

05-004

AHP-RIM TO DEFINE THE ORDER OF INSTALLATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE CREATION OF SUSTAINABLE UNIVERSITY CAMPUSES IN MEXICO.

Campos Guzmán, Verónica ⁽¹⁾; Espinosa, Nieves ⁽²⁾; Cruz Guzmán, Virgilio ⁽³⁾; García-Cáscales, Socorro ⁽²⁾

⁽¹⁾ UPCT, ⁽²⁾ Universidad Politécnica de Cartagena, ⁽³⁾ Universidad Autónoma de Guerrero

Universities can play a very important role in reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions. In Latin America a network of universities (ACUPCC) was created with the commitment to reduce GHG emissions, to date this cluster is made up of only 12 universities in the United States. With regard to Mexico, little progress has been made in this context, only states such as Baja California, Guadalajara and Querétaro have established environmental compliance in their universities, which has led them to operate from 20% to 90% with renewable energy. The Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO), with an enrollment of 44,000 students, with an estimated consumption of 34.9 kWh per year per student, is considering becoming independent from fossil resources and appearing in the Green metric world university ranking. To do this, it is proposed to initiate the transition to ""Sustainable Campus"" by selecting three campuses as site locations by installing photovoltaic systems (SPV), However, it is not possible to start the installations simultaneously, therefore, this work evaluates through the AHP and RIM methods from the environmental, economic, social, political and technical point of view the SPVs to be installed, and thus propose a prioritization in the order of installation.

Keywords: Photovoltaic systems; renewable energy; AHP; RIM, sustainable campus.

AHP-RIM PARA DEFINIR EL ORDEN DE INSTALACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LA CREACIÓN DE CAMPUS UNIVERSITARIOS SUSTENTABLES EN MÉXICO.

Las universidades pueden desempeñar un papel muy importante en la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En América Latina se creó una red de universidades (ACUPCC) con el compromiso de reducir las emisiones GEI, actualmente este clúster está integrado solo por 12 universidades de Estados Unidos. En lo que respecta a México, poco se ha avanzado en este contexto, solo estados como Baja California, Guadalajara y Querétaro han establecido un cumplimiento ambiental en sus universidades, esto las lleva a funcionar con un 20% hasta un 90% con energía renovable. La Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO), con una matrícula de 44,000 estudiantes, con un consumo estimado de 34.9 kWh anual por estudiante se plantea independizarse de los recursos fósiles y figurar en el Green metric world university ranking. Para ello, se propone iniciar la transición a "Campus sustentables" seleccionando tres campus como lugares de emplazamientos instalando sistemas fotovoltaicos (SPV), sin embargo, no es posible iniciar las instalaciones de manera simultánea, por tanto, este trabajo evalúa mediante los métodos AHP y RIM desde el punto de vista ambiental, económico, social, político y técnico los SPV a instalar, y así proponer una priorización en el orden de instalación.

Palabras claves: Sistemas fotovoltaicos; energía renovable; AHP; RIM, Campus sustentables.

Correspondencia: Verónica Campos Guzmán vcamposguzman@hotmail.com

Agradecimientos: Proyecto PID2019-104272RB-C55/AEI/10.13039/501100011033, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI)



©2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

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 no llega al 30 %, la energía solar cubre un poco más del 7% del total. Los sectores con mayor responsabilidad de consumo energético son: transporte (46.5 %), industrial (31.8 %) y residencial, comercial y público (18.1 %) (SENER, 2018). Dentro del sector comercial y público existe un grupo importante a destacar, este corresponde a las universidades, estas pueden jugar un papel importante en la mitigación del cambio climático, 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 consolidado 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, esto le ha permitido funcionar en un 50% con energía solar, a pesar que el consumo energético estudiantil (nivel medio superior y superior) ha aumentado drásticamente a 23.76 kWh/año en los últimos años, esto se debe en general a la implementación de material de laboratorios, uso de tecnologías emergentes y en particular a los malos hábitos de consumo energético (SENER, 2018), al final esto se traduce en el aumento de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Así, en este contexto, la Universidad Autónoma de Guerrero, ha emprendido el camino hacia la transición energética de sus 48 Campus Universitarios (CU) mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV), como es de suponerse, lograr un objetivo tan ambicioso obliga a dividir en objetivos parciales, por tanto se plantea iniciar dicha transición a través de 3 CU que integran el proyecto de regionalización (Guzmán, 2018), logrando un primer objetivo de contar con un proyecto de regionalización integrado por **campus sustentables**, sin embargo, 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 y necesario determinar un orden de instalación estableciendo prioridades o urgencia basada en los criterios que integren la sostenibilidad.

