



Universidad
Politécnica
de Cartagena

U ESCUELA
P C INTERNACIONAL DE
T DOCTORADO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA.**

TESIS DOCTORAL

**ORIENTACIÓN A LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO SOSTENIBLE, ANÁLISIS
DE CICLO DE VIDA (ACV) Y MODELOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO
(MDMC) PARA EVALUACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

Presentada por Verónica Campos Guzmán para
optar al grado de Doctora
por la Universidad Politécnica de Cartagena

Dirigida por:
Dra. María del Socorro García Cascales

Codirigida por:
Dra. Nieves Espinosa Martínez

Cartagena, 2022



Universidad
Politécnica
de Cartagena

U ESCUELA
P INTERNACIONAL DE
C DOCTORADO

Dedico esta tesis a mi pequeña y amada hija Emma, porque su sola presencia me renueva y me llena de fuerza y amor para seguir adelante. A mi esposo Emmanuel porque eres mi fuerza en momentos difíciles, has caminado conmigo tomándome la mano, sosteniéndome cuando estoy a punto de caer, ¡los amo con todo mi ser! Mi pequeña y poderosa gran familia.

A DIOS, porque de él es la sabiduría que está en la tierra.



AGRADECIMIENTOS

Muchas son las personas a las cuales les debo este trabajo de tesis, por eso quiero aprovechar este espacio para agradecer públicamente a cada uno de ellos.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directoras de tesis, la Dra. Socorro García Cascales y Dra. Nieves Espinosa, quienes me guiaron acertadamente a lo largo de todo el doctorado y en este trabajo de tesis; su paciencia, dedicación y sobre todo su calidad humana y profesional, lograron que me sintiera con la seguridad de terminar este trabajo. Siempre tendrán mis respetos y admiración, para mí representan un referente de la mujer profesional, luchadora y fuerte. De ustedes aprendí que, la ciencia también es cosa de mujeres que son madres.

Quiero agradecer también al Dr. Antonio Urbina, quien nunca necesito un nombramiento de tutor o asesor para guiarme y asesorarme, siempre me sentí cobijada como su tutela “adoptiva”. Muchas gracias, porque sin su apoyo no hubiera culminado esta tesis.

Adela, Carlos y Lucia, muchas gracias por todo ese respaldo y por qué a pesar de sus quehaceres siempre están presente, he encontrado en ustedes un compañerismo lleno de amistad, sin su apoyo hubiera quedado en el camino!

Agradezco a mis mentores en México, el Dr. José Maclovio Sautto y el Dr. Virgilio C. Guzmán. Fueron ellos quienes me empujaron a iniciar este proyecto y quienes día a día me recuerdan que lo que se inicia se debe terminar.

Mi especial agradecimiento a mi gran familia, a mi madre y a mi padre, porque con el solo hecho de tenerlos ya soy bendecida. Mi madre me ha enseñado que todo se puede en esta vida con determinación, y mi padre me ha enseñado a darlo todo con amor. A mis hermanas, mis amigas, confidentes; Sandra, Nely y Viri, las amo infinitamente, muchas gracias, porque cada una hizo lo propio para que yo pudiera avanzar y terminar. Mis hermanos; Vico, Fausto, Elia y Davi, gracias por que cuando he necesitado su ayuda jamás me han dejado sola, siempre conmigo, ¡los amo mucho!

Doña Vicky, muchas gracias por el tiempo que me regalo para terminar este proyecto. No es solo la abuelita de Emma, es una parte importante en nuestras vidas.

Por último, pero no menos importante, mis cuñadas y cuñados quienes a su posibilidad cuidaron de Emma para que yo tuviera ese tiempo que necesitaba para terminar esta tesis.

¡Gracias a todos!



RESUMEN

Estamos frente a una realidad energética que debe ser afrontada; existe una relación directamente proporcional entre la demanda energética y los impactos negativos en el medio ambiente. A día de hoy, la energía que se produce y se consume no es sostenible, pues más del 50% procede de recursos fósiles. A pesar de que las fuentes de energía renovable, tienen asociada la etiqueta de sostenibilidad, la sostenibilidad es un concepto multidimensional que necesita integrar al menos tres dimensiones: ambiental, económica y social. Si un sistema energético va a ser evaluado como un contribuyente clave para el desarrollo sostenible, la metodología utilizada para la evaluación debe abordar muchos parámetros e indicadores. Por lo tanto, es un desafío elegir la mejor metodología para llevar a cabo esta tarea. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ha sido empleado tradicionalmente para evaluar la sostenibilidad los sistemas energéticos renovables. Sin embargo, se ha comprobado que esta metodología solo es capaz de proporcionar una evaluación ambiental y no puede proporcionar una evaluación multidimensional de la sostenibilidad. Se necesitan, por lo tanto, metodologías capaces de evaluar y seleccionar aquellos sistemas energéticos renovables altamente sostenibles, con una evaluación positiva ambiental, equitativos económicamente, y justos en los aspectos sociales. Ante esta problemática, algunos investigadores han apuntado al enriquecimiento del ACV con otras herramientas, con el fin obtener una evaluación multidimensional de los sistemas energéticos y lograr una evaluación sostenible. Los Modelos de Decisión Multicriterio (MDMC), son técnicas capaces de seleccionar la mejor de un conjunto de alternativas disponibles, considerando al mismo tiempo aspectos multidimensionales (económicos, sociales, ambientales, técnicos, políticos, etc.). En este contexto, la presente tesis doctoral presenta un marco metodológico, integrado por el ACV y los MDMC, con el fin de evaluar la sostenibilidad de los sistemas energéticos renovables. Se pretende proponer un marco de trabajo, cuya base metodológica principal son los principios del marco ISO del ACV, reforzados por las técnicas multicriterio del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Método de Referencia Ideal (RIM) ; todo ello mediante el lenguaje de programación Python. Como caso particular, se presenta la aplicación de este marco metodológico a



Universidad
Politécnica
de Cartagena

U ESCUELA
P INTERNACIONAL DE
C
T DOCTORADO

un caso de estudio, cuyo objetivo es la evaluación sostenible de sistemas fotovoltaicos, instalados en Campus Universitarios de la Universidad Autónoma de Guerrero, en México.



ABSTRACT

We are facing an energy reality that must be confronted; energy demand and negative impacts on the environment are directly proportional. The energy that is produced and consumed at present is not sustainable, being more than 50% produced from fossil resources. Despite renewable energy sources are per se associated with the sustainability label, sustainability is a multidimensional concept that needs to integrate at least three dimensions: environmental, economic and social. If an energy system is to be assessed as a key contributor to sustainable development, the methodology used for the assessment must address many parameters and indicators. Therefore, it is a challenge to choose the best methodology to carry out this task. Life Cycle Assessment (LCA) methods have been traditionally used to assess the sustainability of renewable energy systems. However, it has been proven that this methodology is capable of providing an environmental evaluation, but is not capable of providing a multidimensional evaluation of sustainability. Appropriate research methodologies are therefore needed for evaluating and selecting highly sustainable renewable energy systems, with a positive environmental evaluation, economically equitable and fair in social aspects. Faced with this problem, some researchers have taken on the task of enriching LCA with other tools, in order to obtain a multidimensional evaluation of energy systems. Multicriteria Decision Models (MCDM) are techniques capable of selecting the best from a set of available alternatives, while considering multidimensional aspects (economic, social, environmental, technical, political, etc.). In this context, this PhD thesis presents a methodological framework, integrated by LCA and MDMC, with the purpose to assess the sustainability of renewable energy systems. A valid framework, whose main methodological basis are the principles of the ISO LCA framework, reinforced by the multicriteria techniques of the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Ideal Function Reference Method (RIM), managed in the Python programming language. The application of this methodological framework to a case study is presented, which objective is the sustainable evaluation of photovoltaic systems, installed in University Campuses at the Autonomous University of Guerrero, in Mexico.



ÍNDICE

CAPITULO 1. Introducción	16
1.1 Contexto de la investigación	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 General	19
1.2.2 Específicos.....	19
1.3 Alcance de la tesis	20
1.4 Estructura de la tesis	21
CAPITULO 2. Marco teórico.....	23
2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	23
2.1.1 Ciclo de vida de un producto	24
2.1.2. Normas ISO y su descendencia para la evaluación del ACV.....	25
2.1.3 Fases del ACV.....	26
2.2 Metodologías para evaluar impactos ambientales en un ACV.....	30
2.3 Software SimaPro.....	33
2.4 Modelos de Decisión Multicriterio	33
2.4.1 Métodos de decisión multicriterio (MDMC)	34
2.4.2 Toma de decisiones en grupo	35
2.4.3 Clasificación de los métodos de decisión multicriterio	35
2.5 Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	36
2.6 Método de Referencia Ideal (RIM).....	39
2. 7 Sostenibilidad	41
CAPITULO 3. Estado del arte.....	43
3.1 Método de análisis de la literatura	43
3.2 Desempeño de metodologías en la evaluación sostenible de los SER.....	45
3.2.1 ACV.....	45
3.2.2 MDMC.....	50



3.2.3 Paradigma ACV y MDMC.....	51
3.3. Evaluación sostenible de los sistemas fotovoltaicos con el paradigma ACV y MDMC.....	53
CAPITULO 4. Metodología.....	54
4.1 Fase 1: Construcción de una base de conocimiento	55
4.2 Fase 2: Análisis de la base de conocimiento	59
4.2.1 Aspectos metodológicos del paradigma ACV y MDMC en evaluación sostenible	60
4.3 Fase 3: Definición y propuesta de una batería de criterios para evaluación sostenible de los SFV.....	69
4.4 Fase 4: Propuesta del marco metodológico híbrido ACV y (AHP-RIM) para la evaluación sostenible de los SFV.....	72
CAPITULO 5. Caso de estudio	80
5.1 Fase preliminar al ACV: Estructuración y construcción del entorno del problema.....	80
5.1.1 Antecedentes y contextualización del problema	80
5.1.2 Planteamiento del problema	82
5.1.3 Identificación del objetivo del estudio.....	83
5.1.4 Matriz de emplazamientos (SFV).....	83
5.1.5 Matriz de expertos involucrados.....	89
5.2 Metodología del ACV.....	90
5.2.1 Definición de metas y alcances	90
5.2.2 Análisis de inventario	93
5.2.3 Evaluación de impactos	100
5.2.4 Análisis de resultados.....	101
5.3 Comunicación de resultados.....	110
CAPITULO 6. Conclusiones y trabajos futuros.....	112
6.1 Conclusiones	112
6.1.1 De aspecto metodológico	112
6.1.2 De aplicación del paradigma ACV y Python (AHP-RIM).....	113



6.1.3 De aplicación al caso de estudio	114
6.1.4 Hacia una producción y consumo energético sostenible.....	115
6.2 Trabajos futuros	115
REFERENCIAS.....	116
ANEXOS	141
A1. CODIGO DEL PROGRAMA EN PYTHON	141



ABREVIACIONES

Abreviatura	Significado
-------------	-------------

ELECTRE	The ELimination Et Choix Traduisant la REalite
PROMETHEE	Preference Ranking Organization meted of Enrichement Evaluations
MACBETH	The Measuring by a Categorical Based Evaluation Technique
SENER	Secretaria de Energía
CUS	Campus Universitarios Sustentables
MDMC	Modelos de Decision Multicriterio
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
LCC	Life Cycle Cost
SLCA	Análisis del Ciclo de Vida Social
AHP	Analytic Hierarchy Process
EPBT	Energy Pay Back Time
SER	Sistemas de Energias Renovables
ES	Evaluacion Sostenible
CED	Cumulative Energy Demandad
CI	Categorias de Impacto
CU	Campus Universitario
UAGRO	Universidad Autónoma de Guerrero
GEI	Gases de Efecto Invernadero



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de desarrollo de la tesis.....	22
Figura 2.1 Ciclo de vida de un sistema (producto o servicio).....	24
Figura 2. 2. Fases de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida	26
Figura 2.3. Definición del alcance de un ACV (establecer límites del sistema en cuestión)	27
Figura 2.4. Clasificación y agrupación de categorías de impacto, ISO + H. Udo de Haes (elaboración propia).....	31
Figura 2.5. Jerarquización del método AHP.....	37
Figura 3.1. Límites y definición de dominio y conjuntos para construir el estado del arte, cuatro conjuntos están representados por diferentes colores y nombrados con siglas explicadas en el texto principal [52]	43
Figura 3.2. Clasificación de los casos de estudio seleccionados según el contexto de aplicación [52] según REN21 [73].....	46
Figura 3.3. Frecuencia de categorías de impacto, evaluadas por tipo de energía renovable, con la metodología ACV [52].....	48
Figura 3.4. Frecuencia de metodologías de evaluación de impacto, por tipo de energía, donde 100% = 94 casos de estudio [52].....	49
Figura 3.5. Distribución anual de publicaciones para evaluaciones sostenibles, usando ACV y otras herramientas Vs paradigma ACV y MDMC [52].....	51
Figura 3.6. Frecuencia de los MDMC, respecto a otras herramientas, combinadas con el ACV para evaluación sostenible de los SER [52]	53
Figura 4.1. Fases de la metodología de desarrollo.....	55
Figura 4.2. Conjuntos definidos para construir una base de conocimiento.....	56
Figura 4.3. Diagrama de la base de datos, estructura de la base de conocimientos generada.....	56



Figura 4.4. Frecuencia de los MDMC por tipo de energía, en evaluación sostenible de SER (Basado en la revisión de una muestra de 38 casos de estudio)[197]..... 60

Figura 4.5. Análisis y clasificación de enfoques cuando han aplicado el paradigma ACV y MDMC en la literatura [52]..... 63

Figura 4.6. Comparación de los tres criterios para cada dimensión de la sostenibilidad: metodología ACV, MDMC y el paradigma ACV y MDMC [52]..... 65

Figura 4.7 Propuesta de un marco metodológico híbrido para evaluación sostenible de los SFV, teniendo como base metodológica principal el ACV con la integración de los MDMC. 77

Figura 4.9. Diagrama de flujo para obtener el orden de prioridad entre criterios, esto se debe realizar con cada experto..... 78

Figura 4.8. Diagrama relacional de la BD para crear la matriz de emplazamientos..... 78

Figura 4.10. Resumen funcional del algoritmo AHP unión RIM programado en el lenguaje de programación Python 79

Figura 5.1. Geografía de la Uagro..... 82

Figura 5.2. Campus Universitarios seleccionados para instalar los SFV 82

Figura 5.3. Estructura organizacional del proyecto de regionalización en la UAGRO. . 89

Figura 5.4. Estructura general de un SFV, registro de entradas y salidas..... 93

Figura 5.5. Procesos principales de los SFV para crear el inventario..... 94

Figura 5.6. Modelado del problema de decisión según los métodos AHP (para la importancia de los criterios) y RIM para la influencia de los pesos y en ranking de alternativas).....103

Figura 5.7. Ejemplo de las entradas del método RIM en código en Python105

Figura 5.8. Ejemplo de salida del algoritmo en Python, estos datos son referente al vector de peso del experto 1.....106

Figura 5.9. Valoración del experto 1, pesos y ranking.....107



Figura 5.10. Valoración del experto 2, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.	107
Figura 5.11. Valoración del experto 3, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.	108
Figura 5.12. Valoración del experto 4, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.	108
Figura 5.13. Valoración del experto 5, pesos de los criterios y ranking de las alternativas	109
Figura 5.14. Manera agregada para presentar los resultados de los cinco expertos. .	110



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Escala de Saaty	38
Tabla 2. 2. Índices para el ratio de consistencias	38
Tabla 3.1. Ficha de definición y caracterización de conjuntos de búsqueda en la literatura.....	44
Tabla 4.1. Clasificación del contexto energético de aplicación según la REN21[39].....	59
Tabla 4.2. Batería de criterios propuesta para evaluación sostenible de SF	69
Tabla 4.3. Clasificación de zonas para instalas los SFV, en las universidades.....	72
Tabla 5.1. Tabla <i>Campus Universitario</i> registrados, basada en la estructura del diagrama correspondiente a la Figura 4.8.....	85
*Tabla 5.2. Código de tipo de áreas para tipificar el consumo energético en los campus universitarios.	87
Tabla 5.3. Tabla <i>Sistemas Fotovoltaicos</i> dimensionados para los tres CU involucrados de la tabla 5.1.....	87
Tabla 5.4 Matriz de emplazamientos (unión de las tablas 5.1 y 5.3 por medio de sus ID)	88
Tabla 5.5. Matriz de expertos que relaciona perfiles y procedencia.....	89
Tabla 5.6. Criterios para evaluar los SFV.....	90
Tabla 5.7. Orden de prioridad entre criterios que estableció cada experto, según la encuesta aplicad de la Figura 4.9.....	91
Tabla 5.8. Escala de valoración entre criterios, según SAATY.....	92
Tabla 5.9. Pesos de los criterios, según cada experto, en verde el criterio con el peso más importante según cada experto, en azul el segundo más importante y en rojo el tercero más importante.	92
Tabla 5.10A. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-CCH01	95
Tabla 5.10B. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-CCH02.....	96



Tabla 5.10C. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-MON03	97
Tabla 5.10D. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-MON04.....	98
Tabla 5.10E. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-LLL05.....	99
Tabla 5.10F. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-LLL06.....	100
Tabla 5.11. Matriz de valoración de todos los criterios con respecto a cada SFV.....	101
Tabla 5.12. Etiquetas lingüísticas para valores cualitativos, según SAATY	104
Tabla 5.13. Intervalo de dominio.....	105
Tabla 5.14. Intervalo de referencia.....	105

CAPITULO 1. Introducción

1.1 Contexto de la investigación

Todas las sociedades necesitan servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas (alumbrado, cocina, ambientación, movilidad, comunicación, etc.). Sin embargo, la forma en que se produce y se consume la energía hoy en día, no es sostenible, ya que más del 50% procede de recursos fósiles.

La quema de combustibles fósiles ha aumentado drásticamente, lo cual ha dado lugar al rápido aumento de las emisiones de CO₂. Tan solo al término del año 2021, llegaron a alcanzar las 36,300 millones de toneladas de CO₂, un 6% más que el año pasado [1]. No obstante, es un hecho que la demanda eléctrica seguirá creciendo de manera exponencial. Se espera que para 2050 la demanda global eléctrica llegue a cerca de 38,700 TWh [2], y por tanto, los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera, podrán alcanzar los 550 ppm de CO₂ para el año 2050 [3]. Esto significa, que aumentaría el doble de su nivel preindustrial, lo que llevaría a un aumento de 2 °C de la temperatura media global. Como consecuencia se tendría un grave impacto en la biodiversidad y seguridad humana (suministro de agua, producción de alimentos, etc.), así como un sobrecoste en la economía global. La producción y el uso de energía, provocan la generación de dos terceras partes de las emisiones de gases de efecto invernadero [3].

El rol de las energías renovables es esencial para la mitigación de cambio climático, pues debilita el vínculo negativo entre producción de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Sin embargo, aunque es ampliamente aceptado que los Sistemas Energéticos Renovables (SER) tienen un mayor grado de sostenibilidad que los sistemas energéticos convencionales, es necesaria una evaluación cualitativa y cuantitativa de su sostenibilidad, para identificar y seleccionar aquellas tecnologías o sistemas altamente sostenibles [5].

Entonces, el uso de energía renovable no garantiza estar exento de contaminar el medio ambiente. El desafío de una producción y consumo energético sostenible es; saber qué opciones energéticas procedentes de las renovables son altamente sostenibles, es decir en equilibrio económico, ambiental y social [5]. El reto está en

seleccionar aquellas tecnologías que cuenten con un alto nivel de sostenibilidad, que se ajusten al entorno a la lucha contra el cambio climático (con ninguna o poca influencia ambiental negativa), con un efecto socialmente positivo y con una economía eficiente y técnicamente viable [6],[7],[8] y [9] .

Tradicionalmente, para evaluar la sostenibilidad de sistemas energéticos, se ha usado la técnica del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [10] [11]. 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 [10]. No obstante, pese a su limitante metodológica en la evaluación de la sostenibilidad, se reconoce que esta metodología es clave en la toma de decisiones y específicamente en la evaluación y comparación de sistemas [12], [9]. La metodología del ACV, es la preferida para la asignación correcta de emisiones en el ámbito de las energías renovables [13]. Sin embargo, desde su creación solo se ha aplicado en la evaluación de aspectos ambientales, comparando tecnologías, procesos o sistemas. Esta técnica solo proporciona información sobre aspectos ambientales, tales como los kg CO₂ emitidos y el tiempo de retorno energético (EPBT) [14] [15], [16] y [17]. A pesar, de ser la técnica más utilizada para evaluación ambiental de sistemas energéticos renovables [13], todavía no se ha creado una ampliación formal del marco ISO, la cual permita una evaluación multidimensional de la sostenibilidad de los sistemas [18], [19], [20] y [21].

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 Azapagic y Dufour [22] y [23] 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, ha llevado a los investigadores a combinar el ACV con Modelos de Decisión Multicriterio (MDMC) [24]. Los MDMC, son herramientas de soporte a la decisión, que proporcionan soluciones eficaces para hacer frente a problemas complejos, donde los datos no están armonizados (criterios) y los intereses están interpuestos [25].

Aunque es reducido el grupo de casos de estudio donde han combinado el ACV con los MDMC [24], [26]–[37], la mayoría de estos autores muestra dos conclusiones comunes. La primera es que el ACV por sí solo es incapaz de lograr una evaluación sostenible, y la segunda es que integrando los MDMC en el ACV, es factible lograr una gestión integrada y sostenible en las energías renovables. Los métodos de decisión como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) [38], la Teoría del Valor Multiatributo (TVMA) y el método ELECTRE-TRI, han sido las técnicas más usadas para combinarlas con el ACV en las investigaciones, en diferentes contextos. 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, y, por último, seleccionan la mejor alternativa en función de los indicadores seleccionados.

La producción eléctrica renovable no implica ser altamente sostenible. Se necesitan metodologías robustas que permitan lograr una evaluación integrada, donde se incluyan aspectos ambientales, económicos y sociales, que oriente hacia una producción y consumo altamente sostenible. Aunque han sido notorios los avances en esta línea de investigación, en lo que respecta al marco exclusivo de las energías renovables, aun no hay un análisis de enfoques y potencialidades sobre la combinación de ACV con herramientas multicriterio. Ello permitiría dar directrices, sugerencias o enfoques para abordar evaluaciones sostenibles, en un contexto energético. Por ejemplo, la evaluación sobre la producción y suministro eléctrico, producción y suministro de calor y frío, producción y suministro de biocombustibles para transportes o elaboración de políticas energéticas [39]. Otra perspectiva sería, desde la clasificación de energías, por ejemplo, la sugerencia de enfoques del ACV y MDMC para evaluación sostenible en la energía solar fotovoltaica (SFV). Dentro de las energías renovables, la energía fotovoltaica es una de las más aprovechadas, y una de las protagonistas en el incremento anual en términos de capacidad instalada. Actualmente

ocupa el tercer lugar en participación de producción de electricidad a nivel mundial [39], y en el campo de la electrificación rural es una de las más empleadas [40] y [41].

Existe, por tanto, un gran espacio para contribuciones científicas novedosas, en la aplicación de las metodologías integradas del ACV con el conjunto de los MDMC, en el contexto de producción y consumo altamente sostenible, a partir de sistemas fotovoltaico. El interés sobre los resultados de la aplicación integrada de metodologías en este campo, no solo atrae a científicos y académicos, sino más bien sirve como soporte en la toma de decisiones, por órganos reguladores y directamente en políticas públicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

En esta tesis, el objetivo general es mostrar que combinar la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con los Modelos de decisión multicriterio (MDMC), conduce hacia una evaluación útil, integral sostenible de los Sistemas Energéticos Renovables (SER). Con este objetivo, se presenta un marco metodológico integrado por el ACV y los MDMC, modelado y programado en el lenguaje de programación Python; para obtener una evaluación multidimensional sostenible (social, económico, ambiental, técnico y político) de los sistemas fotovoltaicos (SFV).

1.2.2 Específicos

Para lograr el objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Primero, poner de manifiesto que la metodología del ACV, por sí sola no puede lograr una evaluación integral sostenible. Puntualizar las debilidades metodológicas del ACV en el contexto de evaluación sostenible, es un objetivo muy particular de esta tesis.
2. El segundo objetivo específico es; mostrar que los MDMC son las herramientas más adecuadas para enriquecer la ya fuerte estructura metodológica del ACV.

3. Luego, aportar puntos de referencia y directrices metodológicas, para la implementación del paradigma integrado por el ACV y los MDMC en evaluación sostenible de los SER, tales como: técnicas multicriterio más utilizadas integradas en el ACV, enfoques metodológicos (integral o complementario), contexto energético de aplicación, según la REN 21 [39] e indicadores de sostenibilidad mayormente empleados.
4. Basándose en los enfoques, directrices y tendencias metodológicas proporcionadas por el objetivo anterior, el cuarto objetivo es el análisis y evaluación de la sostenibilidad multidimensional de sistemas fotovoltaicos. Se tomará como caso de estudio el
5. Proyecto de regionalización de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro) en México, se construirá el primer caso de estudio sobre los Campus Regionales (CR) que componen este proyecto y se particularizará principalmente para tres de ellos: el Campus Universitario de la Costa Chica (CU-CCH), el Campus Universitario Llano Largo (CU-LLL) y el Campus Universitario Montaña (CU-MON). En estos centros, se aplica la combinación del ACV y AHP-RIM--Python, para establecer un ranking de sostenibilidad de seis sistemas FV.

1.3 Alcance de la tesis

La presente tesis, se centra específicamente en mostrar que combinar el ACV con los MDMC puede ser útil para lograr resultados, que conduzcan hacia una producción y consumo sostenible en el contexto de energías renovables. No pretende en ningún caso modificar la arquitectura metodológica del ACV, sino, más bien enriquecer su estructura, explorando otras técnicas o metodologías para integrarlas cuidadosamente; respetando siempre cada elemento marcado por ISO.

Tampoco se pretende imponer el paradigma metodológico que aquí se emplea; se aporta como sugerencia, así como los patrones y directrices metodológicas que ayuden a una combinación útil del ACV y los MDMC, en evaluaciones sostenibles de los SER. Por otro lado, esta investigación plantea una batería de indicadores que pueden estar

alineados a la evaluación sostenible de los SFV. Sin embargo, siempre puede tener otro sesgo y adaptarse al contexto que se esté tratando.

Por tanto, el alcance de este trabajo de investigación radica en la propuesta novedosa del uso de un ACV fuera de lo tradicional, y enriquecido con nuevas técnicas, mostrar la potencialidad de un marco metodológico ACV con otras técnicas integradas, para abrir las puertas a futuras investigaciones.

1.4 Estructura de la tesis

Esta tesis está estructurada en seis capítulos (Figura 1.1). Los primeros tres capítulos están dedicados a la construcción y el análisis del conocimiento. En el capítulo 1, se plantean los objetivos generales y específicos, así como el alcance de la tesis. En el capítulo 2, se recogen todos los conceptos teóricos, metodologías, métodos y técnicas empleadas en esta tesis. Finalmente, en el capítulo 3 se construye el estado del arte, basado en una escala temporal, con toda la formalidad de una revisión exhaustiva de la literatura, pues el resultado se presenta como una base de conocimiento, que proporciona directrices y puntos de referencia metodológicos. En particular, en este capítulo se abordan los tres primeros objetivos específicos: se muestra que el ACV en su forma tradicional, no puede lograr una evaluación integrar sostenible. Por otro lado, los MDMC se presentan como los más frecuentes para enriquecer el ACV en cuestiones de evaluación sostenible, y, por último, teniendo como base, todo el registro y un análisis estadístico básico, se aportan aspectos metodológicos para aplicar el ACV y MDMC en un mismo marco de trabajo.

El capítulo 4, presenta un enfoque metodológico para evaluar SER, específicamente los SFV, cuya base es la combinación del ACV y MDMC, programados en un lenguaje de programación (Python).

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 5, se desarrolla un caso de estudio, cuyo objetivo es la aplicación de la metodología del capítulo anterior. Esto se desarrolla en el contexto de las universidades en México, para la construcción de Campus Universitarios Sustentables (CUS). Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros se presentan en el capítulo 6.

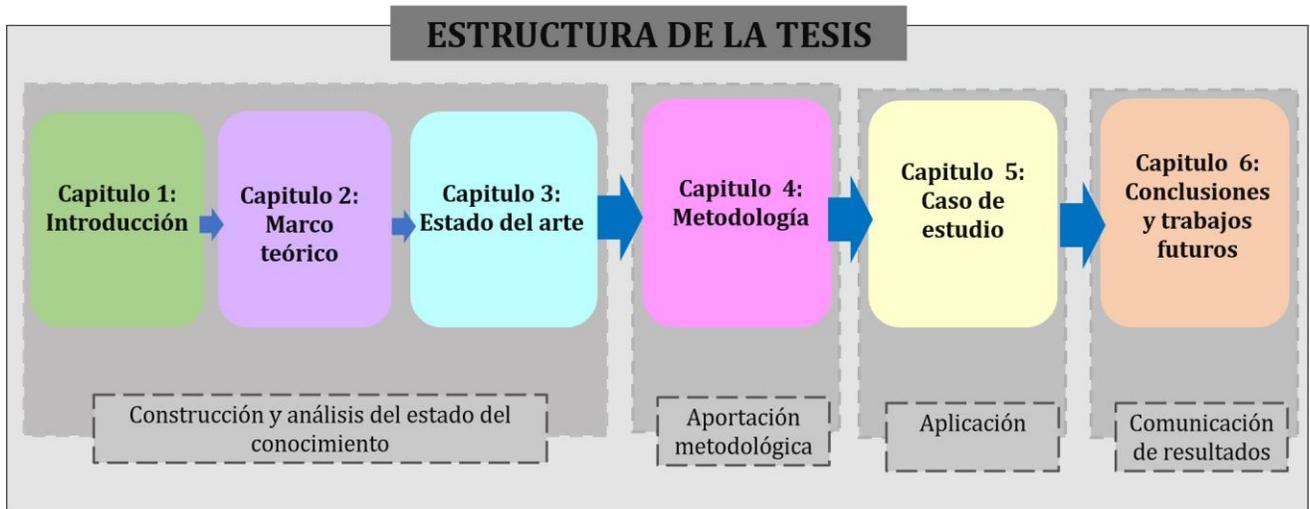


Figura 1.1. Estructura de desarrollo de la tesis

CAPITULO 2. Marco teórico

En este capítulo se recogen todos los conceptos teóricos sobre las metodologías y conceptos que están involucrados en el desarrollo de esta tesis; tales como: la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la norma ISO 14040 y sus específicos para el ACV; los Modelos de Decisión Multi-Criterio (MDMC), específicamente el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Método de Referencia Ideal (RIM), así como el amplio concepto de sostenibilidad. Finalmente se presenta también Python como el lenguaje de programación que se ha usado como apoyo de las metodologías.

2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La definición más común para el análisis de ciclo de vida (ACV) es:

“Una técnica para determinar aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando el inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a estas entradas y salidas; e interpretando los resultados en la fase de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”, [10]

En general, el ACV es una metodología estandarizada internacionalmente por una serie de normas ISO que comienzan en la 14040 [42]. El objetivo de esta metodología es cuantificar todas las emisiones relevantes, los recursos consumidos, los residuos generados durante todo el ciclo de vida, y determinar los impactos ambientales relacionados con la salud y los problemas que están asociados con el sistema que se está estudiando.

El ACV es por tanto una contabilidad ambiental [43], en la que se cuantifican los efectos ambientales asociados al sistema que puede ser: un producto, un servicio, un proceso o una actividad [10].

2.1.1 Ciclo de vida de un producto

Un ACV completo de un producto o servicio incluye además de los efectos ambientales mencionados, también los efectos atribuibles al fin de vida del producto.

La vida de un producto empieza en el diseño y el desarrollo del producto, continúa durante la fase de vida útil, y finaliza al final de vida de las actividades (reutilización, reciclaje, etc.) a través de las siguientes etapas, como se muestra en la Figura 2.1:



Figura 2.1 Ciclo de vida de un sistema (producto o servicio).

Adquisición de materias primas: Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas del medio ambiente y las aportaciones de energía necesarias, incluyendo el transporte previo a la producción.

Proceso y fabricación: Son todas las actividades necesarias para convertir las materias primas y energía en el producto deseado. En la práctica esta etapa se compone de una serie de sub-etapas con productos intermedios que se forman a lo largo de la cadena del proceso.

Distribución y transporte: Contempla el traslado del producto final al cliente.

Fin de vida: Comienza una vez que el producto ha completado su función inicial y puede derivar en los siguientes procesos:

Reciclaje: consecuentemente se recicla a través del mismo sistema de producto (ciclo cerrado de reciclaje) o entra en un nuevo sistema de producto (ciclo de reciclaje abierto).

Gestión de residuos: operaciones en las que el producto se devuelve al medio ambiente como residuo. En resumen, el ciclo de vida de un producto representa su “historia”; desde su nacimiento (materias primas) hasta su fin de vida (residuos) (Figura 2.1) [44]

2.1.2. Normas ISO y su descendencia para la evaluación del ACV

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y para el diseño de procesos menos contaminantes. Ha sido incorporado en el desarrollo de sistemas de eco etiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “*productos ambientales favorables*” [18]. Las normas ISO de la serie 14040 que constituyen los estándares asociados a la conducción de un ACV, se aceptaron internacionalmente; lo que condujo a la aceptación mundial del ACV.

ISO 14040: Marco de referencia para el ACV, principios, necesidades básicas No describe la técnica en detalle, presenta los requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios [42].

ISO 14041: Especifica las necesidades y procedimientos para elaborar la definición, objetivos y alcance del sistema, para realizar el análisis de inventario.

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.

2.1.3 Fases del ACV

De acuerdo con la serie normativa ISO 14040, un ACV está compuesto por cuatro fases: metas y alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos e interpretación de los resultados (Figura 2). Un apunte importante es que la metodología de ACV no sirve para comparar productos entre sí, más bien se comparan las funciones del sistema analizado, por ejemplo: "Iluminación anual de un área de trabajo de 10 m² con 30 bombillas". Es decir, lo que se compara en la práctica es una unidad comparativa denominada

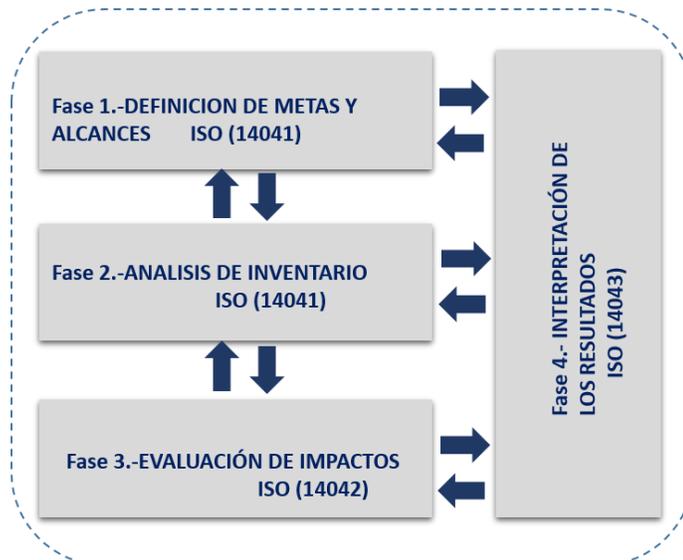


Figura 2. 2. Fases de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida

Tal y como se muestra en la Figura 2.2, las fases que integran un ACV no son simplemente secuenciales, sino que el ACV es una metodología iterativa, que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones. A continuación, se describen cada una de las fases, especificando las actividades que se deben considerar en cada una de ellas [42].

