

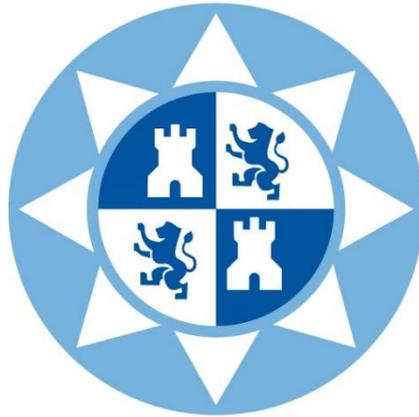


industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Master en energías renovables



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

TRABAJO FIN DE MASTER

MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Verónica Campos Guzmán

Director: Dra. Socorro García-Cáscales

Codirector: Dra. Nieves Espinosa Martínez



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, a 3 de octubre del 2016

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| GLOSARIO | 5 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 6 |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | 9 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 10 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO | 12 |
| 1. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MDMC)..... | 12 |
| 2. TOMA DE DECISIONES EN GRUPO..... | 12 |
| 3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO..... | 13 |
| I. ESCUELA AMERICANA | 13 |
| II. ESCUELA EUROPEA | 13 |
| 4. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO | 13 |
| I. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) | 14 |
| II. TOPSIS | 17 |
| 5. MDMC HÍBRIDOS Y SOFT COMPUTING | 19 |
| 6. DEFINICIÓN GENERAL DEL ACV. | 20 |
| I. CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO | 21 |
| 7. NORMAS ISO – NORMALIZACIÓN DEL ACV | 21 |
| 8. METODOLOGÍA ACV | 22 |
| I. CATEGORÍAS DE IMPACTO, DIFERENCIA ENTRE INTERMEDIAS Y FINALES | 26 |
| II. METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN UN ACV | 26 |
| ILCD:..... | 27 |
| III. APLICACIONES DE UN ACV | 28 |
| 9. SOFTWARE SIMA PRO | 28 |
| CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE | 29 |
| ACV DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES | 29 |
| MDMC DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES | 32 |
| INTEGRACIÓN DE LOS MDMC CON EL ACV DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| ACV CON MDMC DENTRO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA | 37 |
| CAPITULO 3: ACV CON INTEGRACIÓN DE MDMC PARA EVALUAR ALTERNATIVAS SAPV PARA ELECTRIFICACION RURAL EN CERRO HERMOSO, OAXACA, MÉXICO, DESDE EL PUNTO DE VISTA TÉCNICO, AMBIENTAL Y DE COSTES. | 38 |
| ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL | 38 |
| DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DEL ACV, INTEGRANDO MDMC EN SUS FASES 1 Y 4..... | 39 |
| FASE 1: METAS, ALCANCES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO..... | 40 |
| FASE 2: REGISTRO DE ENTRADAS Y SALIDAS: ANALISIS DE INVENTARIO. . | 42 |
| FASE 3: EVALUACIÓN DE IMPACTOS..... | 44 |
| COSTOS DE LOS MÓDULOS | 51 |
| COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS | 53 |
| FASE 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS... | 58 |
| CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 64 |
| REFERENCIAS..... | 65 |
| ANEXOS | 68 |
| SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE ELECTRIFICACIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP-TOPSIS-FUZZY, PARA LA COMUNIDAD DE CERRO HERMOSO, MÉXICO | 68 |
| 1. Descripción del problema..... | 68 |
| 2. Objetivo | 68 |
| 3. Alternativas a considerar..... | 69 |
| 4. Criterios a considerar | 69 |
| <i>Cuantitativos</i> | 70 |
| <i>Cualitativos:</i> | 71 |
| 5. Descripción de la metodología utilizada. | 71 |
| 6. Descripción de los expertos seleccionados..... | 71 |
| 7. Encuestas aplicadas | 72 |
| 8. Resultados obtenidos, evaluación de los tres expertos..... | 91 |
| MÉTODO AHP (Calculo de la parte 1 de la encuesta):..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| MÉTODO TOPSIS (Calculo de la parte 2 de la encuesta):..... | 91 |
| 9. Cálculo de las encuestas, para cada experto..... | 92 |
| 10. Conclusiones de la evaluación de cada experto. | 95 |
| 11. Cálculo de la manera agregada. | 96 |
| Parte 1 Manera agregada: Orden de los criterios, Matriz de comparación binaria de criterios por pares, media geométrica, pesos criterios, lambda máxima, índice de consistencia. | 96 |
| DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN PARA EL CASO DE ESTUDIO..... | 102 |
| DATOS DE IRRADIANCIA EN CERRO HERMOSO, OAXACA, MÉXICO. | 103 |
| DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN..... | 104 |
| DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN..... | 106 |
| DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN..... | 107 |
| CÁLCULO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR EL SAPV EN CERRO HERMOSO | 111 |
| TABLA RESUMEN DEL ACV DE LAS TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS | 114 |

GLOSARIO

- MDMC: Métodos de decisión multicriterio
- ACV: Análisis de ciclo de vida
- SAPV: Sistemas autónomos fotovoltaicos
- SAPV-OPV: Sistema autónomo fotovoltaico con módulos orgánicos
- OPV: Organic Photovoltaic /módulos orgánicos fotovoltaicos.
- SAPV-Si-Mono: Sistema autónomo fotovoltaico con módulos de silicio monocristalino.
- Si-Mono: Silicio monocristalino.
- SAPV-Si-Amorfo: Sistema Autónomo fotovoltaico con módulos de silicio amorfo.
- Si-Amorfo: Silicio amorfo.
- BD: Base de Datos
- CFE: Comisión Federal de Electricidad (México)
- EERR: Energías Renovables
- BOS: Balance of System
- EPBT: Energy Pay Back Tyme/ Tiempo de retorno energético
- AHP: Analytic Hierarchy Process /Proceso Analítico Jerárquico
- FUZZY: Conjunto de números difusos o borrosos.
- TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution / Técnica de orden de preferencia por similitud para la solución ideal.
- GEI: Gases de efecto invernadero
- PR: Performan Ratio
- NASA: National Aeronautics and Space Administration / Agencia Espacial Norteamericana.
- kWh: Kilovatio-hora, unidad de medida de la energía.
- kWp: Kilovatio-pico, unidad de medida de potencia.

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1: Escala de Saaty</i> | 15 |
| <i>Tabla 2: Índices para el ratio de consistencias</i> | 16 |
| <i>Tabla 3: ACV en las energías renovables.</i> | 31 |
| <i>Tabla 4: MDMC en las energías renovables</i> | 33 |
| <i>Tabla 5: MDMC con ACV en las Energías Renovables.</i> | 36 |
| <i>Tabla 6: Demanda de corriente continua por familia en Cerro Hermoso, Oaxaca México.</i> | 42 |
| <i>Tabla 7: Demanda de corriente alterna por familia en Cerro Hermoso, Oaxaca, México.</i> | 43 |
| <i>Tabla 8: Inventario para el SAPV de 1kWp, con tres tecnologías.</i> | 43 |
| <i>Tabla 9: Elementos del SAPV y su tiempo de vida.</i> | 52 |
| <i>Tabla 10: línea de tiempo del funcionamiento de cada tecnología, reemplazo de componentes.</i> | 52 |
| <i>Tabla 11: Vida útil y producción de energía de cada tecnología.</i> | 54 |
| <i>Tabla 12: Comparativa de las tres tecnologías fotovoltaicas en cuatro indicadores: EPBT, Emisiones de CO₂, Energía embebida y Costo de los paneles.</i> | 54 |
| <i>Tabla 13: Valor de los indicadores para evaluar los SAPV.</i> | 58 |
| <i>Tabla 14: Cálculo del peso de los criterios, MDMC etapa 4 ACV</i> | 60 |
| <i>Tabla 15: Matriz de valoración de alternativas, MDMC etapa 4 ACV</i> | 60 |
| <i>Tabla 16: Matriz de valoración normalizada, MDMC etapa 4 ACV.</i> | 60 |
| <i>Tabla 17: Matriz normalizada ponderada, MDMC etapa 4 ACV</i> | 60 |
| <i>Tabla 18: Solución ideal positiva y negativa, MDMC etapa 4 ACV</i> | 60 |
| <i>Tabla 19: Media de separación entre un conjunto de solución y otra, MDMC etapa 4 ACV</i> | 61 |
| <i>Tabla 20: Ranking de las alternativas, MDMC etapa ACV</i> | 61 |
| <i>Tabla 21: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio costo de inversión inicial.</i> | 70 |
| <i>Tabla 22: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio vida útil.</i> | 70 |
| <i>Tabla 23: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio Manto anual.</i> | 70 |