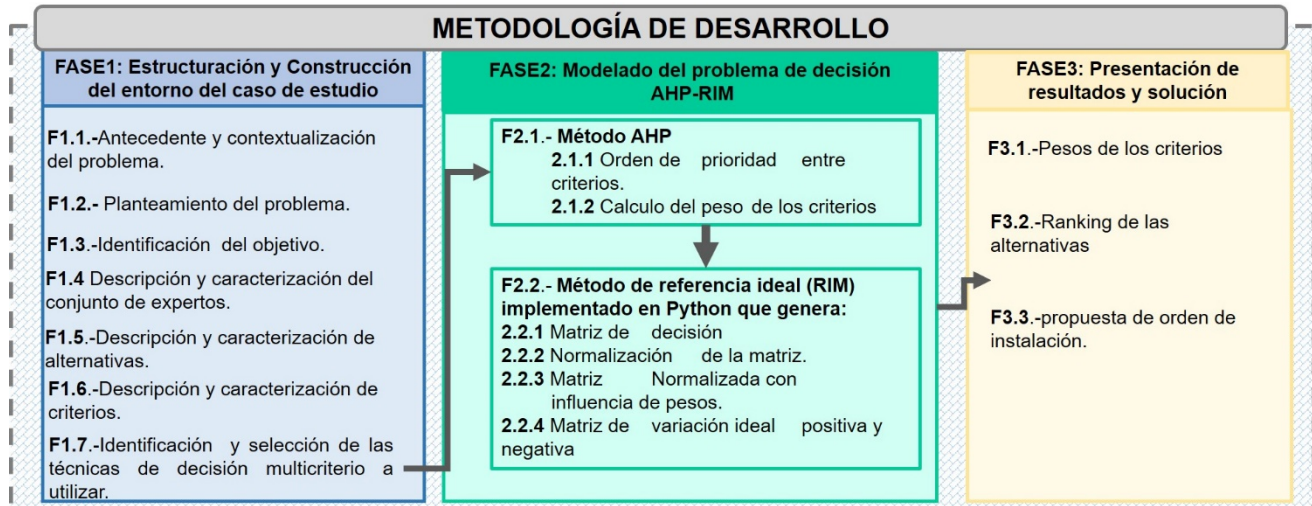
En este trabajo, se identifican 6 emplazamientos, se dimensionan y diseñan para dar lugar a una matriz de alternativas (SFV), finalmente se evalúa esta matriz mediante los métodos de decisión multicriterio AHP y RIM desde el punto de vista ambiental, económico, social, político y técnico, el objetivo es proponer un orden de instalación de los SFV.

Esta investigación está estructurada de la siguiente manera, el epígrafe 2 muestra la metodología y su desarrollo del caso de estudio, esta incluye desde la contextualización del problema hasta el ranking de las alternativas. Los resultados son expuestos en el epígrafe 3. En el epígrafe 4 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

2. Metodología

El desarrollo del caso de estudio se llevó a cabo en tres fases como se muestra en la Figura 1. Desde la estructuración del problema hasta la presentación de resultados.

Figura 1. Metodología para el desarrollo del caso de estudio



2.1 Fase 1: Estructuración y construcción del entorno del caso de estudio

2.1.1 Antecedentes y contexto del problema

A principios del año 2020, la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO) inicio el proyecto de: **“Campus sustentables”** con INTRUST -*Empresa Canadiense, dedicada a la venta de paneles e instalación de sistemas fotovoltaicos (SFV)*-, este proyecto consiste en la instalación de SFV en los 48 Campus Universitarios (CU) que integran la UAGRO, el objetivo general de este proyecto es en primera instancia; sustituir la demanda base de los campus proporcionada con energía convencional por energía limpia e iniciar la transición energética de la UAGRO con la generación de campus sustentables, 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. A la fecha, se han realizado una serie de estudios de viabilidad en un conjunto de CU, sin embargo, por las condiciones que presentan y la necesidad de contar con un servicio de electrificación adecuado, se han clasificado los campus que integran el proyecto de regionalización (Guzmán, 2018) como prioridad para la instalación de los SFV.

2.1.2 Planteamiento del problema

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

1. No es posible acceder a todos los campus para realizar las instalaciones fotovoltaicas, por cuestiones de seguridad solo se cuentan con tres de seis campus: Costa Chica (ubicado al sur del estado de Guerrero), Llano Largo (zona centro) y Montaña (zona alta).
2. 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, pero deben realizarse de manera escalonada.

Derivado de lo anterior, se realizaron una serie de actividades cuyo objetivo fue lograr el diseño y dimensionado de los SFV en los lugares de emplazamientos, para esto se llevaron a cabo una serie de actividades como se muestra en la Figura 2, finalmente se propone una matriz de 6 instalaciones de SFV, teniendo como emplazamientos los tres campus regionales disponibles, dichas instalaciones repartidas físicamente 2 en cada CU. Cada instalación está diseñada para ser interconectada a la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), finalmente se presenta una matriz con los siguientes campos: ID SFV, Descripción breve, potencia (kWp) y tipo de zona, este último campo es una propuesta de clasificación de zonas para las instalaciones, esta propuesta se describe en la Tabla 1.