Fase 1 Definición de metas y alcance:

Lo primero es hacer una descripción y definición del producto, proceso o servicio, para el que se va realizar el análisis. Así mismo se define el objetivo principal del ACV; por qué se va hacer y para quien va dirigido.

Debido a su naturaleza global, un ACV debe definir el alcance del estudio 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”, esto se puede ver gráficamente en la Figura 2.3.

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.

En esta primera fase también se define con que metodología serán evaluados los impactos. Ésta se define de acuerdo al objetivo del estudio del ACV.

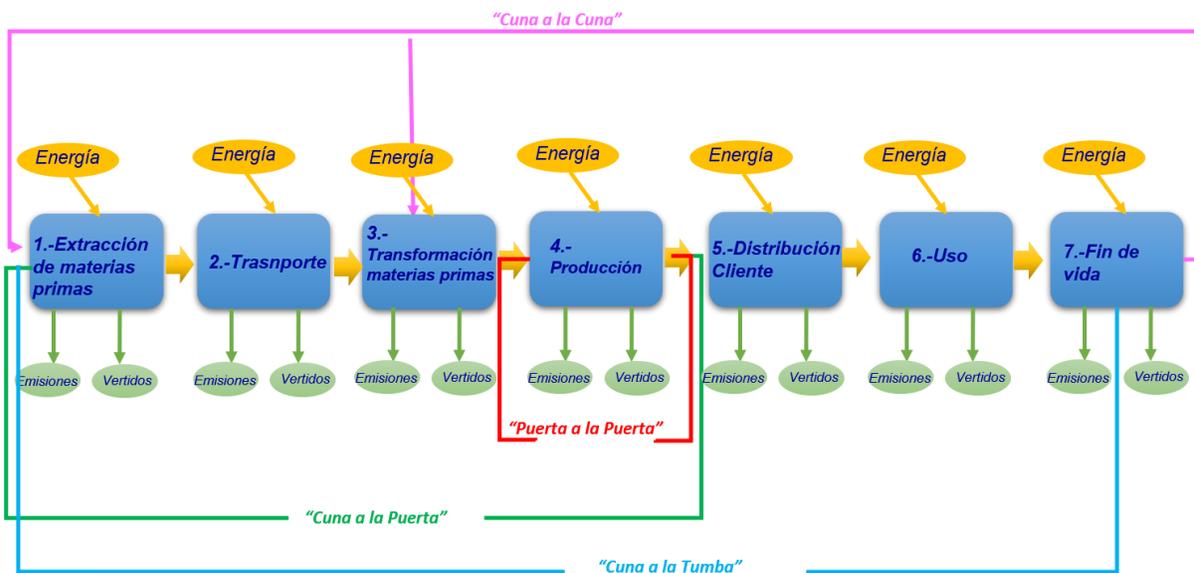


Figura 2.3. Definición del alcance de un ACV (establecer límites del sistema en cuestión)

Fase 2 Análisis de inventario:

En esta etapa primero se hace la identificación y cuantificación de entradas y salidas del sistema analizado.

Entradas: Uso de recursos, materias primas, partes, productos, transporte, electricidad, energía, etc.

Salidas: Emisiones al aire, al agua, al suelo, residuos y subproductos para cada proceso o fase del sistema analizado.

Una vez registradas las entradas y salidas de acuerdo con la norma ISO [43] se hace la selección y clasificación de las Categorías de Impactos (CI) que son de interés para el estudio.

Los resultados que se deben obtener en esta etapa son:

El sistema del producto: que es el conjunto de unidades de procesos conectadas entre sí por los flujos. Un sistema puede desempeñar una o varias funciones.

La unidad de proceso: que es la parte más pequeña de un sistema de producto, para el cual se recopilan los datos.

Categorías de los datos: son los distintos tipos de entradas y salidas de una unidad de proceso o de un sistema producto.

Integrando todos los puntos anteriores se obtiene el inventario del sistema. La correcta documentación en esta etapa asegura la calidad de los resultados y permite su reutilización posterior.

Fase 3 Evaluación de impactos:

Como se muestra en la Figura 2.2, la estructura de esta fase viene determinada por la norma ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales.

Los elementos obligatorios por ISO 14042 son:

Selección de las CI importantes, los indicadores que medirán esas categorías, y los modelos de caracterización a emplear. Según la norma ISO, la selección de las CI debe

hacerse de acuerdo al objetivo que se definió en la fase 1 de la metodología del ACV. Por ejemplo, si el objetivo del ACV es solo medir la huella de carbono, la categoría de impacto principal debe ser las emisiones de gases de efecto invernadero (Global Warming Potential). Existen muchas metodologías para hacer el cálculo de las CI de un sistema [45]. 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.

En varios estudios de ACV, existe el caso que puede usarse más de una metodología para lograr los objetivos ya que cada metodología considera y evalúa un conjunto de CI [46]. Clasificación, aquí se asignan los ítems del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos de sistemas o productos.

Caracterización, consiste en el cálculo de los indicadores de cada CI, esto es; multiplicando los valores obtenidos en el inventario (fase 2) por los factores de caracterización. Estos cálculos indican la contribución de cada indicador a la categoría de los efectos que se producen.

Los factores de caracterización, son factores de equivalencia basados en conclusiones científicas, que evalúan la importancia de los efectos de una determinada sustancia en un indicador de categoría con respecto a la sustancia de referencia. Estos factores de caracterización son proporcionados por cada metodología (descritas a continuación): Siguiendo el ejemplo de la categoría de impacto de potencial de cambio climático (Global Warming Potential), esta categoría está integrada por todas las emisiones de gases de efecto invernadero como son: Dióxido de azufre (SO_2) Óxido de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de Carbono (CO_2), Hexafluoruro de azufre (SF_6), Metano (CH_4), etc. Sin embargo, generalmente se tiene como indicador de categoría los kilogramos de emisiones de CO_2 equivalentes. El factor de caracterización en este caso transforma el potencial de calentamiento global de cada gas de efecto invernadero al potencial equivalente del CO_2 , que se considera la unidad. Así que el CH_4 tenga un factor de 25, significa que 1kg de CH_4 tiene el mismo impacto que 25 kg de CO_2 .

Los tres puntos anteriores dan lugar a la evaluación de impactos en esta etapa y en general para el ACV del sistema analizado.

Adicionalmente, se pueden agregar otros elementos a esta etapa como son: normalización, agrupación, ponderación y análisis de calidad de los datos (en ACV comparativo este procedimiento es obligatorio). Sin embargo, se recomienda que el desarrollo de cada uno de estos elementos esté bien justificado y documentado.

Fase 4 Interpretación de los resultados:

Los elementos que integran esta fase según la norma ISO 14043 [42]

La interpretación debe ser coherente con el objetivo y acorde con el alcance previsto en la etapa 1.

Se evalúa y se selecciona el producto, proceso o servicio preferido.

Por último, se deben exponer las conclusiones, que pueden adquirir forma de recomendaciones para la toma de decisiones, pues permiten determinar en qué fase del ACV del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto, que puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En el caso de comparación de distintos productos se podrá determinar cuál presenta un mejor comportamiento ambiental.

Fase 5 Análisis de sensibilidad:

Aunque la norma no lo cita como obligatorio, se recomienda agregar una quinta etapa, cuyo objetivo es 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 Metodologías para evaluar impactos ambientales en un ACV

Las metodologías de evaluación de impacto son los cálculos sistemáticos que se utilizan para obtener a partir de un flujo de inventario del ciclo de vida, como el dióxido de carbono o el dióxido de azufre, el potencial de cambio climático que provoca.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

Se han desarrollado varias metodologías de evaluación de impacto para el marco del ACV [175–178, 179], cada una proporciona una serie de categorías de impacto, diferenciando entre impactos de punto medio y de punto final. La norma ISO 14042 [8, 12] organiza estas categorías de impacto en tres grupos finales (Figura 2.4), las cuales se dirigen a diferentes áreas de protección de impacto final: “SALUD HUMANA”, “ENTORNO NATURAL” y “RECURSOS NATURALES”. Sin embargo, el autor *Helias Udo de Haes*, junto con otro grupo de investigadores agregó una cuarta área de protección descrita como el medio ambiente modificado por el hombre. Esta área cubre los aspectos de protección de cultivos, bosques, edificios, fenómenos como la lluvia ácida o los impactos del ozono [48]. Finalmente, según dicho autor, el área de protección “ENTORNO NATURAL”, puede desdoblarse en dos, una que ya existe y la cuarta que se nombra como área de protección del “ENTORNO SOCIOCULTURAL”, descrita en la Figura 2.4.

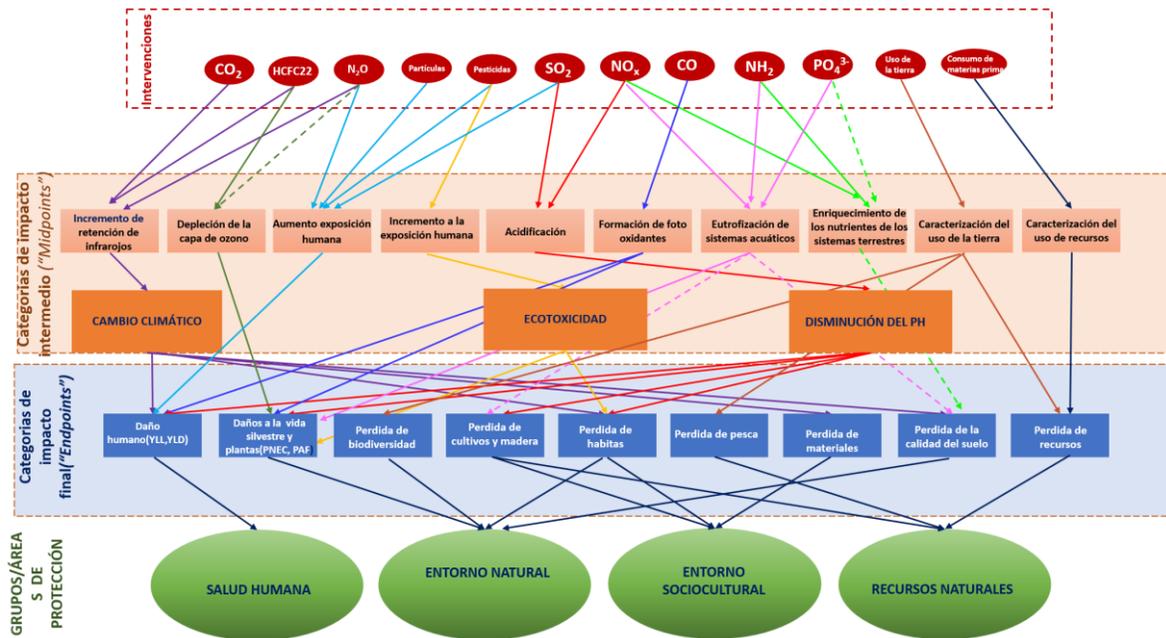


Figura 2.4. Clasificación y agrupación de categorías de impacto, ISO + H. Udo de Haes (elaboración propia)

Una amplia gama de metodologías de evaluación de impacto está disponible. Sin embargo, aquí solo citamos un pequeño conjunto de ellas: ILCD, CML 2002, Ecoindicador99 y ReCiPe, pues son las que aparecen con mayor frecuencia en el uso del contexto energético [52]. Existen varias metodologías de evaluación de impacto que se

suelen utilizar en los pasos de una evaluación de impacto del ciclo de vida (cada una incluye la clasificación y la caracterización y, opcionalmente, la normalización o la ponderación). A continuación, se describen algunas de las metodologías de evaluación de impacto más extendidas.

La Comisión Europea ha desarrollado una guía específica que permita conocer los impactos ambientales derivados de las actividades de las empresas. Se trata de una metodología apta para todos los sectores, ya que tiene en cuenta no sólo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sino también la mayoría de los aspectos relacionados con el medio ambiente relevantes para una organización[44]. Se conoce por sus siglas ILCD derivadas de *International Reference Life Cycle Data System*, y comprende las siguientes categorías de impacto:

Potencial de cambio climático (kg CO₂)

Potencial de agotamiento de ozono (kg CFC - 11 eq)

Efectos cancerígenos y toxicidad humana (CTUh)

Efectos no cancerígenos y toxicidad humana (CTUh)

Materias primas (kg PM 2.5 eq)

Radiación ionización humana HH (kBq U235 eq)

Radiación ionización parcial (CTUe)

Formación de ozono fotoquímico (kg NMVOC eq)

Acidificación (molc H + eq)

Eutrofización terrestre (mol N eq)

Eutrofización de aguas dulces (kg P eq)

Eutrofización marina (kg N eq)

Eco toxicidad de aguas dulces (CTUe)

Cambios en el uso de la tierra (kg C déficit)

Agotamiento de los recursos del agua y uso de recursos fósiles (kg Sb eq)

Otra metodología multi-indicador es la CML, desarrollada en el Centro de Estudios Ambientales la Universidad de Leiden en los Países Bajos. Consiste en la aplicación del valor máximo de las reservas y las tasas de extracción de recursos, de forma que se refleja la gravedad del agotamiento de los recursos [53].

Existen así mismo metodologías que sólo evalúan un indicador, por ejemplo, el Eco-indicador 99 es otra de las metodologías de EICV comúnmente aceptadas. Fue desarrollada por un grupo consultor profesional de los Países Bajos. No existe en principio equivalencia entre categorías de impacto, sin embargo “Uso de recursos” en Ecoindicador 99 es a grandes rasgos equivalente a la de “Agotamiento de recursos abióticos” de CML. El Eco-indicador 99 tiene en cuenta las tendencias a largo plazo de la reducción de la calidad de los recursos.

Por último, citar el modelo base de 100 años de la metodología IPPC, cuyo indicador es la fuerza radiactiva de potencial de cambio climático, o GWP100. [46]

2.3 Software SimaPro

Para facilitar la tarea del ACV se suelen usar frecuentemente programas de software que facilitan el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente. SimaPro es un programa de software desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para evaluar los impactos ambientales de productos, procesos y servicios [54], mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM).

2.4 Modelos de Decisión Multicriterio

La toma de decisiones es un proceso de elección habitual que sucede en diferentes sectores tales como: industria, comercio, ciencia, sociedad etc. Es muy común enfrentarse a situaciones donde se tiene un conjunto de alternativas y se debe elegir la mejor de ellas; lo que constituye un problema de toma de decisiones [25], [55]. Para resolverlo se utilizan determinados juicios en la verificación del cumplimiento de

requisitos de alternativas. Modelar un problema de toma de decisiones mediante un método de decisión multicriterio consiste principalmente en: 1. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativas; 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”)[56] . De forma general, el proceso de toma de decisiones se realiza bajo el paradigma del decisor o teniendo como referente decisiones tomadas que condujeron a buenos resultados.

2.4.1 Métodos de decisión multicriterio (MDMC)

Los métodos de decisión multicriterio son algoritmos bien definidos que ayudan a encontrar la mejor de las soluciones disponibles basados en el objetivo principal del problema tratado.

El análisis de decisión multicriterio es una herramienta de gran utilidad que ayuda al decisor durante el proceso de toma de decisión, pues los métodos que lo conforman permiten abordar el problema de forma ordenada, facilitando el consenso de la decisión final y el tratamiento de la gran cantidad de información, que por lo general se encuentra en diferentes de medida y significados.

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.

El interés de esta tesis, es la aplicación de herramientas metodológicas en el ámbito de las energías renovables, por tanto nos centramos en citar aquí aquellos métodos con mayor aplicación en el contexto energético [25], [57], [58]. 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 [25].

Todas estas teorías están basadas en la suposición de que los decisores procuran hacer elecciones racionales.

2.4.2 Toma de decisiones en grupo

Un proceso de toma de decisiones en grupo, es un medio donde participan múltiples individuos, entre ellos actúan de forma colectiva. Si la toma de decisiones se realiza con la participación de varios decisores, se denomina toma de decisión en grupo, para lograr una toma de decisión conjunta, analizan las situaciones, prioridades y objetivos, finalmente llevan a cabo la selección de la alternativa preferida o más aceptada por dicho grupo [59]. Existen métodos aplicados, cuando los acuerdos entre expertos difieren, uno de ellos es la agregación de la información para obtener un solo resultado.

2.4.3 Clasificación de los métodos de decisión multicriterio

Los diversos métodos de decisión multicriterio existentes, se caracterizan según la concepción que se asume en la solución del problema de decisión, por esto se pueden clasificar en dos grupos básicos.

Escuela americana: Lo que caracteriza a estos MDMC es que en ellos el decisor maximiza una función de utilidad que agrega los distintos criterios que intervienen en el problema. Entre los métodos que se encuentran en esta categoría podemos destacar el de suma ponderada, SMART y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) este último, por su importancia se describe más adelante en esta misma sección.

Escuela europea: Este conjunto de métodos, busca ayudar al decisor a resolver el problema teniendo en cuenta las dificultades que se derivan por la construcción de la función valor. A continuación, solo se citan algunos de los métodos más destacados de este grupo: ELECTRE (The ELimination Et Choix Traduisant la REalite), PROMETHEE (Preference Ranking Organization meted of Enrichement Evaluations) y el método MACBETH (The Measuring by a Categorical Based Evaluation Technique).

2.5 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Desarrollado por Thomas Saaty en 1980 [60], el método AHP se basa en la idea de que la complejidad inherente a un problema de toma de decisión con criterios múltiples, se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados [61], [62].

La lógica de solución de este método es jerarquizar el problema, clasificándolo en las etapas de modelado, valoración y priorización [60]. El principal objetivo de AHP es permitir que el decisor determine la influencia de cada variable en un proceso de jerarquía. Los tres objetivos principales de AHP son los siguientes [63]:

Estructurar decisiones complejas en una jerarquía de objetivos, criterios y alternativas.

Realizar una comparación por pares de todos los elementos en cada nivel de la jerarquía con respecto a cada criterio en el nivel anterior de la jerarquía

Sintetizar verticalmente juicios en diferentes niveles de la jerarquía.

El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria, su modelado debe lucir como se muestra en la Figura 2.5.

El problema de decisión se modela mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema (Figura 2.5), y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar.

En cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados.

La información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente.

Una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una agregación de tipo aditivo.

El método consta de las siguientes etapas:

1ª etapa: Modelado (Figura 2.5)

2ª etapa: Valorización

3ª etapa: Priorización y síntesis

Prioridades locales

Prioridades globales

Prioridad total final o total

4ª etapa: Análisis de sensibilidad

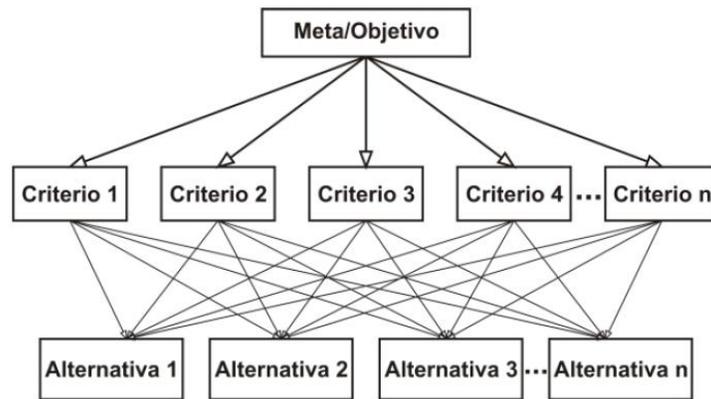


Figura 2.5. Jerarquización del método AHP

Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía.

Como se aprecia en la Figura 2.5, este método estructura el problema en objetivo principal, criterios y alternativas

Paso 2: Establecimiento de las prioridades entre los criterios.

Se usa una escala numérica, que tiene las siguientes equivalencias (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Escala de Saaty

Escala Numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente, preferida	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro
7	Preferencia muy fuerte o demostrada	Un elemento es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extremadamente preferida	Preferencia clara y absoluta de un criterio sobre el otro.
2,4,6,8		Intermedia entre los valores anteriores

Índice de consistencia: se calcula en índice de consistencia aleatorio, lo que da lugar a un ratio de inconsistencia, ver Tabla 2.2.

RI: Índice de consistencia aleatorio $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$

Tabla 2.2. Índices para el ratio de consistencias

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.25	1.34	1.40
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.45	1.48	1.51	1.54	1.56	1.57	1.58	1.60

Ratio de inconsistencia: $RC = \frac{IC}{RI} < 10\%$

Paso 3: Establecimiento de las prioridades locales y globales entre los subcriterios.

Una vez calculada la importancia relativa de los criterios respecto a la meta del problema (paso 2), y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, se calcula la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema. Para ello se calculará el producto de los diferentes pesos de cada uno de los criterios y subcriterios que se recorran en la jerarquía, desde el subcriterio del que se quiere calcular su peso hasta la cúspide de la jerarquía, procedimiento que

se denomina composición jerárquica.

Paso 4: Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas.

Una vez obtenida la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se plantea la matriz de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo que explicado en el paso 2, pero esta vez se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma también.

Paso 5: Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa.

Cuando se dispone de toda la información de la matriz de valoración, para finalizar el método AHP, solo resta aplicar cualquiera de los métodos de la bibliografía para calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa, que representan la importancia de las alternativas con respecto a la meta.

Paso 6: Análisis de sensibilidad.

Como último paso de la metodología AHP puede realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar. En todos estos análisis el procedimiento es el mismo: se realizan variaciones en el valor de un peso (no mayores al 10%) y se observa numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas

2.6 Método de Referencia Ideal (RIM)

RIM es un método relativamente emergente que permite la agregación de información para un ideal de referencia [64]. Tal procedimiento presenta un carácter compensatorio en el siguiente sentido: tiene en cuenta todos los criterios simultáneamente y permite ponderar un valor de criterio cercano al valor ideal correspondiente en detrimento del valor de otro criterio distante de su valor ideal. Este método ha sido utilizado para la ayuda en la selección de equipamiento militar [63] y para clasificar las fechas de

impactos de posibles asteroides cercanos a la tierra [65]. Sin embargo, aún no se ha aplicado en el contexto de toma de decisiones sobre energías renovables. Esta tesis presenta por primera vez su aplicación en este ámbito, y representa la punta de lanza en este contexto. Los pasos del enfoque RIM se describen a continuación.

Paso 1: Definir el contexto del trabajo: En esta etapa se establecen las condiciones del contexto del trabajo, y se establecen los siguientes detalles, para cada criterio:

El rango $[A, B]$, es un intervalo contenido en un dominio D .

El intervalo de referencia ideal $[C, D]$, Es un intervalo o un valor que representa la máxima importancia en un rango dado. Como tal, el ideal de referencia puede ser un conjunto contenido entre ambos el valor mínimo y valor máximo o también pueden coincidir en el mismo punto.

- El peso de cada criterio, w_j

Paso 2. Calcular de $m \times n$ de la matriz de valoración $X = (x_{ij})_{i,j}$ para $i = 1, \dots, m$ y $j = 1, \dots, n$, según el conjunto de criterios del problema de decisión.

Paso 3. Normalizar la matriz de valoración X , mediante una función que proporciona la distancia entre cada x_{ij} y el ideal de referencia. Por lo tanto, para $i = 1, \dots, m$ y $j = 1, \dots, n$, la matriz $m \times n$ $Y = (f(x_{ij}, [A, B], [C, D]))_{i,j}$ debe calcularse, donde la función por partes $f : x \oplus [A, B] \oplus$

$[C, D] \rightarrow [0, 1]$ se define en los siguientes términos:

$$f(x, [A, B], [C, D]) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in [C, D] \\ 1 - \frac{d(x, [C, D])}{|A - C|} & \text{si } x \in [A, C] \text{ con } A \neq C \\ 1 - \frac{d(x, [C, D])}{|D - B|} & \text{si } x \in [D, B] \text{ con } D \neq B \end{cases}$$

Donde $[C, D]$ es un intervalo contenido en el universo $[A, B]$, y representa el ideal de referencia, $x \in [A, B]$ y $[C, D] \subset [A, B]$. Además, la distancia de x al ideal de referencia $[C, D]$ es dado por $d(x, [C, D]) = \min \{|x - C|, |x - D|\}$, donde x es el valor de a dado x_{ij} . Observe que f siempre devuelve valores que se encuentran dentro del rango $[0, 1]$. Por

tanto, el comportamiento de la función f se puede entender de la siguiente manera: Si los valores de f son iguales a 1, entonces coinciden con ideal de referencia. Por tanto, el ideal de referencia viene dado por la identidad vector $(1, 1, \dots, 1)$ ya que $[C, D] \subset [C, D]$. Como tal, f es una función de normalización descrita en términos tanto del rango como del ideal de referencia.

Paso 4. Calcular d la matriz normalizada ponderada $Y' = Y \otimes W^T = (y_{ij} \cdot w_j)_{i,j}$ para $i = 1, \dots, m$ y $j = 1, \dots, n$. Por tanto, el ideal de referencia ponderado es igual al vector de pesos, w_j para $j = 1, \dots, n$.

Paso 5. Determinar la variación de cada alternativa con respecto a la ideal de referencia normalizado.

Para esto tenemos:

$$I_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (y'_{ij} - w_j)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{y} \quad I_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (y'_{ij})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{para } i = 1, \dots, m \text{ y } j = 1, \dots, n$$

Paso 6. Calcular el índice relativo, para cada alternativa se calcula como se muestra en la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{I_i^-}{I_i^+ + I_i^-}, \quad i=1, \dots, m, \text{ donde } R_i \in (0,1).$$

Paso 7. Ordenar todas las alternativas, en orden descendente según sus índices relativos. Como tal, las alternativas que aparecen en la parte superior son las mejores soluciones según RIM, es decir, las más cercanas a la alternativa ideal de referencia.

Tanto el ACV, como las técnicas multicriterio que aquí se presentan, son integradas en un mismo marco de trabajo, gestionadas por el lenguaje de programación Python [66] para dar lugar a una evaluación sostenible de los sistemas energéticos renovables. Por tanto, es apropiado describir el amplio concepto de la sostenibilidad.

2. 7 Sostenibilidad

Es un concepto que aparece por primera vez en 1987 con la publicación del Informe Brundtland [67], este alertaba de las consecuencias medioambientales negativas del

desarrollo económico y la globalización. Trataba de buscar posibles soluciones a los problemas derivados de la industrialización y el crecimiento de la población.

El pensamiento sistémico sostenible plantea que los retos que enfrenta el ser humano, se pueden resolver desde una perspectiva global y promoviendo el desarrollo sostenible, es decir, principalmente basado en tres aspectos; el progreso social, el equilibrio medioambiental y el crecimiento económico [5].

Sin particularizar en ningún contexto, la sostenibilidad considera tres pilares principales, que a decir consideran los siguientes aspectos.

Sostenibilidad ambiental: defiende que la naturaleza no es una fuente inagotable de recursos, esta vela por su protección y uso racional, considera aspectos como: cuidados del medio ambiente, inversión en ER, ahorro de agua, movilidad sostenible, construcción y arquitectura sostenible, etc.

Sostenibilidad social: este pilar de la sostenibilidad, fomenta el desarrollo de las personas, comunidades y culturas, esto para conseguir un nivel global de calidad de vida, sanidad adecuada, educación equitativa, igualdad de género, todo esto con especial interés en países en vías de desarrollo.

Sostenibilidad económica: busca impulsar un crecimiento económico que genere riqueza equitativa, sin perjudicar a los recursos naturales, el reparto igualitario.

CAPITULO 3. Estado del arte

Esta sección se dedica a la construcción formal de un estado del arte, con esto se presenta el estado del conocimiento. El primer objetivo es; exponer el desempeño individual de las metodologías principales de esta tesis: Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Métodos de Decisión Multicriterio (MDMC), ambas en su función de evaluación sostenible (ES) de los Sistemas de Energías Renovables (SER). Luego, se expone un panorama general de los avances, donde se ha aplicado el marco híbrido integrado por el ACV y MDMC, también en la evaluación sostenible de los SER, específicamente se centra en los sistemas fotovoltaicos (SFV).

3.1 Método de análisis de la literatura

Para construir un estado del arte que permita la apertura al conocimiento, sobre la aplicación del ACV, los MDMC, así como la combinación de ambos (ACV y MDMC). En esta sección, se realizó una revisión cuidadosa de la literatura, con esto se logró la construcción de una base de conocimiento, que en capítulos posteriores se describe.

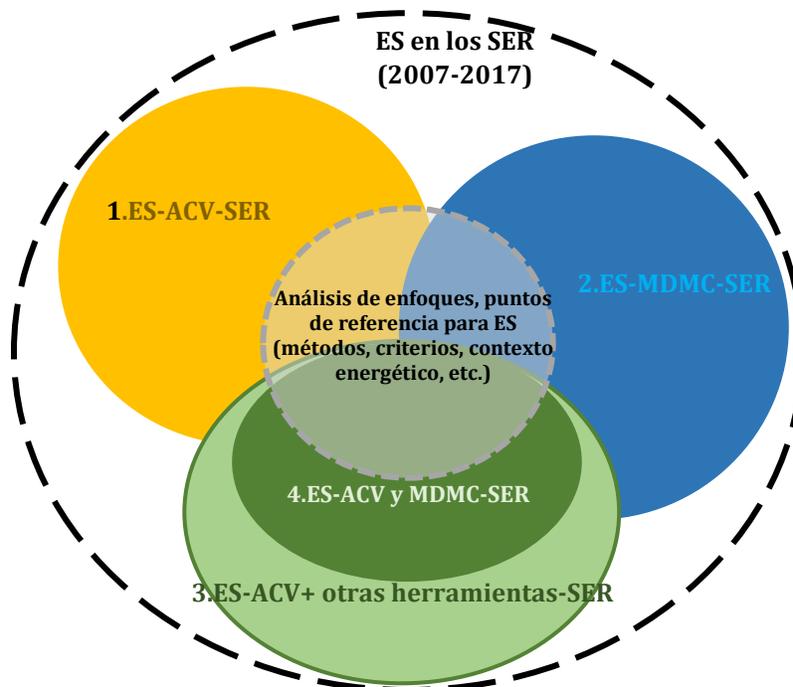


Figura 3.1. Límites y definición de dominio y conjuntos para construir el estado del arte, cuatro conjuntos están representados por diferentes colores y nombrados con siglas explicadas en el texto principal [52]

Primero se delimitó el dominio de búsqueda, para esto se aplicaron conceptos de la teoría de conjuntos. Es decir, se definió el universo como: todos los casos de estudio que tratan de la evaluación de la sostenibilidad en energías renovables, en la escala temporal entre 2007-2017 (Figura 3.1). Se eligió esta escala de tiempo, porque solo durante esta década es posible visualizar un comportamiento creciente en los estudios de ACV, ya sea solo o combinado con herramientas complementarias, aplicados a las energías renovables [19]. Entonces, los dominios de búsqueda de la literatura, estuvieron dados por los límites que caracteriza y describe la Figura 3.1.

La definición, caracterización y criterios de búsqueda de cada conjunto, se muestran en la "Ficha de definición" (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Ficha de definición y caracterización de conjuntos de búsqueda en la literatura.

Id conjunto	Descripción	Criterios de búsqueda Operadores relacionales: "y", "o" y "y no"
1. ES-ACV-SER	Estudios de ACV en particular, con el objetivo de la evaluación sostenible en sistemas de energía renovable.	a) Los objetivos son el principio de sostenibilidad en los SER, "Y" b) ACV como base metodológica con alcance: de la cuna a la puerta "O" de la puerta a la puerta, "O" de la cuna a la tumba "Y" c) Cálculo del tiempo de retorno energético (EPBT), además de kg eq de CO ₂ , incluyendo otras categorías de impacto, "Y NO" "reviews"
2. ES-MDMC-SER	Casos de estudio, donde MDMC se utiliza para evaluar la sostenibilidad en RES	a) La sostenibilidad se evalúa en sus tres dimensiones en los SER "Y" b) MDMC como base metodológica "Y" c) SER como alternativas o escenarios evaluados, "Y NO" "reviews"
3. ES-ACV+otras Herramientas-SER	Casos de estudio donde cualquier herramienta se combina con ACV para evaluar la sostenibilidad en RES	a) Evaluación de la sostenibilidad en tres dimensiones en las SER, "Y" b) ACV con cualquier otra herramienta como base metodológica. "Y NO" "reviews"
4- SE-ACVyMDM C-SER	Estudios de casos donde MDMC se combina con ACV para evaluar la sostenibilidad en RES	a) Evaluación de la sostenibilidad en tres dimensiones en la RES "Y" b).-ACV: de la cuna a la puerta "O" de la puerta a la puerta, "O" de la cuna a la tumba "Y" c). - Combinación de una técnica MDMC como herramienta complementaria para evaluar indicadores sociales y económicos, "Y NO" "reviews"

3.2 Desempeño de metodologías en la evaluación sostenible de los SER.

Un análisis o estudio de sostenibilidad implica considerar al menos tres aspectos: ambientales, sociales y económicos. Así, cualquier herramienta desarrollada para una evaluación sostenible de cualquier sistema, debe ser capaz de integrar todos los aspectos de la esfera de la sostenibilidad, logrando así una evaluación multidimensional. Por otro lado, un sistema es sostenible si, tiene un efecto socialmente positivo, es económicamente eficiente o viable y genera poco o ningún impacto ambiental negativo [28], [68].

3.2.1 ACV

El marco metodológico del ACV es el más utilizado para calcular el progreso en la mitigación del cambio climático, concretamente calculando los kg de CO₂ emitidos y evitados de varias tecnologías renovables [69]. En el caso de la fotovoltaica, cuando se aplica el ACV con el objetivo de evaluación sostenible, siempre terminan reportando solo las emisiones de CO₂, ya sea en proyectos, tecnologías o procesos para la producción y suministro de energía eléctrica [52] (Figura 3.2)

Desde su creación, el método ACV solo se ha aplicado en comparaciones tecnológicas, procesos o sistemas, proporcionando información sobre su perfil ambiental [14]. En lo que respecta a una evaluación sostenible, el marco ISO 14040, solo puede dar una evaluación "*parcialmente sostenible*". Su estructura metodológica no está diseñada para evaluar aspectos relacionados con la economía o lo social [70]–[72]. Por lo tanto, no se puede concluir que el ACV, sea capaz de proporcionar una evaluación sostenible completa; de ahí que deba complementarse con otras herramientas o metodologías [52]. Esta preocupación se manifiesta constantemente en forma de conclusión en las investigaciones realizadas por los profesionales del ACV. Se ha puesto de manifiesto que lograr un estudio integral sostenible, basado solo en el marco del ACV, conduce a

reportar solo resultados de carácter ambiental y en algunos casos técnicos.