| | |
|---|------------|
| <i>Tabla 24: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio costo de generación por kWh. ----</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 25: Expertos seleccionados en el contexto energético mexicano. -----</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 26: Escala de preferencia de Saaty, con números difusos triangulares. -----</i> | <i>91</i> |
| <i>Tabla 27: Etiquetas lingüísticas con números difusos triangulares. -----</i> | <i>92</i> |
| <i>Tabla 28: Consistencia de los expertos en la encuesta corta y extensa. -----</i> | <i>92</i> |
| <i>Tabla 29: Ranking de alternativas, experto 1-----</i> | <i>93</i> |
| <i>Tabla 30: Ranking de alternativas, Experto 2. -----</i> | <i>94</i> |
| <i>Tabla 31: Ranking de alternativas, experto 3. -----</i> | <i>95</i> |
| <i>Tabla 32: Resumen de las encuestas a los tres expertos, ranking, inconsistencia, criterio con mayor peso, alternativa preferida. -----</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabla 33: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 1. -----</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabla 34: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 2 -----</i> | <i>97</i> |
| <i>Tabla 35: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 3. -----</i> | <i>97</i> |
| <i>Tabla 36: Matriz AGREGADA de comparación binaria de criterios. -----</i> | <i>97</i> |
| <i>Tabla 37: Media geométrica agregada--</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabla 38: Peso de los criterios, de la manera agregada.</i> | |
| <i>Tabla 39: Criterios cualitativos, experto 1 -----</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabla 40: Criterios cualitativos, experto 2 -----</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabla 41: Criterios cualitativos, experto 3 -----</i> | <i>99</i> |
| <i>Tabla 42: Matriz agregada de valoración de las alternativas.-----</i> | <i>99</i> |
| <i>Tabla 43: Matriz agregada con el peso de los criterios -----</i> | <i>99</i> |
| <i>Tabla 44: Normalización de la matriz agregada. -----</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 45: Ponderación de la matriz normalizada agregada -----</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 46: Solución ideal positiva (A+) y negativa (A-), manera agregada. -----</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 47: Ranking de las alternativas manera agregada.-----</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 48: Ranking de las alternativas, manera agregada-----</i> | <i>101</i> |
| <i>Tabla 49: Irradiación directa -----</i> | <i>103</i> |
| <i>Tabla 50: Irradiación Indirecta Cerro Hermoso, Inclinación 15 ° -----</i> | <i>103</i> |
| <i>Tabla 51: Tensión de trabajo de un sistema fotovoltaico.-----</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla 52: Irradiancia anual recibida por el SAPV -----</i> | <i>111</i> |
| <i>Tabla 53: Energía generada durante la vida útil del SAPV (25 años) -----</i> | <i>111</i> |
| <i>Tabla 54: Cálculo de horas solares pico-----</i> | <i>112</i> |

Tabla 55: Energía producida por el SAPV con diferentes PR. ----- 113

Tabla 56: Resumen del ACV con la metodología ILCD del SAPV con las tres tecnologías----- 114

Tabla 57: Resumen del ACV con el EPBT, CED, COSTO de los SAPV en las tres tecnologías.----- 115

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| <i>Grafico 1: Metodología AHP</i> | 15 |
| <i>Grafico 2: SAPV como mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso.</i> | 41 |
| <i>Grafico 3: Comparativa cambio climático, kg CO₂ eq.</i> | 45 |
| <i>Grafico 4: Contribución a la depleción a la capa de ozono</i> | 45 |
| <i>Grafico 5: Evaluación de las 16 categorías de impacto en los tres SAPV's</i> | 46 |
| <i>Grafico 6: Comparativa BOS's en la metodología ILCD.</i> | 47 |
| <i>Grafico 7: Comparativa de los módulos en la metodología ILCA.</i> | 48 |
| <i>Grafico 8: Energía embebida en los SAPV's</i> | 49 |
| <i>Grafico 9: Energía embebida en la fabricación de los módulos</i> | 50 |
| <i>Grafico 10: Energía embebida en la fabricación de los elementos de los BOS</i> | 51 |
| <i>Grafico 12: Costo (€) de los módulos, asociados a 1kWp de potencia</i> | 51 |
| <i>Grafico 11: Tiempo de retorno energético de los SAPV's</i> | 54 |
| <i>Grafico 13: SAPV con módulos orgánicos, emisiones de kg CO₂</i> | 55 |
| <i>Grafico 14: SAPV con módulos de silicio Amorfo, emisiones de kg de CO₂</i> | 56 |
| <i>Grafico 15: SAPV con módulos de silicio monocristalino, emisiones de kg de CO₂</i> | 56 |
| <i>Grafico 16: Comparativa módulos, emisiones de kg de CO₂</i> | 57 |
| <i>Grafico 17: Comparativa BOS, emisiones kg CO₂</i> | 58 |
| <i>Grafico 18: Ranking de las alternativas del SAPV, MDMC etapa 4 ACV.</i> | 61 |
| <i>Grafico 19: Tipo de energía embebida en los módulos de Silicio-Monocristalino</i> | 62 |
| <i>Grafico 20: Tipo de energía embebida en el BOS-SAPV Silicio Monocristalino</i> | 62 |
| <i>Grafico 21: Ranking de las alternativas, Experto 1</i> | 93 |
| <i>Grafico 22: Ranking en las alternativas, Experto 2.</i> | 94 |
| <i>Grafico 23: Ranking alternativas, Experto 3.</i> | 95 |
| <i>Grafico 24: Ranking de las alternativas, MANERA AGREGADA</i> | 101 |
| <i>Grafico 25: Curva de radiación directa (kWh/m²/día) en Cerro Hermoso (FUENTE: BD DE LA NASA)</i> | 103 |
| <i>Grafico 26: Curva de radiación indirecta (kWh/m²/día) en Cerro Hermoso.</i> | 104 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 1: Metodología TOPSIS</i> | 17 |
| <i>Figura 2: Metodología del ACV</i> | 22 |
| <i>Figura 3: Aplicaciones de un ACV</i> | 28 |
| <i>Figura 4: Comunidad de Cerro Hermoso, ubicada en el pacífico al sur de México.</i> | 39 |
| <i>Figura 5: Ubicación geográfica para la instalación</i> | 102 |
| <i>Figura 6: Parte superior del techo para instalar el SAPV.</i> | 102 |
| <i>Figura 7: Vista de la instalación en el techo de la vivienda.</i> | 105 |
| <i>Figura 8: Vista superior de la vivienda.</i> | 105 |
| <i>Figura 9: Vista lado sur de la vivienda.</i> | 106 |

INTRODUCCIÓN

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

En este trabajo se estudia y se analiza cómo se integran estas dos metodologías para lograr un solo objetivo dentro de las energías renovables y en concreto dentro de la energía solar fotovoltaica. El objetivo principal es combinar ambas técnicas para reducir el índice de incertidumbre en la toma de decisiones. Derivado de este objetivo el desarrollo de este documento inicia con una revisión bibliográfica de artículos científicos con aplicaciones concretas en este ámbito desde lo general hasta lo particular. En la primera sección se hace la revisión bibliográfica donde se ha aplicado cada metodología (ACV y MDMC) de manera individual dentro de las energías renovables, esto se hace con el objetivo de obtener una clara descripción del desarrollo de la herramienta del ACV en las energías renovables y analizar qué resultados se han obtenido. En paralelo también se hace la revisión bibliográfica de cómo han sido utilizados los MDMC para la ayuda a la toma de decisiones dentro del ámbito de las energías renovables. En la siguiente sección la búsqueda bibliográfica se centra en casos prácticos, priorizando casos de integración de ambas metodologías. La bibliografía revisada pretende acotar y particularizar la búsqueda de casos de estudio para la energía solar fotovoltaica y de esta forma, poder llevar a cabo una revisión más exhaustiva con la intención de obtener las bases para desarrollar el caso de estudio específico en la última sección de este documento. En este punto, basados en la literatura revisada, se desarrolla un caso práctico para evaluar sistemas aislados fotovoltaicos (SAPV) para el suministro de energía eléctrica en la comunidad de Cerro Hermoso, Oaxaca en México, el objetivo de este caso práctico es combinar las metodologías para llegar a una toma de decisión con un índice de incertidumbre reducido, para modelar y probar la combinación de ambas metodologías, se plantea evaluar los SAPV para la comunidad de Cerro Hermoso desde el punto de vista ambiental, técnico y parcialmente económico, proponiendo usar como

base metodológica principal la estructura del ACV, e incluir en la fase 1 y 4 de esta metodología una técnica de decisión multicriterio.

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se estudian todos los conceptos teóricos sobre las metodologías que están involucradas en el desarrollo de este trabajo, tales como: la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), la norma ISO 14040 y sus específicos para el ACV, así como los métodos de decisión multicriterio, las tecnologías fotovoltaicas y los sistemas autónomos fotovoltaicos.

1. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO (MDMC)

Desde los tiempos más antiguos el ser humano se ha enfrentado a tomar decisiones día a día durante todo su ciclo de vida. 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; en este caso, se está en presencia de un problema de toma de decisiones. Este tipo de problemática, tiene como finalidad la selección de la mejor solución de un conjunto de alternativas disponibles, utilizando para lograrlo 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”)[1] . En resumen, 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.

2. TOMA DE DECISIONES EN GRUPO.

La toma de decisiones se puede realizar con la participación de varios decisores, entonces dicho proceso se denomina toma de decisión en grupo, el cual se caracteriza por la selección de la alternativa más preferida o aceptada por el grupo de decisores. Normalmente un proceso de toma de decisiones en grupo se clasifica de acuerdo a:

- La importancia de los decisores, que depende de la asignación de importancia a los decisores, la cual puede considerarse con la misma importancia o diferenciarla.

- El momento en que se realiza la agregación depende de la agregación de información, si se realiza sobre los juicios emitidos por los decisores para sintetizar las prioridades de las alternativas o las prioridades de las alternativas para cada decisor.

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.

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.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Los diversos métodos de decisión multicriterio que se han desarrollado, se caracterizan por la concepción asumida en la solución de la problemática, por esto se pueden clasificar en tres grupos básicos.

I. ESCUELA AMERICANA

Los MDMC que se consideran dentro de este conjunto, tienen la característica o la concepción que el decisor maximiza una función de utilidad de tal forma obtener la agregación de la información de los diferentes criterios. Entre los métodos que se encuentran en esta categoría podemos destacar el de suma ponderada y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

II. ESCUELA EUROPEA

Esta categoría, está representada fundamentalmente por la escuela francesa, que desarrolla una metodología de ayuda a la decisión multicriterio a partir de las dificultades que generaba la construcción de la función de valor, expuesta por la Escuela Americana.

4. MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

La toma de decisiones multicriterio debe ser entendida como un "mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos para auxiliar a los decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios

criterios. Dentro de los MDMC se han desarrollado un importante número de teorías y algoritmos tales como: AHP, ANP, TOPSIS, ELECTRE-TRI y VIKOR por citar algunos. Estos métodos fueron desarrollados para modelar un problema específico y para apoyar a los decisores a seleccionar la “mejor” alternativa cuando se tienen problemas complejos de toma de decisiones. Todas estas teorías están basadas en la suposición de que los decisores procuran hacer elecciones racionales.

I. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

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.

El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

Este método cuenta con las siguientes características:

- El problema de decisión se modela mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, 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
- ✓ 2ª etapa: Valorización
- ✓ 3ª etapa: Priorización y síntesis

Prioridades locales

Prioridades globales

Prioridad total final o total

- ✓ 4ª etapa: Análisis de sensibilidad

Pasos a seguir en el método AHP:

Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía.

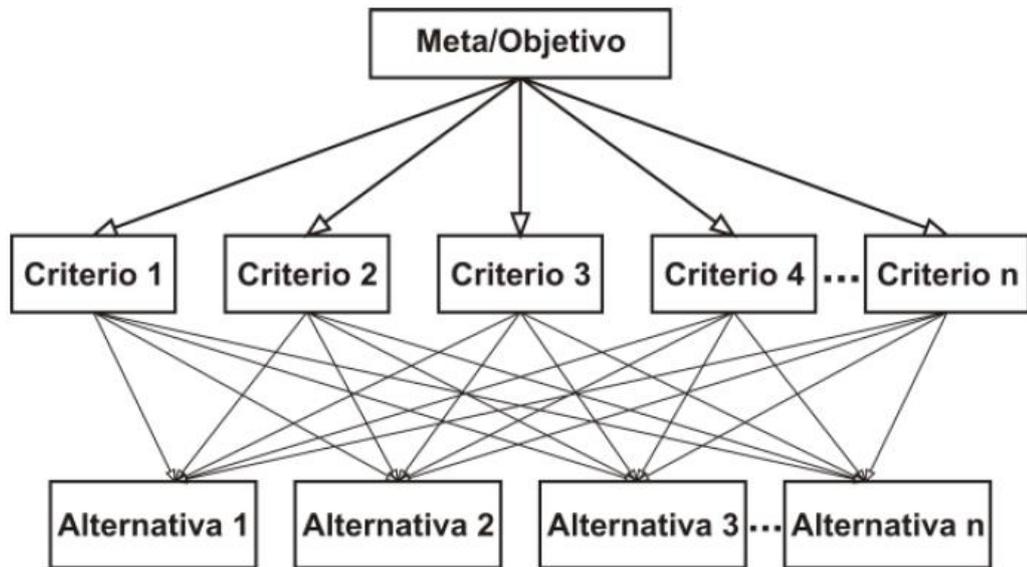


Grafico 1: Metodología AHP

Paso 2: Establecimiento de las prioridades entre los criterios.

| 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 1: Escala de Saaty

Índice de consistencia:

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

| | | | | | | | | |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 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 |
| 1RI | 1.45 | 1.48 | 1.51 | 1.54 | 1.56 | 1.57 | 1.58 | 1.60 |

Tabla 2: Índices para el ratio de consistencias

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, en el paso 2, y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, para calcular la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema bastará calcular 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. Saaty propone que el método a utilizar sea el método de la suma ponderada.

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

II. TOPSIS

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) se basa en el concepto de que es deseable que una alternativa determinada se ubique a la menor distancia respecto de una alternativa ideal que representa lo mejor (ideal positiva o simplemente ideal) y a la mayor distancia respecto a una alternativa ideal que representa lo peor (ideal negativa o anti-ideal).

En resumen, se puede decir que el método TOPSIS busca acercarse a la menor distancia posible del punto ideal y alejarse a la mayor distancia posible del punto anti-ideal.

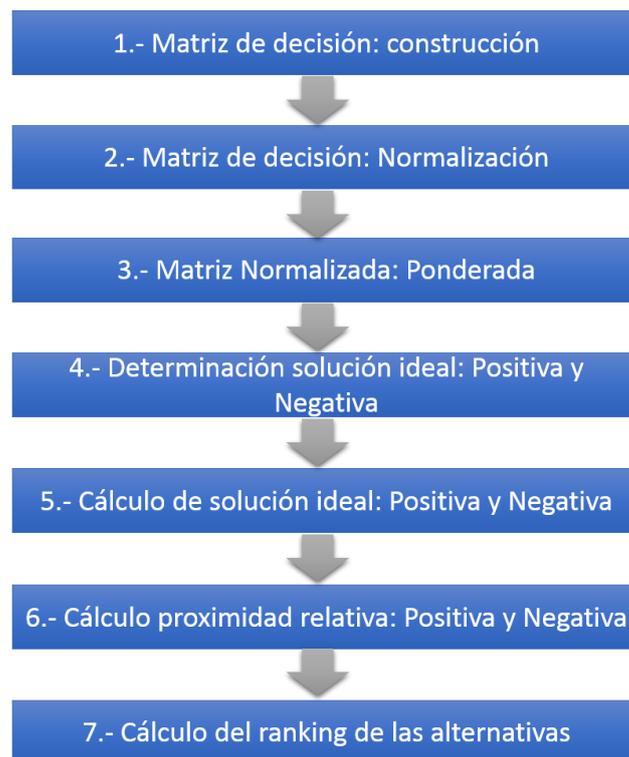


Figura 1: Metodología TOPSIS

Paso 1: Establecimiento de la matriz de decisión.

El método TOPSIS evalúa la matriz de decisión en función de las diferentes alternativas, los criterios y los pesos asociados a dichos criterios.

Paso 2: Normalización de la matriz de decisión.

En el método TOPSIS primero se convierten las dimensiones de los distintos criterios en criterios no dimensionales. Un elemento n_{ij} de la matriz de decisión normalizada puede calcularse de diferentes modos, pero es habitual que en TOPSIS se utilice las siguientes expresiones:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad j=1, 2, \dots, n; i= 1, 2, \dots, m.$$

Pasó 3: Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada.

Cada valor normalizado ponderado de la matriz se calcula como el producto entre cada w_j por cada n_{ij} ,

$$\bar{v}_{ij} = w_j \otimes \bar{n}_{ij}, \quad j= 1,2,\dots,n; i= 1,2,\dots,m$$

Donde, w_j es el peso del j -ésimo criterio, tal que $\sum w_j$ puede ser igual a 1, si hablamos del caso general que verifica la igualdad. Los pesos de los criterios en un problema de decisión no tienen el mismo significado y no todos tienen la misma importancia. Estos pesos pueden obtenerse de diferentes modos: mediante asignación directa, mediante el método AHP, etc.

Paso 4: Determinación de la Solución Ideal Positiva (SIP) y la Solución Anti-ideal o Ideal Negativa (SIN).

El conjunto de valores ideal positivo () y el conjunto de valores ideal negativo () se determinan como sigue:

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \{(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J)(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J')\} \otimes, i= 1,2,\dots, m$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \{(\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J)(\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J')\} \otimes, i= 1,2,\dots, m$$

Donde J está asociado con los criterios que representan atributos deseables y J' está asociado con los criterios que representan atributos indeseables.

Paso 5: Cálculo de las medidas de distancia.

La distancia de cada alternativa de la solución ideal positiva viene dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{1/2}, \quad i= 1,2,\dots,m$$

En tanto que la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa es:

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{1/2}, \quad i= 1,2,\dots,m$$

Paso 6: Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal.

La proximidad relativa a la solución ideal se puede expresar como:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i= 1,2,\dots,m$$

Cuanto más próximo esté el valor de a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa i-ésima.

Paso 7: Ordenación de las preferencias.

Se ordenan las alternativas de acuerdo con el ratio, en orden descendente

5. MDMC HÍBRIDOS Y SOFT COMPUTING

A pesar que existen varios métodos del análisis multicriterio su elección se da en función del objetivo específico del problema a estudiar, este determina cuando es más apropiado un método que otro. Determinar qué y cuántos MDMC utilizar para modelar un mismo problema en la mayoría de la literatura se le denomina “aplicación de una metodología híbrida”, que es la combinación de dos o más MDMC para determinar la mejor solución a un mismo problema. Elegir el método apropiado, determinar si es necesaria una aplicación híbrida, es solo parte de la modelación de un problema mediante un MDMC. En muchos problemas de toma de decisiones los investigadores se enfrentan a evaluaciones de decisores que no son claras y por ende proporcionan valores a los criterios y/o alternativas que están en un rango de valores o con una alta componente de imprecisión. Es decir, es imposible para ellos indicar un valor exacto numérico que evalúe los criterios o las alternativas, y esto lleva como consecuencia que el valor que se le asignan a los atributos o criterios sea de tipo cualitativo o “lingüístico”. Es como decir que un criterio tiene una importancia “medio buena”, “medio mala”, “medio alta”, “medio baja”, etc. Cuando se está frente a un problema de decisión multicriterio de este tipo, puede modelarse mediante herramientas de Soft Computing y en concreto mediante lógica difusa, donde los números difusos, a través del modelado lingüístico difuso, pueden modelizar las valoraciones vagas o imprecisas. La lógica difusa se basa principalmente

en la manipulación de conjuntos difusos cuya teoría fue desarrollada por Lotfi A. Zadeh en 1965. En un conjunto clásico, un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto (lógica clásica), mientras que un elemento de un conjunto difuso, pertenece a un conjunto con un grado de pertenencia que oscila entre 0 y 1 [2]. Cuando se tienen elementos difícilmente valorables, estos se pueden modelizar mediante la utilización de números difusos e incluirlos dentro de los MDMC y así poder asignar valores a los criterios y/o alternativas cuando la información del decisor es imprecisa. En la literatura estos enfoques híbridos de los MDMC con conjuntos difusos están siendo muy utilizados por la comunidad científica para la ayuda a la toma de decisiones en modelos con un alto componente de incertidumbre e imprecisión. Actualmente existe una gran cantidad de variantes de los MDMC tradicionales aplicados con conjuntos difusos y en el ámbito de las energías renovables como se puede ver en la revisión realizada por [3].