Figura 2. Flujo de actividades para el diseño y dimensionado de los SFV, en los CU's

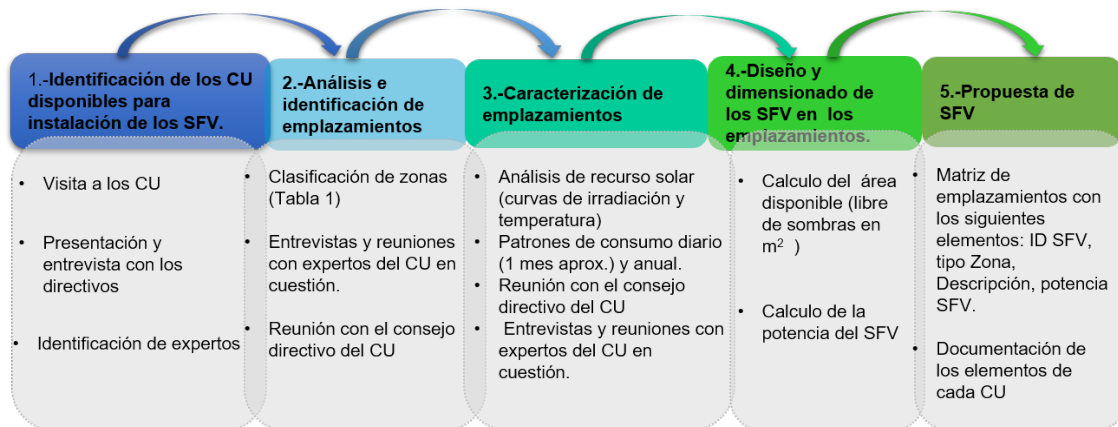


Tabla 1. Clasificación de zonas para la instalación de los emplazamientos

CLASIFICACIÓN DE ZONAS PARA LOS EMPLAZAMIENTOS		
ID	Descripción	Observaciones
Z1	Sobre el techo (Edificios u obras ya construidas)	Esta zona es para ubicar físicamente el SFV, sobre los techos de los edificios ya construidos.
Z2	En tierra con uso secundario	En esta clasificación se consideran espacios físicos para la instalación de los SFV que requieran 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 en el campus, Tales como ; un techumbre un estacionamiento, sombra para cultivo de peces, sombra para criaderos de peces , conejos o gallinas, en su defecto vivero, en resumen debe ser una zona cuya superficie de tierra debe ser aprovechable.
Z3	En tierra sin uso secundario	Esta ubicación es aquella que solo tiene la función de suministro eléctrico, es decir tiene únicamente la función de una granja solar.

2.1.3 Identificación del objetivo

Proponer un orden de instalación de los SFV para iniciar la transición energética a campus sustentables en la UAGRO, utilizando la metodología híbrida: AHP-RIM.

2.1.4 Descripción y caracterización del conjunto de expertos

Para caracterizar las alternativas y criterios, primero se integra un equipo de expertos y tomadores de decisiones, estos fueron seleccionados considerando el perfil, experiencia, conocimiento sobre la problemática y disponibilidad en torno al proyecto de regionalización, por último se hace una selección de cinco expertos que se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción y caracterización de los expertos.

ID	Perfil	Procedencia
E1	Dr. en energías renovables, especialista en fotovoltaica	Campus Regional de la Costa Chica
E2	Maestro en ingeniería, aplicación de tecnologías emergentes a la producción de energías limpias	Campus Regional de la Costa Chica
E3	Coordinador General de los 7 Campus Regionales	Rectoría, Uagro
E4	Coordinador del Campus Costa Chica	Campus Regional de la Costa Chica
E5	Directora General del área de sostenibilidad (Uagro-Verde)	Rectoría, Uagro

2.1.5 Descripción y caracterización de alternativas

La Tabla 3 muestra la matriz de alternativas identificadas para este caso de estudio, obtener esta matriz fue el resultado de seguir las actividades estructuradas que se muestran en la Figura 2.

Tabla 3. Descripción y caracterización de alternativas

CAMPUS (Descripción)	ID-ALTERNATIVA	DESCRIPCIÓN	Área ocupada (m ²)	Tipo de zona*(s según Tabla 1)	Potencia instalada (kWp)	Energía producida (kWh/día)
-Costa Chica (Cruz Grande Guerrero, México) -Energía diaria consumida (kWh/día)=424.93	CRESCH-01	Sistema fotovoltaico instalado sobre los techos de los edificios A y B del campus. Este sistema requiere de una obra civil extra como zapatas de concreto para cada ristra del sistema, con estructuras de acero o aluminio.	252	Z1	44	221.5
	CRESCH-02	Sistema fotovoltaico instalado en una techumbre, entre el edificio A y B del campus, para esto se construirá una estructura de metal/acero, que sirva como base para la instalación de los paneles entre el edificio A y B, misma que funciona como la techumbre de la explanada del campus.	200	Z2	32	162.2
-Montaña (Huamuxtitlan, Guerrero, México) -Energía diaria consumida (kWh/día)= 61.85	CRESMON-03	Sistema fotovoltaico instalado sobre los techos de los edificios A y B del campus. Este sistema requiere de una obra civil extra como zapatas de concreto para cada ristra del sistema, con estructuras de acero o aluminio.	252	Z1	44	233.2
	CRESMON-04	En el ala lateral del edificio A, se construye un parking, y se superponen paneles, la función primaria es la producción de energía eléctrica y la función secundaria es servir como estacionamiento para los autos del Campus	215	Z2	32	169.6
-Llano Largo (Llano Largo, municipio de Acapulco Gro, México) -Energía diaria consumida (kWh/día)=1839.36	CRESLLL-05	Se instalarán paneles sobre los techos de los edificios, que suman aproximadamente 11 factibles para su uso, se toma como una sola edificación debido al modelo de la construcción.	252	Z1	44	221.32
	CRESLLL-06	Se instalan paneles sobre una cancha de basquetbol considerando solo la superficie disponible libre de sombras. El campus se encuentra en una zona suburbana.	240	Z2	32	160.96