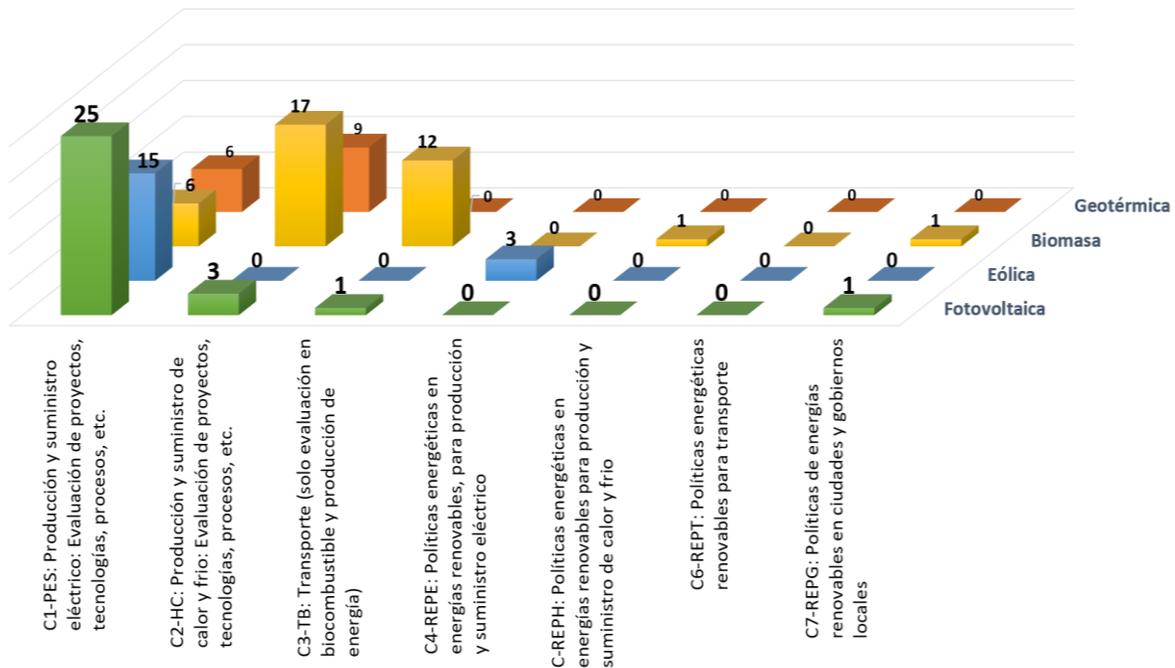


Figura 3.2. Clasificación de los casos de estudio seleccionados según el contexto de aplicación [52] según REN21 [73]

Las conclusiones expuestas en esta sección, están sustentadas en la revisión de 94 casos de estudio, cuyo objetivo es la evaluación sostenible de sistemas energéticos, en ellos la metodología predominante es el ACV. Los casos de estudio se clasificaron según la tecnología de energía renovable: fotovoltaica [30–57, 182], eólica [52–74], biomasa [78–84, 86–91, 93–101, 101–108, 186–188] y geotérmica [109–122, 189]. Cada caso de estudio ha sido analizado en profundidad, tratando de localizar algún otro indicador, que no sea el conjunto habitual de indicadores. Sin embargo, se confirmó la hipótesis de que la metodología ACV, se limita solo a medir aspectos ambientales en la esfera de la sostenibilidad [15, 20, 21]. Por otro lado, los indicadores que se reportan mediante el ACV, se obtienen del cálculo de las categorías de impacto que ofrecen los métodos de evaluación de impacto del ACV, entonces en lo sucesivo, aunque son categorías de impacto, nos referimos a ellas como indicadores.

Aunque el número de indicadores ambientales reportados en estudios de ACV ha aumentado en la última década, los más comunes para el caso de energía fotovoltaica,

eólica y geotérmica, son el potencial de cambio climático (emisiones de CO₂), el tiempo de retorno energético (*Energy Payback Time*, EPBT) y la energía embebida (*Cumulative Energy Demand*, CED)[170, 171, 190, 190–195,196, 197], (Figura 3.3). Para el caso de la energía a partir de biomasa, solo se evalúan indicadores como potencial de cambio climático (emisiones de CO₂), acidificación y eutrofización de sistemas acuáticos [78–84, 86–108, 186–188, 198–200]. Además, se pudo recabar información adicional sobre aspectos metodológicos, por ejemplo, que la energía solar fotovoltaica tiene mayor aplicación del ACV para; “*Evaluación de proyectos, tecnologías o procesos para la producción y suministro de energía eléctrica*”.

Otro aspecto importante a destacar es; la selección de los métodos de evaluación de impactos del ACV, no existe un procedimiento que indique cual se debe seleccionar, sino más bien esta selección debe estar alineada con el objetivo del estudio en particular [31, 48, 170, 171], a nivel general, estos métodos difieren en dos aspectos principales: 1) número de categorías de impactos calculadas que proporcionan y 2) brindan información de punto medio o final, como se muestra en la sección 2.2 de esta tesis y gráficamente en la Figura 1.4. Finalmente, los métodos: CML 2000, ILCD, Eco-Indicador, ReCipe aparecen como los más frecuentes o la combinación de ellos (Figura 3.4). Siempre se sugiere seleccionar más de una metodología de evaluación de impacto, si el estudio así lo requiere, por ejemplo: si uno de los objetivos del estudio es el cálculo de la energía embebida por un sistema, es necesario incluir el método de evaluación de impacto llamado “*Cumulative Energy Demand*” (CED), que únicamente reporta este dato.

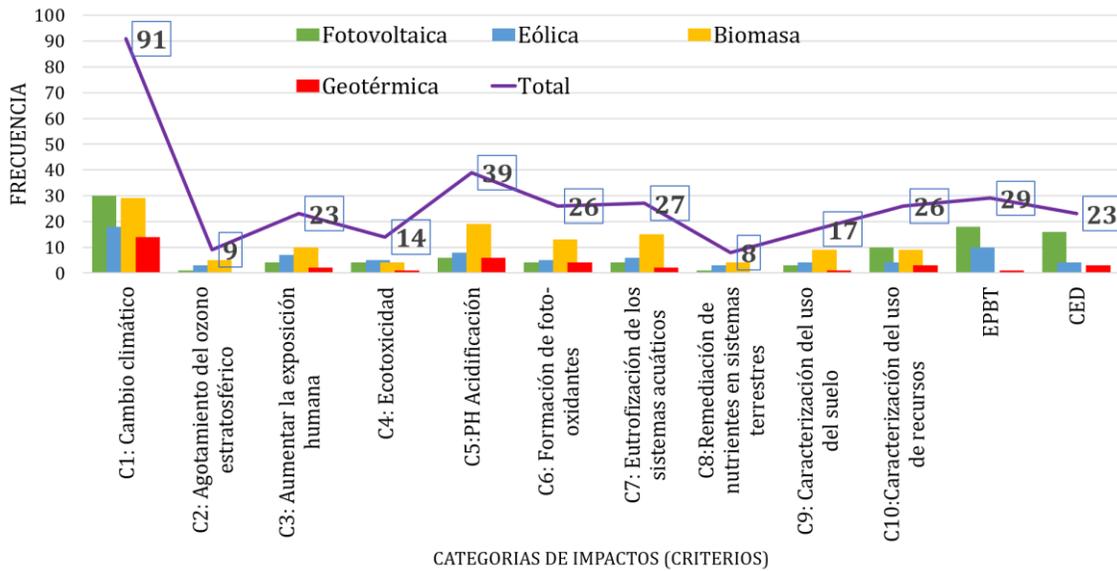


Figura 3.3. Frecuencia de categorías de impacto, evaluadas por tipo de energía renovable, con la metodología ACV [52]

La energía solar fotovoltaica es de los campos más estudiados. En todas las investigaciones, siempre se concluye que el uso del ACV se limita a reportar las emisiones de CO₂ y el EPBT; esto de nueva cuenta, refuerza la hipótesis que la estructura metodológica del ACV, es incapaz de proporcionar una evaluación integral sostenible.

En toda la literatura, se encontraron solo dos investigaciones que además de indicadores ambientales, reportaron un indicador adicional. En [100], incluyen en los resultados el indicador de factor de retorno de energía, esto indica cuantas veces el sistema devuelve la energía utilizada para fabricarlo. Por su parte en [81], añaden a sus resultados el GPBT, que es el tiempo que se tarda en evitar las emisiones de GEI que se producen cuando se fabrica el sistema.

En resumen, la metodología del ACV es una herramienta útil y preferida para la toma de decisiones, pero solo en el contexto de la evaluación ambiental, en el marco de las energías renovables[52]. Además, otra conclusión parcial es que, si bien el objetivo es la evaluación sostenible, el ACV analiza los SER cuando su función es; la generación y suministro de energía eléctrica. Los escenarios compuestos por los SER son analizados en aspectos como: su vida útil, calificación energética, tipo y madurez de la tecnología.

Claramente, solo existe el análisis de escenarios desde el punto de vista ambiental y parcialmente técnico [71].

Entonces, aunque el ACV se considera una metodología robusta, objetiva, con fuerte respaldo científico y cuyos resultados se pueden aprovechar para la formulación de políticas energéticas [25, 22, 173]; en todos los casos, las investigaciones solo terminan enfocándose en los indicadores más populares: potencial de cambio climático, acidificación, EPBT y eutrofización. Se necesita pues la integración de indicadores sociales y económicos para lograr una evaluación sostenible integral en los SER.

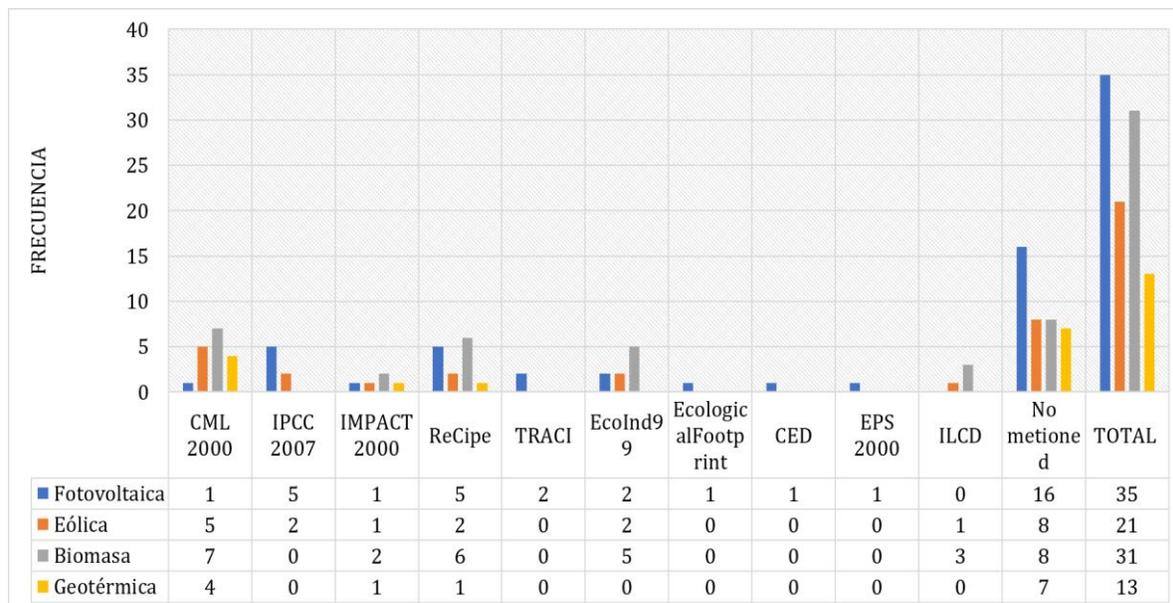


Figura 3.4. Frecuencia de metodologías de evaluación de impacto, por tipo de energía, donde 100% = 94 casos de estudio [52]

3.2.2 MDMC

Las técnicas multicriterio son populares dentro de la gestión de energía sostenible. Estas técnicas brindan soluciones a problemas que involucran múltiples objetivos contradictorios [59]. Varios de estos métodos se basan en el establecimiento de prioridades, con evaluación de números difusos [184], [185]. La evaluación y cálculo de la energía sostenible se suele obtener en una toma de decisiones multicriterio [17], [176].

En primera instancia, los MDMC ofrecen una evaluación sostenible, por considerar en un análisis todos los indicadores del ámbito de la sostenibilidad [186]. Sin embargo, aunque los estudios que tienen como base metodológica los MDMC, pueden alcanzar un grado de completa sostenibilidad, no se puede descartar la incertidumbre que generan los resultados. Por ejemplo, cuando se trata de sostenibilidad, el enfoque que utilizan los MDMC, por sí solos no puede identificar los niveles de contaminación, de la producción o del uso de los recursos [29].

Myllyviita et al., a través de su análisis confirmaron que: *“Usar MDMC solo, como soporte para la evaluación sostenible, no es recomendable, ya que en muchos casos los MDMC necesitan insumos de otras herramientas o métodos, por ejemplo, el ACV”* [187]. Además, los MDMC por sí mismos son métodos subjetivos que brindan un resultado, dependiendo de la percepción de los expertos, mientras que el ACV, es una herramienta objetiva, basada en datos medidos y cálculo bien diseñado [70], [171], [188]. Solo hay cuatro investigaciones, entre los analizados en esta tesis que utilizan el ACV como recurso, para obtener datos ambientales que luego son procesados mediante MDMC [189]–[192].

Así, se puede concluir que, si bien los MDMC son capaces de brindar una evaluación completamente sostenible, porque incluyen todos los aspectos de la sostenibilidad, dejan una clara incertidumbre en sus resultados si no dan lugar al cálculo de sus indicadores mediante las herramientas adecuadas, por ejemplo, el ACV.

3.2.3 Paradigma ACV y MDMC

El análisis del ciclo de vida, por su madurez y robustez, es actualmente la metodología más aceptada y utilizada por la comunidad científica para realizar evaluaciones sostenibles ambientales, además de ser la herramienta de apoyo a la toma de decisiones, por parte de fabricantes, decisores políticos, clientes, etc. [193]. La mayor parte de la literatura, se refiere al ACV como; una herramienta para medir la sostenibilidad de los sistemas energéticos [194]. Sin embargo, como se ha comprobado a lo largo de esta sección, su única aplicación, proporciona solo una evaluación parcial de la sostenibilidad.

Si bien, la discusión metodológica del paradigma ACV y MDMC se viene dando desde hace dos décadas, en cuanto a la aplicación de evaluación sostenible en los SER, ha emergido en la última década (Figura 3.5).

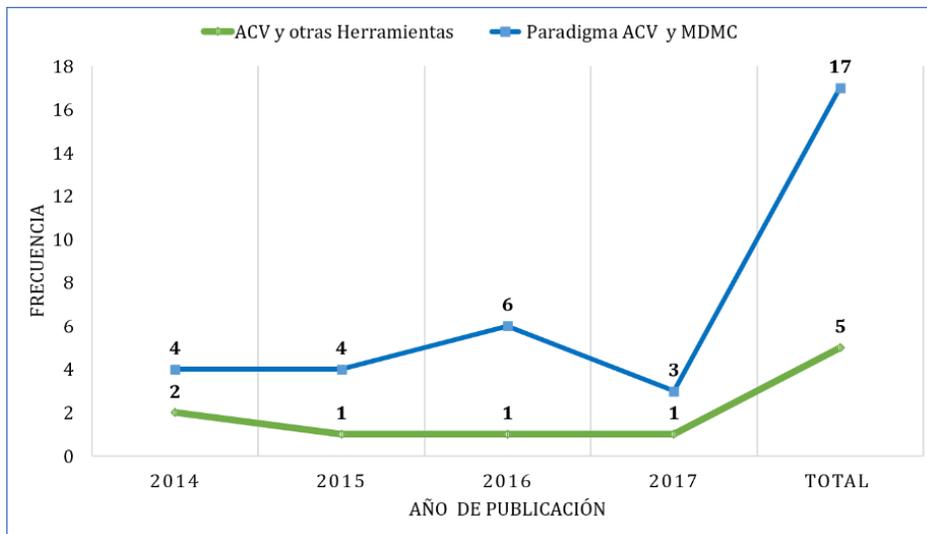


Figura 3.5. Distribución anual de publicaciones para evaluaciones sostenibles, usando ACV y otras herramientas Vs paradigma ACV y MDMC [52]

El conjunto de casos de estudio analizados, en los que ACV y MDMC se han combinado en el campo de los sistemas energéticos (renovables y/o mixtos), es muy reducido. La relación metodológica de estas técnicas es una línea de investigación reciente y con poco campo estudiado.

El propósito de esta sección es; mostrar que los MDMC son las técnicas más utilizadas, específicamente para la extensión del ACV en evaluación sostenible de los sistemas energéticos (renovables y mixtos). En este contexto, las huellas de la literatura muestran que esta relación metodológica es la más habitual (Figura 3.6): 16 de 22 casos de estudios, complementan el ACV con una técnica multicriterio para afrontar un problema de evaluación sostenible en sistemas energéticos. Esto equivale al 73% de la literatura estudiada. Mientras que el otro 27% son métodos que los investigadores han desarrollado, dirigidos a casos de estudios particulares. Un estudio reciente considera que "quizás" los MDMC son los métodos más comunes que se combinan con el ACV [70]. En esta sección, se puede afirmar que los MDMC son las herramientas más populares que se combinan con el ACV, al menos desde la perspectiva de evaluación sostenible.

Algunos autores, como [29], afirman no obstante, que la incorporación de los MDMC en el ACV, implica varias fuentes de incertidumbre y desacuerdos metodológicos [70]. Sin embargo, el paradigma ACV y MDMC reúne las ventajas de ambos métodos, lo que mitiga las desventajas que se generan al actuar individualmente, con el objetivo de una evaluación sostenible [70]. Por tanto, esta combinación de metodologías logra una evaluación completamente sostenible, por las siguientes razones:

1) Porque incluye los tres aspectos mínimos de la sostenibilidad: ambiental, social y económico [70]–[72], [171], [188]. 2) Además, este marco híbrido tiene la ventaja de tener la objetividad del ACV y la ventaja de la flexibilidad de los MDMC que permiten integrar criterios cualitativos y cuantitativos. Así mismo, el ACV y los MDMC juntos involucran métodos científicos bien diseñados, probados y aceptados, participación de expertos o grupo de expertos, con perfiles específicos y participación de la sociedad o partes interesadas.

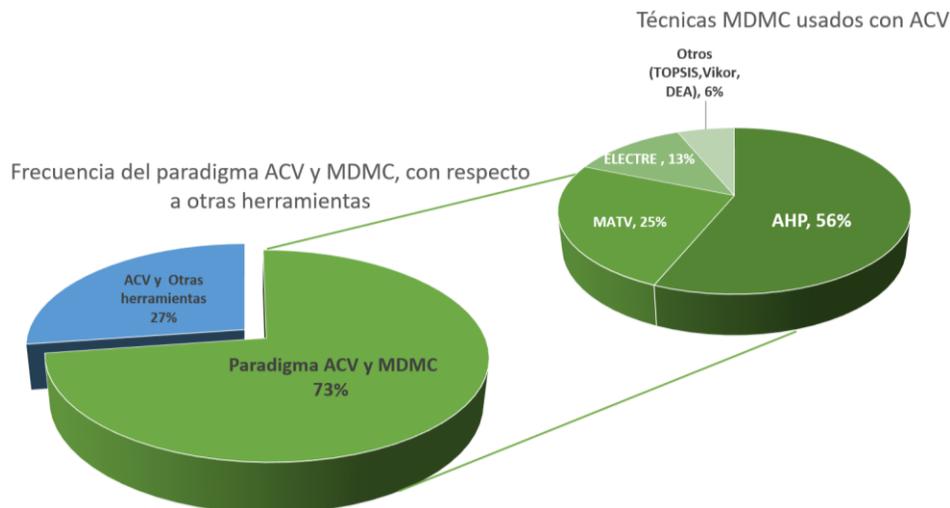


Figura 3.6. Frecuencia de los MDMC, respecto a otras herramientas, combinadas con el ACV para evaluación sostenible de los SER [52]

3.3. Evaluación sostenible de los sistemas fotovoltaicos con el paradigma ACV y MDMC.

En lo que respecta a evaluar la sostenibilidad multidimensional de SFV, solo dos investigaciones se han dedicado al análisis de tecnologías fotovoltaicas, utilizando un enfoque combinado de ACV y MDMC. La primera, de A. Petrillo et al., estudió en 2016 un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA), donde las variaciones y comparaciones que realizan es desde el punto de vista de la configuración del sistema. Evalúan cada variación del SFVA desde el punto de vista ambiental con el ACV, desde el económico con Life Cycle Cost (LCC) y desde el social mediante ACV social. El peso de los criterios se calcula con AHP [195]. Como resultado obtienen la configuración más sostenible del SFVA, para suministrar energía a una estación de radio en Egipto. El segundo trabajo que estudia la sostenibilidad de las tecnologías fotovoltaicas y cuya base metodológica es el paradigma ACV y MDMC, carece de evaluación social, aquí se presta más atención a los aspectos económicos[196].

A lo largo de toda la literatura revisada y analizada, se consideran los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, no profundizan en el análisis de las diversas tecnologías fotovoltaicas, evaluando sus procesos de producción. La evaluación en todos los casos es a nivel de “sistema”, esto quiere decir que no se realiza el ACV de los impactos ambientales de los procesos de fabricación de las tecnologías, sino más bien evalúan las partes del SFV (Modulo, BOS, etc) [88],[92]

CAPITULO 4. Metodología

En este capítulo se propone el uso del marco híbrido integrado por el ACV y AHP[62]-RIM[64], con el objetivo de llevar a cabo una evaluación multidimensional de la sostenibilidad, de los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, antes se sustenta y se expone el medio metodológico para poder llegar la propuesta de este marco híbrido.

Partimos de las secciones anteriores de esta tesis. En el capítulo anterior se mostraron los avances en esta línea de investigación. Algunos aspectos metodológicos fueron puestos en conocimiento, así como, métodos de evaluación de impactos y ambientales principalmente. Además, se pudo comprobar que la aplicación del paradigma del ACV y MDMC, escasamente se ha utilizado en la evaluación de los SER, y su aplicación es casi nula en el contexto de evaluación sostenible de los SFV [197].

El desarrollo de esta propuesta metodológica, se divide en cuatro fases principales como se puede observar en la Figura 4.1. La primera fase incluyó la revisión bibliográfica y búsqueda de lo que se ha desarrollado en esta línea de investigación; esto permite el objetivo principal de la esta fase, la construcción de una base de conocimiento. La segunda fase hace referencia al análisis de la información recabada, es decir al análisis de la base de conocimiento generada en la fase anterior, en esta segunda fase se hace uso de la experiencia de la comunidad científica, y se aplica el concepto de “Data Mining” [198], que es el proceso de extracción de información significativa de bases de datos. Este proceso revela información importante a través de factores ocultos, tendencias y correlaciones, con esto se consiguen puntos de referencia sobre la combinación del ACV y MDMC en lo que respecta a los SER.

La tercera fase es la propuesta de una batería general de criterios, cuyo objetivo es siempre medir la sostenibilidad de los SER. Finalmente, la cuarta fase propone un marco metodológico integrado por el ACV y técnicas multicriterio específicas como: AHP y RIM. En una fase concluyente se presentan los resultados de todas las fases anteriores.

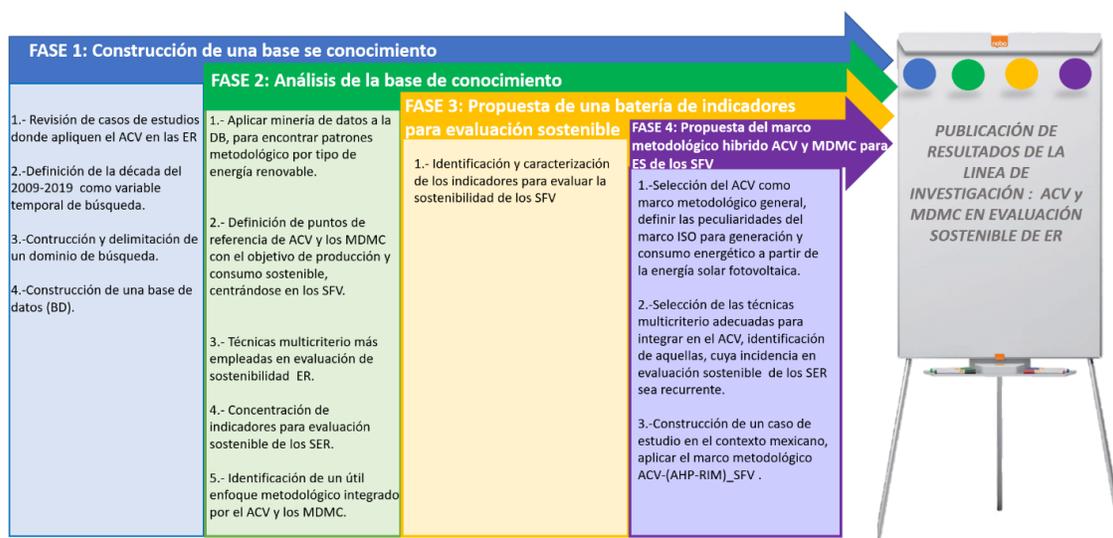


Figura 4.1. Fases de la metodología de desarrollo

4.1 Fase 1: Construcción de una base de conocimiento

Sumergirse en una nueva línea de investigación puede producir mucha incertidumbre, conocer que es lo que se ha realizado al respecto y en qué tiempos, son preguntas ambiguas para comenzar a investigar. Es por esto, que como primera tarea se lleva a cabo una amplia búsqueda y revisión de aquellos casos de estudios cuyo objetivo es la evaluación sostenible de los sistemas energéticos y donde utilizan el ACV, ACV y MDMC, y el ACV con otras herramientas. Este primer acercamiento a las bases de datos científicas como: Scopus, colección de base de datos de la Web of Science, Elsevier, entre otras y buscadores como Google Scholar permiten identificar a partir de que década hay rastros más fuertes en esta línea de investigación.

Esta tarea dejó como resultado la concentración de todos los casos de estudio que cumplen con los primeros criterios de búsqueda, como los especificados en la Tabla 3.1 del capítulo anterior. La década del 2007-2017 fue definida como la década clave para la revisión de los casos de estudio, ya que fue identificada la mayor concentración de investigaciones que cumplen con los objetivos de búsqueda [197]. La Figura 4.2 muestra las clasificaciones por tipo de energía y la respectiva cardinalidad de cada conjunto; y muestra la clasificación con el número de artículos que constituye la base de conocimiento de esta tesis.

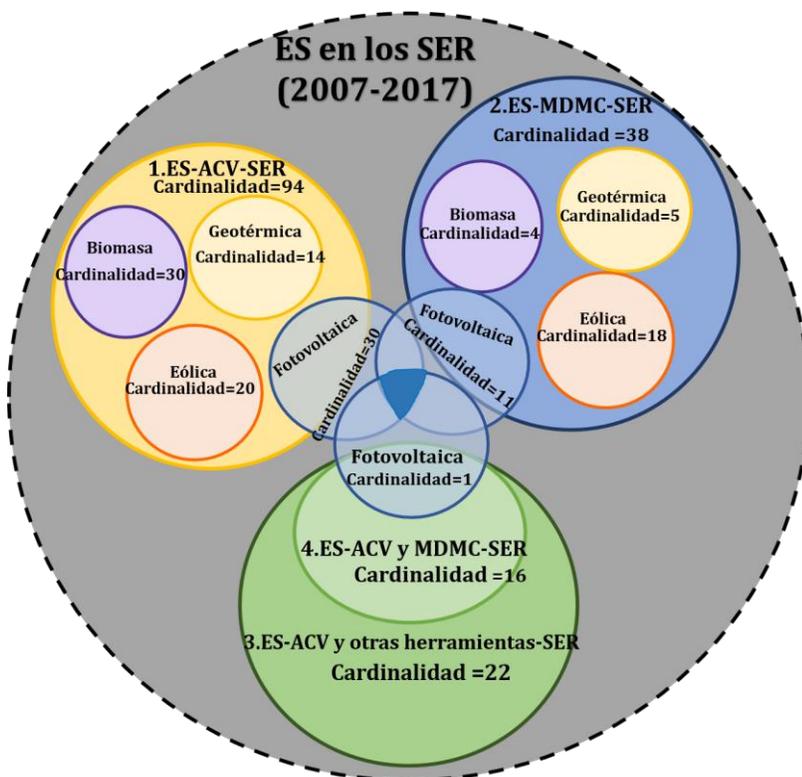


Figura 4.2. Conjuntos definidos para construir una base de conocimiento

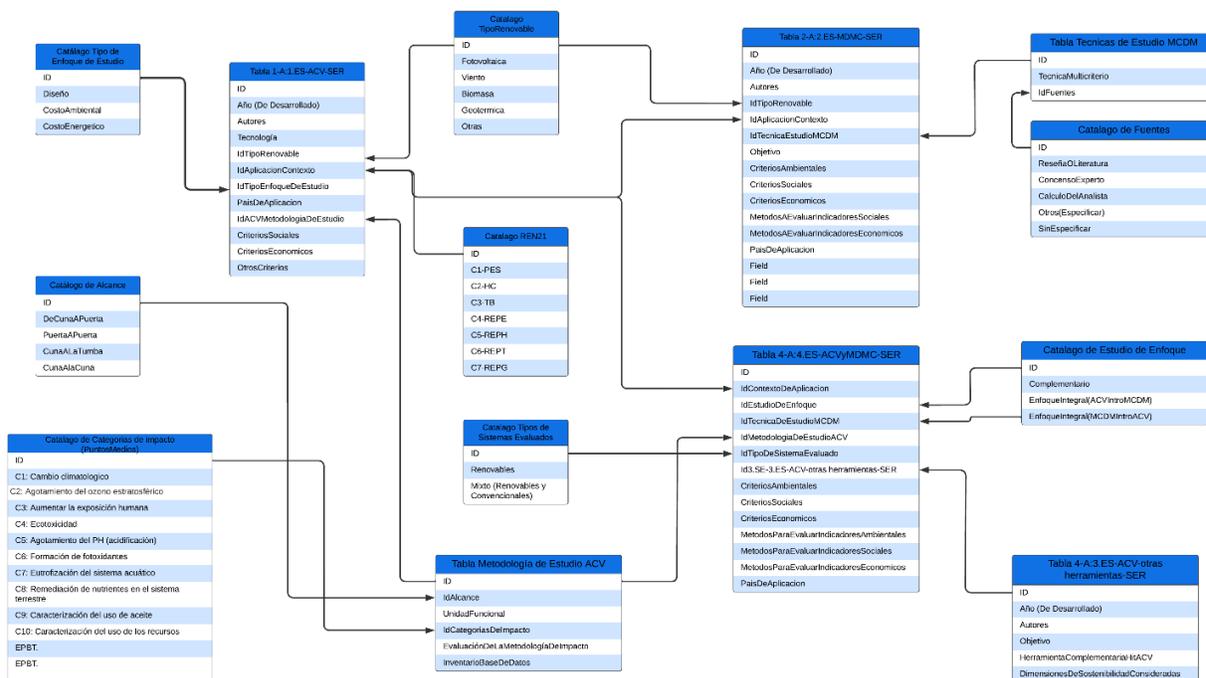


Figura 4.3. Diagrama de la base de datos, estructura de la base de conocimientos generada.

Con una clasificación por tipo de energía renovable, en evaluación sostenible de sistemas energéticos renovables o mixtos, se obtuvo la viabilidad de llevar a cabo el registro de cada investigación en una base de datos, cuyas tablas y campos se muestran en el diagrama de la Figura 4.3

El diagrama relacional correspondiente a la Figura 4.3, muestra los datos que se guardan en cada una de las tablas de la base de conocimiento, define qué información forma parte de los metadatos. Cada entidad (tabla) se relaciona con otra por medio de los Id's (ID). Esta técnica se aplicó para lograr una concentración de la información estandarizada, con este formato es fácil aplicar el concepto llamado “*data mining*” o minería de datos, que es obtener información precisa (patrones) sobre los datos recabados [198]. Así, cada tabla principal del diagrama, guarda información de cada uno de los conjuntos específicos, que se definieron en las Figuras 3.1 y 4.2.

A continuación, se describe brevemente los datos que se guardan de cada grupo.

- *Tabla 1-A:1.ES-ACV-SER* guarda datos como el **año** en que se desarrolló el estudio; los **autores**; la **tecnología** empleada; el **tipo de energía renovable** involucrada, que se selecciona de un catálogo cuyos valores son: fotovoltaica, eólica, biomasa, geotérmica y otras; el **contexto energético de aplicación** que va alineado con la REN21 y cuyos valores para los índices se encuentran en la Tabla 4.1; el **enfoque del tipo de estudio**, que puede ser de diseño, de cálculo de costo ambiental o costo energético, según el catálogo “*tipo de enfoque del estudio*”; el **país de aplicación**; las **peculiaridades de la metodología ACV empleada**, tales como: alcance, Unidad Funcional (UF), categorías de impacto, metodología de evaluación de impacto, y base de datos del inventario empleada; los **criterios sociales, criterios ambientales y criterios económicos**, son los datos que integran esta tabla y que hacen referencia al grupo de estudios que fue etiquetado con el identificador: **1.ES-ACV-SER** (los datos de esta tabla se pueden ver en el material suplementario de esta tesis).
- *Tabla 2-A:2.ES-MDMC-SER*, esta tabla guarda todos los datos de la tabla anterior; sin embargo, se ha de recordar que esta entidad hace referencia al grupo de

estudios, cuyos objetivos son logrados utilizando los MDMC. Por tanto, adicionalmente a los datos de la *Tabla 1-A:1.ES-ACV-SER*, se concentran los **métodos de cálculos** para los criterios: sociales, económicos y ambientales, además del **objetivo** y específicamente la **técnica multicriterio empleada** (AHP, TOPSIS, VIKOR, etc.).

- *Tabla 4-A:3.ES-ACV-otras herramientas-SER*, esta tabla guarda información de aquellas investigaciones que combinan el ACV con otra herramienta, para evaluación sostenible; el **año** de desarrollo; los **autores**; los **objetivos**; las **herramientas utilizadas** y las **dimensiones de sostenibilidad** evaluada. Esta tabla es para mostrar una comparación entre la combinación del ACV con cualquier otra herramienta y el ACV combinado con los MDMC en el contexto de evaluación sostenible.
- *Tabla 4-A:4.ES-ACVyMDMC-SER*, esta entidad guarda todos los datos de las tablas anteriores, pero, además, esta tabla concentró específicamente aquellos casos de estudio donde la comunidad científica, empleó el ACV y MDMC para evaluación sostenible. Para estos casos, se registraron todos los datos de las entidades anteriores, pero se presta especial atención en registrar los siguientes aspectos metodológicos:
 - El enfoque que se ha dado al estudio (**IdEnfoqueEstudio**), que puede ser integral o complementario (descritos en secciones posteriores).
 - **MDMC** empleado
 - **IdMetodologiaACV**: en este campo se especifican las peculiaridades del ACV (alcance, UF,etc)
 - **IdTipoSistemaEvaluado**, aquí se especifica el tipo de sistema a evaluar, que puede ser renovable o mixto. En este punto no se puede tener seleccionado un estudio donde se evalúen solo sistemas energéticos convencionales, ya que, uno de los criterios de selección fue precisamente la evaluación sostenible en sistemas energéticos renovables o en su defecto mixtos.