6. DEFINICIÓN GENERAL DEL ACV.

La definición más común para ACV esta conceptualizada como: *“una técnica para determinar aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un 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”*, En general el ACV es una metodología estandarizada internacionalmente por una serie de normas ISO que comienzan en la 1440 [4] . El objetivo de esta metodología es cuantificar todas las emisiones relevantes, los recursos consumidos, los impactos ambientales relacionados con la salud y problemas que están asociados con el sistema que se está estudiando. El ACV como metodología es una contabilidad ambiental [5] en la que se cuantifican los efectos ambientales asociados al sistema que puede ser: un producto, un servicio, un proceso o una actividad. El ACV considera toda la “historia” del producto desde su origen como materia prima hasta su final como residuo, toma en cuenta también las fases intermedias como: transporte, preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución y uso.

I. CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO

La vida de un producto empieza en el diseño y el desarrollo del producto y finaliza al final de vida de las actividades (reutilización, reciclaje, etc.) a través de las siguientes etapas:

Adquisición de materias primas: Todas las actividades necesarias para la extracción de las materias primas y las aportaciones de energía del medio ambiente, 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.

Uso, reutilización y mantenimiento: Utilización del producto acabado a lo largo de su vida en servicio.

Reciclaje: Comienza una vez que el producto ha servido para su función inicial y 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: comienza una vez que el producto ha servido a su función y se devuelve al medio ambiente como residuo.

7. NORMAS ISO – NORMALIZACIÓN DEL ACV

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes. Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de eco etiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientales favorables” y en las normas ISO que poseen los estándares asociados a la conducción de un 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.

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 acabo 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.

8. METODOLOGÍA ACV

De acuerdo con la normativa ISO 14040, la metodología de ACV, puede verse como un proyecto que está compuesto por cuatro fases: *metas y alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos e interpretación de los resultados*. La metodología de ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios, o cantidades de productos que realizan la misma función.

Tal y como se muestra en la figura 2, son cuatro fases las que integran un ACV, y no son simplemente secuenciales, el ACV es una metodología iterativa, que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.

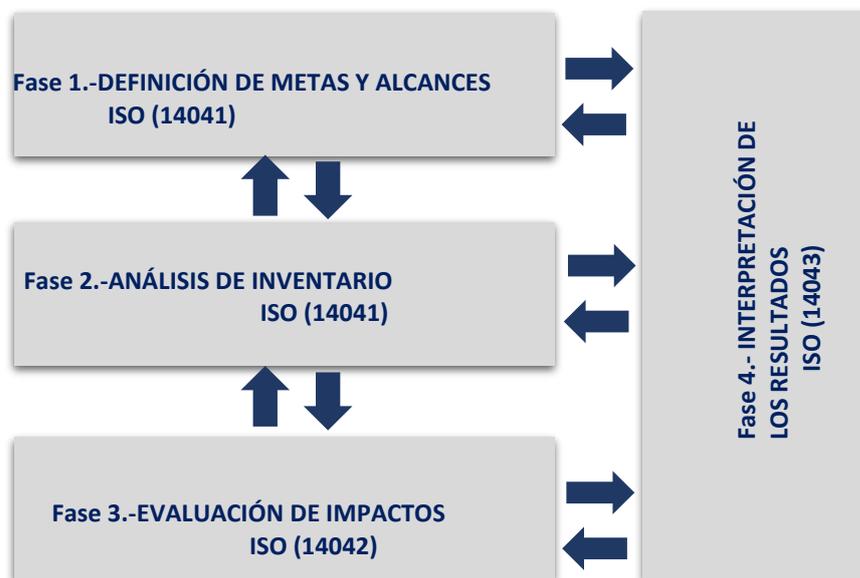


Figura 2: Metodología del ACV

I. DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DEL ACV

Fase1: Definición de metas y alcance.

Las acciones que contempla esta fase puntualmente son las siguientes:

- Descripción y definición del producto, proceso o servicio para el que se va realizar el análisis.
- Define el objetivo principal del ACV y debe ser claramente definido; por qué se va hacer, para quien va dirigido [6].
- Debido a la 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”.
- 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, esta se define de acuerdo al objetivo del estudio del ACV.

Fase2: 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.

Se hace el registro de los flujos, la descripción de cada unidad de operación y la conexión del inventario con los parámetros y lista de unidades medidas. Una vez registrados los datos de acuerdo con la norma ISO [5] se hace la selección y clasificación de las categorías de impactos que es 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 que 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 1, 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 categorías de impactos importantes, los indicadores que medirán esas categorías, y los modelos de caracterización a emplear, según la norma ISO, la selección de las categorías de impactos deben ser de acuerdo al objetivo que se definió en la primera fase. 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). Existen muchas metodologías para hacer el cálculo de los indicadores de los impactos ambientales de un sistema [7]. 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 categorías de impactos.
- Clasificación, en esta fase se asignan los datos procedentes 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 la modelización, mediante los factores de caracterización de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto. En la práctica se calculan los valores de los indicadores de cada

categoría de impacto 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 a 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 de evaluación de impactos (ILCD, LCIA-CML 2001, LCIA-TRACI, LCIA, Recipe, etc). Por ejemplo siguiendo el ejemplo de la categoría de impacto de calentamiento global (Global warming), 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 kgs de emisiones de CO_2 equivalentes y como factor de caracterización el factor de equivalencia que transforma el potencial de calentamiento global de los otros gases de efecto invernadero a la unidad elegida que son los kgs CO_2 equivalentes. Por ejemplo el factor de caracterización del CO_2 es 1 mientras que el CH_4 tiene 25. Esto 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.

Elementos opcionales

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

- La interpretación debe ser coherente con el objetivo y acorde con el alcance previsto en la etapa 1.
- Se evalúan y se selecciona el producto, proceso o servicio preferido.
- Por último, se deben dar conclusiones, que pueden adquirir forma de recomendaciones para la toma de decisiones, pues permite 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.

Aunque la norma no lo pone como obligatorio se recomienda agregar una quinta etapa de:

Fase 5: Análisis de sensibilidad.

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

I. CATEGORÍAS DE IMPACTO, DIFERENCIA ENTRE INTERMEDIAS Y FINALES

Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el último efecto del impacto ambiental, “endpoint” , o bien, considerar los impactos intermedios, “midpoints” [8]. Los efectos midpoint o punto intermedio evalúan el efecto sobre recursos naturales como: acidificación, eutrofización, calentamiento global, reducción de la capa de ozono. Mientras que los efectos endpoint o punto final evalúan las consecuencias que tendrán las entradas y salidas del sistema del producto sobre la reducción de la biodiversidad, duración de vida de seres humanos y disminución de recursos naturales. De tal modo que las categorías de impacto intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo en general que se ajusten más a los cálculos, estas proporcionan información más detallada de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Como ya se describió el grupo de categorías de impacto finales son variables que afectan directamente a la sociedad por tanto su elección resulta más relevante y comprensible a escala global. Descrito todo lo anterior actualmente es más común recurrir al uso de categorías de impacto intermedias.

II. METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN UN ACV

Las metodologías de evaluación de impacto son los cálculos sistemáticos que se utilizan para obtener desde un flujo de inventario del ciclo de vida, como el dióxido de carbono o el dióxido de azufre, hasta el impacto medioambiental que provoca. Los resultados de estos cálculos suelen medir tanto los efectos del punto medio como del punto final (los efectos del punto final a veces se denominan efectos de los daños) [9].

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.

ILCD:

Como se especifica en secciones anteriores la norma ISO 14040 y 14044 son los estándares que proporcionan el marco indispensable para la evaluación del análisis de ciclo de vida. Sin embargo, la Comisión Europea ha desarrollado durante meses una guía específica para el cálculo de la huella ambiental, 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[10], por tanto la metodología ILCD o International Reference Life Cycle Data System por sus siglas en inglés es una metodología estandarizada completa que calcula los siguientes indicadores:

- Cambio climático (kg CO₂)
- Agotamiento de la capa de ozono (kg CFC – 11 eq)
- Afectos cancerígenos y toxicidad humana (CTUh)
- Efectos no cancerígenos y toxicidad humana (CTUh)
- Materia prima (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)
- Uso de la tierra (kg C déficit)
- Depleción de los recursos del agua y uso de recursos fósiles (kg Sb eq)

La metodología ILCD no es la única que existe, hay un abanico de metodologías que te permiten la evaluación de impactos en un ciclo de vida con similares categorías de impactos.