2.1.6 Descripción y caracterización de criterios

La Tabla 4 establece el listado de criterios que se consideran para este caso de estudio, estos criterios son el resultado de una investigación sobre la búsqueda de aquellos indicadores que figuran más en los estudios sobre evaluación de sostenibilidad en energías renovables. Esta batería de indicadores es soportada sobre una base de conocimientos compuesta por más de un centenar de artículos revisados (Campos-Guzmán et al., 2019)

Tabla 4. Descripción y caracterización de los criterios

CRITERIO	UNIDAD DE MEDIDA	Descripción
C1: Formación educativa (CUANTITATIVO)	No. De estudiantes beneficiados	Hace referencia a los estudiantes que usan el FSV como objeto de estudio o laboratorio
C2: Ocupación y pérdida de áreas (CUANTITATIVO)	M ² Ocupados	Perdida de áreas
C3: Riesgo de accidentes(CUANTITATIVO)	% de riesgos en accidentes	Según las estadísticas, el porcentaje de riesgo en accidentes en este tipo de instalaciones.
C4: Influencia local del proyecto en la comunidad (CUANTITATIVO)	No. De Empleos temporales generados en la comunidad.	Empleos directos en los diferentes oficios.
C5: Costo SFV (CUANTITATIVO)	Dólares (DlIs)	Incluye desde su diseño e instalación
C6: Costo Manto anual (CUANTITATIVO)	Dólares (DlIs)	Incluye solo gastos de mantenimiento al año
C7: Retorno de la inversión (PAYBACK) (CUANTITATIVO)	Años	No. Años en recuperar el costo total del SFV.
C8: Perfil ambiental (CUANTITATIVO)	kg de emisiones de CO ₂ equivalentes	Cantidad de CO ₂ emitidos por el SFV instalado.
C9: EPBT (CUANTITATIVO)	Años	No. Años en regresar la energía invertida en fabricar el SFV.
C10: Potencia SFV (CUANTITATIVO)	kW	
C11: Factibilidad (tiempo de despliegue) (CUANTITATIVO)	Años	En cuantos años se puede desplegar el SFV
C12: % Demanda energética cubierta (CUANTITATIVO)	% cubierto, de la demanda total	Mide el % de la demanda cubierta de cada CU.
C13: Apoyo de financiamiento por autoridades universitarias institucionales(CUALITATIVO)	Nulo, bajo, medio, alto, muy alto	Apoyo por parte del rector, coordinadores, y tomadores decisiones de la UAGRO.
C14: Factibilidad de participación en convocatorias especiales de proyectos tecnológicos(CUALITATIVO)	Nulo, bajo, medio, alto, muy alto	Apoyo por parte del rector, coordinadores, y tomadores decisiones del estado gubernamental o federal.

2.1.7 Identificación y selección de las técnicas de decisión multicriterio

Método Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para el cálculo de los pesos

La lógica de solución de este método es jerarquizar el problema, clasificándolo en las etapas de modelado, valoración y priorización (Saaty, 2014), para nuestro caso, la etapa 1 de este método se muestra en la Figura 3, modela el problema tratado. El principal objetivo de AHP es permitir que el tomador de decisiones determine la influencia de cada variable en un proceso de jerarquía. Los tres objetivos principales de AHP son los siguientes (Sánchez-Lozano & Rodríguez, 2020):

- I. Estructurar decisiones complejas como una jerarquía de objetivos, criterios y alternativas.
- II. Para 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
- III. Para sintetizar verticalmente juicios en diferentes niveles de la jerarquía.

Estudios recientes como en (Ghimire & Kim, 2018; Mastrocinque et al., 2020), está demostrado que el método AHP es el más utilizado por la comunidad científica para la evaluación de fuentes de energía renovable, la identificación del emplazamiento óptimo para una instalación de energía renovable, y selección del mejor entre las alternativas. (Ilbahar et al., 2019) , para nuestro caso, seleccionamos este método para llevar a cabo el proceso de establecer prioridades entre los criterios y así obtener el vector de pesos, dejando el trabajo del cálculo del ranking de las alternativas al método de referencia ideal (RIM) descrito a continuación.

Método de Referencia Ideal (RIM) para el cálculo del ranking de las alternativas

RIM, aunque es un método relativamente emergente, es una metodología novedosa que permite la agregación de información para un ideal de referencia (Cables et al., 2016). 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 toma de decisiones en cuestiones de selección de equipamiento militar (Sánchez-Lozano & Rodríguez, 2020) y para clasificar las fechas de impactos de posibles asteroides cercanos a la tierra (Sánchez-Lozano et al., 2019). Sin embargo, aún no se ha aplicado en el contexto de toma de decisiones sobre energías renovables, este trabajo representa la punta de lanza en este contexto y presenta por primera vez su aplicación en este ámbito. Los pasos del enfoque RIM se describen a continuación.

Paso1: 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. Calculo 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 como en (1).