- **Criterios sociales, económicos y ambientales.**
- **Métodos de evaluación,** para cada dimensión de los criterios

Tabla 4.1. Clasificación del contexto energético de aplicación según la REN21[39]

Descripción	Nomenclatura
Evaluación de proyectos, tecnologías, procesos, etc., para producción y suministro eléctrico	C1-PES
Evaluación de proyectos, tecnologías, procesos, etc., para producción y suministro de calor o frío	C2-HC
Transporte (solo evaluación en biocombustibles o producción de energía)	C3-TB
Políticas energéticas en energías renovables para producción y suministro eléctrico.	C4-REPE
Políticas energéticas en energías renovables para producción y suministro de calor y frío	C5-REPH
Políticas energéticas en energías renovables para transporte	C6-REPT
Políticas de energías renovables en las ciudades y los gobiernos locales	C7-REPG

Con el registro de todos los casos de estudio en la base de conocimiento, se concluye y se contribuye con un total de más de 140 investigaciones, las cuales se pueden encontrar en las Tabla 1-A, Tabla 3-A, Tabla 4-A y Tabla 5-A. (en el siguiente repositorio: <https://drive.google.com/drive/folders/1cqHUrstQMa1zwOp5-pvMjGDCd2SkVvHE?usp=sharing>). Así, sobre esta construcción, se basan las propuestas metodológicas de las siguientes fases.

4.2 Fase 2: Análisis de la base de conocimiento

Se analiza la base de conocimiento de la fase anterior y se pueden dar los siguientes puntos de referencia, en relación a la aplicación del paradigma ACV y MDMC, en el contexto de las energías renovables. Es de interés en esta tesis, aplicar los puntos metodológicos en lo que respecta a la energía solar fotovoltaica, o donde esta tenga participación, por tanto, los puntos metodológicos que aquí se presentan, pertenecen al sesgo de la energía solar fotovoltaica.

4.2.1 Aspectos metodológicos del paradigma ACV y MDMC en evaluación sostenible

4.2.1.1 AHP, el método más usado para combinar con ACV

En un análisis más profundo en relación al paradigma ACV y MDMC, se obtiene otro hallazgo; el método AHP es la técnica más utilizada en esta combinación de metodologías (Figura 3.6, capítulo 3) [26], [27], [36], [68], [199]. La justificación más común, para el uso de AHP con el ACV, es que es un método robusto, fácil de entender, con una madurez aceptada y, además, su estructura algorítmica proporciona resultados que pueden comunicarse fácilmente a los tomadores de decisiones.

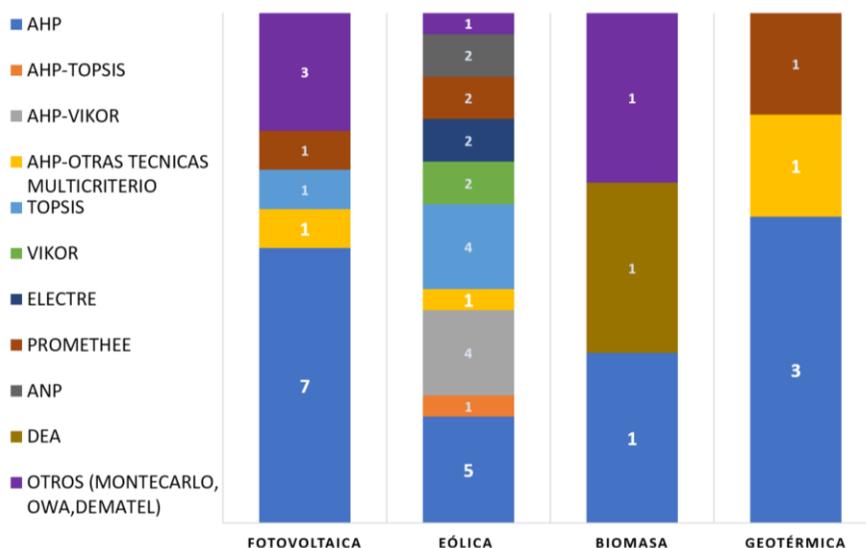


Figura 4.4. Frecuencia de los MDMC por tipo de energía, en evaluación sostenible de SER (Basado en la revisión de una muestra de 38 casos de estudio)[197]

Además, en evaluación de SER el método AHP sigue siendo el más utilizado cuando se aplica como metodología única en un caso de estudio. Sin embargo, su uso va más allá, ya que la combinación de AHP con otros métodos, también es muy popular en este contexto (Figura 4.4).

Cuando el objetivo es evaluación sostenible, de varios escenarios o alternativas desde el punto de vista ambiental, económico y social, en esta última implica evaluar criterios tanto cuantitativos como cualitativos, AHP, además de permitir este tipo de evaluación, es un procedimiento simple, aplicado en múltiples campos de la ciencia de toma de

decisiones. Como se puede observar en la gráfica de la Figura 4.4, cuatro son los tipos de energías renovables involucradas (fotovoltaica, eólica, biomasa y geotérmica), en cada una de ellas AHP resulta como el más aplicado, así como su combinación con otros MDMC.

Ya sea para el cálculo de los pesos o para el cálculo final de las alternativas o escenarios, AHP aparece como el más común. Este método es realmente sistémico, que nunca pierde de vista el objetivo principal, que en este caso es la evaluación sostenible.

Además, la mayoría de las aplicaciones de AHP se han hecho en el siguiente contexto:

- a) Para evaluación de escenarios para producción y suministro eléctrico (*scoring*, clasificación de proyectos o tecnologías).
- b) Para la formulación de políticas energéticas

Finalmente, aunque no siempre el objetivo es la evaluación sostenible, siempre se termina identificando este método como el más popular en la solución de problemas con toma de decisiones [16], [176], [177].

4.2.1.2 Análisis de los enfoques aplicados del paradigma ACV y MDMC.

A pesar de que hoy en día hay muchas herramientas disponibles para evaluación sostenible, no obstante, existe la necesidad de resaltar las complementariedades o la integración de varias existentes, con el fin de generar nuevas herramientas. La combinación del ACV y los MDMC se ha aplicado muy poco [195]. Sin embargo, aunque el grupo de investigaciones es muy reducido, cada estudio analizado presenta un enfoque con distinta perspectiva.

En esta sección se presenta un análisis detallado y se presenta una clasificación de los enfoques que han aplicado, cuando han integrado el ACV con los MDMC, sin particularizar en ningún contexto; solo se presta atención como integran estas dos metodologías.

La Figura 4.5 presenta una clasificación de enfoques, esto se construyó a base del análisis de la base de conocimiento, cuya propuesta principal es la aplicación del ACV y

uno o más métodos multicriterio como metodología principal.

Tres son los enfoques que se han identificado y que se presentan a continuación: “ACV y MDMC”, “ACV dentro de los MDMC” y “MDMC dentro del ACV”.

ACV y MDMC: esta combinación implica que existe el mismo nivel de jerarquía entre ambas metodologías, y se utiliza particularmente en la evaluación sostenible [24], [24], [32], [33], [200], [201]. La construcción general de este enfoque se da en tres fases principales: 1) **análisis**, que incluye actividades como a) selección y definición de escenarios o tecnologías, b) selección y definición de criterios. 2) **modelado**, se implementa el ACV para el cálculo de los criterios ambientales y económicos *-y en algunos casos para el impacto social, aplicando la evaluación del ciclo de vida social-* que involucran la participación de la literatura y expertos y 3) **evaluación**, en esta fase aplican los MDMC para establecer los pesos de los criterios; para esta tarea el método más popular es el AHP. El ranking de los escenarios también se calcula con AHP u otro método del grupo de los MDMC, y, por último, en base a los puntos anteriores reportan los resultados y se hacen recomendaciones. Este enfoque ha sido aplicado principalmente para la selección del mejor escenario energético a corto, mediano y largo plazo, y también para el desarrollo de recomendaciones de políticas energéticas, con el fin de mejorar el sector energético de un país [26], [36], [37], [68], [202], [203].

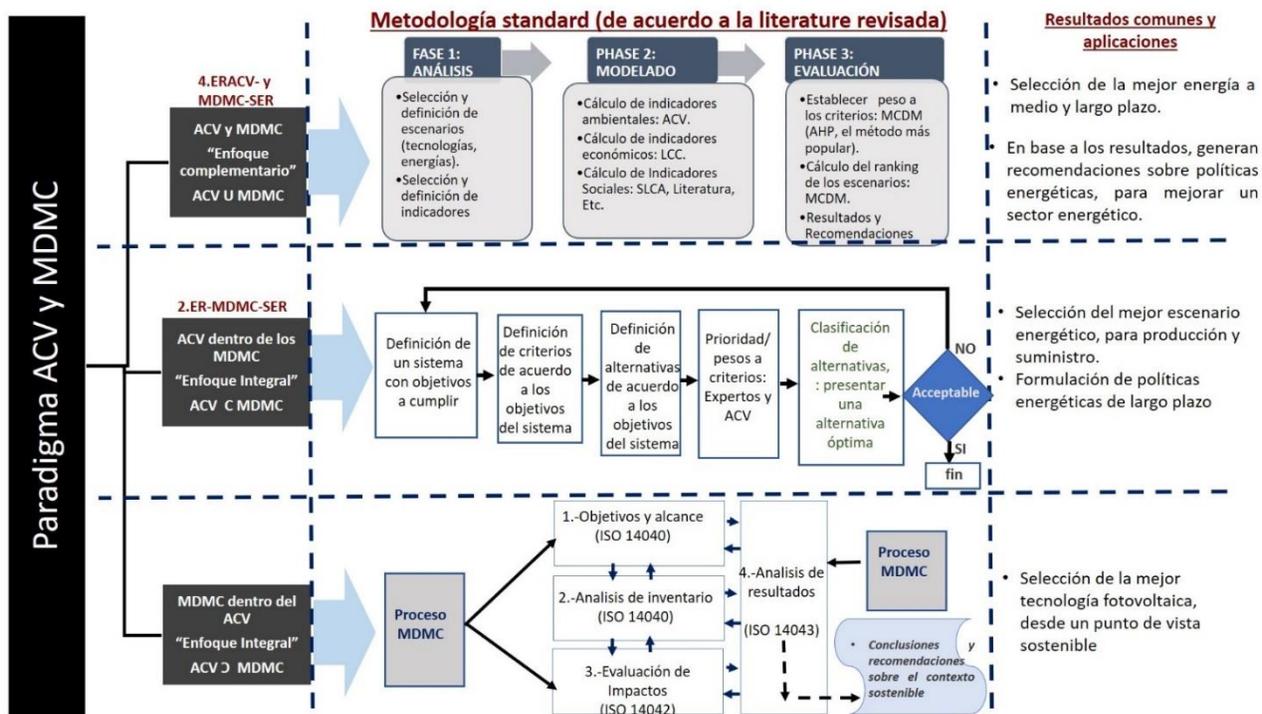


Figura 4.5. Análisis y clasificación de enfoques cuando han aplicado el paradigma ACV y MDMC en la literatura [52]

ACV dentro del MDMC: En algunos casos, un estudio de ACV se integra en alguna fase del proceso de análisis multicriterio convencional (Figura 4.5, descrito por la etiqueta "ACV C MDMC"). El ACV se utiliza allí, como un recurso para obtener datos ambientales [191], [204]–[206]. Sin embargo, las aplicaciones de este enfoque son de carácter más técnico, aunque involucran todos los criterios de sostenibilidad y utilizan los resultados del ACV de forma justa, su mayor aplicación radica en el problema de “seleccionar la mejor alternativa”. Solo un estudio aplica los resultados con el fin de construir políticas energéticas para la toma de decisiones sostenibles [71].

MDMC dentro del ACV: Por otro lado, algunos enfoques integrales se manejan con la aplicación parcial de un MDMC, dentro del amplio marco general del ACV. Estos casos son escasos y pueden interpretarse como intentos de modificación de la estructura del ACV. En general, esto es ampliamente discutido y posiblemente, este tipo de enfoques es el que genera más desacuerdos en la comunidad científica. Sin embargo, una

perspectiva particular, puede ser el enfoque que menos incertidumbre genera. Incluir MDMC dentro de algunas etapas del ACV tiene dos ventajas principales:

1. Los MDMC son necesarios dentro de la metodología ACV cuando se realiza un estudio comparativo entre productos, siendo necesario un proceso de decisión multicriterio, que ayude en la interpretación de los resultados [70], [122]. Por ejemplo, en un caso en el que se compara el desempeño ambiental de varios productos o sistemas, uno puede tener un mejor desempeño ambiental con respecto al potencial de calentamiento global, mientras que otro puede ser mejor con respecto a la ecotoxicidad [193]. Esto deja a los tomadores de decisiones con el desafío de integrar adecuadamente esta información en sus decisiones.
2. Para lograr una evaluación de la sostenibilidad en el marco del ACV, son necesarios uno o más procesos de MDMC [196]. La primera justificación de esta integración es; que es necesario agregar criterios, sociales, económicos, técnicos y políticos (si es el objetivo). Además, en algunas ocasiones estos criterios obligan a tomar valores cualitativos, y para ello los MDMC son las herramientas más populares y aceptadas.

4.2.1.3 Principales criterios de sostenibilidad evaluados: por ACV, por MDMC, por el paradigma ACV y MDMC.

La sostenibilidad es un objetivo final de muchos responsables políticos y debe definirse mediante la medición, el análisis y la evaluación cuidadosa de criterios específicos [195]. En cualquier campo de la evaluación sostenible, los criterios que se seleccionen deben cumplir con las siguientes características elementales: debe ser funcional, claro, relevante, adaptable al contexto de aplicación y pragmáticos [7], [207], [208]. Por ejemplo, si uno de los problemas identificados es la contaminación del aire, entonces los criterios relevantes serían aquellos que miden la contaminación del aire, tales como: NO₂, CO₂, NH₃, O₃, etc [26]. El mayor desafío es analizar el problema con la menor cantidad de criterios, con esto se asegura que el proceso de toma de decisiones sea manejable [26]

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

En este apartado, se muestran en un solo marco (Figura 4.6), los tres criterios principales para cada dimensión de la sostenibilidad; cuándo se ha aplicado el ACV o los MDMC, así como la combinación de ambos (ACV y MDMC), con el objetivo de evaluación sostenible de los sistemas energéticos. Una observación general en la Figura 4.6, es que, aquellas investigaciones, donde se ha utilizado la metodología ACV solo proporciona criterios de evaluación de la dimensión ambiental (primer cuadrante de la Figura 4.6, cuyo color de referencia al conjunto de estudios aparece en amarillo). Esto permite una vez más, corroborar que no se logra una evaluación integral de la sostenibilidad, utilizando solo el marco ACV.

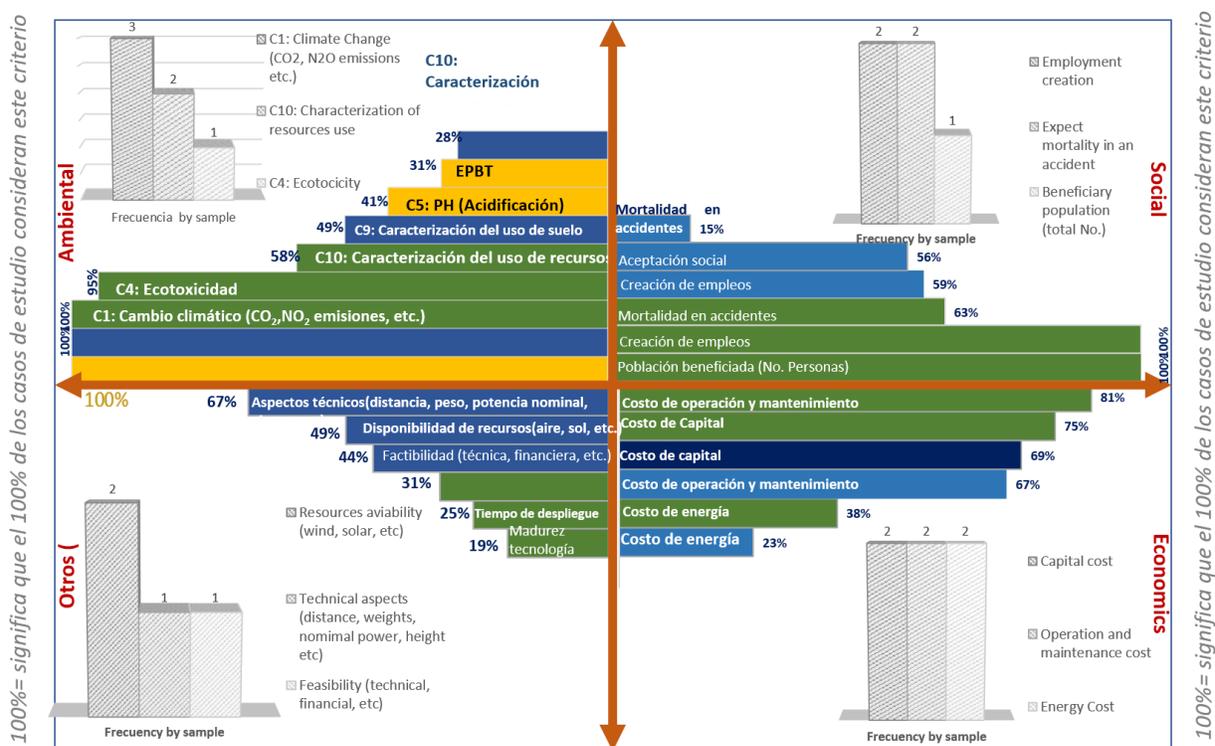


Figura 4.6. Comparación de los tres criterios para cada dimensión de la sostenibilidad: metodología ACV, MDMC y el paradigma ACV y MDMC [52]

Principales criterios para medir aspectos ambientales:

Las investigaciones muestran que, el principal criterio para medir el desempeño ambiental es el “**Cambio climático (emisiones de CO₂)**”. Si se observa nuevamente la gráfica de la Figura 4.6, se puede observar que este es considerado por el 100% de las investigaciones. Entonces, se puede concluir que este es el criterio más frecuente,

cuando analizan los SER, con el objetivo de evaluación sostenible. Esto tiene sentido, ya que identificar mejores opciones de políticas para abordar el cambio climático, es uno de los objetivos urgentes hoy en día. Luego, **“Caracterización de uso de recursos”**, se encuentra en dos grupos (2.ES-MDMC-SER y 4. ES-ACV y MDMC-SER) como principal criterio de medición en esta dimensión. **“Ecotoxicity”**, es el tercero más frecuente. Después, en el siguiente orden son **“Caracterización del uso del suelo”**, **“Acidificación”** y **“EPBT”**. Estos dos últimos, solo se consideran cuando se utiliza la herramienta ACV para la evaluación de la sostenibilidad.

Principales criterios para medir aspectos sociales:

Estos criterios deben incluir temas que afectan a las personas, directa o indirectamente, y deben clasificarse según beneficien o perjudiquen a la población. En la mayoría de los casos, son criterios cualitativos, que implican la participación de la localidad involucrada, de expertos y de autoridades (locales, regionales o nacionales según el caso). A la fecha, no existe acuerdo sobre los métodos de evaluación, que se deben utilizar para medir los criterios de esta dimensión. Si bien, se puede decir que esta dimensión es la que menos se ha aplicado y en la que existen pocos consensos metodológicos. Así, la **“Creación de empleo”** es el criterio más frecuente de esta dimensión; está presente como uno de los tres primeros criterios, en los dos conjuntos que componen este contexto. La **“Mortalidad en accidente”** también aparece como criterio principal. Sin embargo, aunque tiene una frecuencia de 2, su porcentaje de participación no es tan alto, como **“Población beneficiada (n° total)”**. Finalmente, **“Aceptación Social”**, es el cuarto criterio con mayor incidencia.

Principales criterios para medir aspectos económicos:

Los criterios económicos determinan la forma en que se distribuyen los recursos limitados. Normalmente, los recursos se asignan a costos de construcción, producción y mantenimiento. De los cuatro aspectos de la esfera de sostenibilidad que se consideran en la Figura 4.6, los aspectos económicos, son los que presentan más acuerdos. **“Costo de operación y mantenimiento”**, **“Costo de capital”** y **“Costo de energía”**, son el primero, segundo y tercero con mayor porcentaje de aparición,

respectivamente. Esto quiere decir que; si se utiliza solo el ACV, o el paradigma ACV y MDMC o solo los MDMC, estos son los criterios que al menos se deben considerar, para evaluar la sostenibilidad de sistemas energéticos en los aspectos sociales.

Principales criterios para medir aspectos técnico-políticos:

Es la dimensión donde hay menos concordancias en la comunidad científica. Únicamente ***“Disponibilidad de recursos (eólico, solar, etc.)”*** es el criterio que está presente en toda la literatura revisada (Figura 4.6). Por ejemplo, los estudios que utilizan solo los MDMC para la evaluación sostenible (2.ES-MDMC-SER), consideraron relevantes los ***“Aspectos técnicos (distancia, peso, potencia nominal, altura, etc.)”***, seguidos de la ***“Factibilidad (técnica, financiera, etc.)”***. En cambio, las investigaciones que utilizaron el marco metodológico integrado por el ACV y MDMC (4.ES-ACV y MDMC-SER), consideran más relevante analizar el ***“Tiempo de implementación y Eficiencia (energética, técnica)”*** seguido de ***“Madurez de la tecnología”***. Finalmente, en esta dimensión aparecen 5 criterios principales.

4.2.1.4 Puntos de referencia para la energía solar fotovoltaica

- A. ***“Cambio climático (emisiones de CO₂)”, “Tiempo de retorno energético (EPBT)” y “Energía embebida (CED)”***, son tres criterios ambientales que deben ser incluidos en la evaluación de sostenibilidad [30–57, 182], estos están fuertemente ligados cuando se trata de evaluar los SFV para el suministro eléctrico (Figura 4.6)
- B. En lo que respecta al ACV; CML 2000, ILCD, EcoIndicador99, ReCipe, aparecen como los métodos de evaluación de impactos más frecuentes para evaluar los impactos ambientales, en el caso de los SFV sugiere que se deben combinar cualquiera de las anteriores con la Cumulative Energy Demand (CED), esta última permite calcular el tiempo de retorno energético, siempre se debe buscar aquellas que satisfacen los objetivos del estudio.

- C. AHP solo, o AHP combinado con otro MDMC, es la técnica multicriterio de mayor aplicación para la evaluación de alternativas con SFV. Se puede deducir que combinar ACV y AHP, es una alternativa metodológica viable, que puede arrojar buenos resultados en la evaluación multidimensional de la sostenibilidad de los SFV.
- D. Integrar ACV y AHP/AHP-otra técnica, desde un enfoque integral es lo recomendable, esto quiere decir que, la técnica multicriterio esté contenida dentro de la base metodológica del ACV; así se integra el o los métodos multicriterio, en alguna de las fases del ACV, y no se altera la estructura metodológica del ACV. Solo existe un único caso de estudio donde aplican ACV y AHP para evaluar SFV desde un punto de vista técnico, es decir no es el objetivo la evaluación sostenible, sino más bien de selección de configuración del sistema con un enfoque complementario (según, la clasificación de la Figura 4.5).

4.3 Fase 3: Definición y propuesta de una batería de criterios para evaluación sostenible de los SFV.

El uso de la energía solar fotovoltaica, está presente en diferentes sectores: transporte, industrial y residencial, comercial y público. Como bien se expuso en secciones anteriores de esta tesis, los criterios deben ser funcionales, claros, relevantes, pragmáticos, y sobre todo adaptados al contexto de aplicación. En este sentido, no es lo mismo evaluar la sostenibilidad de los SFV en el contexto de la industria alimentaria, que en la industria aeroespacial. Los criterios deben estar alineados con el contexto de aplicación. Basados en esta diferencia de escenarios, en esta sección se plantea una batería de criterios, dirigida a evaluar la sostenibilidad de SFV instalados en el sector universitario.

Tabla 4.2. Batería de criterios propuesta para evaluación sostenible de SF

ID Criterio	Criterio	Unidad de medida	Descripción	
S O c i a l	SC1	Formación educativa	No. De estudiantes beneficiados con el sistema instalado	Este criterio define la cantidad de estudiantes que pueden beneficiarse con la instalación de un SFV, es decir debido a que en algunas universidades existen carreras sobre energías renovables, este criterio define la cantidad de estudiantes que pueden usar el SFV como objeto de estudio para prácticas.
	SC2	Ocupación y pérdida de áreas	m ²	Este criterio se expresa en m ² , haciendo referencia a las áreas que se pierden por instalación del sistema, esto se debe observar directamente en la tabla (Tabla 4.3) de clasificación de zonas (Z1, Z2, Z3) que se construyó para este fin. Claramente se ve que una alternativa con clasificación tipo Z1 tiene mayor ventaja sobre una clasificación tipo Z3. Esto lleva como consecuencia la pérdida de espacios para otro tipo de proyectos.
	SC3	Riesgo de accidentes	% de riesgos	Este criterio se calcula mediante estadísticas registradas en los accidentes suscitados en instalaciones similares a la evaluada, en este caso en la clasificación de industria de transformación e industria eléctrica, para esto es necesario recurrir a los registros de las estadísticas de riesgo en el trabajo

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

				en México, esto mediante el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) que representa el 79.7% de la población trabajadora con empleo formal en México [209]
	SC4	Influencia local del proyecto en la comunidad	No. de Empleos temporales generados en la comunidad.	Este criterio mide las personas directamente empleadas, tanto de la comunidad local, como profesionales egresados o en proceso de la misma universidad para la instalación del SFV, es decir cuántos herreros, técnicos, soldadores, e instaladores se emplearán, etc.
E C O N Ó M I C O	EC1	Costo inicial del SFV		<p>CostoSFV, es la suma total del costo de todos los elementos que componen el SPV, n, es el número de elementos que representan un costo inicial para la instalación del sistema. e, son los elementos que componen el sistema y que provocan un gasto, algunos elementos identificados que provocan un costo hasta ahora son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paneles • Inversor • Cableado • Estructura • Instalación (equipo técnico) • Punto de conexión con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) • Unidad Verificadora de Instalación Eléctrica (UVIE) • Medidor bidireccional (para medir el balance neto por parte de la CFE) • Cargos extras por tramites de permiso • Excedentes, por cambio de propietario, de emplazamiento
	EC2	Costo mto. anual	\$Costo anual del mto.	Este criterio indica cuanto se paga por el mantenimiento anual del SFV
	EC3	Retorno de la inversión (TIR)	Años	Este criterio indica en cuantos años se podrá recuperar la inversión inicial el criterio EC1
Am bien tal	AC1	Perfil ambiental	Análisis de Ciclo de Vida: kg de emisiones de CO ₂ , equivalentes	Este criterio indica las emisiones de CO ₂ , equivalentes

$$Costo_{SFV} = \sum_{e=1}^n Costo_e$$

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

T é c n i c o	AC2	EPBT	Años	Este criterio expresa los años que se tarda el sistema en devolver la energía que se necesitó para producirlo.
	TC1	Potencia SFV	kWp	Indica la potencia del SFV,
	TC2	Factibilidad (tiempo de despliegue)	Tiempo estimado de despliegue del proyecto	Indica el tiempo en que el proyecto esté funcionando, tomando en cuenta desde la concepción, instalación que implica trámites para el punto de conexión, estos varían, dependiendo del tipo de SFV y de la potencia, obtener los permisos, y las licencias necesarias.
	TC3	Demanda energética cubierta	$\% = \frac{\text{Energía Generada por SFV/Energía Requerida por la universidad}}{100}$	La universidad o campus universitario requiere de un SFV con una potencia específica para cubrir la demanda energética requerida, inmediatamente y a largo plazo, este criterio indica el porcentaje aproximado que cubre el SFV en cuestión, es decir que tanto está cerca la curva de producción con la curva de la demanda.
P o l í t i c o	PC1	Apoyo de financiamiento por órganos universitarios.	Cualitativo (Nulo, bajo, medio, alto, muy alto)	Este criterio indica la percepción del apoyo financiero para la implementación del proyecto por parte de las autoridades en turno: primero el coordinador general del campus universitario, luego los coordinadores generales y por último quien ocupe en ese momento el cargo de Rector.
	PC2	Factibilidad de participación en convocatorias proyectos tecnológicos	Cualitativo (Nulo, bajo, medio, alto, muy alto)	Este criterio indica, la factibilidad de que el proyecto participe en convocatorias especiales, por el gobierno federal o estatal, para el financiamiento parcial o total del proyecto.

Tabla 4.3. Clasificación de zonas para instalas los SFV, en las universidades

Clasificación de zonas para emplazamientos de los SFV		
ID	Descripción	Observaciones
Z1	Sobre el techo (edificios u otras obras ya construidas)	Clasifican en este tipo aquellas zonas que son techos de edificios ya construidos, es decir el SFV debe adaptarse a las áreas disponibles, pueden ser edificios, techumbres, canchas deportivas, cafeterías, etc.
Z2	En tierra con uso secundario	En esta clasificación se consideran espacios físicos para la instalación de los SFV que requieren la construcción de una obra civil extra. Sin embargo, debe ser concebida con dos funciones: una primaria que es el suministro eléctrico y otra secundaria que pueda proporcionar la universidad. Por ejemplo, una techumbre para los estanques de criadero de peces, o para estacionamiento, o para sombra de la composta o criadero de conejos. La construcción de estas instalaciones FV es considerada dentro del gasto inicial del proyecto.
Z3	En tierra sin uso secundario	Esta clasificación es aquella que solo tiene la función de suministro eléctrico, es decir su único propósito es proporcionar energía eléctrica. Estas zonas son aquellas denominadas granjas solares, los emplazamientos de este tipo no hacen un aprovechamiento óptimo del área.

4.4 Fase 4: Propuesta del marco metodológico híbrido ACV y (AHP-RIM) para la evaluación sostenible de los SFV.

En esta sección se presenta el ACV como metodología principal y la integración de los MDMC (AHP-RIM) y las tecnologías de la Información (TIC's) mediante procesos bien definidos (Figura 4.7).

El marco metodológico que se propone, está basado en 5 fases principales, que se describen a continuación:

Fase preliminar al ACV: Estructuración y construcción del entorno del problema.

Es una fase que prepara el marco de trabajo, es decir, considera la estructuración completa de un problema, y propone que se desarrollen los siguientes elementos básicos:

- Contextualización del problema
- Planteamiento del problema

- Identificación y definición del objetivo del estudio
- Caracterización de matriz de emplazamientos, para esto se propone su construcción mediante el diagrama expuesto en la Figura 4.8, esto es, aplicando los principio de construcción de una base de datos en las TIC's, a grandes rasgos el diagrama de la Figura 4.8, plantea primero crear todos los Campus Universitarios (CU) involucrados, estos deben ser caracterizados con su dirección, curvas de irradiancia, curvas de temperatura, demanda energética total, patrones de consumo energético (puede ser por áreas), luego crear la tabla que contenga los SFV identificados, para esto se debe registrar: la potencia, el área ocupada, energía producida, tipo de zona para su instalación, según la tabla 4.1. y por último si requiere o no obra civil. Finalmente se crea una tercera tabla, cuyos registros son los emplazamientos, un emplazamiento pertenece a un campus universitario y tiene su SFV, es decir que para un CU puede tener registrado uno o más SFV, además de esos datos se agrega una descripción, una ubicación geográfica y el % de energía que cubre ese SFV en ese CU.
- y, por último, identificación y caracterización de expertos, aquí se puede identificar a expertos que pertenecen a la universidad involucrada en el estudio, esto garantiza mejor dominio del problema.

Una vez concluida la fase preliminar, se propone iniciar el ACV, desarrollando sus fases tradicionales y auxiliadas por los procesos que se marcan en el esquema de la Figura 4.7:

Fase 1, Definición del metas y alcances.

- Se crean los elementos marcados por ISO, es decir se define, una UF, UR, definición de la metodología de evaluación de impactos y por último, el objetivo del ACV, aquí no se debe confundir el objetivo del estudio general (fase preliminar), con el propio del ACV. Puede ser que el objetivo del problema sea establecer el orden de prioridad para la instalación de SFV, considerando aspectos ambientales, sociales, económicos, técnicos y políticos; en este caso, se persigue un objetivo netamente sostenible. Sin embargo, el objetivo de un

estudio de ACV en un sistema solo puede ser de análisis o comparativo [36].

- En un formato libre, se seleccionan y se especifican los criterios de sostenibilidad: sociales, económicos, ambientales, técnicos y políticos si es el caso. Para nuestro caso, se propone la batería de criterios de sostenibilidad, que se generó a partir del análisis de la base de conocimiento (Tabla 4.2)
- Luego se establece un peso de prioridad a cada criterio, es decir con la intervención del panel de expertos que se definió en la fase preliminar, se lleva a cabo el proceso que define la Figura 4.9, este proceso se repite a cada experto y por cada uno se obtiene un vector de peso de los criterios. En resumen, Para obtener el peso de los criterios de cada experto, se aplica el proceso de la Figura 4.9 y finalmente sus valoraciones numéricas mediante el método multicriterio AHP (descrito en la sección del marco teórico de esta tesis).

Fase 2, Análisis de inventario.

En esta fase, se desarrollan las actividades tradicionales de un ACV, es decir se registran las entradas y salidas de los sistemas en cuestión, en este caso de los SFV.

Fase 3, Evaluación de impactos.

Evaluación de impactos, en un ACV tradicional se define con una metodología de evaluación de impactos, de las disponibles y aceptadas por ISO.

- Evaluación de impactos ambientales, la metodología debe ser definida desde la fase 1 del ACV, en este caso puede emplearse la metodología ILCD, que proporciona 11 categorías de impacto, que pueden ser traducidas en los criterios definidos. Sin embargo, la literatura sugiere que, si han de calcularse la energía embebida en el sistema, debe también seleccionarse la metodología Cumulative Energy Demand (CED).
- Evaluación de criterios sociales, estos pueden evaluarse con la evaluación del ciclo de la vida social del sistema, en este caso también el panel de expertos puede participar positivamente, en esta evaluación.
- Evaluación de criterios económicos, estos se pueden resolver con la experiencia de los expertos y los métodos de cálculos bien definidos en la literatura.
- Evaluación de criterios técnicos y políticos, ambos aspectos se pueden evaluar

con la participación de los expertos y la literatura.

Finalmente, la propuesta es generar una matriz de valoración, cuya estructura está basada en la valoración de cada criterio con respecto a cada sistema (SVF)

Fase 4, Interpretación de resultados

En un análisis de ACV tradicional, se proporcionan datos numéricos aislados, es decir solo valoraciones cuantitativas, sin sugerencias que orienten hacia una toma de decisiones baja en incertidumbre, de la fase anterior podemos presentar las valoraciones numéricas de cada sistema con cada criterio, sin embargo un análisis, cuyo objetivo es la toma de decisiones por la selección del sistema más sostenible, debe estar basado en la interacción a la vez de todos los criterios en todos los sistemas. Por lo anterior, en esta fase se propone incluir 2 actividades específicas:

- Análisis comparativo, obtener un ranking en los sistemas (SFV), para obtener el ranking de los sistemas, se propone el método RIM, sin embargo, debido a que el panel de expertos es amplio, y para cada experto deben aplicarse todos los pasos que considera el método RIM, en este punto se propone programar la técnica híbrida AHP unión RIM, en el lenguaje de programación Python, cuyas entradas son: la matriz de valoración y cada vector de peso de los criterios de cada experto, por cada vector de peso proporcionado, el programa proporciona un ranking de las alternativas, esto se puede ver resumido y gráficamente en la Figura 4.10.

Al finalizar estos cálculos se obtienen los rankings de los SFV, que obtuvo cada experto, sin embargo, si no hubiera un acuerdo total en el ranking, se propone realizar una media geométrica con los cinco expertos y obtener un vector de pesos con los valores agregados de cada uno.

Si se analiza en detalle lo anterior, se puede comprobar que la técnica AHP-RIM, debe repetirse una y otra vez, según el número de expertos, o según los vectores de peso que se dispongan. Por lo anterior, se propone la implementación del programa AHP unión RIM- Python.