III. APLICACIONES DE UN ACV

Las aplicaciones de un ACV, actualmente están extendidas a diferentes áreas disciplinares, la figura 3 hace un breve resumen de algunas aplicaciones de esta metodología, el ACV como herramienta ha resultado muy útil tanto en el ámbito industrial para mejorar procesos, empresarial para planificación estratégica, etc

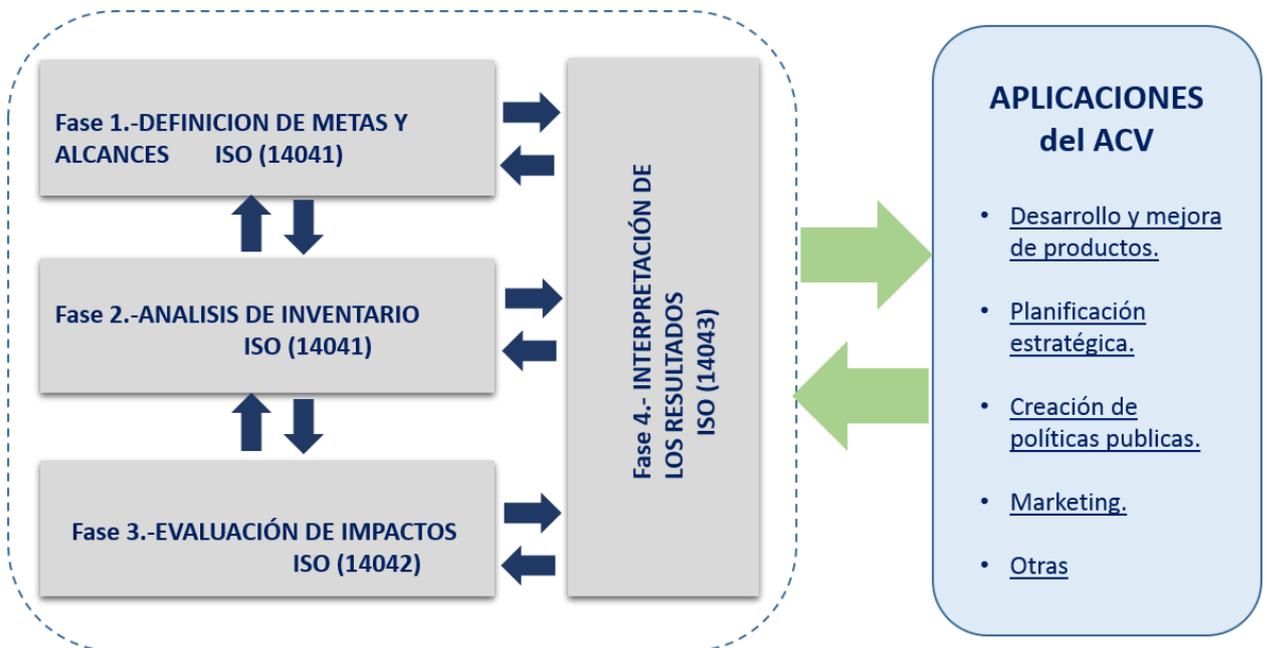


Figura 3: Aplicaciones de un ACV

9. SOFTWARE SIMA PRO

Es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM). Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente.

El funcionamiento básico del software de ACV SimaPro como herramienta profesional para evaluar los impactos ambientales de productos, procesos y servicios [12].

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

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

Estudiar y analizar cómo se integran estas dos metodologías para lograr un solo objetivo dentro de las energías renovables y en concreto dentro de la energía solar fotovoltaica es el objeto principal de este capítulo. En este apartado se realiza una revisión bibliográfica de artículos científicos con aplicaciones concretas en este ámbito desde lo general hasta lo particular. En la primera sección se hace la revisión bibliográfica donde se ha aplicado cada metodología (ACV y MDMC), de manera individual dentro de las energías renovables, esto se hace con el objetivo de obtener una clara descripción del desarrollo de la herramienta del ACV en las energías renovables y analizar qué resultados se han obtenido. En paralelo también se hace la revisión bibliográfica de cómo han sido utilizados los MDMC para la ayuda a la toma de decisiones dentro del ámbito de las energías renovables. En la segunda sección la búsqueda bibliográfica se centra en casos prácticos, priorizando casos de integración de ambas metodologías. La bibliografía revisada pretende acotar y particularizar la búsqueda de casos de estudio para la energía solar fotovoltaica y de esta forma, poder llevar a cabo una revisión más exhaustiva con la intención de obtener las bases para plantear y desarrollar un caso de estudio específico en el último capítulo de este documento.

ACV DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

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

de retorno de energía embebida en su fabricación. Estudios de ACV han sido ampliamente realizados en Europa y en el resto del mundo para evaluar los costes energéticos y ambientales de las tecnologías usadas en las energías limpias. Por ejemplo algunas de las contribuciones más relevantes en este contexto son: García-Valverde, Miguel, Martínez-Bejar, & Urbina, 2009, donde evaluaron el ACV de un sistema completo autónomo fotovoltaico instalado en la ciudad de Murcia, España, el cual, incluye además de los paneles fotovoltaicos los componentes del sistema como las baterías, inversor, regulador y cables. El EPBT obtenido en este trabajo fue de 9.08 años. La energía primaria invertida en la fabricación de este sistema fue de 45,692 MWh y emisiones de CO₂ de 13,166 ton. Además, determinaron que de todos los elementos que componen el sistema, los paneles y las baterías son los elementos con mayor costo energético y ambiental. Otro caso de estudio fue realizado por: Espinosa, García-Valverde, Urbina, & Krebs en el 2011, donde evaluaron el ciclo de vida de la producción de módulos fotovoltaicos con células solares de polímeros flexibles por medio del proceso llamado ProcessOne, donde señalan que la tecnología tiene 1.35 años de EPBT de un módulo típico con 3% de eficiencia y una superficie útil del 67%. Un estudio contextualizado en el sureste español, realizado por: Serrano-Luján, García-Valverde, Espinosa, García-Cáscales, Sánchez-Lozano y Urbina, en el 2013, muestra el EPBT, ERF y factor de emisión de un generador fotovoltaico integrado en un tejado, donde se consideró desde la extracción de los materiales hasta el tratamiento de todos los materiales al final del ciclo de vida. Los módulos fotovoltaicos fueron identificados como los principales responsables del consumo energético debido a su producción, suponiendo un 60% de la energía embebida del sistema. Otro estudio más reciente fue realizado en el contexto China[15], este estudio consistió en la evaluación del ciclo de vida de un módulo fotovoltaico de Silicio multi-cristalino, en esta evaluación se consideró desde la extracción del silicio hasta la producción del módulo completo y se basó en los datos de inventario de las empresas Chinas de paneles fotovoltaicos, el EPBT calculado fue de 2.2 a 6.1 años, y las emisiones de CO₂ por cada kWh fueron en el rango de 5.60 a 12.07 gr; los autores concluyeron que la fase más crítica del ACV es la etapa de la transformación de Silicio metálico a Silicio solar, ya que es el consumo más alto en energía eléctrica.

La tabla 3 hace referencia a casos de estudio donde se han evaluado ACV para las energías renovables, proporciona una descripción de los resultados de cada estudio, así como la unidad funcional, y otros parámetros que se midieron en el caso referido.

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

| Estudio-autor | Objetivo | Unidad funcional | Categorías impacto medidas | EERR | Resultados ACV |
|---------------|--|------------------|-------------------------------------|--------------------|--|
| [13] | Calculo del EPBT y el GWP de un SAPV de 4.2 kWp | 1 kWh | Global Warming potential, EPBT | Solar fotovoltaica | Energía embebida en el SAPV: 63.17 MWh fabric. Bat. Plomo 55.42 MWh fabric. Mod. P.V. 1.81 MWh fabric. Estruc. Soport 1.67 MWh fabric. Marcos 1.16 MWh fabric. Regulador 0.83 MWh fabric. Inversor 0.75 MWh fabric. Cables |
| [14] | ACV de los módulos de células solares de polímeros, por el proceso de fabricación PROCESSIONE | 1 m ² | Energía Primaria embebida | Solar fotovoltaica | Replantear el proceso del grabado del ITO. Energía primaria en materiales: 302.27 MJ/m ² Energía directa proceso: 76.96 MJ/m ² |
| [16] | Evaluar las cargas ambientales de un sistema fotovoltaico con módulos de telurio de cadmio (CdTe) en Malasia y comparar su EPBT con otras tecnologías. | 1kWh | EPBT CO ₂ | Solar fotovoltaica | EPBT (CdTe): 0.94 a 0.76 años EPBT (mono-Si): 2.6 a 4.12 años EPBT (poli-Si): 2 años EPBT (amorfo-Si): 1 a 1.3 años CO ₂ (sistema completo):15.1 gr eq / kWh CO ₂ (módulo PV CdTe): 7.23 gr eq / kWh CO ₂ (BOS): 4.41 eq /kWh Energía primaria embebida: 7.96 MJ / kWh |
| [17] | ACV de un módulo fotovoltaico con módulos de silicio mono cristalino en China. | 1kWp | Global Warming, Eutrofización, EPBT | Solar fotovoltaica | EPBT=0.42 a 0.91 años |
| [17] | ACV de un módulo fotovoltaico con módulos de silicio multi-cristalino cristalino en China. | 1kWp | Global Warming, Eutrofización, EPBT | Solar fotovoltaica | EPBT=2.2 a 6.1 años CO ₂ =5,60 a 12,07 g / kWh |

ITO: Indio, Estaño, Oxido.

Tabla 3: ACV en las energías renovables.

MDMC DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En esta sección se citan algunos casos de estudio donde los MDMC han sido aplicado con sus diferentes variantes, se muestra como han ayudado a la toma de decisiones dentro de las energías renovables. La literatura muestra cómo se pueden comparar diferentes alternativas y atributos utilizando una escala de importancia relativa. Por ejemplo en un caso de estudio muy notorio [18] en esta revisión aplicaron un modelo MDMC tradicional usando cuatro criterios y diecisiete subcriterios, y señalando que la energía eólica era la mejor fuente de energía renovable en Turquía. En otro estudio, [19] aplicaron una técnica de MDMC-Fuzzy, para seleccionar la política energética más adecuada en Turquía. Otros autores [20] utilizaron una técnica híbrida de MDMC con conjuntos difusos (AHP-TOPSIS-Fuzzy), para la evaluación de las diferentes tecnologías fotovoltaicas. Otros grupo de investigadores [21] aplicaron un MDMC tradicional, donde determinaron qué tecnologías en energías renovables son viables en Paquistán, considerando criterios como impactos medioambientales, económicos, técnicos y políticos. Otros expertos [22] desarrollaron otro caso de estudio pero en este utilizaron una metodología híbrida con números difusos: AHP-VIKOR-Fuzzy con matrices de conjuntos difusos en la evaluación de los criterios, además de evaluar las áreas de forestación como alternativas en Estambul, mediante esta metodología encontraron que la cuenca de Ömerli es el distrito más adecuado para la forestación en Estambul. Otros autores [23] utilizaron datos de un sistema de información geográfica (SIG) y un MDMC híbrido, y con esta técnica evaluaron diferentes lugares para instalar plantas solares fotovoltaicas en el área de Cartagena, Región de Murcia en el sureste de España, teniendo en cuenta criterios ambientales, geomorfológicos, de localización y climáticos.