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

Observe que $[C, D]$ 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. Calcule 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. Determine la variación de cada alternativa con respecto a la ideal de referencia normalizado. Para esto tenemos la expresión como se muestra en (2)

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

Paso 6. Cálculo del índice relativo, para cada alternativa se calcula como se muestra en la expresión referenciada en (3).

$$R_i = \frac{I_i^-}{I_i^+ + I_i^-}, i=1, \dots, m, \text{ donde } R_i \in (0,1) \quad (3)$$

Paso 7. Ordene 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.

2.2 Fase 2. Modelado del problema de decisión (AHP-RIM)

En la Figura 3 se modela el problema de decisión, se propone utilizar AHP para el cálculo de los pesos de los criterios y el método RIM para establecer el orden de las alternativas.

2.2.1 Método AHP

Orden de prioridad y peso de los criterios

Para obtener el peso de los criterios, se procedió a realizar una encuesta en Excel a cada experto, la dinámica que siguió, se muestra el diagrama de flujo de la Figura 4, la aplicación de esta, busco dos objetivos: el primero establecer el orden de prioridad entre criterios, y segundo obtener el vector de pesos de criterios, para cada experto. Finalmente, cada experto proporcionó el orden de prioridad de los criterios según su juicio. En la Tabla 5 se observa que tres de los cinco expertos establecieron el criterio 5 (Costo total del SFV) como el más importante a tomar en cuenta, mientras que la Influencia local del proyecto en la comunidad, como el menos importante.

Tabla 5. Orden de prioridad que estableció cada experto en la encuesta aplicada

Expertos	Orden de prioridad de criterios													
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
E1	C12	C13	C5	C6	C11	C10	C7	C2	C8	C1	C14	C9	C3	C4
E2	C5	C12	C1	C10	C6	C14	C11	C8	C2	C7	C13	C3	C9	C4
E3	C10	C7	C5	C6	C8	C4	C2	C1	C9	C12	C13	C3	C14	C11
E4	C5	C12	C10	C6	C7	C1	C3	C11	C9	C8	C2	C4	C14	C13
E5	C5	C6	C12	C10	C7	C1	C3	C13	C14	C9	C11	C8	C2	C4

2.2.2 Método de Referencia Ideal (RIM) implementado en Python

En esta sección se desarrolló el método RIM en el lenguaje de programación Python, este requiere de dos entradas, una que se ingresa una sola vez, a esto le llamamos: “**datos de inicio**”, que hace referencia a los pasos 1 y 2 del método RIM, estos se refieren a las matrices de: *intervalos de dominio*, *intervalos de referencia ideal* y *matriz de valoración X*, mostradas en las tablas 6,7 y 8 respectivamente. La segunda entrada, se le llama: “**datos de entrada**”, estos varían dependiendo del vector de peso (W_{En}) de los criterios de cada experto (método AHP), se ingresa al algoritmo un vector de pesos a la vez y el programa proporciona en un archivo de Excel cuyo contenido es: la matriz normalizada, matriz normalizada con influencia de pesos, variación a la solución ideal positiva y negativa, y el ranking de las alternativas, la lógica del programa se puede ver gráficamente en la Figura 5.

Figura 3. Diagrama de modelado del problema de decisión con AHP-RIM

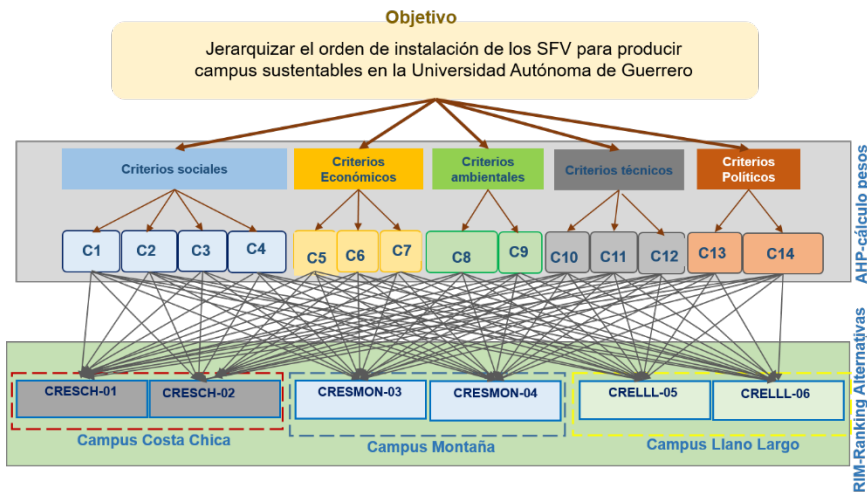


Figura 4. Diagrama de flujo para obtener el orden de prioridad entre criterios, para cada experto.