- Finalmente, en una última actividad se formalizan los resultados y se presentan

en forma de conclusiones, estructurados especialmente para llevar a cabo una toma de decisiones, alineada con el objetivo del estudio y del ACV. Es decir, se debe comunicar un solo ranking de los SFV, que incluya las valoraciones de todos los expertos involucrados, las valoraciones de todos los criterios.

En conclusión, este marco tiene como base metodológica principal el ACV. Se observa que no se han modificado las actividades estándares que establece la norma ISO. En esta metodología, lo que se propone es enriquecer un estudio del ACV, respetando su arquitectura metodológica. Cada actividad conduce a un resultado y tiene un proceso o método responsable, cuyo principio es respetar los elementos del ACV tradicional.

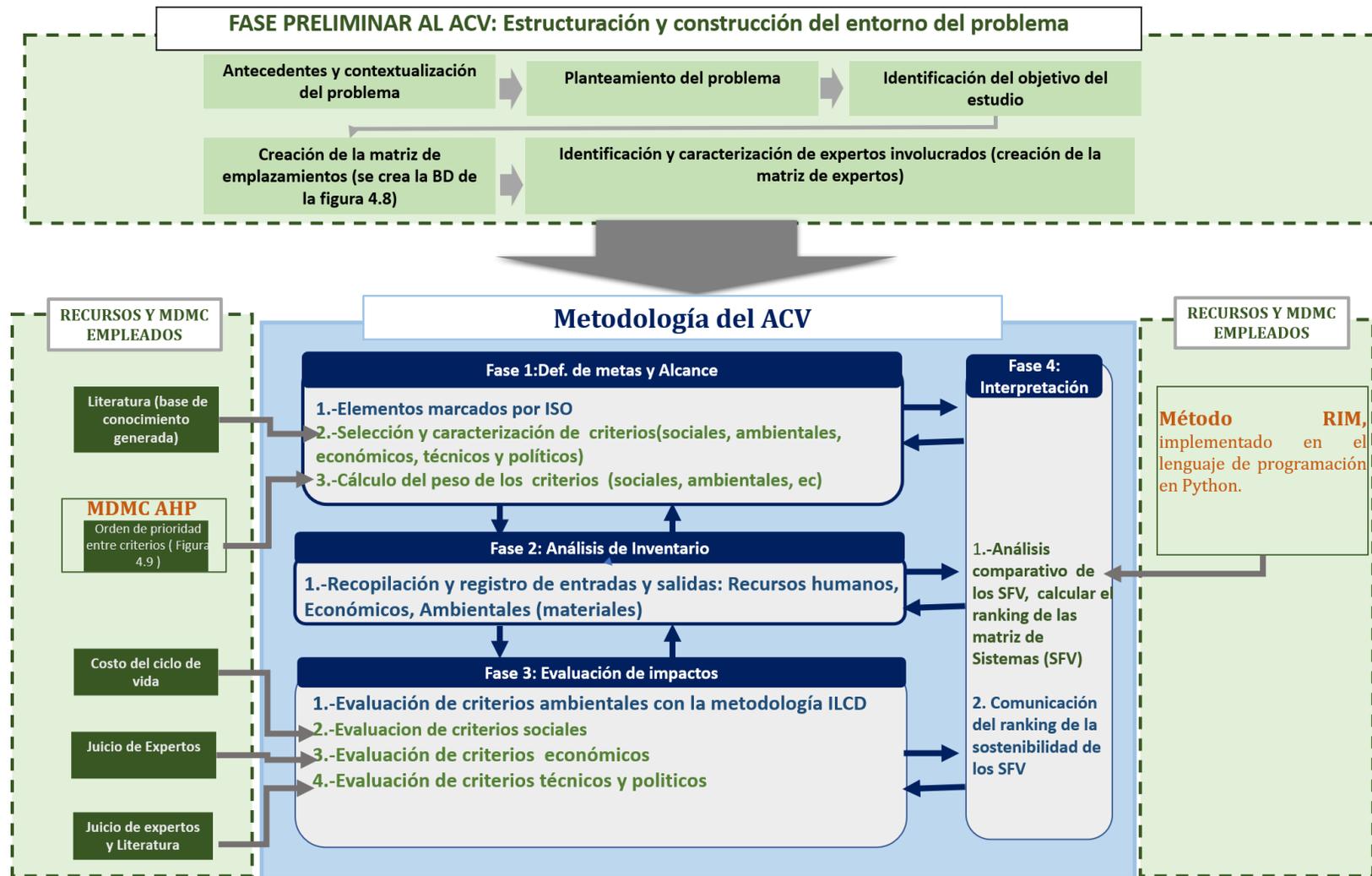


Figura 4.7 Propuesta de un marco metodológico híbrido para evaluación sostenible de los SFV, teniendo como base metodológica principal el ACV con la integración de los MDMC.

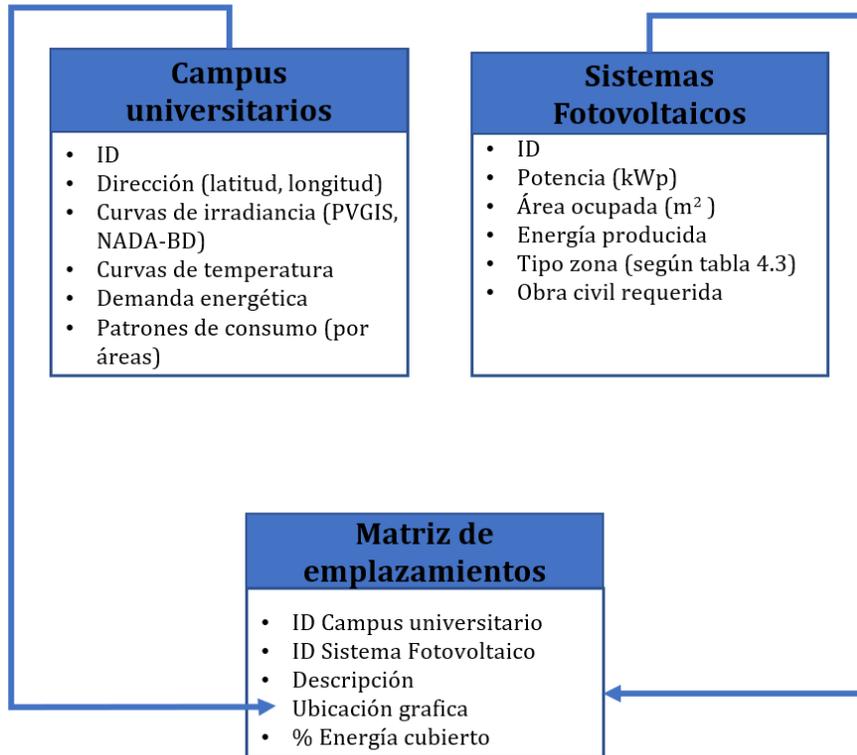


Figura 4.8. Diagrama relacional de la BD para crear la matriz de emplazamientos

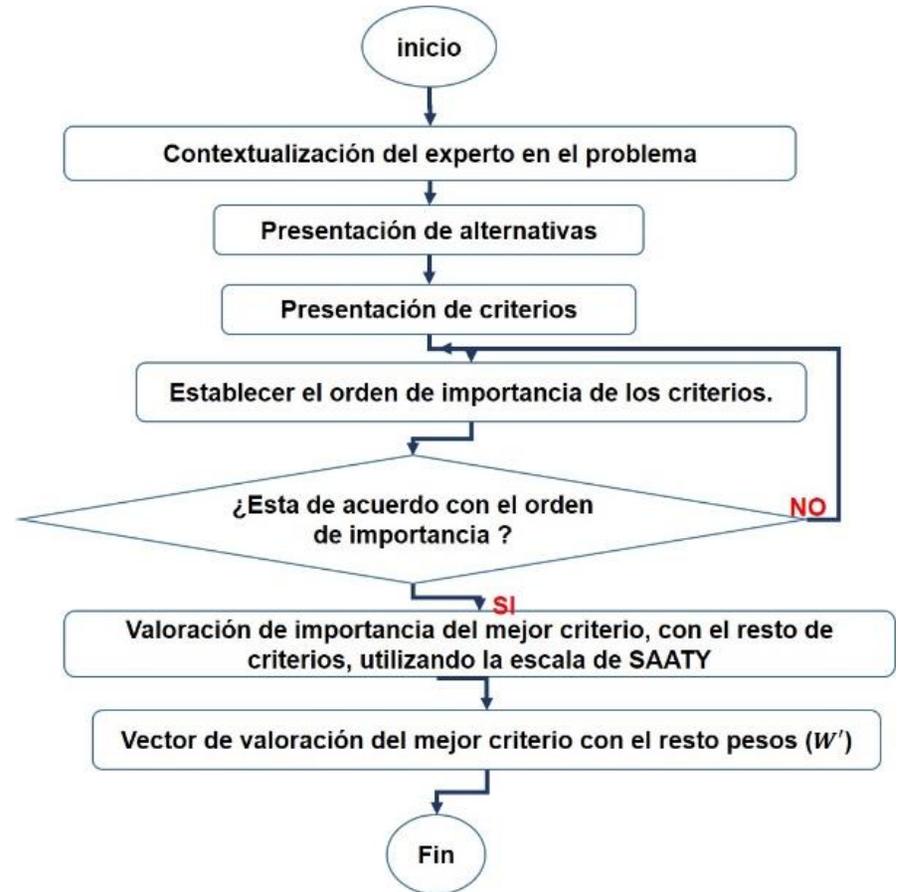


Figura 4.9. Diagrama de flujo para obtener el orden de prioridad entre criterios, esto se debe realizar con cada



Figura 4.10. Resumen funcional del algoritmo AHP unión RIM programado en el lenguaje de programación Python

La Figura 4.10, muestra a grandes rasgos las entradas y las salidas del programa desarrollado en Python, basado en la lógica del método AHP -RIM. El código completo se puede consultar en el anexo A1 de este trabajo de tesis.

CAPITULO 5. Caso de estudio

La evaluación de la sostenibilidad mediante el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), es un paradigma que se ha propuesto aplicar desde hace más de una década. La integración de otras metodologías o técnicas para enriquecer el ACV, es una práctica que ha cobrado más fuerza incluso del año 2020, como así lo demuestran las recientes publicaciones [210]–[213].

A continuación, se desarrolla el caso de estudio que lleva por título: “Campus sustentables, hacia una producción y consumo sostenible en la Universidad Autónoma de Guerrero, en México”.

El desarrollo de este caso de estudio se basa en la combinación del ACV y los MDMC. Específicamente, en el esquema que plantea la Figura 4.7 del capítulo 4 de metodología de este trabajo de tesis. Los puntos que a continuación se desarrollan son los que marca la metodología propuesta en el capítulo de metodología de esta tesis (Figura 4.7).

5.1 Fase preliminar al ACV: Estructuración y construcción del entorno del problema.

5.1.1 Antecedentes y contextualización del problema

En México, el mix energético está compuesto principalmente de recursos fósiles. Según datos de la Secretaría de Energía (SENER), el porcentaje de la demanda energética que cubren las energías renovables, escasamente llega al 31 %, de este porcentaje la energía solar cubre un poco más del 4%. Los sectores con mayor responsabilidad de consumo energético son: transporte (46.5 %), industrial (31.8 %) y residencial , comercial y público (18.1 %)[214]. Dentro del sector comercial y público existe un grupo importante a destacar; el de las universidades. Estas pueden jugar un papel importante en la mitigación del cambio climático, ya que son entidades que deben tomar la iniciativa en su calidad de instituciones formadoras de profesionales conscientes de cara al futuro. Por ejemplo, en Estados Unidos tres universidades han puesto en marcha la transición energética, a día de hoy funcionan con energía renovable. La justificación es simple; mostrar que cualquier esfuerzo generará un impacto real en el uso de los recursos.

En lo que respecta a México, solo tres universidades han llevado a cabo acciones y consolidados proyectos que impacten en el uso de energías limpias. La universidad de Mexicali, en Baja California Sur, con una inversión de 1.7 millones de dólares, instaló una de las granjas solares más grandes de América Latina, lo que le ha permitido funcionar en un 50% con energía solar. Esto lo ha logrado a pesar de que el consumo energético estudiantil ha aumentado drásticamente a 23.76 kWh/año en los últimos años. En general, este aumento se debe a la implementación de material de laboratorios, al uso de tecnologías emergentes y, en particular, a los malos hábitos de consumo energético [214].

Otro ejemplo es la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), situada en el estado de Guerrero al sur de México (Figura 5.1), que ha emprendido el camino hacia la transición energética de sus 48 Campus Universitarios (CU). El planteamiento consiste en la instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV) teniendo como principal contribuidor a INTRUST -Empresa Canadiense, dedicada a la venta de paneles e instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV)-. El objetivo es independizar a la UAGro de la Comisión de electricidad (CFE), que actualmente es el único proveedor de energía eléctrica en el país.

Que la UAGro logre una transición energética total, es decir que sus 48 campus universitarios operen con energía renovable y así, contar con campus universitarios sustentables (CUS), es su objetivo final. Sin embargo, como es de suponer, lograr un objetivo tan ambicioso obliga a dividir en objetivos parciales.

Primero se considera que no todos los CU tienen las mismas condiciones y prioridades. Esto se refiere a que los campus, cuya ubicación esté situada en un área rural tienen una prioridad sobre el resto.

Lo que precede, nos lleva al Proyecto de Regionalización [215] de la UAGro. Este proyecto está constituido por 6 campus universitarios, distribuidos en las 7 regiones del estado de Guerrero (Figura 5.2), específicamente en zonas rurales y de difícil acceso. El objetivo es dar atención a las comunidades indígenas y marginadas del estado, en las que se ha demostrado que existe una alta pobreza energética [216]-[218].

La generación de campus universitarios sustentables, es el primer paso para iniciar

una transición energética y así, figurar en el grupo de las universidades en el país con acciones en proporcionar soluciones a combatir el cambio climático. Además, participar en el “*Green metric world university ranking*” impulsado por la universidad de Indonesia [219].

Basados en la premisa anterior y sobre la serie de estudios de viabilidad que se han realizado sobre este contexto, se ha reducido el conjunto de campus universitarios. En una primera fase se ha propuesto la transición a campus sustentables, pero solo de aquellos CU que integran el Proyecto de Regionalización. Sin embargo, la situación actual de inseguridad en México en zonas rurales [220], [221], la extensión territorial y las distancias tan largas entre uno y otro CU, son factores que limitan y sólo hay condiciones de viabilidad para iniciar en 3 de los 6 CU ((Figura 5.2).

Entonces, sin pérdida de generalidad, aun cuando se ha reducido el conjunto de CU para iniciar, no es posible iniciar las instalaciones de los SFV de manera simultánea. Por tanto, es útil determinar una prioridad de instalación, basada en criterios que aborden una evaluación multidimensional de la sostenibilidad de los SFV en general.

5.1.2 Planteamiento del problema

Iniciar la instalación de SFV, en los campus que integran el proyecto de regionalización, presenta dos inconvenientes:



Figura 5.1. Geografía de la Uagro



Figura 5.2. Campus Universitarios seleccionados para instalar los SFV

1. Por cuestiones de seguridad y distancias territoriales, no es posible acceder a todos los campus para realizar las instalaciones fotovoltaicas. Las condiciones actuales, permiten considerar solo tres de los seis campus: Costa chica (ubicado al

sur del estado de Guerrero), Llano largo (zona centro) y Montaña (zona alta) (Figura 5.2).

2. Centrados solo en los tres CU seleccionados, tanto el recurso económico como el humano, no permiten la instalación simultanea de los SFV. Se llegará a la instalación total de los SFV en todos los campus seleccionados, pero deben realizarse de manera escalonada.

5.1.3 Identificación del objetivo del estudio

Proponer un orden de instalación de los SFV, esto mediante la evaluación de la sostenibilidad de su ciclo de vida, utilizando la metodología hibrida: ACV y (AHP-RIM) desarrollada en el lenguaje de programación Python (Figura 4.7, del capítulo 4). Todo lo anterior da inicio a la transición energética a CUS en la UAGro.

5.1.4 Matriz de emplazamientos (SFV)

Durante los meses de febrero, marzo y abril del 2021, se realizaron visitas y se desarrolló el trabajo de campo correspondiente en cada CU involucrado; se sostuvieron reuniones con los directivos, con el consejo de unidad, al mismo tiempo que fueron identificados posibles expertos involucrados en el problema.

Después, para cada campus visitado, se levantó la documentación que plantea el diagrama de la Figura 4.8, que se refiere al diagrama de la BD de emplazamientos, este diagrama indica que se deben construir 3 tablas de datos, a continuación, se describe cada una de ellas:

- *Campus Universitarios*: la estructura de esta tabla define los siguientes campos; ID, dirección, curvas de irradiancia, curvas de temperatura, demanda energética y patrones de consumo
- *Sistemas Fotovoltaicos*: ID, potencia, área ocupada, energía producida, % energía cubierta, tipo de zona, y obra civil requerida, son los campos indicados a desarrollar en esta tabla.
- *Matriz de emplazamientos*: esta tabla concentra los datos de las dos tablas anteriores, además del campo descripción y ubicación geográfica.

En términos generales, el diagrama que cita la Figura 4.8, establece que para cada CU pueden ser identificados uno o más emplazamientos para instalar SFV. Con esta base, se crearon las tres tablas que indica este diagrama.

Primero se creó la tabla “*Campus Universitarios*”, definiendo los tres campus involucrados, campus universitario de Cruz Grande, con el **ID: CU-CCH**, campus universitario Montaña con el **ID: CU-MON** y campus universitario Llano Largo con el **ID: CU-LLL**. Los valores de esta tabla, en su mayoría son gráficas y se presentan en la Tabla 5.1. En esta tabla, es importante destacar una peculiaridad; para construir el campo referente a *Patrones de consumo*, se recogieron datos durante un mes, con una bitácora diseñada en Excel para este fin (esta se puede revisar en los anexos de esta tesis). Este registro se realizó por áreas, se identificaron las áreas de un CU en general, y se propuso una clasificación de áreas como se muestra en la Tabla 5.2., a esta clasificación hace referencia la gráfica del campo *Patrones de consumo* de la Tabla 5.1.

Seguido se creó la tabla “*Sistemas Fotovoltaicos*”, se identificaron en total 6 emplazamientos para instalar los SFV, dos en cada CU: dos en el campus de la Costa chica (CU-CCH), dos en el de Llano largo (CU-LLL) y dos en el campus de la Montaña (CU-MON). Cada instalación fue diseñada para ser interconectada a la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La Tabla 5.3 muestra los valores de cada campo para esta tabla, es decir, se detallan la potencia, el área ocupada, la energía producida y el tipo de zona y obra civil, en total son 6 registros los que presenta, uno para cada SFV.

Por último, para cada CU de la tabla “*Campus Universitario*” se registraron 2 SFV en la tabla “*Sistemas fotovoltaicos*”, es decir, es la unión de las dos tablas (Tabla 5.1 y Tabla 5.3) esto da lugar a la tabla “*Matriz de emplazamientos*” (Tabla 5.4). El objetivo es mostrar en una sola tabla, información de ambas a través de sus ID’s.

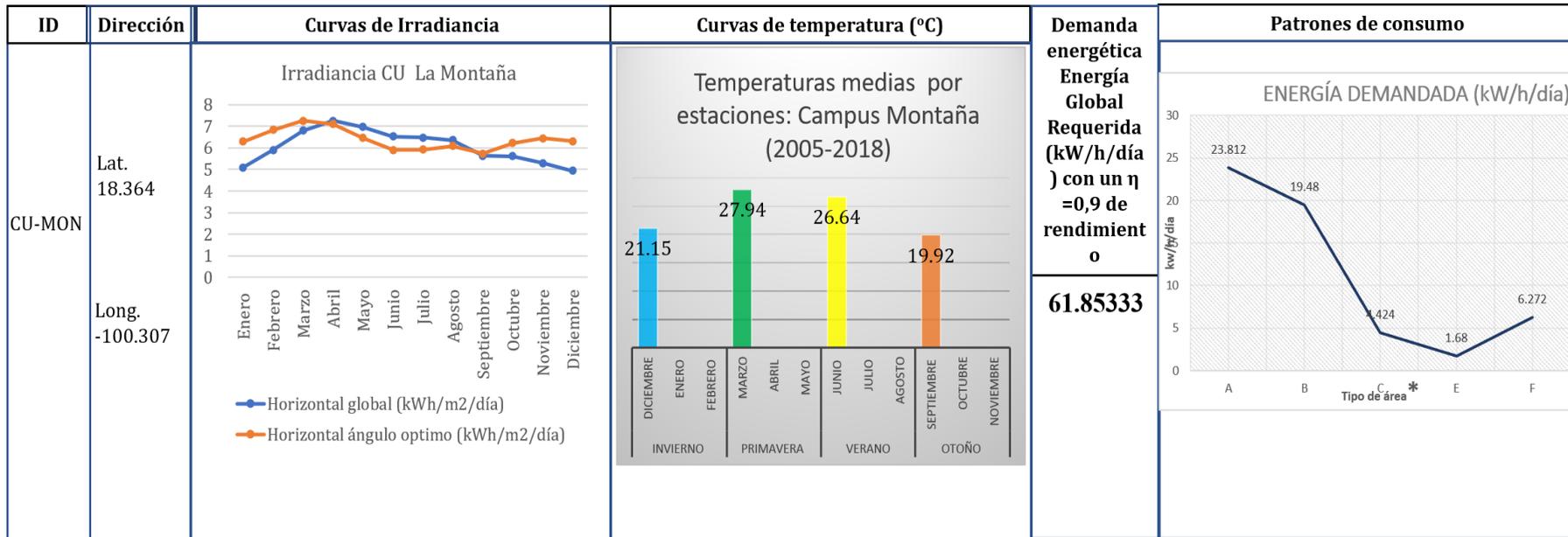
En general, guardar información bajo estos estándares, garantiza una desagregación de datos que trae ventajas a la hora de agregar o borrar algún registro. Este control de registros es bastante útil en términos informáticos, y específicamente en el diseño y creación de bases de datos. Permite llevar un registro ordenado y tipificado con nomenclaturas fáciles de manejar, especialmente cuando se maneja un gran conjunto de información.

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Tabla 5.1. Tabla *Campus Universitario* registrados, basada en la estructura del diagrama correspondiente a la Figura 4.8.

ID	Dirección	Curvas de Irradiancia	Curvas de temperatura (°C)	Demanda energética Energía Global Requerida (kW/h/día) con un $\eta = 0,9$ de rendimiento	Patrones de consumo																								
CU-CCH	Lat. 16.734145 Long. -99.129669	<p style="text-align: center;">Irradiancia CU Costa Chica</p> <p style="text-align: center;">— Horizontal global (kWh/m2/día) — Horizontal ángulo optimo (kWh/m2/día)</p>	<p style="text-align: center;">Temperaturas medias por estaciones: Campus Costa Chica (2005-2018)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th>Temporada</th> <th>Temperatura (°C)</th> </tr> <tr> <td>INVIERNO</td> <td>26.77</td> </tr> <tr> <td>PRIMAVERA</td> <td>27.6</td> </tr> <tr> <td>VERANO</td> <td>28.1</td> </tr> <tr> <td>OTOÑO</td> <td>27.8</td> </tr> </table>	Temporada	Temperatura (°C)	INVIERNO	26.77	PRIMAVERA	27.6	VERANO	28.1	OTOÑO	27.8	424.93	<p style="text-align: center;">ENERGÍA DEMANDADA (kW/h/día)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th>Tipo de área</th> <th>Energía Demandada (kW/h/día)</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>123.966</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>70.608</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>112.368</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>96</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>17.6</td> </tr> </table>	Tipo de área	Energía Demandada (kW/h/día)	A	123.966	B	70.608	C	112.368	D	96	F	17.6		
		Temporada	Temperatura (°C)																										
INVIERNO	26.77																												
PRIMAVERA	27.6																												
VERANO	28.1																												
OTOÑO	27.8																												
Tipo de área	Energía Demandada (kW/h/día)																												
A	123.966																												
B	70.608																												
C	112.368																												
D	96																												
F	17.6																												
CU-LLL	Lat. 16.835 Long. -99.809	<p style="text-align: center;">Irradiancia CU Llano largo</p> <p style="text-align: center;">— Horizontal global (kWh/m2/día) — Horizontal ángulo optimo (kWh/m2/día)</p>	<p style="text-align: center;">Temperaturas medias por estaciones: Campus Llano Largo (2005-2018)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th>Temporada</th> <th>Temperatura (°C)</th> </tr> <tr> <td>INVIERNO</td> <td>26.95</td> </tr> <tr> <td>PRIMAVERA</td> <td>28.34</td> </tr> <tr> <td>VERANO</td> <td>28.13</td> </tr> <tr> <td>OTOÑO</td> <td>27.68</td> </tr> </table>	Temporada	Temperatura (°C)	INVIERNO	26.95	PRIMAVERA	28.34	VERANO	28.13	OTOÑO	27.68	1839.3627	<p style="text-align: center;">ENERGÍA DEMANDADA (kW/h/día)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th>Tipo de área</th> <th>Energía Demandada (kW/h/día)</th> </tr> <tr> <td>A</td> <td>638.988</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>670.0025</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>242.496</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>6.04</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>46.8</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>51.1</td> </tr> </table>	Tipo de área	Energía Demandada (kW/h/día)	A	638.988	B	670.0025	C	242.496	D	6.04	F	46.8	G	51.1
Temporada	Temperatura (°C)																												
INVIERNO	26.95																												
PRIMAVERA	28.34																												
VERANO	28.13																												
OTOÑO	27.68																												
Tipo de área	Energía Demandada (kW/h/día)																												
A	638.988																												
B	670.0025																												
C	242.496																												
D	6.04																												
F	46.8																												
G	51.1																												

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO



CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

***Tabla 5.2.** Código de tipo de áreas para tipificar el consumo energético en los campus universitarios.

Código de tipo de áreas	
Código	Descripción
A	Se etiquetan como áreas de tipo “A”, las oficinas o lugares <i>administrativos</i> tales como: dirección, secretaria, administraciones generales, etc.
B	Se etiquetan como áreas de tipo “B” aquellas estancias, que tienen la función de <i>formación académica</i> , tales como: salones de clases, aula de medios, bibliotecas, centros de cómputo.
C	Se etiquetan como áreas de tipo “C” aquellas estancias designadas para <i>investigación</i> tales como laboratorios, área de prácticas, etc.
D	Se etiquetan como áreas de tipo “D” aquellas estancias designadas para <i>trabajo de campo</i> , tales como áreas de cultivo, áreas de secado, áreas de producción intensiva de algún producto (huevo, conejo, fertilizantes, mermeladas, etc.) normalmente son a campo abierto.
E	Se etiquetan como áreas de tipo “E” aquellas estancias designadas para <i>recreación</i> tales como canchas deportivas, zona de juegos, etc.
F	Se etiquetan como áreas de tipo “F” aquellas estancias designadas para <i>comunes</i> tales como pasillos, patios, salas de espera, etc.
G	Se etiquetan como áreas de tipo “G” aquellas estancias designadas para <i>servicios</i> tales como cafetería, papelería, etc.

Tabla 5.3. Tabla *Sistemas Fotovoltaicos* dimensionados para los tres CU involucrados de la tabla 5.1

ID	Potencia (kWp)	Área ocupada (m ²)	Energía producida (kWh/día)	Energía cubierta (%)	Tipo de zona (según tabla 4.3)	Obra civil requerida
01	44	252	221.5	52	Z1	Zapatas de concreto prefabricadas.
02	32	200	162.5	38	Z2	Estructura sencilla vertical de aluminio
03	44	252	233.2	100	Z1	Zapatas de concreto prefabricadas.
04	32	215	169.6	100	Z2	Estructura sencilla vertical de aluminio
05	44	252	221.32	12	Z1	Zapatas de concreto prefabricadas.
06	32	240	160.96	9	Z2	Estructura sencilla vertical de aluminio

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Tabla 5.4 Matriz de emplazamientos (unión de las tablas 5.1 y 5.3 por medio de sus ID)

ID universitario	Campus	ID Sistema Fotovoltaico	Descripción	Ubicación gráfica
CU-CCH		01	SFV instalado sobre los techos de los edificios A y B del CU. Este sistema requiere de una obra civil extra como zapatas de concreto prefabricado para cada ristra con estructuras de acero de aluminio.	
CU-CCH		02	SFV instalado en una techumbre entre el edificio A y B, para esto se requiere como base una estructura de metal, cuya función principal es la techumbre y sobre esta montar los paneles, esta techumbre se encontrará en la explanada principal del campus.	
CU-MON		03	SFV instalado sobre los techos de los edificios A y B del CU. Este sistema requiere de una obra civil extra como: zapatas de concreto prefabricado para cada ristra, con estructuras de acero de aluminio.	
CU-MON		04	En el ala lateral del edificio A, se propone construir un parking superponiendo los paneles.	
CU-LLL		03	Se propone instalar paneles sobre los techos de los edificios, 11 son los edificios disponibles para este fin, sin embargo, se consideran las zonas libres de sombras, esto es debido al modelo de construcción.	
CU-LLL		04	Se dimensiono el SFV para montar paneles en una cancha de basquetbol ya construida, se consideró solo la superficie disponible y libre de sombras ya que el campus se encuentra en una zona conurbana.	

5.1.5 Matriz de expertos involucrados

Se integró a este caso de estudio un panel de expertos y tomadores de decisiones. Estos fueron seleccionados de entre todos los involucrados en el proyecto de regionalización (ver Figura 5.3) y tomadores de decisiones de la UAGro. Su elección se sujetó a su perfil, experiencia, conocimiento sobre la problemática, pertinencia y disponibilidad en torno al proyecto.

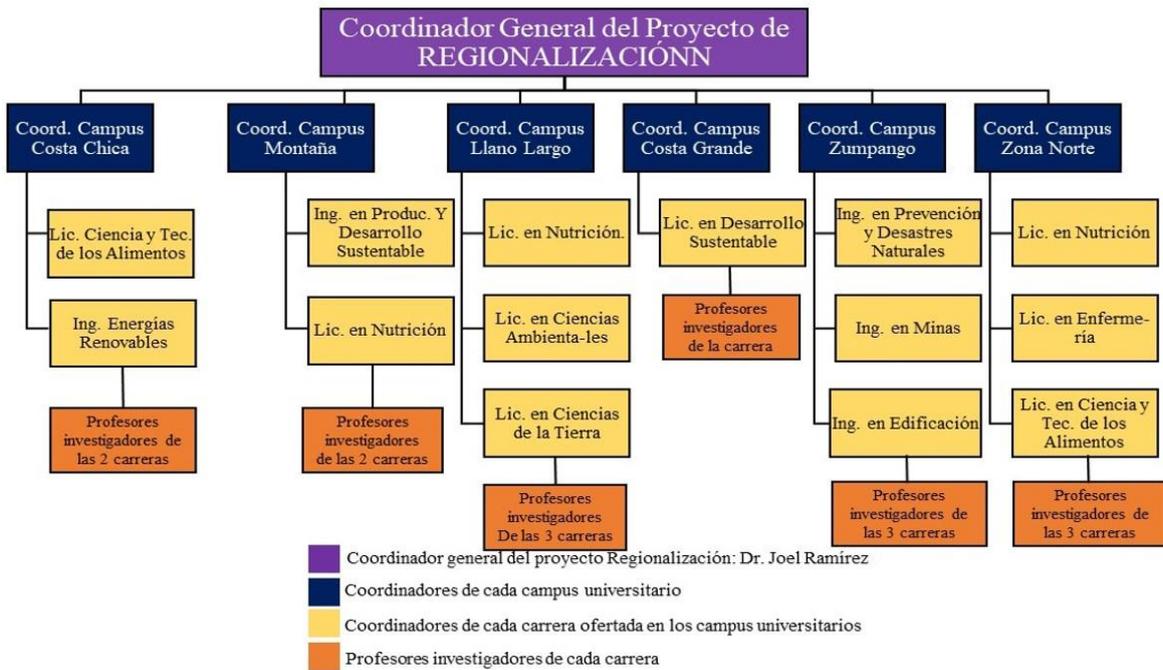


Figura 5.3. Estructura organizacional del proyecto de regionalización en la UAGRO.

En un último análisis, se integró un equipo de cinco expertos, cuyos perfiles se describen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Matriz de expertos que relaciona perfiles y procedencia

ID	Perfil	Procedencia y pertinencia
E1	Dr. En energías renovables, especialista en fotovoltaica	Campus Costa chica
E2	Mtro., en ingeniería, aplicación de tecnologías emergentes a la producción de energías limpias.	Campus Costa chica
E3	Coordinador general del proyecto regionalización	Rectoría, UAGro.
E4	Coordinador General del Campus Costa chica, gestor y coordinador del proyecto: “Campus sustentables en la UAGro”	Campus Costa chica
E5	Directora general del área de sostenibilidad (UAGro-verde)	Rectoría, UAGro.

5.2 Metodología del ACV

Se ha considerado para cada registro de la Tabla 5.4, la evaluación del ciclo de vida. Es decir, cada SFV es considerado como un sistema, donde se evalúan el ciclo de vida y se integran además los expertos de la Tabla 5.5.

5.2.1 Definición de metas y alcances

a) Se consideraron los 6 SFV de la matriz de emplazamientos (Tabla 5.4) como los sistemas a evaluar dentro de este estudio de ACV. El objetivo es evaluar la sostenibilidad multidimensional de cada SFV. Como unidad de referencia tenemos 1 SFV, con un alcance del estudio de la “*cuna a la puerta*”. Este tipo de ACV es un análisis intermedio del ciclo de vida del producto, ya que solo considera las entradas y salidas desde materias primas hasta distribución. Es decir, no considera los impactos del uso y deposición. Para cuestiones ambientales, se emplea la metodología ILCD, para finalmente centrarse solo en las emisiones de CO₂.

b) Cada SFV se evalúa bajo 14 criterios, descritos y propuestos en el capítulo de metodología de esta tesis (Tabla 4.2). En la siguiente tabla solo se presenta el tipo de evaluación realizada y el objetivo de cada criterio considerado.