La tabla 4 muestra la recopilación y descripción de algunos casos particulares donde se aplican MDMC, MDMC-híbrido, MDMC-Fuzzy y MDMC-híbrido-Fuzzy en la toma de decisiones en energías renovables.

Tabla 4: Casos prácticos, variantes de MDMC en energías renovables (Fuente: Elaboración Propia).

| Estudio-autor | Objetivo | Técnica | Criterios | Alternativas |
|---------------|--|------------------|---|--|
| [24] | Determinar lugar ideal para una estación de observación eólica en una universidad. | (AHP) | C1:Topografía, C2: Coste, C3:Infraestructura, C4:Seguridad, C5:Conveniencia en el transporte | Energía eólica Zona1, Zona2, Zona 3 |
| [25, p. -] | Determinar qué proyecto de energía renovable es el adecuado para instalar en la región de Waterloo, CANADÁ | (AHP) | Impacto ecológico, Beneficio socio económico, Potencial educativo, Disponibilidad de recursos, Viabilidad técnica, Viabilidad financiera. | Energías Renovables A1:E. solar fotovoltaica, A2: E. eólica, A3: E. geotérmica, A4: E. mini hidráulica. A5: E. solar térmica. |
| [26] | Evaluar las tecnologías de concentradores solares térmicos. | PROMETHEE | 3 económicos y 4 técnicos Incluye escala cualitativa de los impactos ambientales (3 a moderada, 2 para baja y 1 para ningún impacto). | Correspondientes a diferentes tecnologías de concentración solar Parabólica, energía y fluido de transferencia de calor. |
| [19] | Seleccionar la política energética más adecuada en TURQUIA | AHP-Fuzzy | C1:Técnicos (7), C2: Ambientales (3), C3: Sociopolítico (4), C4: Económicos (3) | A1: E. hidráulica,A: Biomasa, A3: Geotérmica, A4: E. solar, A5: E. eólica, A6: Carbón, A7: Petróleo, A8: Gas natural, A9: E. Nuclear. |
| [20] | Seleccionar la mejor célula fotovoltaica. | AHP-TOPSIS-Fuzzy | C1: Costo manufactura, C2: Eficiencia en conversión, C3: Cuota del mercado, C4: emisiones de gases de efecto invernadero, C5: EPBT | A1: Cell Si-Cristalino (Mono y Poli), A2: Si-amorfo thin layer. A3: thin layer Cdte, A4: III-V thin layer. A5: Organica-Híbridas |
| [27] | Seleccionar el paquete más adecuado de sistema solar aislado para el hogar (SHS), en las zonas rurales de BANGLADESH | (AHP) | C1: Costo paquete C2: Satisfacción de la demanda básica de electricidad de la casa. C3: Disponibilidad del paquete. | Energía solar fotovoltaica, A1: 75 Wp para 6 lampara 8 W c/u, 1 Ventilador, 1 TV. A2: 50 Wp para 4 lamparas 8 W c/u, 1 Ventilador, 1 TV. A3: 30 Wp para 2 lamparas 8 W c/u, 1 ventilador, 1 TV La mejor alternativa: A3. |
| [28] | Evaluar sitios potenciales para la instalación de una planta solar, en Cartagena, región de Murcia, España. | AHP-TOPSIS | 1 medioambiental, 3 geomorfológicos, 4 localización y 2 climáticos. | Alternativas: sitios potenciales para instalar una planta solar fotovoltaica. |

Tabla 4: MDMC en las energías renovables

INTEGRACIÓN DE LOS MDMC CON EL ACV DENTRO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.

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

Revisando las aplicaciones de cada metodología orientada a las energías limpias. A la luz de los resultados: los casos de estudio de ACV (tabla 1), muestran que esta metodología por sí sola, solo provee indicadores medioambientales del ciclo de vida de un sistema [5], tales como: gases de efecto invernadero (GEI), residuos sólidos, uso de suelo, impactos a la salud, costes de medio de transporte, cargas energéticas, etc. Por su parte los MDMC en los casos de estudio presentados en la tabla 2, muestran que son herramientas útiles que te permiten elegir de un conjunto de alternativas disponibles, la mejor de ellas.

El ACV es insuficiente para determinar la sostenibilidad total de sistemas energéticos, tecnologías o procesos. La sostenibilidad debe incluir al menos tres elementos claves: medioambiental, económico y social, como lo resalta [29] en su investigación dirigida específicamente a la evaluación sostenible de sistemas energéticos renovables. También los investigadores reconocen que los MDMC permiten evaluar sistemas en más de una dimensión mediante varios criterios que pueden ser: medioambientales, económicos o sociales. Basados en estos antecedentes y con el fin de obtener resultados más robustos, concluyentes y certeros, varios investigadores han comenzado a investigar la integración de las metodologías de ACV con MDMC, mediante este nuevo enfoque se han desarrollado casos de estudio específicamente en el marco de las energías renovables. Con el apoyo de ambas metodologías se han construido y evaluado sistemas en varios países dirigidos al desarrollo basado en energías limpias. Por ejemplo: en una investigación citada [30] evaluaron nueve plantas generadoras de electricidad en México basados en cuatro escenarios (ecológicos, tecnócratas, ligeramente ecológicos, ligeramente tecnócratas), aplicaron un ACV para las etapas de: construcción, producción y desmantelamiento de las plantas generadoras de electricidad y obtuvieron los indicadores ambientales del aire, suelo, agua y biodiversidad para cada etapa. Además, agregaron indicadores económicos, sociales e institucionales mediante un MDMC, normalizaron y mediante la evaluación de las nueve alternativas (nueve plantas generadoras de electricidad) con los doce criterios, obtuvieron que las plantas que generan electricidad mediante energía eólica son las más sostenibles en México.

En México también [31] evaluaron sistemas energéticos para el suministro de energía en el país hasta el año 2050, para ello han tenido en cuenta once escenarios (alternativas) a evaluar en base a diecisiete criterios (diez a partir de un ACV, tres económicos y cuatro sociales). Utilizan un método multiatributo para evaluar los escenarios y a partir del análisis de evaluación determinan que el escenario más sostenible es el que compone el mix energético con un 86 % de energía procedente de energía renovable y principalmente un alto porcentaje de energía eólica. En Portugal [32] evaluaron seis clases de vehículos de carga ligera, no solo utilizaron el ACV para la fabricación de dichos vehículos, sino que además utilizaron un MDMC para agregar los indicadores de operación de las unidades. Mediante esta integración de ambas metodologías obtuvieron que la mejor alternativa es el vehículo de batería eléctrica recargada a partir de energía solar. Otro estudio más reciente en este contexto fue realizado en Estados Unidos (EU) [33] en este estudio analizaron el desempeño de vehículos de carga ligera para pasajeros, y bajo dos escenarios (producción de electricidad convencional, producción de electricidad solar) evaluaron la sostenibilidad en tres dimensiones, como conclusiones de este análisis estos autores primero proponen que para evaluar la sostenibilidad de los siete vehículos contemplados en su caso de estudio, deben incluir en el ACV las dimensiones económicas y sociales. Sin embargo, ellos solo obtienen los indicadores de la dimensión ambiental mediante el ACV y mediante el uso de un MDMC evalúan los indicadores de las dimensiones sociales y económicas como resultados finales determinan que los vehículos eléctricos híbridos deben ser la prioridad de acuerdo al mix energético de EU.

De los pocos casos de estudio citados, los resultados más concluyentes son para el caso particular en México. Dos de las investigaciones analizadas de diferentes autores coinciden en que los sistemas energéticos más sostenibles en ese país son los que están compuestos por energía eólica. Aunque no resulta lógico obtener conclusiones determinantes basadas en únicamente dos investigaciones, sí resulta posible deducir que la integración de ambas metodologías en estas investigaciones ha aportado una ayuda considerable a los decisores a la hora de elegir las opciones más sostenibles. En resumen, esta sección presenta una revisión del estado actual de ambas técnicas (MDMC-ACV) en el apoyo a la toma de decisión aplicada a las energías renovables, principalmente en el campo de la planificación energética. La tabla 5 muestra el resumen de la revisión de artículos científicos de los casos donde se han combinado ambas