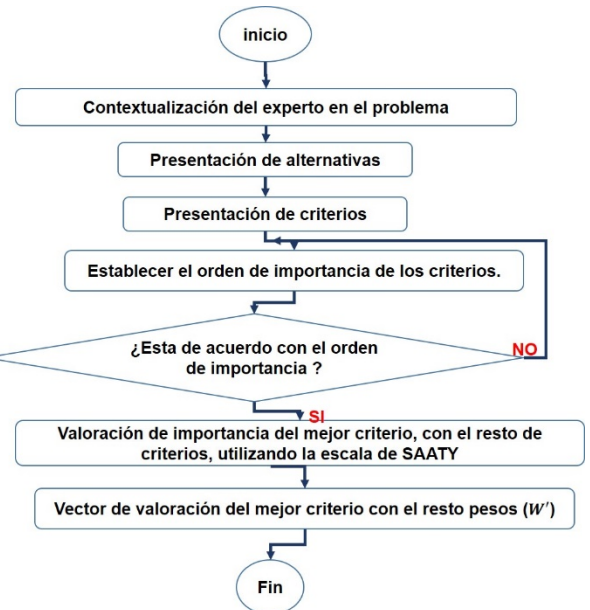


Tabla 6. Intervalos de dominio de trabajo

		Dominio de trabajo (A-B)													
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
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 7. Intervalos de referencia

		Ideal de referencia (C-D)													
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
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

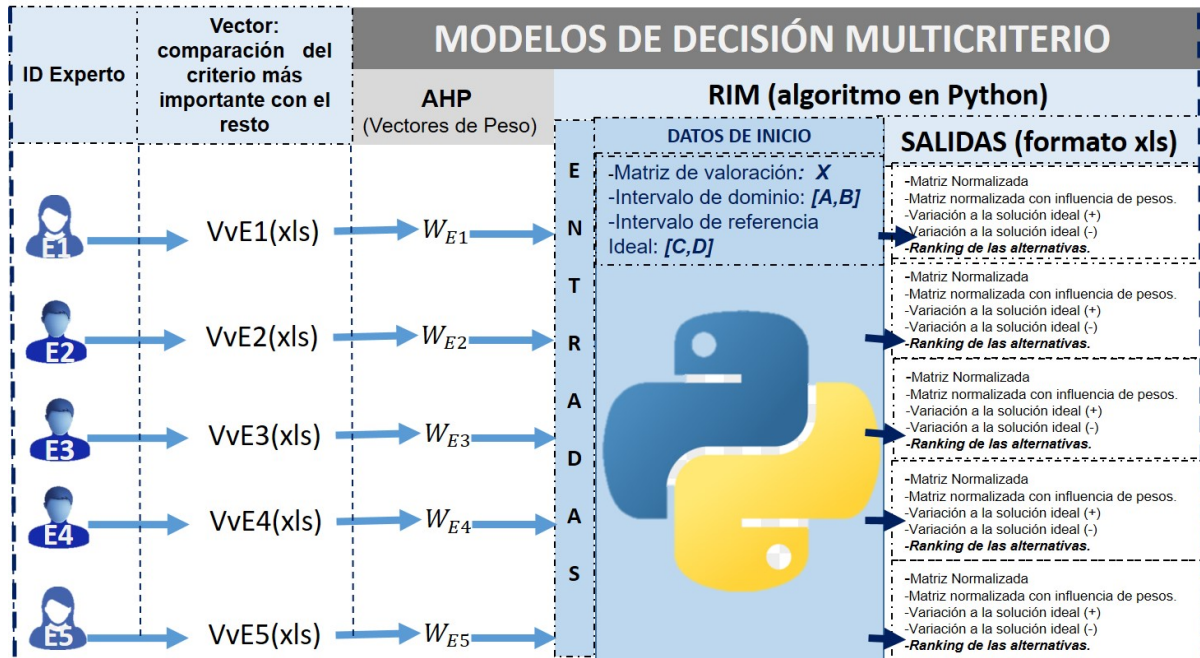
Tabla 8. Matriz de valoración X

ID Alternativas	ID-CRITERIOS													
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
CRESCH-01	68	0	17	3	61792	3089	6	0.44	5	44	3	52	3	3
CRESCH-02	68	200	22	2	50756	2537.7	6.36	0.32	4	32	4	38	3	3
CRESMON-03	92	0	26	3	62373	3118.6	6.97	0.44	6	44	6	100	4	4
CRESMON-04	92	215	29	2	49286	2464.32	7.57	0.32	5	32	5	100	4	4
CRESLLL-05	0	0	24	5	61802	3090.12	5.6	0.44	5	44	3	12	3	3
CRESLLL-06	0	240	37	3	61681	3084.04	7.9	0.32	6	32	4	9	3	3

2.3 Fase 3. Presentación de salidas de los métodos AHP-RIM

En esta fase, se presentan los resultados de la fase anterior, por cuestiones de espacio se presenta un resumen sobre los resultados, mostrando así, solo los pesos de los criterios y el ranking de las alternativas directamente.

Figura 5. Descripción general de las entradas y salidas del método RIM programado en Python



2.3.1 Pesos de los criterios

Cinco fueron los expertos que formaron el equipo de trabajo para dar solución a este caso de estudio, como muestra la tabla 9, 3 de los 5 expertos estuvieron de acuerdo en seleccionar el mismo criterio (criterio 5) como el más importante, sin embargo, los otros dos lo consideran como el tercero más importante, dejando el criterio 12 entre el primero y segundo más importante, como se resaltan en la tabla, de color verde aquellos cuya posición es la primera y marrón los que se encuentran en segunda.