Tabla 5.6. Criterios para evaluar los SFV

Dimensión	ID Criterio	Criterio	Tipo de dato	Objetivo
SOCIAL	SC1	Formación educativa	Cuantitativo	Maximizar
	SC2	Ocupación y perdida de áreas	Cuantitativo	Minimizar
	SC3	Riesgo en accidentes	Cuantitativo	Minimizar
	SC4	Influencia local del proyecto en la comunidad	Cuantitativo	Maximizar
ECONÓMICA	EC5	Costo inicial del SFV	Cuantitativo	Minimizar
	EC6	Costo manto. anual	Cuantitativo	Minimizar
	EC7	Retorno de inversión (TIR)	Cuantitativo	Minimizar
AMBIENTAL	AC8	Perfil ambiental	Cuantitativo	Minimizar
	AC9	EPBT	Cuantitativo	Minimizar
TÉCNICO	TC10	Potencia SFV	Cuantitativo	Maximizar
	TC11	Factibilidad (tiempo despliegue)	Cuantitativo	Minimizar
	TC12	% demanda energética cubierta	Cuantitativo	Maximizar
POLÍTICO	PC13	Apoyo por órganos universitarios	Cualitativo	Maximizar
	PC14	Participación en convocatorias de proyectos tecnológicos	Cualitativo	Maximizar

En esta fase del ACV se desarrolló el proceso de establecer prioridades entre criterios. Es decir, cada experto se sometió a la evaluación de los criterios, para así proporcionar un vector con un orden de prioridad de los criterios. Ello sin perder el objetivo del estudio, que es establecer un orden prioridad de instalación de los SFV.

c) El método multicriterio **AHP**, fue seleccionado para permitir que el tomador de decisiones determine la influencia de cada criterio en un proceso de jerarquía. En general, se realizó una comparación de pares de todos los criterios en cada nivel de la jerarquía. Para este caso:

Primero se aplicó la encuesta, cuya lógica está basada en el diagrama de flujo de la Figura 4.9, con esto se obtuvieron los vectores de prioridades entre criterios de cada experto (Tabla 5.7)

Tabla 5.7. Orden de prioridad entre criterios que estableció cada experto, según la encuesta aplicad de la Figura 4.9

ID Exp	Orden de prioridad entre criterio, según cada experto													
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
E1	TC12	PC13	EC5	EC6	TC11	TC10	EC7	SC2	AC8	SC1	PC14	AC9	SC3	SC4
E2	EC5	TC12	SC1	TC10	EC6	PC14	TC11	AC8	SC2	EC7	PC13	SC3	AC9	SC4
E3	TC10	EC7	EC5	EC6	AC8	SC4	SC2	SC1	AC9	TC12	PC13	SC3	PC14	TC11
E4	EC5	TC12	TC10	EC6	EC7	SC1	SC3	TC11	AC9	AC8	SC2	SC4	PC14	PC13
E5	EC5	EC6	TC12	TC10	EC7	SC1	SC3	PC13	PC14	AC9	TC11	AC8	SC2	SC4

Segundo, de la Tabla 5.7, se obtuvieron los vectores de peso para cada experto en los 14 criterios considerados. Esto significa que, para el caso del primer experto, que consideró el criterio técnico (TC12) como el más importante, ahora en una siguiente fase, este debe establecer qué tan importante es con respecto al segundo, tercero y el ultimo más importante. En este paso, se hizo uso de una escala numérica basada en la escala de SAATY (ver Tabla 5.8), esta numeración pondera la importancia de un criterio sobre otro.

Se aplicó este proceso a cada experto, y finalmente se obtuvieron los vectores de

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

pesos para cada criterio, según cada experto. La Tabla 5.9, muestra los pesos que obtuvo cada criterio.

Una apreciación rápida que se puede dar, es que la mayoría de los expertos se inclinaron por priorizar los aspectos económicos y técnicos. Los aspectos ambientales se mostraron lejos de ser prioridades en este caso.

Tabla 5.8. Escala de valoración entre criterios, según SAATY

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente, preferida	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro
7	Preferencia muy fuerte o demostrada	Un elemento es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extremadamente preferida	Preferencia clara y absoluta de un criterio sobre otro.
2,4,6,8		Intermedia entre valores anteriores

Tabla 5.9. Pesos de los criterios, según cada experto, en verde el criterio con el peso más importante según cada experto, en azul el segundo más importante y en rojo el tercero más importante.

ID Criterios	PESOS, SEGÚN CADA EXPERTO				
	E1	E2	E3	E4	E5
SC1	0.03622	0.10734	0.04139	0.04420	0.06025
SC2	0.04139	0.03067	0.05795	0.02763	0.02678
SC3	0.03220	0.02684	0.03220	0.04420	0.04820
SC4	0.03220	0.02385	0.05795	0.02763	0.02678
EC5	0.09659	0.21469	0.09659	0.22101	0.24099
EC6	0.09659	0.07156	0.09659	0.07367	0.12049
EC7	0.05795	0.03067	0.09659	0.07367	0.08033
AC8	0.03622	0.04294	0.05795	0.03157	0.03012
AC9	0.03220	0.02385	0.03622	0.03157	0.03443
TC10	0.05795	0.07156	0.28976	0.11051	0.08033
TC11	0.05795	0.04294	0.03220	0.04420	0.03443
TC12	0.28976	0.21469	0.03622	0.22101	0.12049
PC13	0.09659	0.02684	0.03622	0.02456	0.04820
PC14	0.03622	0.07156	0.03220	0.02456	0.04820

5.2.2 Análisis de inventario

El inventario comprende el registro de entradas y salidas del sistema que se está analizando; en este caso los 6 SFV. La construcción del inventario de un SFV incluye la entrada de materiales y energía, así como las salidas, que pueden ser otros procesos u otros subsistemas (Figura 5.4).

Entonces, el balance de carga ambiental de un sistema, viene dado por la sumatoria de todas sus entradas, menos las cargas que corresponden a los subproductos salientes.

Basados en la lógica del diagrama de la Figura 5.4, se construyó el inventario para cada SFV. Seis son los procesos principales que se crearon para este inventario: SFV, BOS, MODULOS, OBRA CIVIL, PLACAS DE HORMIGON Y M³ DE CEMENTO PREMEZCLADO.

El diagrama general de la Figura 5.5, fue la plantilla para construir el inventario final de cada uno de los seis sistemas. En dicho diagrama se puede observar que el SFV es el proceso que consume el resto. Dependiendo de la configuración de cada SFV irán variando los valores y los procesos.

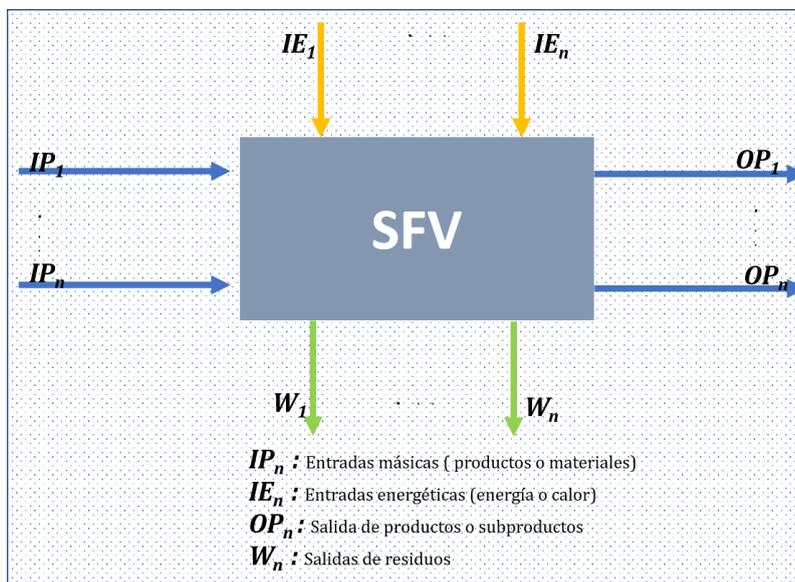


Figura 5.4. Estructura general de un SFV, registro de entradas y salidas

. Se destaca que se presenta un inventario para dos tipos de potencias en sistemas: 22kWp y 32 kWp. El inventario del sistema de 22 kWp se duplicó para obtener los impactos de un sistema de 44 kWp. Como se mencionó en la Tabla 5.4, este sistema se sitúa sobre los edificios A y B.

Si se observa detenidamente, cada CU tiene asignado un SFV de 44 kWp y otro de 32 kWp. En lo que respecta a los de potencia 44kWp, presentan exactamente la misma configuración; pues los tres campus cuentan con los edificios análogos estructuralmente. Por otro lado, en lo que respecta a los SFV con potencia de 32 kWp, sí que hay una variación en cuanto a las configuraciones, lo cual impacta visiblemente a la hora de elaborar el inventario; puesto que algunos requieren obra civil y otros no, por ejemplo.

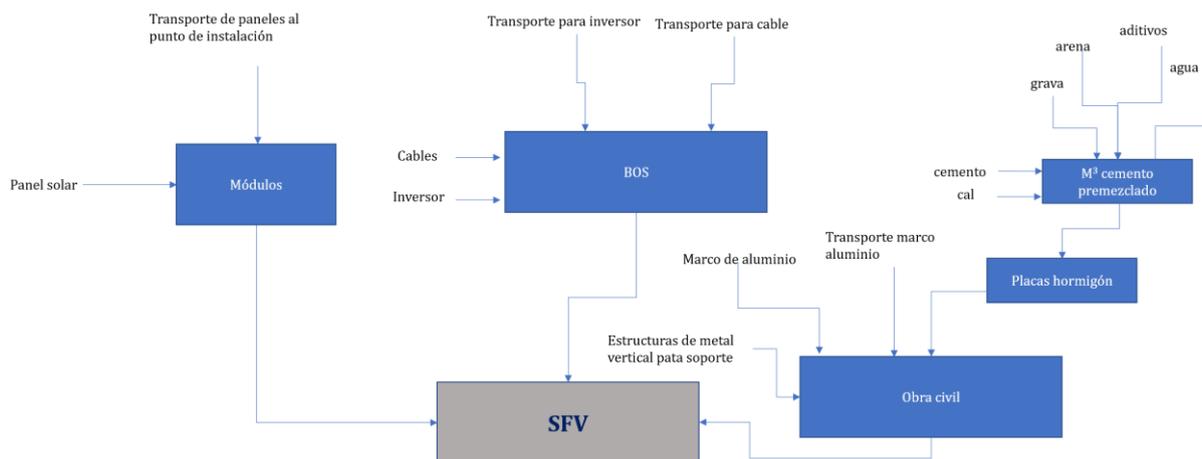


Figura 5.5. Procesos principales de los SFV para crear el inventario.

En general, las tablas 5.10A a la 5.10F describen en detalle los procesos de cada SFV

Tabla 5.10A. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-CCH01

IDSFV:CU-CCH01		U. Referencia: SFV de 22kWp, montado sobre el edificio A			
Procesos		Entradas			
MÓDULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios	
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	63	Pza	19 kg, 350 kw	
Transporte al punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	1815	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)	
BOS					
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza		
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	980	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m	
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	62	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)	
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1486	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)	
OBRA CIVIL					
Estructura metal para soporte de paneles	Flat roof construction, on roof, RER, [m ²]	90.09	m ²		
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K	86	m ²		
Placas de anclaje de hormigón	Concrete production zomp a RNA only	22.25	m ³	Proceso: m ³ cemento premezclado	
Transporte marco aluminio	Transport, van <3.5t/RER U	17	ton/km	Ruta: Guadalajara-Cruz Grande (627 km)	
M³ cemento premezclado					
Cemento		206	kg		
Agua		123	kg		
grava		1100	kg		
Arena		910	kg		
Cal		69	kg		

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Aditivos		1.2	kg	
----------	--	-----	----	--

Tabla 5.10B. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-CCH02

IDSFV:CU-CCH02	U. Referencia: SFV de 32kWp, montado sobre la techumbre entre edificio A y B			
Procesos	Entradas			
MÓDULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	100	Pza	19 kg, 350 kw
Transporte al punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	2880.04	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)
BOS				
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza	
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	1619	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	62.156	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1688.066	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1516 km)
OBRA CIVIL				
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K	143	m ²	
Transporte marco aluminio	Transport, van <3.5t/RER U	27.52	ton/km	Ruta: Guadalajara-Cruz Grande (627 km)

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Tabla 5.10C. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-MON03

IDSFV:CU-MON03		U. Referencia: SFV de 22kWp, montado sobre el edificio A			
Procesos		Entradas			
MÓDULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios	
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	63	Pza	19 kg, 350 kWp	
Transporte al punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	1380	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)	
BOS					
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza		
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	1113	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m	
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	47	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)	
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1284	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)	
OBRA CIVIL					
Estructura vertical de metal para soporte de paneles	Flat roof construction, on roof, RER, [m2]	90.09	m ²		
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K	86	m ²		
Placas de anclaje de hormigón	Concrete production zomp a RNA only	22.25	m ³	Proceso: m ³ cemento premezclado	
Transporte marco aluminio	Transport, van <3.5t/RER U	22	ton/km	Ruta: Guadalajara-Huamuxtitlan (826.6 km)	
M³ cemento premezclado					
Cemento		206	kg		
Agua		123	kg		
grava		1100	kg		
Arena		910	kg		
Cal		69	kg		
Aditivos		1.2	kg		

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Tabla 5.10D. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-MON04

IDSFV:CU-MON04		U. Referencia: SFV de 32kWp, parking en el ala A del edificio.		
Procesos		Entradas		
MÓDULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	100	Pza	19 kg, 350 kWp
Transporte punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	2190.7	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)
BOS				
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza	
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	1619	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	47.27	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1288.86	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Huamuxtitlan (1153 km)
OBRA CIVIL				
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K	143	m ²	
Vigas de acero		180	m	
Zapatas de hormigón	Concrete production zomp a RNA only (Proceso: m ³ cementos premezclado)	32	m ³	
Transporte vigas de acero		25.45	ton/km	Ruta: Edo. México-Huamuxtitlan (385) (12 m =626 kg)
Transporte marco aluminio	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	27.52	ton/km	Ruta: Guadalajara-Huamuxtitlan (627 km)
M³ cemento premezclado				
Cemento		206	kg	
Agua		123	kg	
grava		1100	kg	
Arena		910	kg	
Cal		69	kg	
Aditivos		1.2	kg	

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

Tabla 5.10E. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-LLL05

IDSFV:CU-LLL05	U. Referencia: SFV de 22kWp, sobre el techo de los edificios.			
Procesos	Entradas			
MÓDULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	63	Pza	19 kg, 350 kWp
Transporte al punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	1728	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Llano Largo (1443 km)
BOS				
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza	
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	1113	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	59	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Llano Largo (1443.06 km)
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1607	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Llano Largo (1443.06 km)
OBRA CIVIL				
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K	86	m ²	
Estructura vertical de metal para soporte de paneles	Flat roof construction, on roof, RER, [m ²]	90.06	m ²	
Zapatas de hormigón	Concrete production zomp a RNA only	22.5	m ³	
Transporte marco aluminio	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	24	ton/km	Ruta: Guadalajara-Llano Largo (915.2km)
M³ cemento premezclado				
Cemento		206	kg	
Agua		123	kg	
grava		1100	kg	
Arena		910	kg	
Cal		69	kg	
Aditivos		1.2	kg	

Tabla 5.10F. Análisis de inventario del sistema fotovoltaico: CU-LLL06

IDSFV:CU-LLL06		U. Referencia: SFV de 32kWp, montado sobre una cancha de basquetbol			
Procesos		Entradas			
MODULOS	Procesos (Ecoinvent)	Cantidad	U. medida	Comentarios	
Panel solar	Photovoltaic panel, multi-Si wafer {GLO} market for Conseq, U	100	Pza	19 kg, 350 kwp	
Transporte al punto de instalación	Transport, van <3.5t/RER U	21178.9	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Llano Largo (1146.4 km)	
BOS					
Inversor	Inverter, 20kW {RoW} production Conseq, U-EditL&V---> Modificado de Inverter, 500kW {RER} production Conseq, U	1	Pza		
Cable	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm ² EU-15 S	1619	kg	1.5 mts de cable por fila, 7.32 kg /m	
Transporte inversor	Transport, van <3.5t/RER U	62.156	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Llano Largo (1146 km)	
Transporte cable	Transport, van <3.5t/RER U	1276	ton/km	Ruta: Tamaulipas-Cruz Grande (1146 km)	
OBRA CIVIL					
Marco de aluminio para montaje	Market for window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K	143	m ²		
Transporte marco aluminio	Transport, van <3.5t/RER U	47	ton/km	Ruta: Guadalajara-Llano Largo (627 km)	

5.2.3 Evaluación de impactos

En este apartado se muestra la evaluación de los impactos de cada criterio para cada SFV, en lo que se conoce como matriz de valoración (Tabla 5.11). Cada grupo de criterios se ajustó a sus propios recursos para su evaluación, como se marcó en el esquema de la Figura 4.7 - que representa la metodología de este caso de estudio-.

Las cuestiones sociales se midieron con el panel de expertos, y con bibliografía; las económicas con los métodos que vienen establecidos en la literatura, y con los métodos de calculo que se plantearon en la batería de indicadores de la Tabla 4.2, del capítulo anterior. Para las cuestiones ambientales se usó la metodología ILCD del ACV.

Finalmente, los técnicos y políticos se evaluaron por medio del panel de expertos y con bibliografía.

Si analizamos la Tabla 5.11, los criterios de carácter político (PC13 y PC14) fueron evaluados con etiquetas lingüísticas. Esto se especificó desde un principio en la caracterización de los indicadores.

Tabla 5.11. Matriz de valoración de todos los criterios con respecto a cada SFV

SFV	ID CRITERIOS													
	SC1	SC2	SC3	SC4	EC5	EC6	EC7	AC8	AC9	TC10	TC11	TC12	PC13	PC14
CU-CCH01	68	0	17	3	61792	3089	6	0.44	5	44	3	52	Medio bajo	Medio bajo
CU-CCH02	68	200	22	2	50756	2537.7	6.36	0.32	4	32	4	38	Medio bajo	Medio bajo
CU-MON03	92	0	26	3	62373	3118.6	6.97	0.44	6	44	6	100	Medio	Medio
CU-MON04	92	215	29	2	49286	2464.32	7.57	0.32	5	32	5	100	Medio	Medio
CU-LLL05	0	0	24	5	61802	3090.12	5.6	0.44	5	44	3	12	Medio bajo	Medio bajo
CU-LLL06	0	240	37	3	61681	3084.04	7.9	0.32	6	32	4	9	Medio bajo	Medio bajo

5.2.4 Análisis de resultados

Resultados preliminares del ACV

Se obtuvo una matriz que proporciona las valoraciones de todos los SFV, con respecto a cada uno de los criterios (Tabla 5.11). Sin embargo, determinar cuál es el mejor sistema, en función del objetivo del estudio, es un desafío. En un ACV tradicional, solo se presentan resultados, es decir, sin sugerencias concretas hacia una toma de decisiones, basados en todos los criterios de sostenibilidad.

Hasta aquí, se cuenta con una evaluación numérica de cada sistema en todos los campos de la esfera de la sostenibilidad, pero no se puede cumplir con el objetivo de proporcionar un orden de instalación. Se pueden observar resultados aislados, es decir, que se puede saber cuál SFV es mejor en términos ambientales, o en términos sociales.

Pero definir un orden, considerando al mismo tiempo todos los aspectos de la sostenibilidad, es todo un reto si no se apoya en alguna técnica capaz de integrar todos los criterios considerados y así, determinar una jerarquía que establezca un ranking presentando la mejor opción.

Resultados con la participación del método AHP y RIM

Precediendo lo anterior, se retoman los metadatos del caso de estudio y ahora se cuenta con todos los elementos para modelar un problema de decisión multicriterio, y así guiar hacia una toma de decisiones, persiguiendo el objetivo inicial.

Para este caso particular, y como se marcó en la metodología de esta tesis (Figura 4.7), el método RIM se emplea para obtener un orden de instalación de los SFV, su papel solo es actuar como una técnica de apoyo, para enriquecer todo el proceso del ACV.

El procedimiento de la técnica híbrida multicriterio AHP - RIM, es puesto en un mismo marco, cuya lógica es desarrollada en el lenguaje de programación Python, dando paso al enfoque: **AHP unión RIM-Python**, como se muestra en el esquema de la Figura 5.6.

Primero, se empleó el método AHP para obtener la relevancia y el peso de cada criterio. Esto se calculó para cada experto del panel disponible; es decir, que se obtuvieron cinco vectores de peso como se expuso en la Tabla 5.9. Luego, se obtuvo una matriz de valoración, producto de la evaluación de las metodologías de evaluación de impactos del ACV, del panel de expertos y de los métodos que sugiere la bibliografía de la base de conocimientos (presentada en el capítulo 3 de esta tesis).

Por último, el método RIM proporciona un ranking de los SFV, que en lo sucesivo los llamaremos alternativas.

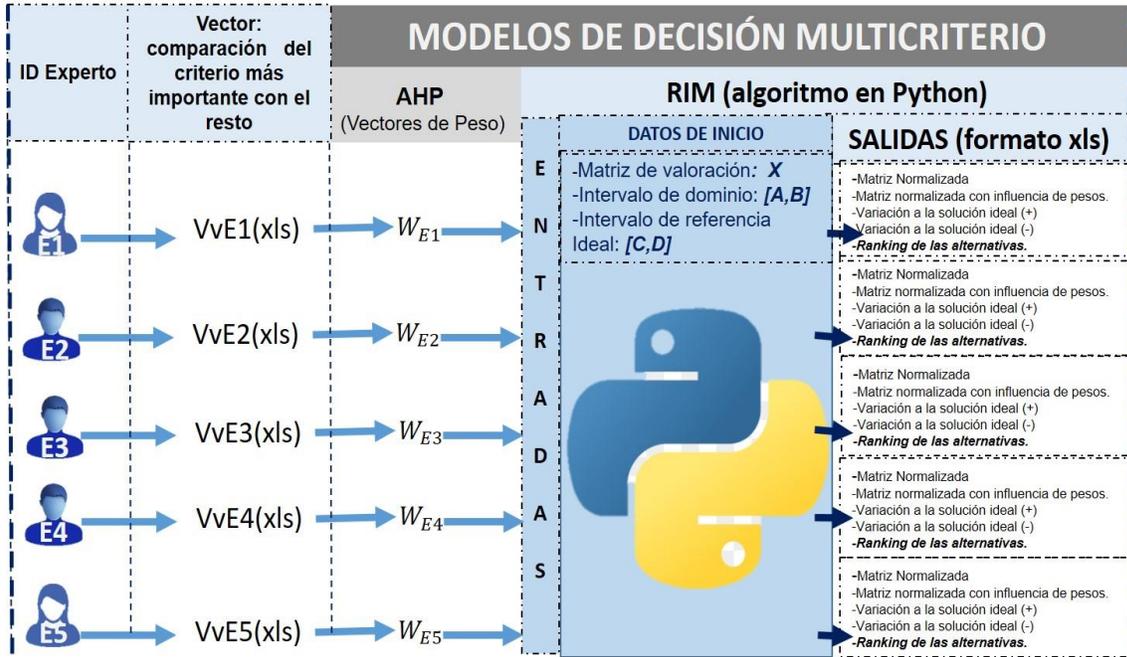


Figura 5.6. Modelado del problema de decisión según los métodos AHP (para la importancia de los criterios) y RIM para la influencia de los pesos y en ranking de alternativas)

Descripción funcional del algoritmo AHP unión RIM-Python (Figura 5.6)

En general, cada método es responsable de realizar sus tareas. **AHP**, aunque es el método empleado para establecer prioridades entre los criterios (Tabla 5.9) presenta un punto que resolver; no existe un acuerdo entre expertos sobre un vector final de pesos. Por ello, se calculó una media geométrica donde se agregaron las respuestas de los cinco expertos y estas respuestas se representaron en un solo vector, como se muestra más adelante.

En este punto también, la matriz de valoración presenta datos cuantitativos y cualitativos. Así pues, las valoraciones lingüísticas de los criterios PC13 y PC14, se tradujeron a una escala numérica establecida por SAATY (ver Tabla 5.12). De esta forma, se obtuvo una matriz de valoración (Tabla 5.11) actualizada, ahora con valoraciones numéricas completamente, aunque sin normalizar. A partir de este punto comienza el trabajo del método **RIM**.

Tabla 5.12. Etiquetas lingüísticas para valores cualitativos, según SAATY

Tipo de etiqueta lingüística	
Descripción	Valor
<i>Muy bajo</i>	0
<i>Bajo</i>	1
<i>Medio bajo</i>	3
<i>Medio</i>	5
<i>Medio alto</i>	7
<i>Alto</i>	9
<i>Muy alto</i>	10

El método **RIM** fue programado en el lenguaje de programación Python, bajo su lógica funcional expuesta en el capítulo del marco teórico de esta tesis.

En el algoritmo desarrollado, este requiere de dos entradas, una que se ingresa una sola vez, a la cual llamamos: “**entrada constante**”, y que hace referencia a los pasos 1 y 2 del método RIM, esto se refieren a:

- ✓ Matriz de valoración con evaluación numérica (tabla 5.11)
- ✓ Intervalo de dominio (tabla 5.13)
- ✓ Intervalo de referencia ideal (tabla 5.14)

Y la segunda entrada, denominada: “**entrada variable**”, esta varía dependiendo del vector de peso (W_{En}) de los criterios de cada experto, específicamente se refiere a:

- ✓ Vector de peso de cada experto: E1, E2, E3, E4, E5 (5 expertos)
- ✓ Vector de la manera agregada (incluye las respuestas de los 5 expertos)

Se ingresa al algoritmo un vector de peso a la vez (se puede apreciar un ejemplo en la Figura 5.7) y el programa, por cada vector ingresado, este proporciona las siguientes **salidas**, en formato xls (Las funciones y el código del algoritmo en general se pueden ver en el Anexo A1 de este trabajo de tesis)

- ✓ Matriz normalizada
- ✓ Matriz normalizada con influencia de pesos
- ✓ Variación a la solución ideal positiva (+)
- ✓ Variación a la solución ideal negativa (-)
- ✓ Ranking de las alternativas

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

```

#-----D A T O S   D E   I N I C I O-----
#
#Vector de pesos :CALCULADO CON AHP
#ENTRADA VARIABLE
#DATOS DEL EXPERTO
PE1=[0.060,0.026,0.048,0.026,0.240,0.120,0.080,0.030,0.034,0.080,0.034,0.120,0.048,0.048]
#-----DATOS INICIALES DEL METODO RIM-----
#ENTADA CONSTANTE
#INGRESE LOS VALORES DE LOS INTERVALOS
ICD=[[250,250],[1,1],[720,720],[0,0],[49286,61688],[0,0],[5,8],[0,0],[3,5],[44,44],[1,1],[100,100],[3,4],
IAC=[[0,250],[1,1],[0,720],[0,0],[49286,49286],[0,0],[1,5],[0,0],[1,3],[32,44],[1,1],[0,100],[1,3],[1,3]]
IDB=[[250,250],[1,3],[720,720],[0,10],[61688,61688],[0,1000],[8,20],[0,1000],[5,20],[44,44],[1,3],[100,10
IDAl=["A1-CCH","A2-CCH","A3-CM","A4-CM","A5-CLL","A6-CLL"]
#MATRIZ DE VALORACIÓN DEL PROBLEMA
MD=[[68,1,17,3,61792,3089,6,0.44,5,44,3,52,3,3],[68,2,22,2,50756,2537.7,6.36,0.32,4,32,4,38,3,3],[92,1,26

```

ENTRADA VARIABLE: Vector de peso del Experto 1 (vector que se va variando)

ENTRADA CONSTANTE

Figura 5.7. Ejemplo de las entradas del método RIM en código en Python

Tabla 5.13. Intervalo de dominio

Dominio de trabajo (A-B)														
	SC1	SC2	SC3	SC4	EC5	EC6	CE7	AC8	AC9	TC10	TC11	TC12	PC13	PC14
Ext. I	0	1	0	0	49286	0	1	0	1	32	1	0	1	1
Ext D.	250	3	720	10	61688	1000	20	1000	20	44	3	100	4	4

Tabla 5.14. Intervalo de referencia

Dominio de trabajo (C-D)														
	SC1	SC2	SC3	SC4	EC5	EC6	CE7	AC8	AC9	TC10	TC11	TC12	PC13	PC14
Ext. I	250	1	720	0	49286	0	5	0	3	44	1	100	3	3
Ext D.	250	1	720	0	61688	0	8	0	5	44	1	100	4	4

La Figura 5.7, muestra un ejemplo de las entradas del programa **AHP unión RIM-Python** y la Figura 5.8 muestra la salida referente al ejemplo de entrada que se expone en la Figura 5.7.

CAPITULO 5. CASO DE ESTUDIO

La salida es en formato xls, cuya estructura son todas las matrices que se especifican anteriormente.

MATRIZ NORMALIZADA													
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
0.272	1	0.023611	0.97	0	0	1	0	1	1	1	0.52	1	1
0.272	0.206349206	0.030556	0.98	0	0	0	0	1	1	1	0.38	1	1
0.368	1	0.036111	0.97	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
0.368	0.146825397	0.040278	0.98	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0.033333	0.95	0	0	0	0	1	1	1	0.12	1	1
0	0.047619048	0.051389	0.97	0	0	0	0	0	1	1	0.09	1	1
MATRIZ NORMALIZADA CON INFLUENCIA DE PESOS													
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
0.009792	0.041	0.000756	0.03104	0	0	0.058	0	0.032	0.058	0.058	0.1508	0.097	0.036
0.009792	0.008460317	0.000978	0.03136	0	0	0	0	0.032	0.058	0.058	0.1102	0.097	0.036
0.013248	0.041	0.001156	0.03104	0	0	0	0	0	0.058	0	0.29	0.097	0.036
0.013248	0.006019841	0.001289	0.03136	0	0	0	0	0.032	0.058	0.058	0.29	0.097	0.036
0	0.041	0.001067	0.0304	0	0	0	0	0.032	0.058	0.058	0.0348	0.097	0.036
0	0.001952381	0.001644	0.03104	0	0	0	0	0	0.058	0.058	0.0261	0.097	0.036
VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEAL (+)													
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
0.000686859	0	0.000976	9.22E-07	0.009409	0.009409	0	0.001296	0	0	0	0.019377	0	0
0.000686859	0.001058831	0.000962	4.1E-07	0.009409	0.009409	0.003364	0.001296	0	0	0	0.032328	0	0
0.000517654	0	0.000951	9.22E-07	0.009409	0.009409	0.003364	0.001296	0.001024	0	0.003364	0	0	0
0.000517654	0.001223612	0.000943	4.1E-07	0.009409	0.009409	0.003364	0.001296	0	0	0	0	0	0
0.001296	0	0.000957	2.56E-06	0.009409	0.009409	0.003364	0.001296	0	0	0	0.065127	0	0
0.001296	0.001524717	0.000921	9.22E-07	0.009409	0.009409	0.003364	0.001296	0.001024	0	0	0.069643	0	0
VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEAL (-)													
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
9.58833E-05	0.001681	5.71E-07	0.000963	0	0	0.003364	0	0.001024	0.003364	0.003364	0.022741	0.009409	0.001296
9.58833E-05	7.1577E-05	9.56E-07	0.000983	0	0	0	0	0.001024	0.003364	0.003364	0.012144	0.009409	0.001296
0.00017551	0.001681	1.34E-06	0.000963	0	0	0	0	0	0.003364	0	0.0841	0.009409	0.001296
0.00017551	3.62385E-05	1.66E-06	0.000983	0	0	0	0	0.001024	0.003364	0.003364	0.0841	0.009409	0.001296
0	0.001681	1.14E-06	0.000924	0	0	0	0	0.001024	0.003364	0.003364	0.001211	0.009409	0.001296
0	3.81179E-06	2.7E-06	0.000963	0	0	0	0	0	0.003364	0.003364	0.000681	0.009409	0.001296
RANKING DE LAS ALTERNATIVAS													
ID-ALTERNATIVAS	PUNTUACIÓN												
1	0.517396496												
2	0.42417802												
3	0.649787534												
4	0.665708941												
5	0.331159629												
6	0.306298216												

Figura 5.8. Ejemplo de salida del algoritmo en Python, estos datos son referente al vector de peso del experto 1.

Derivado de los cálculos anteriores, se obtuvieron 5 soluciones parciales o individuales, basadas en el criterio y experiencia de cada experto y una solución general o agregada, esta última incluye las evaluaciones de los 5 expertos.

A continuación, se describe cada una de ellas en detalle.

5.4.2.1 Soluciones individuales

El experto 1, estableció como prioridad los aspectos técnicos y económicos (ver Figura 5.9). Así, las alternativas del campus de la Montaña aparecen como las primeras a instalar, seguidas por las del campus de la Costa Chica.

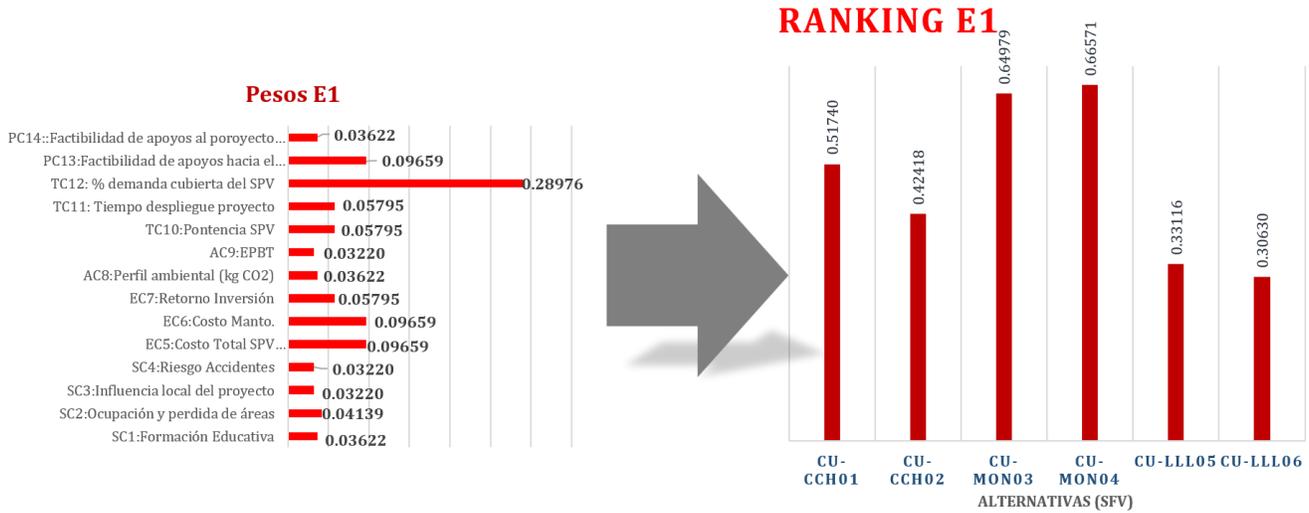


Figura 5.9. Valoración del experto 1, pesos y ranking

En lo que se refiere al experto 2, también los aspectos técnicos y económicos fueron a los que mayor peso le asignó. De nueva cuenta, los SFV del campus de la Montaña aparecen con mayor prioridad a instalar. (Figura 5.10), aunque con menor puntaje con respecto a la valoración del experto 1.

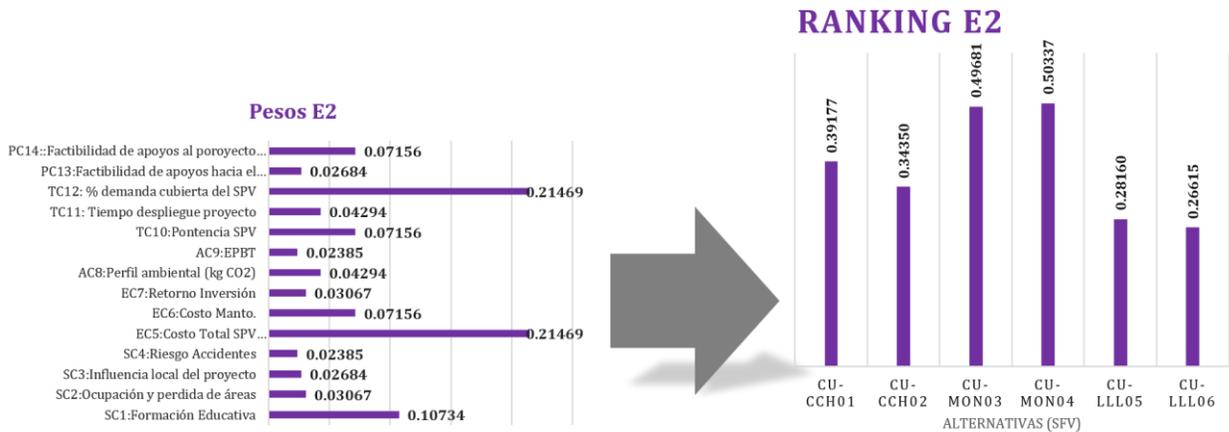


Figura 5.10. Valoración del experto 2, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.