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

Tabla 5: MCDM con ACV en las energías renovables (Fuente: Elaboración Propia)

| Estudio-autor | Datos MCDM | Datos ACV | Objetivos EERR | Escenarios | Resultados |
|---------------|--|---|--|--|---|
| [31] | Método multiobjetivo 17 criterios (10 ACV, 3 económicos, 4 sociales) 11 alternativas | U. func: Generación anual de electricidad p/2050 BD: Ecoinvent V2.2 Alcance: "de la cuna a la tumba" LCIA: CML 2001. Cat. Impact. AD, AC,EUT,GW, OLD, PO. | Determinar el Sistema energético más sostenible para el año 2050. | 11 Sistemas energéticos en México: | Opciones más sostenibles para el suministro energético en México para el 2050 son los escenarios: integrados que generan el 100 % electricidad a partir de energía renovable, lo sigue el escenario que está compuesto por el 75 % de producción de EERR, 10% gas natural, 5% carbón y 10 % energía nuclear. |
| [30] | (AHP) 12 criterios 9 alternativas | Alcance: "cuna-cuna" Objetivo: evaluar la sostenibilidad de las plantas energéticas. Categorías de impactos evaluadas: aire, suelo, agua, biodiversidad. | Determinar que Planta de electricidad por medio de las EERR, es la más sostenible en México. | 4 escenarios: 1.-Ecológico 2.-Tecnócrata 3.-Ligeramente ecológico 4.-Ligeramente tecnócrata | De acuerdo con las cuatro dimensiones (económicas, sociales, institucionales y medioambientales), las 9 plantas evaluadas desde los 4 escenarios. Las plantas de energía eólica son las más sostenibles en México. |
| [32] | Electre TRI. 8 criterios: 6 ACV, 2 operaciones vehículo. 6 altervs. | U. func: 1 km distancia recorrido. BD: Ecoinvent V2.2. Alcance: "cuna a la tumba" LCIA: CML 2001. Cat. Impact.: AD, AC,EUT,GW, OLD, PO. | EERR para evaluación de sostenibilidad de vehículos, por energía renovable | 6 Clases de vehículos en Portugal. 1. | Mejor alternativa de los 6 fue el vehículo de batería Eléctrica (BEV), con 8 de los 10 indicadores evaluados, todo esto en el contexto de Portugal. |
| [34] | TOPSIS 12 criterios 6 alternativas | Indicadores medidos con el ACV: calentamiento global, eutrofización, requerimiento de la tierra | Determinar la mejor alternativa (tecnología) para el tratamiento de aguas residuales en horario de verano. | 6 escenarios: 1.-Área urbana 2.-Área urbana tratamiento de agua para reúso. 3.-Área suburb. 4.-Área suburb. Trat. De agua para reúso. 5.-Área rural 6.-Área rural de trat. de agua para reúso | Analizan cinco MDMC, determinan que TOPSIS es el método más adecuado para seleccionar la tecnología de tratamiento de aguas residuales. Encontraron que las tecnologías que debían usar para el tratamiento de aguas residuales para el caso de Mumbai, India deben ser compactas y eficientes. |
| [33] | Electre 7 alternativas 16 criterios | Obtienen los datos ambientales de ACV, de otros estudios. | Evaluar la sostenibilidad de vehículos disponibles en EU, bajo un escenario de energía eléctrica convencional y un escenario de energía eléctrica solar. | 2 escenarios: 1.-Producción electricidad convencional 2.-Producción electricidad solar | Evalúan 7 tipos de vehículos como alternativas bajo dos escenarios. La adopción de los vehículos eléctricos híbridos (VEH) debe ser una prioridad dada la actual red de energía eléctrica de Estados Unidos. Proponen que las dimensiones sociales y económicas se deben incluir en la metodología de ACV convencional. |

Tabla 5: MDMC con ACV en las Energías Renovables.

ACV CON MDMC DENTRO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

En toda la bibliografía revisada en este documento, no se encontraron estudios que integrasen la metodología de ACV con MDMC específicamente en la energía solar fotovoltaica, solo en algunos casos [35] evalúan las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo a su impacto medioambiental y económico, pero en ningún caso integran MDMC con ACV. A pesar que existen gran cantidad de investigaciones sobre el ACV para la energía solar fotovoltaica, la mayoría de estos estudios se centran sólo en calcular la energía embebida en la fabricación de esta tecnología, es decir en términos de tiempo de amortización de la energía gastada que comúnmente se denomina indicador de EPBT. Por ejemplo algunos autores [13] calculan estos indicadores en el estudio que realizan de ACV en paneles fotovoltaicos. Para abonar a esta revisión, se refiere también la investigación de [36] que hacen una revisión exhaustiva de estudios de ACV específicamente en energía solar fotovoltaica. Un alto porcentaje de los casos de estudio citados en esa investigación sólo evalúan la sostenibilidad de las tecnologías fotovoltaicas en términos de su EPBT y emisiones de CO₂ principalmente, además muy pocos incluyen el BOS (balance of system) en el ACV. Por otro lado los MDMC muestran ser una herramienta útil para modelar problemas de toma de decisiones en las energías renovables como lo muestra [37] en su reciente investigación. El uso de estos métodos se ha diversificado con diferentes enfoques aplicados en casos de estudios concretos como se muestra en la tabla 4 de este documento.

CAPITULO 3: ACV CON INTEGRACIÓN DE MDMC PARA EVALUAR ALTERNATIVAS SAPV PARA ELECTRIFICACION RURAL EN CERRO HERMOSO, OAXACA, MÉXICO, DESDE EL PUNTO DE VISTA TÉCNICO, AMBIENTAL Y DE COSTES.

El objetivo de este capítulo es realizar un ACV con la integración de un MDMC para seleccionar primero la mejor alternativa de electrificación desde el punto de vista ambiental, técnico y parcialmente económico.

ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

Actualmente Cerro hermoso es una comunidad de unos 12 años de antigüedad compuesta de aproximadamente un poco más de 300 familias, cuenta con servicios comunitarios como: centro de salud, una escuela primaria y preescolar, a pesar del tiempo que llevan, el problema principal es el suministro de electricidad, al ser esta una zona rural, la red de electricidad aún no se extiende hasta esta área, en la actualidad solo unas pocas familias cuentan con plantas generadoras de electricidad a partir de diésel y gasolina, el resto se encuentran sin electricidad. Tanto el agua, electricidad y demás servicios son los problemas principales para el desarrollo de esta comunidad. Dado que una de las necesidades más latentes es el caso de las viviendas, el gobierno estatal implemento un programa llamado "Techo Firme" que consiste en la construcción de viviendas de concreto de un tamaño de 7 mts largo cercado, y 3.5 mts de patio por 5.5 mts de ancho para cada familia, de esta manera el gobierno estatal pretende que a partir de este programa comience la construcción de vivienda de concreto. Cabe mencionar que el centro de salud y un aula de preescolar ya han sido construidas aun cuando se carece del suministro eléctrico. El aula de preescolar consta de dos profesoras y atiende a 20 niños, así como la escuela primaria que consta de 4 profesores y atiende a 90 niños (todos los grados).



Figura 4: Comunidad de Cerro Hermoso, ubicada en el pacífico al sur de México.

Tomando la comunidad de Cerro Hermoso como el lugar de emplazamiento para el caso de estudio de esta investigación, la cual se basa principalmente sobre la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) incorporando como actividad secundaria los métodos de decisión multicriterio. Descrito lo anterior, concretamente este capítulo describe como se aplica la metodología del ACV con la integración de los MDMC en la fase 1 y 4 para llegar a la selección de la mejor tecnología fotovoltaica de electrificación en la comunidad rural en Cerro Hermoso Oaxaca.

DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DEL ACV, INTEGRANDO MDMC EN SUS FASES 1 Y 4.

Siguiendo las actividades que debe incluir la metodología, el objetivo principal de este trabajo es integrar los MDMC dentro de esta metodología, con el único fin de reducir el nivel de incertidumbre en la toma de decisiones, el ACV por si solo como se menciona en secciones anteriores, evalúa únicamente aspectos ambientales, en este caso de estudio se propone evaluar desde el principio incluso si un SAPV es buena alternativa y posterior a ella evaluar sus aspectos ambientales dimensionando el tres tecnologías. A continuación, se citan cada una de las fases que integra el ACV y se describe las actividades que incluyeron en este caso de estudio.

FASE 1: METAS, ALCANCES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Esta fase incluye varias actividades, tales como definición de las metas, el alcance y el objetivo del estudio, así como definir bien el sistema en cuestión a analizarse, por ello en esta fase se agrega un MDMC en la actividad donde se define y se describe el sistema analizar.

Descripción y definición del sistema analizar

MDMC: AHP-TOPSIS-FUZZY, PARA SELECCIONAR LA MEJOR TECNOLOGÍA DE ELECTRIFICACIÓN EN CERRO HERMOSO.

Debido a que, en esta técnica multicriterio se consideran tres alternativas como posibles sistemas de electrificación en la comunidad de Cerro Hermoso, las cuales fueron: SAPV, sistema diésel y sistema de la CFE. Para considerar como alternativa un SAPV en este análisis fue necesario dimensionar esta alternativa en el contexto de la comunidad considerada, por ello en este punto de estudio se dimensiona un SAPV para la comunidad de Cerro Hermoso.

DIMENSIONADO LA ALTERNATIVA DEL SAPV

Como se menciona en el párrafo anterior, dado que se considera un SAPV como una alternativa de electrificación en la técnica AHP-TOPSIS-Fuzzy, en esta sección se procedió a dimensionar el SAPV acorde a las necesidades de la comunidad, para ello se realizaron encuestas con las personas residentes y en concreto con las autoridades en turno (Agente municipal) con el fin de obtener la información necesaria para determinar la media de la demanda energética en las 300 viviendas, mediante esto se llega a la conclusión que cada vivienda tiene una demanda de 3686 watts hora día, una vez obtenidos estos datos se dimensiona un SAPV con estas necesidades y se concluye que instalar un SAPV de 1 kWp de potencia en cada vivienda cubriría la demanda (Ver anexos).

DETERMINANDO EL MEJOR SISTEMA ENERGÉTICO PARA CERRO HERMOSO.