2.3.2 Ranking de las alternativas

La tabla 10, muestra los rankings de las alternativas correspondiente a cada experto, considerando su propio vector de peso de los criterios (tabla 9), este es el vector final que proporciona el programa desarrollado. Analizando detenidamente los resultados de la Tabla 10, se observa que; el 80% de los expertos coincide en que sea el SFV de la alternativa 4 el primero en desarrollarse (resaltado en color verde), luego el 60 % coincide en que la siguiente sea la alternativa 2 (color marrón) de ahí solo un 40 % coincide en que la próxima sea la alternativa 3 (color azul).

Tabla 10. Ranking de las alternativas, según los 5 expertos

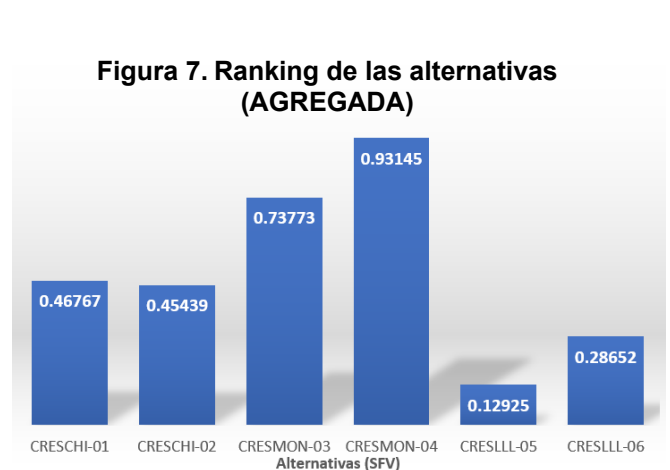
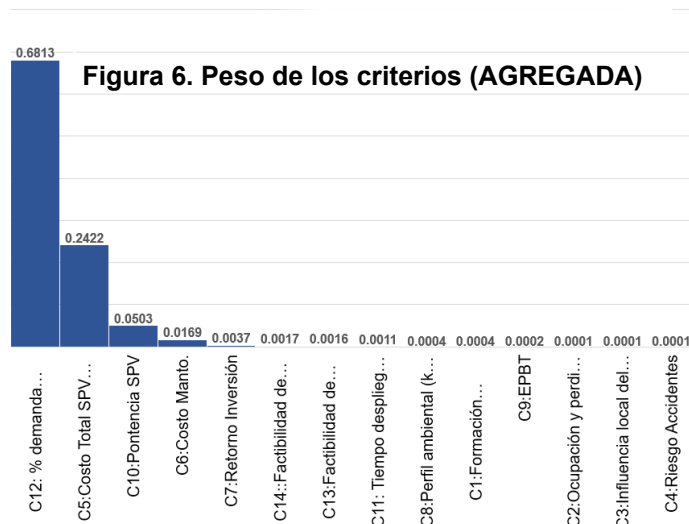
ID-ALTERNATIVAS	RANKING DE LAS ALTERNATIVAS SEGÚN CADA EXPERTO					Ranking En colores
	E1	E2	E3	E4	E5	
CRESCHI-01	0.49678	0.37990	0.66778	0.40847	0.35044	1ro
CRESCHI-02	0.44128	0.55160	0.27675	0.52669	0.56578	2do
CRESMON-03	0.65392	0.49831	0.62416	0.49854	0.36552	3ro.
CRESMON-04	0.68405	0.68749	0.28479	0.65306	0.60716	4to.
CRESLLL-05	0.30527	0.26473	0.61294	0.28051	0.26909	5to
CRESLLL-06	0.33004	0.47319	0.26932	0.46231	0.53797	6to

Tabla 9. Vectores de pesos de los criterios, según los 5 expertos

ID-CRITERIOS/Descripción	PESOS DE LOS CRITERIOS, SEGÚN CADA EXPERTO				
	E1	E2	E3	E4	E5
C1: Formación Educativa	0.03622	0.10734	0.04139	0.04420	0.06025
C2: Ocupación y pérdida de áreas	0.04139	0.03067	0.05795	0.02763	0.02678
C3: Influencia local del proyecto	0.03220	0.02684	0.03220	0.04420	0.04820
C4: Riesgo Accidentes	0.03220	0.02385	0.05795	0.02763	0.02678
C5: Costo Total SFV (BOS+Paneles+instalación)	0.09659	0.21469	0.09659	0.22101	0.24099
C6: Costo Manto.	0.09659	0.07156	0.09659	0.07367	0.12049
C7: Retorno Inversión	0.05795	0.03067	0.09659	0.07367	0.08033
C8: Perfil ambiental (kg CO ₂)	0.03622	0.04294	0.05795	0.03157	0.03012
C9: EPBT	0.03220	0.02385	0.03622	0.03157	0.03443
C10: Potencia SFV	0.05795	0.07156	0.28976	0.11051	0.08033
C11: Tiempo despliegue proyecto	0.05795	0.04294	0.03220	0.04420	0.03443
C12: % demanda cubierta del SPV	0.28976	0.21469	0.03622	0.22101	0.12049
C13: Factibilidad de apoyos hacia el proyecto por órganos públicos estatales	0.09659	0.02684	0.03622	0.02456	0.04820
C14: Factibilidad de apoyos al proyecto por órganos federales, en convocatorias especiales	0.03622	0.07156	0.03220	0.02456	0.04820
Primero más importante Segundo más importante Tercero más importante					