A diferencia de los expertos 1 y 2, el experto 3 consideró que la potencia del SFV debía ser la que mayor importancia debe tener a la hora de evaluar los SFV (Figura 5.11). En este caso, el ranking de las alternativas favoreció aquellas que pertenecen al campus Costa Chica y luego el resto aparece con puntajes similares.

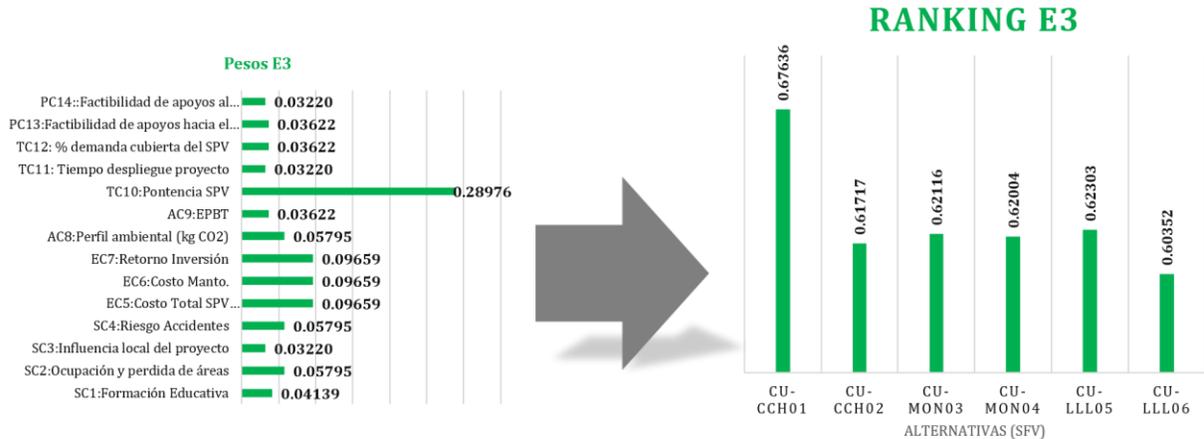


Figura 5.11. Valoración del experto 3, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.

Con el experto 4, de nuevo aparecieron el % de demanda energética cubierto y el costo del SFV (Figura 5.12) como los criterios notablemente con mayor peso con respecto al resto. Derivado de esto, los SFV que corresponden al campus de la Montaña son preferentes para comenzar las instalaciones.

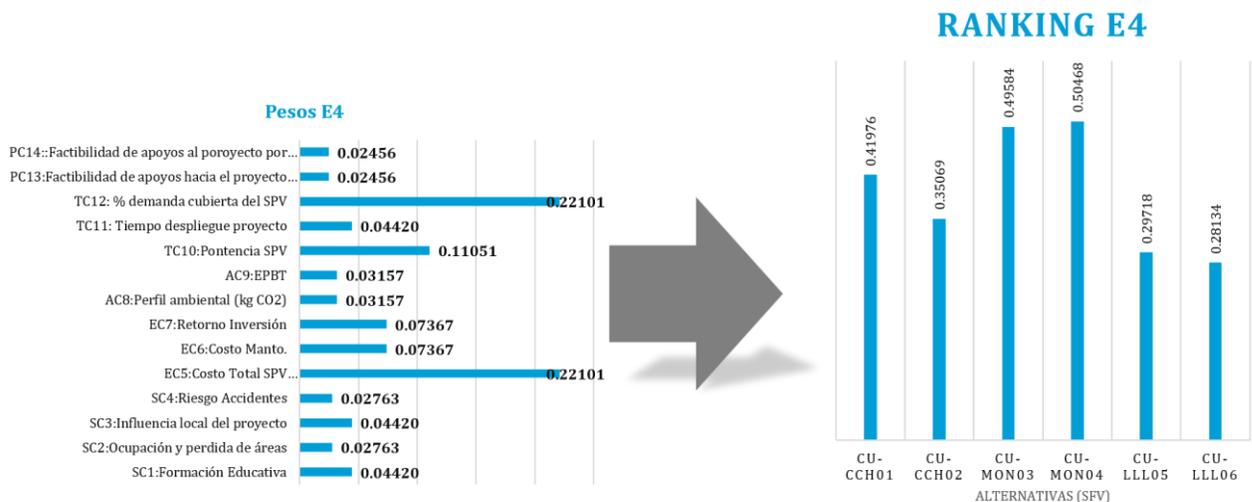


Figura 5.12. Valoración del experto 4, pesos de los criterios y ranking de las alternativas.

El experto 5, valoró los mismos criterios como los más importantes al igual que los expertos 1 y 2. Es decir, que los aspectos técnicos y económicos aparecen con mayor relevancia con respecto al resto (Figura 5.13). Consecuentemente, las alternativas del campus de la Montaña aparecen como las primeras a instalar. Sin embargo, si comparamos los puntajes con el resto de las alternativas, la diferencia no es tan significativa como en el ranking que se estableció para los expertos 1 y 2.

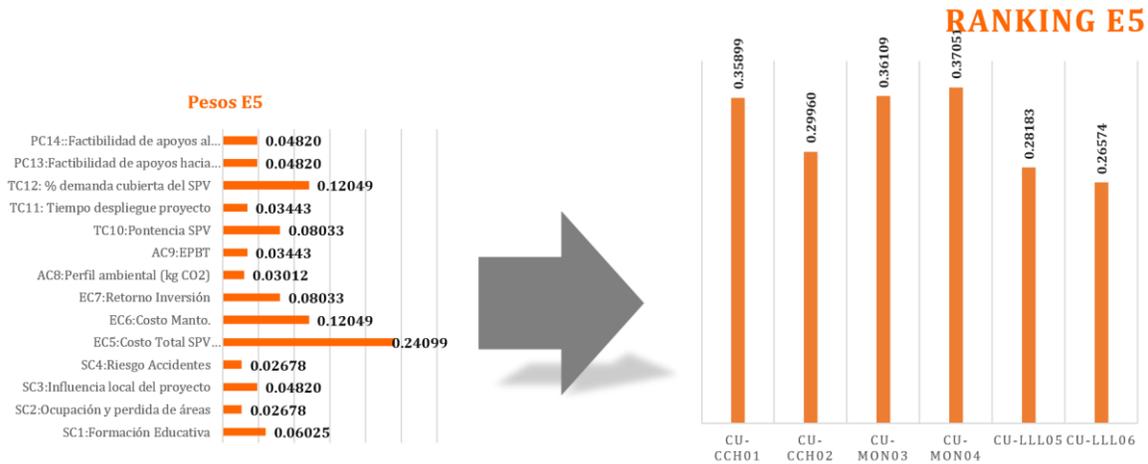


Figura 5.13. Valoración del experto 5, pesos de los criterios y ranking de las alternativas

5.4.2.2 Solución agregada

Finalmente, aunque cuatro de los cinco expertos coincidieron en el orden de instalación de las alternativas o SFV, fue necesario y útil realizar la agregación de la información de los 5 expertos, y así presentar un solo ranking con las evaluaciones de cada método y cada experto. La Figura 5.14, muestran los resultados finales

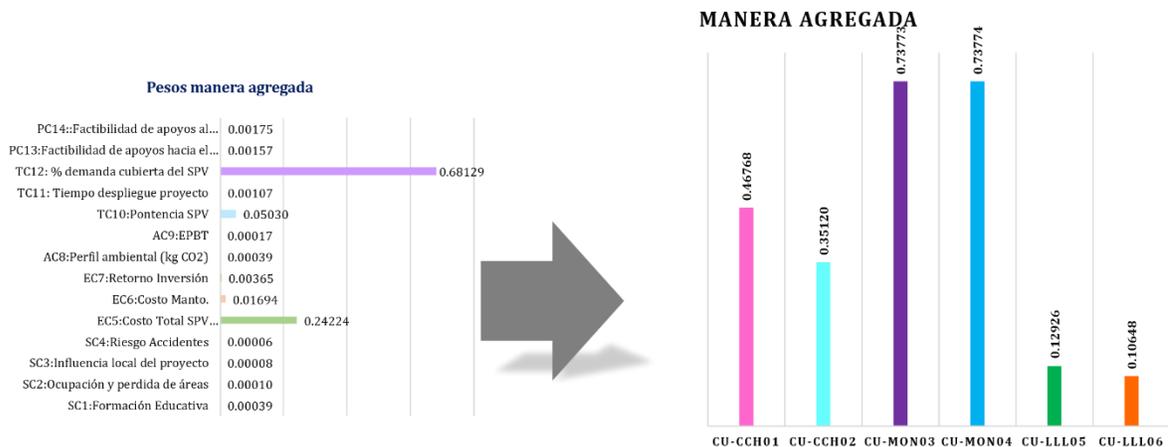


Figura 5.14. Manera agregada para presentar los resultados de los cinco expertos.

5.3 Comunicación de resultados

Se partía del objetivo de obtener un ranking para el orden de instalación de varios sistemas fotovoltaicos, basado en la evaluación multidimensional sostenible de su ciclo de vida.

Seis SFV fueron analizados en detalle, desde cinco pilares de sostenibilidad: Social, económico, ambiental, técnico y político.

De las gráficas anteriores, se observa claramente que hay una especial preocupación por el coste del SFV y el % de la demanda energética cubierta del CU en cuestión. Esto puede resultar lógico ya que la problemática expone que los recursos económicos son racionados, además del interés de independizarse en un 100% de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), esto tiene un fin: ser etiquetados como *campus sustentables* totalmente.

Por otro lado, si se analizan las opiniones del grupo de expertos, aunque es un equipo multidisciplinar, en general, fueron los aspectos económicos y técnicos los más importantes a la hora de juzgar y tomar la decisión sobre sistemas energéticos. Esto coincide con lo que registra la literatura; los paradigmas están enfocados a cuestiones económicas y técnicas.

En conclusión, y alineados al objetivo de este estudio, se propone un orden de instalación de los SFV para iniciar la transición energética a campus sustentables, como muestra la Figura 5.15.



Figura 5.15. Propuesta de orden de instalación de los SFV.

Adicionalmente, se ponen de manifiesto los siguientes puntos para la toma de decisiones:

Los resultados muestran que es viable iniciar una transición energética por campus; para esto, el estudio propone instalar todos los SFV de cada campus, sin dejar pendiente ninguna alternativa.

Las instalaciones deben iniciarse por los SFV que se encuentran en el campus de la Montaña. Esto es lógico, ya que el objetivo es; contar con campus sustentables independientes totalmente de la CFE, es decir con una demanda eléctrica cubierta del 100% procedente de la energía solar. Por tanto, las alternativas deben cubrir el 100% o más de la demanda energética. Si analizamos las dos alternativas que aparecen como primeras a instalar (CU-MON04 y CU-MON03) se observa que en el criterio de *% de demanda cubierta del SFV*, estas son las únicas que presentan un porcentaje del 100%.

En lo que respecta al campus Costa Chica, pueden iniciar las instalaciones por cualquiera de los dos SFV propuestos, se llega a esta conclusión más particular, debido al puntaje similar entre ambas alternativas, si profundizamos explorando de nuevo la matriz de valoración se observa que ambas ofertan características similares para lograr el objetivo.

CAPITULO 6. Conclusiones y trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

6.1.1 De aspecto metodológico

El ACV en su forma tradicional, es incapaz de proporcionar una evaluación integral sostenible en cualquier contexto de aplicación, y particularmente en la evaluación de sistemas energéticos renovables. Por tanto, la aplicación sola del ACV, no puede proporcionar resultados que conduzcan hacia una producción y consumo sostenible.

Es necesario soportar el marco ISO, con técnicas de decisión multicriterio, para esto se proporcionan los siguientes puntos de referencia en cuanto al uso general de la combinación del ACV y MDMC.

1.-ACV y AHP ó ACV y AHP-Otra técnica multicriterio, es la combinación metodológica más utilizada, cuando se trata de lograr una evaluación integral sostenible de los SER.

3.- En un proceso de ACV, es recomendable seleccionar más de una metodología de evaluación de impacto, para evaluar los impactos ambientales y en algunos casos sociales, CML 2000, ILCD y RECIPE, son las metodologías más utilizadas.

4.- Los criterios mínimos que se deben considerar en cada dimensión del ámbito de la sostenibilidad, para la evaluación integral sostenible de los SER, el **“Cambio climático (emisiones de CO₂)”**, **“Caracterización del uso de los recursos”** y la **“Ecotoxicidad”**, son al menos los tres criterios ambientales que deben incluirse. Con relación a valorar los aspectos sociales, **“Creación de empleo”**, **“Población beneficiada (%)”** y **“Mortalidad esperada en accidentes”** aparecen como los aspectos mínimos a considerar. Por otro lado, los aspectos económicos deben medirse al menos con los **“Costos de operación y mantenimiento”**, **“Costo de capital”** y **“Costo de energía”**. Finalmente, la **“Disponibilidad de recursos (eólico, solar, etc.)”**, **“Aspectos técnicos (distancia, peso, potencia nominal y altura)”**, y **“Factibilidad (técnica, financiera)”**, también son los aspectos mínimos que deben incluirse en la dimensión política.

5.-Los países productores de grandes tecnologías renovables, como China, Estados Unidos o India, deberían esforzarse más en utilizar metodologías como la combinación del ACV y MDMC, para la evaluación de la sostenibilidad de las tecnologías renovables. Los impactos varían de un lugar a otro, ya que depende del mix energético del país fabricante; de hecho, esto se ha demostrado en un estudio reciente [100].

6.-Combinar el ACV y los MDMC en un mismo marco, se puede desarrollar en tres fases principales: fase de análisis, que incluye la selección y definición de escenarios e indicadores; fase de modelado, incluye el cálculo de los indicadores ambientales (ACV), sociales (SACV) y económicos (ECV); y finalmente la fase de evaluación, donde se establecen los pesos (AHP, AHP-Otra técnica multicriterio) y se calcula el ranking de los escenarios (AHP, TOPSIS, VIKOR, etc.)

Esta combinación de herramientas arroja fuertes resultados:

- I. Lograr un análisis sostenible de los SER, con la robustez del ACV en términos ambientales, analizar los aspectos sociales, desde el punto de vista de la sociedad involucrada, desde la experiencia de los expertos tomando en cuenta los costes de todo su ciclo de vida,
- II. Lograr una evaluación sostenible integral y
- III. Reducir la incertidumbre en la toma de decisiones, para la selección de los sistemas de energías renovables más sostenibles.

6.1.2 De aplicación del paradigma ACV y Python (AHP-RIM)

El ACV es la metodología central, esto quiere decir, que todos los elementos que marca este marco metodológico, son incluidos primero y siempre bajo las normas que indica ISO.

La integración de los MDMC, como AHP y RIM, y demás procesos, son solo como soporte y jamás de sustitución, el objetivo es enriquecer el ACV, dándole un enfoque metodológico integral.

Además de los MDMC, se han integrado proceso basados en las tecnologías de la información (TIC's), dichos procesos se refieren al diagrama de la figura 4.8 y 4.9.

La propuesta del marco metodológico híbrido, presenta el ACV soportado por los métodos, procedimientos y técnicas, previo y durante su desarrollo. Esto es que, en ninguna etapa se planea modificar su estructura metodológica, más bien esta propuesta metodológica, se basa en el enriquecimiento del ACV, mediante el apoyo de procesos y técnicas de decisión y procesos de las tecnologías de la información.

Las ventajas que podemos resaltar de este marco metodológico híbrido son las que se citan a continuación:

- I. Respeto de la arquitectura metodológica del ACV.
- II. Agregar técnicas con tareas asignadas específicas para lograr el objetivo de evaluación sostenible, y asegurar que cada parte desarrolla lo que le corresponde, obteniendo finalmente un resultado holístico.
- III. Integración de las TIC's en el ACV.

6.1.3 De aplicación al caso de estudio

Regresando al objetivo del caso de estudio, que es proponer un orden de instalación de los SFV, mediante la evaluación de la sostenibilidad de su ciclo de vida, utilizando la metodología híbrida: ACV y (AHP-RIM) desarrollada en el lenguaje de programación Python. Se propuso iniciar las instalaciones por el campus regional de la Montaña, luego el campus regional de la Costa Chica y por último el campus regional de Llano Largo.

Además, los resultados muestran que es viable iniciar la transición por campus, para esto el estudio concluye y propone instalar todos los SFV de cada campus, sin dejar pendiente ninguna alternativa.

Las instalaciones deben iniciarse por los SFV que se encuentran en el campus de la Montaña, esto es lógico, ya que el objetivo es lograr contar con campus sustentables, independientes totalmente de la Comisión Federal de Electricidad, es decir con la demanda eléctrica del 100% procedente de la energía solar. Por tanto, las alternativas deben cubrir el 100% o más de la demanda energética, si analizamos estas dos alternativas en la matriz de valoración, son las únicas que proporcionan el 100% de la demanda requerida.

En lo que respecta al campus de la Costa Chica, pueden iniciar las instalaciones por cualquiera de los dos SFV propuestos, se llega a esta conclusión más particular, debido al puntaje similar en ambas alternativas, si profundizamos explorando de nuevo la matriz de valoración se observa que ambas ofertan características similares para lograr el objetivo.

Finalmente, aquí se está presentando por primera vez la combinación de ACV y las técnicas multicriterio de AHP-RIM, programadas en un lenguaje de programación científico de alto nivel, como lo es Python, con el objetivo de evaluación multidimensional sostenible de los SFV. Consecuentemente, esto representa el inicio de un camino, donde se tiene mucho que explorar.

6.1.4 Hacia una producción y consumo energético sostenible

Entre los puntos de referencia metodológicos, en relación al paradigma del ACV y MDMC y la aplicación de un caso particular del marco metodológico el ACV-Python (AHP-RIM). Podemos etiquetar esta propuesta metodológica, como una herramienta útil, que puede conducir a la selección de aquellos sistemas energéticos renovables con un alto grado de sostenibilidad, eficientes y capaces de proporcionar energía limpia suficiente para todas las personas, rumbo al año 2050.

Metodologías, que orienten hacia una producción y consumo sostenible de la energía, son de urgencia para una toma de decisiones acertada, baja en incertidumbre y congruente con los objetivos futuros, pero sobre todo para evitar la escalada de impactos negativos del cambio climático.

6.2 Trabajos futuros

Hay mucho camino que recorrer, y aquí solo se presenta la punta del iceberg, hace falta probar y comparar otras técnicas con el ACV. Por ejemplo, valorar el marco metodológico con números difusos, programado en Python u otro lenguaje de interés.

La construcción de una aplicación tecnológica en web, basada en el paradigma ACV y una variación de las diferentes técnicas Multicriterio, cuya finalidad sea proporcionar índices de sostenibilidad de los sistemas energéticos. Analizar las variaciones en las respuestas, de utilizar una técnica y otra.

REFERENCIAS

- [1] World Wildlife Fund, *The energy report: 100% renewables by 2050*. Gland, Switzerland: World Wildlife Fund, 2011.
- [2] IPCC-Climate Change, «srren_report_es.pdf», 2011. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf (accedido 22 de mayo de 2017).
- [3] I. P. on C. Change, *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press, 2014.
- [4] E. Agency, «World Energy Outlook 2015– Electricity Access Database,"».
- [5] A. Bond, A. Morrison-Saunders, y J. Pope, «Sustainability assessment: the state of the art», *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 30, n.º 1, pp. 53-62, mar. 2012, doi: 10.1080/14615517.2012.661974.
- [6] A. AtKisson, «Developing indicators of sustainable community: Lessons from sustainable Seattle», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 16, n.º 4, pp. 337-350, jul. 1996, doi: 10.1016/S0195-9255(96)00025-X.
- [7] A. Valentin y J. H. Spangenberg, «A guide to community sustainability indicators», *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 20, n.º 3, pp. 381-392, jun. 2000, doi: 10.1016/S0195-9255(00)00049-4.
- [8] A. Evans, V. Strezov, y T. J. Evans, «Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 5, pp. 1082-1088, jun. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.03.008.
- [9] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang, y J.-H. Zhao, «Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 9, pp. 2263-2278, dic. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.
- [10] G. Rebitzer *et al.*, «Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications», *Environ. Int.*, vol. 30, n.º 5, pp. 701-720, jul. 2004, doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005.

- [11] B. Ness, E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg, y L. Olsson, «Categorising tools for sustainability assessment», *Ecol. Econ.*, vol. 60, n.º 3, pp. 498-508, ene. 2007, doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.07.023.
- [12] H. Mälkki y K. Alanne, «An overview of life cycle assessment (LCA) and research-based teaching in renewable and sustainable energy education», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 218-231, mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.176.
- [13] X. Li y E. Mupondwa, «Life cycle assessment of camelina oil derived biodiesel and jet fuel in the Canadian Prairies», *Sci. Total Environ.*, vol. 481, pp. 17-26, may 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.003.
- [14] E. Buonocore, L. Vanoli, A. Carotenuto, y S. Ulgiati, «Integrating life cycle assessment and energy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy», *Energy*, vol. 86, pp. 476-487, jun. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.04.048.
- [15] A. Azapagic y H. Stichnothe, «3 - Life cycle sustainability assessment of biofuels», en *Handbook of Biofuels Production*, Woodhead Publishing, 2011, pp. 37-60. doi: 10.1533/9780857090492.1.37.
- [16] K. Menberg, S. Pfister, P. Blum, y P. Bayer, «A matter of meters: state of the art in the life cycle assessment of enhanced geothermal systems», *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, n.º 9, pp. 2720-2743, ago. 2016, doi: 10.1039/C6EE01043A.
- [17] J. Kim, J. L. Rivera, T. Y. Meng, B. Laratte, y S. Chen, «Review of life cycle assessment of nanomaterials in photovoltaics», *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 249-258, ago. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.060.
- [18] G. Finnveden *et al.*, «Recent developments in Life Cycle Assessment», *J. Environ. Manage.*, vol. 91, n.º 1, pp. 1-21, oct. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [19] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, y M. Ritthoff, «Options for broadening and deepening the LCA approaches», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 2, pp. 120-127, ene. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.09.023.
- [20] Vázquez-Rowe, y D. Iribarren, «Review of Life-Cycle Approaches Coupled with Data Envelopment Analysis: Launching the CFP», *Sci. World J.*, vol. 2015, p. e813921, ene. 2015, doi: 10.1155/2015/813921.

- [21] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, y M. Ritthoff, «Options for broadening and deepening the LCA approaches», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 2, pp. 120-127, ene. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.09.023.
- [22] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, y M. Ritthoff, «Options for broadening and deepening the LCA approaches», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 2, pp. 120-127, ene. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.09.023.
- [23] M. Martín-Gamboa, D. Iribarren, D. García-Gusano, y J. Dufour, «A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems», *J. Clean. Prod.*, vol. 150, pp. 164-174, may 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.017.
- [24] Verónica Campos-Guzman, Guido C. Guerrero-Liquet, Lucia Serrano, Nieves Espinosa, J. Miguel Sanchez-Lozano, M. Socorro García-Cascales, «ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS ON LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE CONTEXT OF RENEWABLE ENERGY», *21 AEIPRO*, jul. 2016.
- [25] A. Kumar *et al.*, «A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 596-609, mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
- [26] A. Azapagic, L. Stamford, L. Youds, y C. Barteczko-Hibbert, «Towards sustainable production and consumption: A novel DEcision-Support Framework IntegRating Economic, Environmental and Social Sustainability (DESIREs)», *Comput. Chem. Eng.*, vol. 91, pp. 93-103, ago. 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.03.017.
- [27] Ma. Claudia Roldán, M. Martínez, y R. Peña, «Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 154-160, may 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.007.
- [28] A. I. De Luca *et al.*, «Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review», *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 352-370, oct. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.284.

- [29] A. R. Domingues, P. Marques, R. Garcia, F. Freire, y L. C. Dias, «Applying Multi-Criteria Decision Analysis to the Life-Cycle Assessment of vehicles», *J. Clean. Prod.*, vol. 107, pp. 749-759, nov. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.086.
- [30] D. Fozer *et al.*, «Life cycle, PESTLE and Multi-Criteria Decision Analysis of CCS process alternatives», *J. Clean. Prod.*, vol. 147, pp. 75-85, mar. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.056.
- [31] F. Heberle, C. Schiffler, y D. Brüggemann, «Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working fluids», *Geothermics*, vol. 64, pp. 392-400, nov. 2016, doi: 10.1016/j.geothermics.2016.06.010.
- [32] S. Khishtandar, M. Zandieh, y B. Dorri, «A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.212.
- [33] «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». Accedido: 8 de mayo de 2017. [En línea]. Disponible en: <file:///C:/Users/Nieves/Downloads/Life%20Cycle%20Analysis%20as%20the%20Sustainability%20Assessment%20Multicriteria%20Decision%20Tool%20for%20Road%20Transport%20Biofuels.pdf>
- [34] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, y Q. P. Zheng, «Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S.», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, Part 1, pp. 291-307, ene. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.021.
- [35] J. Ren, A. Manzardo, A. Mazzi, F. Zuliani, y A. Scipioni, «Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, n.º 6, pp. 842-853, jun. 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0877-8.

- [36] E. Santoyo-Castelazo y A. Azapagic, «Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects», *J. Clean. Prod.*, vol. 80, pp. 119-138, oct. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.061.
- [37] L. Stamford y A. Azapagic, «Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 23, pp. 194-211, dic. 2014, doi: 10.1016/j.esd.2014.09.008.
- [38] T. L. Saaty, «How to make a decision: The analytic hierarchy process», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, n.º 1, pp. 9-26, sep. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [39] REN21 Editors, «GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf», 2016. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf (accedido 28 de marzo de 2017).
- [40] L. Molyneaux, L. Wagner, y J. Foster, «Rural electrification in India: Galilee Basin coal versus decentralised renewable energy micro grids», *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 422-436, abr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.002.
- [41] T. Urmee, D. Harries, y A. Schlapfer, «Issues related to rural electrification using renewable energy in developing countries of Asia and Pacific», *Renew. Energy*, vol. 34, n.º 2, pp. 354-357, feb. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.05.004.
- [42] M. Finkbeiner, «The International Standards as the Constitution of Life Cycle Assessment: The ISO 14040 Series and its Offspring», en *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment*, W. Klöpffer, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 85-106. doi: 10.1007/978-94-017-8697-3_3.
- [43] G. Finnveden *et al.*, «Recent developments in Life Cycle Assessment», *J. Environ. Manage.*, vol. 91, n.º 1, pp. 1-21, oct. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [44] Instituto de medio ambiente y sostenibilidad EUR 24708, *ILCD handbook International Reference Life Cycle Data System*. 2010.
- [45] D. W. Pennington *et al.*, «Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice», *Environ. Int.*, vol. 30, n.º 5, pp. 721-739, jul. 2004, doi: 10.1016/j.envint.2003.12.009.
- [46] GaBi LCIA, «“Life Cycle Impact Assessment (LCIA) Methods”».

REFERENCIAS

- [47] R. S. Mark Goedkoop, «Microsoft Word - El annexe report_update 22-6-01.doc - EI99_annexe_v3.pdf», 2001. https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_annexe_v3.pdf (accedido 14 de mayo de 2017).
- [48] H. U. de H. Helias Udo de Haes, «Society of Environmental Toxicology and Chemistry», 2002. <https://www.setac.org/store/ViewProduct.aspx?id=1036212> (accedido 14 de mayo de 2017).
- [49] M. Z. Hauschild y M. A. J. Huijbregts, *Life Cycle Impact Assessment*. Springer, 2015.
- [50] J. Bare, «TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 13, n.º 5, pp. 687-696, oct. 2011, doi: 10.1007/s10098-010-0338-9.
- [51] «LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf». Accedido: 14 de mayo de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>
- [52] V. Campos-Guzman, M. S. García-Cascales, N. Espinosa, y A. Urbina, «Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, p. 343, ene. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.031.
- [53] Dr. Olivia Joliet, Univ. of Michigan, «“IMPACT 2002+” LCIA methodology /».
- [54] «Software “Curso Sima-Pro”-2015-evaluación de Impactos ambientales».
- [55] C. A. Bana E Costa, T. J. Stewart, y J.-C. Vansnick, «Multicriteria decision analysis: Some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 99, n.º 1, pp. 28-37, may 1997, doi: 10.1016/S0377-2217(96)00380-3.
- [56] T. H. Gerard Bruno, «El proceso de analisis jerarquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en seleccion de proveedores.», Santiago, España, 2001.
- [57] T. Tsoutsos, M. Drandaki, N. Frantzeskaki, E. Iosifidis, y I. Kiosses, «Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete», *Energy Policy*, vol. 37, n.º 5, pp. 1587-1600, may 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.12.011.

- [58] T. Kaya y C. Kahraman, «Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul», *Energy*, vol. 35, n.º 6, pp. 2517-2527, jun. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.02.051.
- [59] P. Zhou, B. W. Ang, y K. L. Poh, «Decision analysis in energy and environmental modeling: An update», *Energy*, vol. 31, n.º 14, pp. 2604-2622, nov. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.10.023.
- [60] T. L. Saaty, «Analytic Heirarchy Process», en *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, American Cancer Society, 2014. doi: 10.1002/9781118445112.stat05310.
- [61] L. P. Ghimire y Y. Kim, «An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP», *Renew. Energy*, vol. 129, pp. 446-456, dic. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.011.
- [62] E. Mastrocinque, F. J. Ramírez, A. Honrubia-Escribano, y D. T. Pham, «An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector», *Expert Syst. Appl.*, vol. 150, p. 113321, jul. 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113321.
- [63] J. M. Sánchez-Lozano y O. N. Rodríguez, «Application of Fuzzy Reference Ideal Method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection», *Appl. Soft Comput.*, vol. 88, p. 106061, mar. 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106061.
- [64] E. Cables, M. T. Lamata, y J. L. Verdegay, «RIM-reference ideal method in multicriteria decision making», *Inf. Sci.*, vol. 337-338, pp. 1-10, abr. 2016, doi: 10.1016/j.ins.2015.12.011.
- [65] J. M. Sánchez-Lozano, M. Fernández-Martínez, y M. T. Lamata, «Near-Earth Asteroid impact dates: A Reference Ideal Method (RIM) approach», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 81, pp. 157-168, may 2019, doi: 10.1016/j.engappai.2019.02.010.
- [66] J. M. Zelle, *Python Programming: An Introduction to Computer Science*. Franklin, Beedle & Associates, Inc., 2004.
- [67] «CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf». Accedido: 24 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

- [68] B. Atilgan y A. Azapagic, «An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey», *Energy Policy*, vol. 93, pp. 168-186, jun. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.055.
- [69] H. Kim, K. Cha, V. M. Fthenakis, P. Sinha, y T. Hur, «Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems», *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 78-88, may 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.008.
- [70] G. M. Zanghelini, E. Cherubini, y S. R. Soares, «How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation», *J. Clean. Prod.*, oct. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.230.
- [71] E. Strantzali y K. Aravossis, «Decision making in renewable energy investments: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 885-898, mar. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.021.
- [72] I. Vázquez., I. zquez-Rowe, y D. Iribarren, «Review of Life-Cycle Approaches Coupled with Data Envelopment Analysis: Launching the CFP», *Sci. World J.*, vol. 2015, p. e813921, ene. 2015, doi: 10.1155/2015/813921.
- [73] REN21 Editors, «17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf», 2017. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf (accedido 23 de marzo de 2018).
- [74] V. M. Fthenakis y H. C. Kim, «CdTe photovoltaics: Life cycle environmental profile and comparisons», *Thin Solid Films*, vol. 515, n.º 15, pp. 5961-5963, may 2007, doi: 10.1016/j.tsf.2006.12.138.
- [75] M. Raugei, S. Bargigli, y S. Ulgiati, «Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si», *Energy*, vol. 32, n.º 8, pp. 1310-1318, ago. 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.10.003.
- [76] R. García-Valverde, C. Miguel, R. Martínez-Béjar, y A. Urbina, «Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system», *Sol. Energy*, vol. 83, n.º 9, pp. 1434-1445, sep. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.012.
- [77] R. García-Valverde, J. A. Cherni, y A. Urbina, «Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies», *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 18, n.º 7, pp. 535-558, nov. 2010, doi: 10.1002/pip.967.

- [78] Á. A. Bayod-Rújula, A. M. Lorente-Lafuente, y F. Cirez-Oto, «Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed modules systems», *Energy*, vol. 36, n.º 5, pp. 3148-3158, may 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.03.004.
- [79] N. Espinosa, R. García-Valverde, A. Urbina, y F. C. Krebs, «A life cycle analysis of polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods under ambient conditions», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, n.º 5, pp. 1293-1302, may 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2010.08.020.
- [80] M. Ito, M. Kudo, M. Nagura, y K. Kurokawa, «A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant», *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 19, n.º 7, pp. 878-886, nov. 2011, doi: 10.1002/pip.1070.
- [81] A. Sumper, M. Robledo-García, R. Villafáfila-Robles, J. Bergas-Jané, y J. Andrés-Peiró, «Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 8, pp. 3888-3896, oct. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.023.
- [82] M. A. Kreiger, D. R. Shonnard, y J. M. Pearce, «Life cycle analysis of silane recycling in amorphous silicon-based solar photovoltaic manufacturing», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 70, pp. 44-49, ene. 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.10.002.
- [83] K. Menoufi, D. Chemisana, y J. I. Rosell, «Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme», *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 505-514, nov. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.037.
- [84] Y. Yao y F. You, «Life Cycle Energy, Environmental and Economic Comparative Analysis of CdTe Thin-film Photovoltaics Domestic and Overseas Manufacturing Scenarios», en *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 32, A. K. and I. Turunen, Ed. Elsevier, 2013, pp. 733-738. doi: 10.1016/B978-0-444-63234-0.50123-8.
- [85] M. Beccali, M. Cellura, P. Finocchiaro, F. Guarino, S. Longo, y B. Nocke, «Life cycle performance assessment of small solar thermal cooling systems and conventional plants assisted with photovoltaics», *Sol. Energy*, vol. 104, pp. 93-102, jun. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2013.10.016.

- [86] J. Collier, S. Wu, y D. Apul, «Life cycle environmental impacts from CZTS (copper zinc tin sulfide) and Zn₃P₂ (zinc phosphide) thin film PV (photovoltaic) cells», *Energy*, vol. 74, pp. 314-321, sep. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.06.076.
- [87] D. Yue, F. You, y S. B. Darling, «Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis», *Sol. Energy*, vol. 105, pp. 669-678, jul. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.04.008.
- [88] V. Kabakian, M. C. McManus, y H. Harajli, «Attributional life cycle assessment of mounted 1.8 kWp monocrystalline photovoltaic system with batteries and comparison with fossil energy production system», *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 428-437, sep. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.125.
- [89] Chr. Lamnatou, H. Baig, D. Chemisana, y T. K. Mallick, «Life cycle energy analysis and embodied carbon of a linear dielectric-based concentrating photovoltaic appropriate for building-integrated applications», *Energy Build.*, vol. 107, pp. 366-375, nov. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.030.
- [90] Chr. Lamnatou y D. Chemisana, «Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators», *Build. Environ.*, vol. 93, Part 2, pp. 376-384, nov. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.06.031.
- [91] K. Lokesh, V. Sethi, T. Nikolaidis, E. Goodger, y D. Nalianda, «Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance», *Biomass Bioenergy*, vol. 77, pp. 26-44, jun. 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.03.005.
- [92] D. Hengevoss, C. Baumgartner, G. Nisato, y C. Hugli, «Life Cycle Assessment and eco-efficiency of prospective, flexible, tandem organic photovoltaic module», *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 317-327, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.025.
- [93] J. Hong, W. Chen, C. Qi, L. Ye, y C. Xu, «Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China», *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 283-293, ago. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.04.013.