3. Resultados

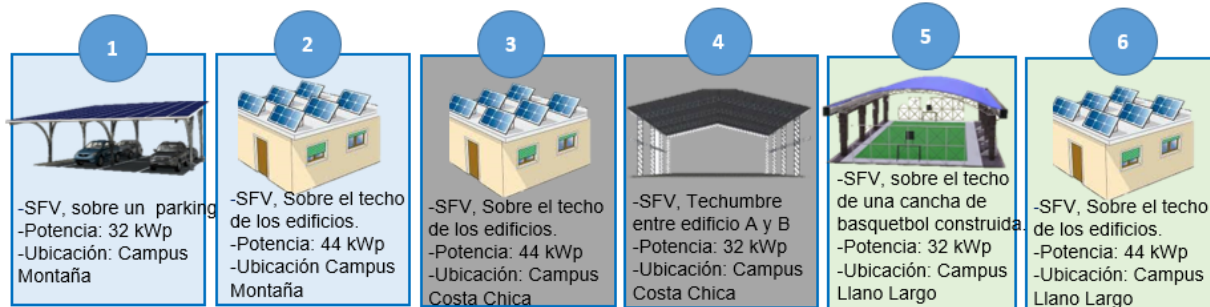
De la sección anterior sabemos lo que resume la tabla 10, sin embargo, no podemos lograr el objetivo, ya que hay una variación en el grupo de expertos de acuerdo a cuál es el orden de instalación de los SFV. Para lograr un solo ranking, considerando todas las valoraciones del grupo de expertos, en este estudio se realiza la manera agregada de los resultados anteriores, repitiendo el mismo proceso de los métodos AHP-RIM (Python), finalmente se obtiene un único vector de pesos de los criterios y un solo ranking de las alternativas (ver figura 6 y 7). Si observamos las gráficas de las figuras 6 y 7 y comparamos con las tablas 9 y 10, podemos deducir 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 CFE, para poder ser etiquetados como **campus sustentables** totalmente. Por otro lado, si analizamos el grupo de expertos, aunque es un equipo multidisciplinar, siguen siendo los aspectos económicos y técnicos más importantes a la hora de juzgar y tomar la decisión sobre sistemas energéticos, esto coincide con lo que muestra la literatura (Claudia Roldán et al., 2014; Naz et al., 2016; Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014).



4. Conclusiones y trabajos futuros

Finalmente, regresando al objetivo principal de este estudio sobre proponer un orden de instalación de los SFV, para iniciar la transición energética a campus sustentables en la UAGRO, basados en las gráficas de las figuras 6 y 7, se propone el siguiente orden de instalación (Figura 8):

Figura 8. Propuesta de orden de instalación de los SFV



Basados en las figuras 7 y 8, se puede comentar, concluir y finalmente sugerir los siguientes puntos, para la toma de decisiones:

- Los resultados muestran que es viable iniciar la transición 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 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.

Como trabajo futuro se propone realizar este estudio utilizando el método TOPSIS, de nuevo integrarlo en el lenguaje de programación Python y destacar las diferencias en los resultados si las hubiera.

5. Referencias

Cables, E., Lamata, M. T., & Verdegay, J. L. (2016). RIM-reference ideal method in multicriteria decision making. *Information Sciences*, 337-338, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.12.011>

- Campos-Guzmán, V., García-Cáscales, M. S., Espinosa, N., & Urbina, A. (2019). Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 343-366. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.031>
- Claudia Roldán, Ma., Martínez, M., & Peña, R. (2014). Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.007>
- Ghimire, L. P., & Kim, Y. (2018). An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP. *Renewable Energy*, 129, 446-456. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.011>
- Guzmán, C. (2018). *ANALYSIS OF SOLAR RESOURCE FOR A SUSTAINABLE FUNCTIONALITY IN THE REGIONAL EDUCATIONAL CAMPS OF THE AUTONOMOUS PUBLIC UNIVERSITY OF GUERRERO*. 13.
- Ilbahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2019). A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Reviews*, 25, 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.04.014>
- Mastrocinque, E., Ramírez, F. J., Honrubia-Escribano, A., & Pham, D. T. (2020). An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. *Expert Systems with Applications*, 150, 113321. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113321>
- Naz, M. N., Mushtaq, M. I., Naeem, M., Iqbal, M., Altaf, M. W., & Haneef, M. (2016). Multicriteria decision making for resource management in renewable energy assisted microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.059>
- Saaty, T. L. (2014). Analytic Heirarchy Process. En *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat05310>
- Sánchez-Lozano, J. M., Fernández-Martínez, M., & Lamata, M. T. (2019). Near-Earth Asteroid impact dates: A Reference Ideal Method (RIM) approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 81, 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.02.010>
- Sánchez-Lozano, J. M., & Rodríguez, O. N. (2020). Application of Fuzzy Reference Ideal Method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing*, 88, 106061. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106061>
- Santoyo-Castelazo, E., & Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80, 119-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- SENER. (2016). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030-México*. <https://www.gob.mx/sener>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