- [94] G. Hou *et al.*, «Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China», *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 882-890, feb. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.023.
- [95] P. Jayathissa, M. Jansen, N. Heeren, Z. Nagy, y A. Schlueter, «Life cycle assessment of dynamic building integrated photovoltaics», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 156, pp. 75-82, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.04.017.
- [96] Chr. Lamnatou, H. Baig, D. Chemisana, y T. K. Mallick, «Environmental assessment of a building-integrated linear dielectric-based concentrating photovoltaic according to multiple life-cycle indicators», *J. Clean. Prod.*, vol. 131, pp. 773-784, sep. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.094.
- [97] J. H. Wong, M. Royapoor, y C. W. Chan, «Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 608-618, may 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.241.
- [98] D. O. Akinyele, R. K. Rayudu, y N. K. C. Nair, «Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria», *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 537-549, feb. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.09.017.
- [99] F. C. Ertem, P. Neubauer, y S. Junne, «Environmental life cycle assessment of biogas production from marine macroalgal feedstock for the substitution of energy crops», *J. Clean. Prod.*, vol. 140, Part 2, pp. 977-985, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.041.
- [100] L. Serrano-Luján, N. Espinosa, J. Abad, y A. Urbina, «The greenest decision on photovoltaic system allocation», *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1348-1356, feb. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.020.
- [101] M. de Simón-Martín, M. Díez-Mediavilla, y C. Alonso-Tristán, «Real Energy Payback Time and Carbon Footprint of a GCPVS», *Energy 2017 Vol 5 Pages 77-95*, ene. 2017, doi: 10.3934/energy.2017.1.77.
- [102] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, y V. Lo Brano, «Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, n.º 1, pp. 200-217, ene. 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.05.013.

- [103] R. H. Crawford, «Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 9, pp. 2653-2660, dic. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.008.
- [104] B. Fleck y M. Huot, «Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use», *Renew. Energy*, vol. 34, n.º 12, pp. 2688-2696, dic. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.06.016.
- [105] E. Martínez, F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jiménez, y J. Blanco, «Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine», *Renew. Energy*, vol. 34, n.º 3, pp. 667-673, mar. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.05.020.
- [106] B. Tremeac y F. Meunier, «Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 8, pp. 2104-2110, oct. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.01.001.
- [107] J. Weinzettel, M. Reenaas, C. Solli, y E. G. Hertwich, «Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine», *Renew. Energy*, vol. 34, n.º 3, pp. 742-747, mar. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.04.004.
- [108] H.-J. Wagner, C. Baack, T. Eickelkamp, A. Epe, J. Lohmann, y S. Troy, «Life cycle assessment of the offshore wind farm alpha ventus», *Energy*, vol. 36, n.º 5, pp. 2459-2464, may 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.01.036.
- [109] B. Guezuraga, R. Zauner, y W. Pölz, «Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines», *Renew. Energy*, vol. 37, n.º 1, pp. 37-44, ene. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.05.008.
- [110] Y. Wang y T. Sun, «Life cycle assessment of CO2 emissions from wind power plants: Methodology and case studies», *Renew. Energy*, vol. 43, pp. 30-36, jul. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.12.017.
- [111] N. Demir y A. Taşkın, «Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri», *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 253-263, sep. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.016.
- [112] N. Demir y A. Taşkın, «Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri», *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 253-263, sep. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.016.

- [113] N. Demir y A. Taşkın, «Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri», *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 253-263, sep. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.016.
- [114] N. Demir y A. Taşkın, «Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri», *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 253-263, sep. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.04.016.
- [115] K. B. Oebels y S. Pacca, «Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil», *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 60-70, may 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.10.026.
- [116] A. Rashedi, I. Sridhar, y K. J. Tseng, «Life cycle assessment of 50 MW wind farms and strategies for impact reduction», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 89-101, may 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.045.
- [117] A. Myhr, C. Bjerkseter, A. Ågotnes, y T. A. Nygaard, «Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective», *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 714-728, jun. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.017.
- [118] Md. S. Uddin y S. Kumar, «Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique», *J. Clean. Prod.*, vol. 69, pp. 153-164, abr. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.073.
- [119] S. H. Al-Behadili y W. B. El-Osta, «Life Cycle Assessment of Dernah (Libya) wind farm», *Renew. Energy*, vol. 83, pp. 1227-1233, nov. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.05.041.
- [120] A. V. Vargas, E. Zenón, U. Oswald, J. M. Islas, L. P. Güereca, y F. L. Manzini, «Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 1210-1216, ene. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.056.
- [121] B. Xue *et al.*, «A life cycle co-benefits assessment of wind power in China», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 338-346, ene. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.056.
- [122] A. Bonou, A. Laurent, y S. I. Olsen, «Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application», *Appl. Energy*, vol. 180, pp. 327-337, oct. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.058.

- [123] Y.-F. Huang, X.-J. Gan, y P.-T. Chiueh, «Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems», *Renew. Energy*, vol. 102, Part A, pp. 98-106, mar. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.050.
- [124] W.-C. Wang y H.-Y. Teah, «Life cycle assessment of small-scale horizontal axis wind turbines in Taiwan», *J. Clean. Prod.*, vol. 141, pp. 492-501, ene. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.128.
- [125] O. Eriksson, G. Finnveden, T. Ekvall, y A. Björklund, «Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion», *Energy Policy*, vol. 35, n.º 2, pp. 1346-1362, feb. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.04.005.
- [126] C. M. Gasol *et al.*, «Life cycle assessment of a Brassica carinata bioenergy cropping system in southern Europe», *Biomass Bioenergy*, vol. 31, n.º 8, pp. 543-555, ago. 2007, doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.026.
- [127] I. Butnar, J. Rodrigo, C. M. Gasol, y F. Castells, «Life-cycle assessment of electricity from biomass: Case studies of two biocrops in Spain», *Biomass Bioenergy*, vol. 34, n.º 12, pp. 1780-1788, dic. 2010, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.07.013.
- [128] C. Jury, E. Benetto, D. Koster, B. Schmitt, y J. Weltring, «Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid», *Biomass Bioenergy*, vol. 34, n.º 1, pp. 54-66, ene. 2010, doi: 10.1016/j.biombioe.2009.09.011.
- [129] B. Schumacher, H. Oechsner, T. Senn, y T. Jungbluth, «Life cycle assessment of the conversion of Zea mays and x Triticosecale into biogas and bioethanol», *Eng. Life Sci.*, vol. 10, n.º 6, pp. 577-584, dic. 2010, doi: 10.1002/elsc.201000069.
- [130] J. Fan, T. N. Kalnes, M. Alward, J. Klinger, A. Sadehvandi, y D. R. Shonnard, «Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil», *Renew. Energy*, vol. 36, n.º 2, pp. 632-641, feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.045.
- [131] T. Patterson, S. Esteves, R. Dinsdale, y A. Guwy, «Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale», *Bioresour. Technol.*, vol. 102, n.º 15, pp. 7313-7323, ago. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.063.

- [132] M. Poeschl, S. Ward, y P. Owende, «Environmental impacts of biogas deployment – Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways», *J. Clean. Prod.*, vol. 24, pp. 184-201, mar. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.10.030.
- [133] M. Poeschl, S. Ward, y P. Owende, «Environmental impacts of biogas deployment – Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air», *J. Clean. Prod.*, vol. 24, pp. 168-183, mar. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.10.039.
- [134] T. Tabata y T. Okuda, «Life cycle assessment of woody biomass energy utilization: Case study in Gifu Prefecture, Japan», *Energy*, vol. 45, n.º 1, pp. 944-951, sep. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.064.
- [135] T. Tabata y T. Okuda, «Life cycle assessment of woody biomass energy utilization: Case study in Gifu Prefecture, Japan», *Energy*, vol. 45, n.º 1, pp. 944-951, sep. 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.064.
- [136] S. Grierson, V. Strezov, y J. Bengtsson, «Life cycle assessment of a microalgae biomass cultivation, bio-oil extraction and pyrolysis processing regime», *Algal Res.*, vol. 2, n.º 3, pp. 299-311, jul. 2013, doi: 10.1016/j.algal.2013.04.004.
- [137] A. Pa, X. T. Bi, y S. Sokhansanj, «Evaluation of wood pellet application for residential heating in British Columbia based on a streamlined life cycle analysis», *Biomass Bioenergy*, vol. 49, pp. 109-122, feb. 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.11.009.
- [138] T. Patterson, S. Esteves, R. Dinsdale, A. Guwy, y J. Maddy, «Life cycle assessment of biohydrogen and biomethane production and utilisation as a vehicle fuel», *Bioresour. Technol.*, vol. 131, pp. 235-245, mar. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.12.109.
- [139] P. Collet *et al.*, «Biodiesel from microalgae – Life cycle assessment and recommendations for potential improvements», *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 525-533, nov. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.06.009.
- [140] E. Benetto, C. Jury, G. Kneip, I. Vázquez-Rowe, V. Huck, y F. Minette, «Life cycle assessment of heat production from grape marc pellets», *J. Clean. Prod.*, vol. 87, pp. 149-158, ene. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.10.028.
- [141] K. Lokesh, V. Sethi, T. Nikolaidis, E. Goodger, y D. Nalianda, «Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their

- impact on jet engine performance», *Biomass Bioenergy*, vol. 77, pp. 26-44, jun. 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.03.005.
- [142] B. Monteleone *et al.*, «Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions», *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 160-170, oct. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.089.
- [143] F. Pierobon, M. Zanetti, S. Grigolato, A. Sgarbossa, T. Anfodillo, y R. Cavalli, «Life cycle environmental impact of firewood production – A case study in Italy», *Appl. Energy*, vol. 150, pp. 185-195, jul. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.033.
- [144] M. Boschiero, F. Cherubini, C. Nati, y S. Zerbe, «Life cycle assessment of bioenergy production from orchards woody residues in Northern Italy», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, Part 4, pp. 2569-2580, ene. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.094.
- [145] A. Kylili, E. Christoforou, y P. A. Fokaides, «Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment», *Biomass Bioenergy*, vol. 84, pp. 107-117, ene. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.11.018.
- [146] G. S. M. Ankita Juneja, «Evaluating the potential of renewable diesel production from algae cultured on wastewater: techno-economic analysis and life cycle assessment (PDF Download Available)», *ResearchGate*, 2017. https://www.researchgate.net/publication/315464530_Evaluating_the_potential_of_renewable_diesel_production_from_algae_cultured_on_wastewater techno-economic_analysis_and_life_cycle_assessment (accedido 4 de mayo de 2017).
- [147] M. M. Czyrnek-Delêtre, S. Rocca, A. Agostini, J. Giuntoli, y J. D. Murphy, «Life cycle assessment of seaweed biomethane, generated from seaweed sourced from integrated multi-trophic aquaculture in temperate oceanic climates», *Appl. Energy*, vol. 196, pp. 34-50, jun. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.129.
- [148] A. Forte, A. Zucaro, M. Fagnano, y A. Fierro, «Potential environmental impact of bioethanol production chain from fiber sorghum to be used in passenger cars», *Sci. Total Environ.*, vol. 598, pp. 365-376, nov. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.244.
- [149] S. Song *et al.*, «Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province», *Energy*, vol. 130, pp. 373-381, jul. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068.

- [150] S. C. Togarcheti, M. kumar Mediboyina, V. S. Chauhan, S. Mukherji, S. Ravi, y S. N. Mudliar, «Life cycle assessment of microalgae based biodiesel production to evaluate the impact of biomass productivity and energy source», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 286-294, jul. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.01.008.
- [151] S. C. Togarcheti, M. kumar Mediboyina, V. S. Chauhan, S. Mukherji, S. Ravi, y S. N. Mudliar, «Life cycle assessment of microalgae based biodiesel production to evaluate the impact of biomass productivity and energy source», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 286-294, jul. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.01.008.
- [152] R. P. Tommy Dalgaard, «Environmental impacts of producing bioethanol and biobased lactic acid from standalone and integrated biorefineries using a consequential and an attributional life cycle assessment approach», 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717309233> (accedido 6 de mayo de 2017).
- [153] C. Wang, Y. Chang, L. Zhang, M. Pang, y Y. Hao, «A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China», *Energy*, vol. 120, pp. 374-384, feb. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.11.085.
- [154] Shizhong Song, «Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province», 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217306345> (accedido 11 de mayo de 2017).
- [155] F. Battista *et al.*, «LCA evaluation for the hydrogen production from biogas through the innovative BioRobur project concept», *Int. J. Hydrog. Energy*, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.065.
- [156] S. Frick, M. Kaltschmitt, y G. Schröder, «Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs», *Energy*, vol. 35, n.º 5, pp. 2281-2294, may 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.02.016.
- [157] M. R. Halldor Palsson, «LCA of combined heat and power production at Hellisheiði geothermal power plant with focus on primary energy efficiency (PDF Download Available)», *ResearchGate*, 2010. https://www.researchgate.net/publication/256732536_LCA_of_combined_heat_

- and_power_production_at_Hellisheidi_geothermal_power_plant_with_focus_on_primary_energy_efficiency (accedido 6 de mayo de 2017).
- [158] C. Chiavetta, F. Tinti, y A. Bonoli, «Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling», *Procedia Eng.*, vol. 21, pp. 591-597, ene. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2054.
- [159] M. Lacirignola y I. Blanc, «Environmental analysis of practical design options for enhanced geothermal systems (EGS) through life-cycle assessment», *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 901-914, feb. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.005.
- [160] M. Ristimäki, A. Säynäjoki, J. Heinonen, y S. Junnila, «Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design», *Energy*, vol. 63, pp. 168-179, dic. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.10.030.
- [161] M. Bravi y R. Basosi, «Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy», *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 301-308, mar. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.015.
- [162] G. Russo, A. S. Anifantis, G. Verdiani, y G. S. Mugnozza, «Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems», *Biosyst. Eng.*, vol. 127, pp. 11-23, nov. 2014, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002.
- [163] F. Ruzzenenti, M. Bravi, D. Tempesti, E. Salvatici, G. Manfrida, y R. Basosi, «Evaluation of the environmental sustainability of a micro CHP system fueled by low-temperature geothermal and solar energy», *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 611-616, feb. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.025.
- [164] M. R. Karlsdóttir, Ó. P. Pálsson, H. Pálsson, y L. Maya-Drysdale, «Life cycle inventory of a flash geothermal combined heat and power plant located in Iceland», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, n.º 4, pp. 503-519, abr. 2015, doi: 10.1007/s11367-014-0842-y.
- [165] M. Martín-Gamboa, D. Iribarren, y J. Dufour, «On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems», *Geothermics*, vol. 53, pp. 27-37, ene. 2015, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.03.012.
- [166] F. Heberle, C. Schiffler, y D. Brüggemann, «Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working

- fluids», *Geothermics*, vol. 64, pp. 392-400, nov. 2016, doi: 10.1016/j.geothermics.2016.06.010.
- [167] B. Huang y V. Mauerhofer, «Life cycle sustainability assessment of ground source heat pump in Shanghai, China», *J. Clean. Prod.*, vol. 119, pp. 207-214, abr. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.048.
- [168] T. Gibon, A. Arvesen, y E. G. Hertwich, «Life cycle assessment demonstrates environmental co-benefits and trade-offs of low-carbon electricity supply options», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 1283-1290, sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.078.
- [169] «Integrating life cycle assessment and emergy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy». <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215005034> (accedido 7 de mayo de 2017).
- [170] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, y M. Ritthoff, «Options for broadening and deepening the LCA approaches», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 2, pp. 120-127, ene. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.09.023.
- [171] M. Martín-Gamboa, D. Iribarren, D. García-Gusano, y J. Dufour, «A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems», *J. Clean. Prod.*, vol. 150, pp. 164-174, may 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.017.
- [172] A. F. Sherwani, J. A. Usmani, y Varun, «Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n.º 1, pp. 540-544, ene. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.08.003.
- [173] V. M. Fthenakis y H. C. Kim, «Photovoltaics: Life-cycle analyses», *Sol. Energy*, vol. 85, n.º 8, pp. 1609-1628, ago. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.002.
- [174] J. Peng, L. Lu, y H. Yang, «Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 255-274, mar. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.035.
- [175] S. Gerbinet, S. Belboom, y A. Léonard, «Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 747-753, oct. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.043.

- [176] D. Yang, J. Liu, J. Yang, y N. Ding, «Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade», *J. Clean. Prod.*, vol. 94, pp. 35-45, may 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.003.
- [177] J. F. Armendariz-Lopez, A. Luna-Leon, M. E. Gonzalez-Trevizo, A. P. Arena-Granados, y G. Bojorquez-Morales, «Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, Mexico», *Renew. Energy*, vol. 87, Part 1, pp. 564-571, mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.051.
- [178] Chr. Lamnatou y D. Chemisana, «Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues», *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 270-287, may 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.009.
- [179] M. Lacirignola, B. H. Meany, P. Padey, y I. Blanc, «A simplified model for the estimation of life-cycle greenhouse gas emissions of enhanced geothermal systems», *Geotherm. Energy*, vol. 2, n.º 1, p. 8, oct. 2014, doi: 10.1186/s40517-014-0008-y.
- [180] O. Eriksson, G. Finnveden, T. Ekvall, y A. Björklund, «Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion», *Energy Policy*, vol. 35, n.º 2, pp. 1346-1362, feb. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2006.04.005.
- [181] S. Ramachandran, Z. Yao, S. You, T. Massier, U. Stimming, y C.-H. Wang, «Life Cycle Assessment of a Sewage Sludge and Woody Biomass Co-gasification System», *Energy*, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.139.
- [182] S. Song *et al.*, «Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province», *Energy*, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068.
- [183] «Evaluating the potential of renewable diesel production from algae cultured on wastewater: techno-economic analysis and life cycle assessment (PDF Download Available)», *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/315464530_Evaluating_the_potential_of_renewable_diesel_production_from_algae_cultured_on_wastewater_techno-economic_analysis_and_life_cycle_assessment (accedido 11 de mayo de 2017).

- [184] J. C. Mourmouris y C. Potolias, «A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece», *Energy Policy*, vol. 52, pp. 522-530, ene. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.09.074.
- [185] Ü. Şengül, M. Eren, S. Eslamian Shiraz, V. Gezder, y A. B. Şengül, «Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey», *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 617-625, mar. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.045.
- [186] V. Fthenakis y M. Raugei, «7 - Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems», en *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems*, N. Pearsall, Ed. Woodhead Publishing, 2017, pp. 209-232. doi: 10.1016/B978-1-78242-336-2.00007-0.
- [187] T. Myllyviita, A. Holma, R. Antikainen, K. Lähtinen, y P. Leskinen, «Assessing environmental impacts of biomass production chains – application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA)», *J. Clean. Prod.*, vol. 29, pp. 238-245, jul. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.01.019.
- [188] H. K. Jeswani, A. Azapagic, P. Schepelmann, y M. Ritthoff, «Options for broadening and deepening the LCA approaches», *J. Clean. Prod.*, vol. 18, n.º 2, pp. 120-127, ene. 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.09.023.
- [189] K. Volkart, C. Bauer, P. Burgherr, S. Hirschberg, W. Schenler, y M. Spada, «Interdisciplinary assessment of renewable, nuclear and fossil power generation with and without carbon capture and storage in view of the new Swiss energy policy», *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 54, Part 1, pp. 1-14, nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijggc.2016.08.023.
- [190] S. Gumus, M. Kucukvar, y O. Tatari, «Intuitionistic fuzzy multi-criteria decision making framework based on life cycle environmental, economic and social impacts: The case of U.S. wind energy», *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 8, pp. 78-92, oct. 2016, doi: 10.1016/j.spc.2016.06.006.
- [191] C. Nzila, J. Dewulf, H. Spanjers, D. Tuigong, H. Kiriamiti, y H. van Langenhove, «Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya», *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 496-506, may 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.020.

- [192] E. Strantzali, K. Aravossis, y G. A. Livanos, «Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 775-787, sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.085.
- [193] G. Rebitzer *et al.*, «Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications», *Environ. Int.*, vol. 30, n.º 5, pp. 701-720, jul. 2004, doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005.
- [194] G. Valenzuela-Venegas, J. C. Salgado, y F. A. Díaz-Alvarado, «Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection», *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 99-116, oct. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.113.
- [195] A. Petrillo, F. De Felice, E. Jannelli, C. Autorino, M. Minutillo, y A. L. Lavadera, «Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system», *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 337-355, sep. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.04.027.
- [196] F. Cucchiella, D’ y I. Adamo, «A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments», *Int. J. Photoenergy*, vol. 2015, p. e627454, mar. 2015, doi: 10.1155/2015/627454.
- [197] V. Campos-Guzmán, M. S. García-Cáscales, N. Espinosa, y A. Urbina, «Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, pp. 343-366, abr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.031.
- [198] S. Navega, «Princípios Essenciais do Data Mining», p. 9.
- [199] S. Väisänen, M. Mikkilä, J. Havukainen, L. Sokka, M. Luoranen, y M. Horttanainen, «Using a multi-method approach for decision-making about a sustainable local distributed energy system: A case study from Finland», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1330-1338, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.173.
- [200] K. F.-R. Liu, C.-Y. Ko, C. Fan, y C.-W. Chen, «Combining risk assessment, life cycle assessment, and multi-criteria decision analysis to estimate environmental aspects in environmental management system», *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, n.º 7, pp. 845-862, ago. 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0407-x.

- [201] C. C. C. von Doderer y T. E. Kleynhans, «Determining the most sustainable lignocellulosic bioenergy system following a case study approach», *Biomass Bioenergy*, vol. 70, n.º Supplement C, pp. 273-286, nov. 2014, doi: 10.1016/j.biombioe.2014.08.014.
- [202] L. Stamford y A. Azapagic, «Sustainability indicators for the assessment of nuclear power», *Energy*, vol. 36, n.º 10, pp. 6037-6057, oct. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.08.011.
- [203] A. Azapagic, «Sustainable Production and Consumption: A Decision-Support Framework Integrating Environmental, Economic and Social Sustainability», *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 37, pp. 131-136, ene. 2015, doi: 10.1016/B978-0-444-63578-5.50017-7.
- [204] R. Quijano H, S. Botero B, y J. Domínguez B, «MODERGIS application: Integrated simulation platform to promote and develop renewable sustainable energy plans, Colombian case study», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n.º 7, pp. 5176-5187, sep. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.006.
- [205] M. Rosso, M. Bottero, S. Pomarico, S. La Ferlita, y E. Comino, «Integrating multicriteria evaluation and stakeholders analysis for assessing hydropower projects», *Energy Policy*, vol. 67, pp. 870-881, abr. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.12.007.
- [206] J. R. San Cristóbal, «Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method», *Renew. Energy*, vol. 36, n.º 2, pp. 498-502, feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.031.
- [207] A. Evans, V. Strezov, y T. J. Evans, «Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 5, pp. 1082-1088, jun. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.03.008.
- [208] T. Gibon, R. Wood, A. Arvesen, J. D. Bergesen, S. Suh, y E. G. Hertwich, «A Methodology for Integrated, Multiregional Life Cycle Assessment Scenarios under Large-Scale Technological Change», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, n.º 18, pp. 11218-11226, sep. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b01558.

REFERENCIAS

- [209] «Sitio Web “Acercando el IMSS al Ciudadano”». <http://www.imss.gob.mx/conoce-al-imss/memoria-estadistica-2018> (accedido 20 de abril de 2022).
- [210] L. Chang y J. Tan, «An integrated sustainability assessment of drinking straws», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, n.º 4, p. 105527, ago. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105527.
- [211] N. Cihat Onat, «How to compare sustainability impacts of alternative fuel Vehicles?», *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 102, p. 103129, ene. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2021.103129.
- [212] H. Dyckhoff y R. Souren, «Integrating multiple criteria decision analysis and production theory for performance evaluation: Framework and review», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 297, n.º 3, pp. 795-816, mar. 2022, doi: 10.1016/j.ejor.2021.05.046.
- [213] «Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making - 1st Edition». <https://www.elsevier.com/books/life-cycle-sustainability-assessment-for-decision-making/ren/978-0-12-818355-7> (accedido 26 de noviembre de 2021).
- [214] SENER, «Prospectiva de energías renovables 2016-2030-México». 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener>
- [215] C. Guzmán, «ANALYSIS OF SOLAR RESOURCE FOR A SUSTAINABLE FUNCTIONALITY IN THE REGIONAL EDUCATIONAL CAMPS OF THE AUTONOMOUS PUBLIC UNIVERSITY OF GUERRERO», p. 13, 2018.
- [216] T. R. Bonilla, «Aplicación del método de Nussbaumer sobre pobreza energética a regiones climáticas de México», sep. 2020, Accedido: 7 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/1273>
- [217] R. García-Ochoa, B. Graizbord, R. García-Ochoa, y B. Graizbord, «Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional», *Econ. Soc. Territ.*, vol. 16, n.º 51, pp. 289-337, ago. 2016.
- [218] M. P. Z. Delgado, M. R. Serrano, C. S. Barquín, y H. S. Barquín, «La pobreza energética en mujeres rurales mexicanas: el adobe como tecnología sustentable», *Escen. Empresa Territ.*, vol. 7, n.º 9, Art. n.º 9, nov. 2018, Accedido: 7 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.esumer.edu.co/index.php/escenarios/article/view/30>

REFERENCIAS

- [219] «UI GreenMetric Participants 2021», *Google My Maps*. https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1efasHG5crGdsMjP112AKsyL_gNfoZDI4 (accedido 25 de mayo de 2022).
- [220] J. L. Carpio-Domínguez y J. L. Carpio-Domínguez, «Crimen organizado (narcotráfico) y conservación ambiental: el tema pendiente de la seguridad pública en México», *CS*, n.º 33, pp. 237-274, abr. 2021, doi: 10.18046/rece.i33.4076.
- [221] «Perspectivas del desarrollo social y rural en México/ Prospects for social and rural development in Mexico», *Rev. Cienc. Soc.*, n.º Vol. 26, Num. 3, 2020, doi: 10.31876/rce.v26i3.33230.

ANEXOS

A1. CODIGO DEL PROGRAMA EN PYTHON CREACION DE LAS FUNCIONES

```
AHP-RIM.py - E:\ProgramasPython\RIM\AHP-RIM.py (3.8.0)
File Edit Format Run Options Window Help

#AREA DE FUNCIONES
#Funcion que devuelve la minima diferencia entre el x y el intervalo de referencia ideal

def dmin(x, c, d):
    minimo=0
    a=math.fabs(x-c)
    b=math.fabs(x-d)
    if a<b:
        minimo=a
    else:
        minimo=b

    return minimo

#FUNCION PARA CALCULAR LOS INTERVALOS (CD,AC, DB)

def intervalos(Mint):
    I=[]
    for c in Mint:
        x=[]
        inicio=c[0]
        fin=c[1]
        for a in range(inicio,fin+1):
            x.append(a)
        I.append(x)
    return I
```

```

#FUNCIÓN QUE CÁLCULA LA MATRIZ NORMALIZADA DEL MÉTODO RIM
#AL:número de alternativas, CR: número de criterios, IA: Indices de los intervalos CD
#IB: Índice del intervalo AC, IC: Índice del intervalo DB
#MV: Matriz de valoración del método RIM
def MNRIM(AL,CR,IA,IB,IC,MV):

    #CALCULAMOS LOS INTERVALOS
    CD=intervalos(IA)
    AC=intervalos(IB)
    DB=intervalos(IC)
    MN=[]

    F=0
    AMN=[]
    #fila=1
    for Al in MV:

        AMN=[]
        for Cd in range(0,CR):
            F=0
            elex=Al[Cd]
            X=CD[Cd]
            Y=AC[Cd]
            Z=DB[Cd]
            auxAC=IB[Cd]
            ia=auxAC[0]
            ic=auxAC[1]
            auxDB=IC[Cd]
            iD=auxDB[0]
            iB=auxDB[1]
            #auxCD=ICD[Cd]
            #iC=auxCD[0]
            #id=auxCD[1]

            if elex in X:

                F=1

            if elex in Y and ia!=ic:

                d=dmin(elex,ic,iD)
                dAC=ia-ic
                Va= math.fabs (dAC)
                F=1-(d/Va)

            else:
                if elex in Z and iD!=iB:
                    d=dmin(elex,ic,iD)
                    dDB=iD-iB
                    Va= math.fabs (dDB)
                    F=1-(d/Va)

        AMN.append(F)
    MN.append(AMN)
    return MN

```

```
AHP-RIM.py - E:\ProgramasPython\RIM\AHP-RIM.py (3.8.0)
File Edit Format Run Options Window Help

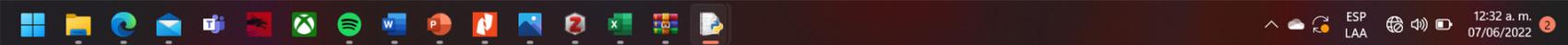
#Función que crea la matriz normalizada con la influencia de los pesos
def MNIPRIM(MNZ, VP):
    MIP=[]
    AMIP=[]
    for i in MNZ:
        AMIP=[]
        for e in range(C):
            elem=i[e]
            elemV=VP[e]
            eMIP=elem*elemV
            AMIP.append(eMIP)
        MIP.append(AMIP)

    return MIP

#Función que crea la matriz de variación a la solución ideal
def MVSIRIM(mni, VP):
    MVSI=[]
    AMVSI=[]
    for i in mni:
        AMVSI=[]
        for e in range(C):
            el=i[e]
            elVP=VP[e]
            b=el-elVP
            eMVSI=math.pow(b, 2)
            AMVSI.append(eMVSI)
        MVSI.append(AMVSI)
    return MVSI

def MVSINRIM(mni):
    MVSN=[]
    AMVSN=[]
    for i in mni:
        AMVSN=[]
        for e in i:
            v=math.pow(e, 2)
            AMVSN.append(v)
        MVSN.append(AMVSN)
    return MVSN
```

Ln: 83 Col: 0



IMPLEMENTACION DE LAS FUNCIONES (inicio del programa)

```

#-----DATOS DE INICIO-----
#-----DATOS INICIALES DEL METODO RIM-----
#Vector de pesos :CALCULADO CON AHP
#ENTRADA VARIABLE
#DATOS DEL EXPERTO
PE1=[0.060,0.026,0.048,0.026,0.240,0.120,0.080,0.030,0.034,0.080,0.034,0.120,0.048,0.048]
#ENTADA CONSTANTE
#INGRESE LOS VALORES DE LOS INTERVALOS
ICD=[[250,250],[1,1],[720,720],[0,0],[49286,61688],[0,0],[5,8],[0,0],[3,5],[44,44],[1,1],[100,100],[3,4],[3,4]]
IAC=[[0,250],[1,1],[0,720],[0,0],[49286,49286],[0,0],[1,5],[0,0],[1,3],[32,44],[1,1],[0,100],[1,3],[1,3]]
IDB=[[250,250],[1,3],[720,720],[0,10],[61688,61688],[0,1000],[8,20],[0,1000],[5,20],[44,44],[1,3],[100,100],[4,4],[4,4]]
IDAL=["A1-CCH","A2-CCH","A3-CM","A4-CM","A5-CLL","A6-CLL"]

#MATRIZ DE VALORACIÓN DEL PROBLEMA
MD=[[68,1,17,3,61792,3089,6,0.44,5,44,3,52,3,3],[68,2,22,2,50756,2537.7,6.36,0.32,4,32,4,38,3,3],[92,1,26,3,62373,3118.6,6.97,0.44,6,44,6,100,4,4],[92,2,29,2
#creamos un objeto wb
wb = openpyxl.Workbook()
hoja1=wb.create_sheet("EXPERTO1")
#hoja = wb.active #Hoja por defecto o cero
#hoja.title="MNormalizada"
hoja2=wb.create_sheet("MNPesos")

#Activo la hoja que se va manipular
hoja2=wb.active
print(f'Hoja activa: {hoja1.title}')
#a1=hoja["A1"]
#b1=hoja2["A1"]
#b1=hoja2.cell(row=1, column=1,value=1)
#wb.active=MNormalizada
#Le ponemos titulos a las matriz

```

ENTRADA VARIABLE:

ENTRADA CONSTANTE

Se crean los archivos xls

Ln: 85 Col: 0



ESP LAA 12:40 a. m. 07/06/2022

GENERACION DE LAS MATRICES EN ARCHIVOS DE EXCEL

```

#GENERAMOS LA MATRIZ NORMALIZADA
encabezado1=("", "MATRIZ NORMALIZADA", "")
espacio=("", "")
hojal.append(encabezado1)
encabezado=("C1", "C2", "C3", "C4", "C5", "C6", "C7", "C8", "C9", "C10", "C11", "C12", "C13", "C14")
hojal.append(encabezado)
Mn=MNRIM(A, C, ICD, IAC, IDB, MD)
for a in range(A):
    #X=[IDAl[a], Mn[a]]
    hojal.append(Mn[a])

#GENERAMOS LA MATRIZ NORMALIZADA CON INFLUENCIA DE PESOS
hojal.append(espacio)
encabezado2=("", "MATRIZ NORMALIZADA CON INFLUENCIA DE PESOS")
hojal.append(encabezado2)
hojal.append(encabezado)
mip=MNIPRIM(Mn, PE1)
for m in range(A):
    #X=[IDAl[a], Mn[a]]
    hojal.append(mip[m])

#GENERAMOS LA MATRIZ CON VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEA POSITIVA (+)
hojal.append(espacio)
encabezado2=("", "VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEAL (+)")
hojal.append(encabezado2)
hojal.append(encabezado)
mvsI=MVSIRIM(mip, PE1)
for m in range(A):
    #X=[IDAl[a], Mn[a]]
    hojal.append(mvsI[m])
#GENERAMOS LA MATRIZ CON VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEAL NEGATIVA (-)
hojal.append(espacio)
encabezado2=("", "VARIACIÓN A LA SOLUCIÓN IDEAL (-)")
hojal.append(encabezado2)
hojal.append(encabezado)
mvsIN=MVSINRIM(mip)
for m in range(A):
    #X=[IDAl[a], Mn[a]]
    hojal.append(mvsIN[m])

```

RANKING DE LAS ALTERNATIVAS

```
#GENERAMOS EL RANKING DE LAS ALTERNATIVAS
hoja1.append(espacio)
encabezado2=("", "RANKING DE LAS ALTERNATIVAS")
hoja1.append(encabezado2)
encabezado= ("ID-ALTERNATIVAS", "PUNTUACIÓN")
hoja1.append(encabezado)
#CALCULANDO I+
IMAS=[]
for i in mvsI:
    S=sum(i)
    R=sqrt(S)
    IMAS.append(R)

#CALCULANDO I-
IMENOS=[]
for i in mvsI:
    S=sum(i)
    R=sqrt(S)
    IMENOS.append(R)

#ESTABLECIENDO EL RANKING DE LAS ALTERNATIVAS
RANKING=[]
for r in range (A):
    er=IMENOS[r]/(IMAS[r]+IMENOS[r])
    RANKING.append(er)
    rank=(r+1,er)
    hoja1.append(rank)

wb.save('RIM-MN.xlsx')
```

Ln: 233 Col: 0