Incluimos el análisis de la técnica multicriterio AHP-TOPSIS-Fuzzy, considerando las alternativas: SAPV de 1kWp, Sistema de la CFE, Sistema Diesel como posibles tecnologías de electrificación, hasta ahora a pesar que estamos en la fase 1 de ACV, aun no definimos cual es el sistema analizado, sin embargo para lograr este objetivo se aplica una técnica multicriterio híbrida difusa : AHP-TOPSIS-Fuzzy, la cual incluye aplicar dos tipos de encuestas: encuesta corta y encuesta extensa (ver anexo), considera la participación de tres expertos en contexto energético mexicano, evaluándose con números difusos triangulares, en principio las encuestas y el modelado del problema en

general se aplica con números clásicos, después de analizar las respuesta cuantitativas de los expertos en las encuestas, se nota que los tres individuos difieren en sus respuestas las cuales oscilan en un rango de valores, por este motivo se procede a modelar el problema con números difusos en la forma agregada, mediante esto se obtiene el SAPV de 1kWp como el mejor sistema de electrificación para Cerro Hermoso (ver anexos).

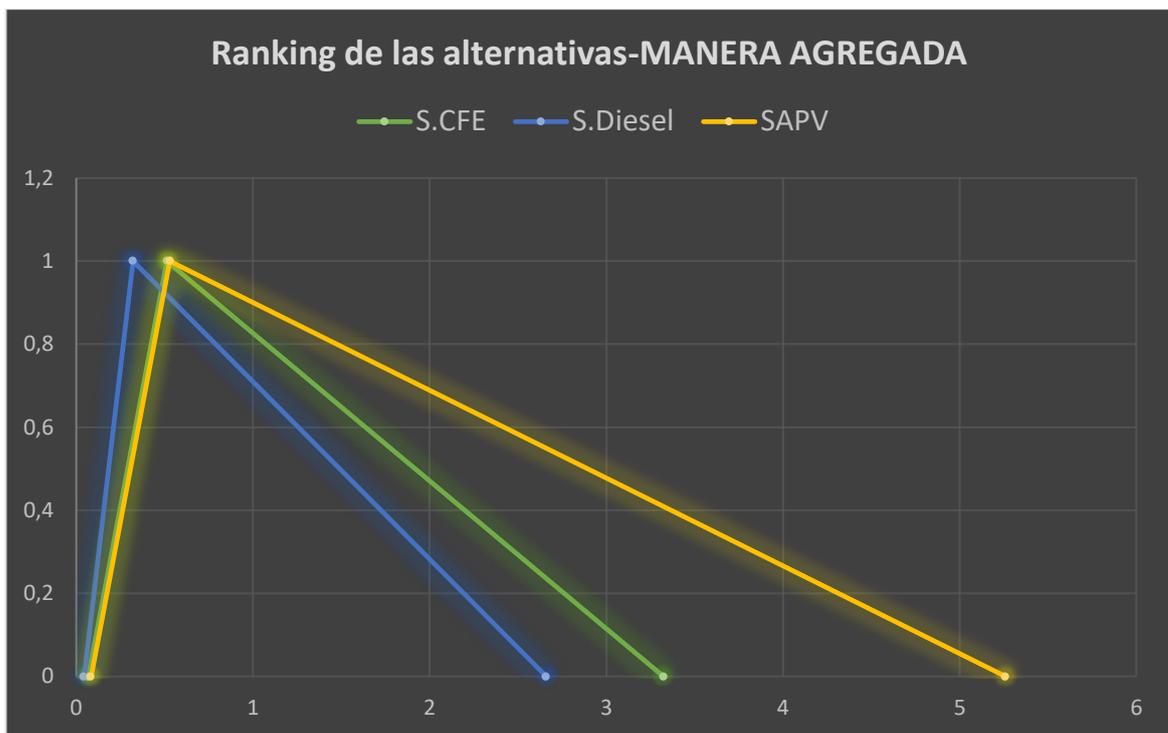


Grafico 2: SAPV como mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso.

De la actividad anterior de obtuvo que un SAPV es la mejor alternativa de electrificación para Cerro Hermoso, a partir de ahora nos referiremos al sistema analizado como el SAPV.

Teniendo claro y descrito el sistema analizar, a continuación, se describen el resto de las actividades para esta primera fase.

De la actividad anterior se sabe que un SAPV es la mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso, pero el objetivo de este estudio es determinar la mejor alternativa de SAPV, lo cual incluye la evaluación del SAPV con diferentes tecnologías.

Objetivo del estudio: evaluar el SAPV de 1kWp con tres tecnologías fotovoltaicas, tomando una tecnología de cada generación: de la primera generación se analiza la tecnología de **Silicio monocristalino (Si-Mono)**, segunda generación **Silicio amorfo (Si-Amorfo)** y de la tercera las **Células orgánicas (OPV)**, se tomará en cuenta para

este primer estudio solo la perspectiva ambiental, indicadores económicos y técnicos, se determina evaluar la dimensión ambiental utilizando la metodología ILCD con sus dieciséis categorías de impactos que son: **Cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, efectos cancerígenos y toxicidad humana, efectos no cancerígenos y toxicidad humana, materia prima, radiación ionización humana, radiación ionización parcial, formación de ozono fotoquímico, acidificación, eutrofización terrestre, eutrofización de aguas dulces, eutrofización marina, eco toxicidad de aguas dulces, uso de la tierra, depleción de los recursos del agua y uso de recursos fósiles.**

Los indicadores que se analizarán y donde se centrará el comportamiento ambiental serán los dieciséis que proporciona la metodología, acotando finalmente en los kg de CO₂ emitidos, además se incluye el tiempo de retorno energético (EPBT) y adicionalmente se agrega el indicador de costo de los paneles, superficie ocupada por cada tecnología, su eficiencia y por último la energía gastada para su fabricación. Una vez calculados estos indicadores se incluye en la última fase (fase 4) de este estudio una técnica de decisión multicriterio (AHP-TOPSIS) para determinar que SAPV es el mejor en términos ambientales, técnicos y parcialmente económico.

Se utiliza Sima-Pro como Software para la evaluación de impactos ambientales.

Fronteras o alcance del estudio: El sistema se evalúa con un alcance **de la cuna a la puerta**, ya que se consideran desde la entrada de materiales para la fabricación de los elementos que componen el SAPV, hasta su instalación.

Unidad funcional: 1kWp

Unidad de referencia: 1 SAPV

FASE 2: REGISTRO DE ENTRADAS Y SALIDAS: ANALISIS DE INVENTARIO.

De acuerdo a la demanda de cada familia (tabla 6 Y 7) que se concluyó en una de las actividades de la fase anterior.

| FOCOS (corriente continua) | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------------|--------------|----------------------|-------------|
| Estancia | No | No focos | Watts | Horas uso día | Wh/d |
| <i>Cuarto</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Baño</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Cocina</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Patio</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Sala</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| Total | | | | | 600 |

Tabla 6: Demanda de corriente continua por familia en Cerro Hermoso, Oaxaca México.

| ELECTRODOMESTICOS (Corriente Alterna) | | | | |
|--|-----------|--------------|----------------------|-------------|
| Dispositivo | No | Watts | Horas uso día | Wh/d |
| Televisor | 1 | 75 | 4 | 300 |
| Refrigerador | 1 | 110 | 23 | 2530 |
| Lavadora | 1 | 200 | 0.83 | 166 |
| ventilador pedestal | 2 | 15 | 3 | 90 |
| Total | | | | 3686 |

Tabla 7: Demanda de corriente alterna por familia en Cerro Hermoso, Oaxaca, México.

Energía demandada=3686 watts, con el 0.9 del rendimiento del inversor tenemos la demanda energética es 4095 wh/d

Desglosado de las tablas anteriores (6 y 7) y como se indica en secciones anteriores, este trabajo incluye el dimensionado completo de una instalación autónoma fotovoltaica en Cerro Hermoso (ver anexos). Por ello en esta etapa se citan los elementos para dimensionar el SAPV con la misma potencia (1kWp) con las tres tecnologías diferentes mismas que fueron citadas en la fase1 de este estudio. La tabla 8 muestra el inventario para el dimensionado con las tres tecnologías seleccionadas.

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

Tabla 8: Inventario para el SAPV de 1kWp, con tres tecnologías.

Del dimensionado de la instalación podemos resaltar los datos importantes, tales como la superficie disponible para la instalación del SAPV, solo se cuenta con una superficie de 7 mts de largo por 5.5 mts de ancho (ver anexo), lo cual condiciona la superficie disponible para el SAPV por tanto esto hace que sea un criterio relevante para la decisión.

FASE 3: EVALUACIÓN DE IMPACTOS

En la fase anterior se citaron los elementos necesarios para este estudio, también se definió en la primera fase de este ACV que se utiliza la metodología de ILCD para evaluar los impactos ambientales y que el software que se utiliza para realizar el ACV es el SIMAPro.

En esta fase se muestran los resultados de la evaluación de los impactos utilizando la metodología ILCD. Como se define en la fase 1 de este análisis, la evaluación de los impactos que se presentan en esta etapa están asociados a la unidad funcional de 1kWp, y a la unidad de referencia de 1 SAPV, también se define que la instalación y el funcionamiento del SAPV será en el contexto mexicano, por esta razón, en el software, en los casos donde permite se toman los procesos que están directamente en el emplazamiento de la instalación y el resto en el contexto global. Para modelar el mismo sistema se consideran tres tecnologías fotovoltaicas: con módulos orgánicos (OPV), módulos de silicio monocristalino (Si-Mono) y módulos de Silicio Amorfo (Si-Amorfo), además se consideran dos versiones de BOS: BOS-OPV y BOS-Si, el primero es para modelar la instalación con los módulos orgánicos donde se omite el marco o el soporte de aluminio, y el segundo para simular la instalación con los módulos de Silicio: amorfo y monocristalino, de este último su única variante es la cantidad de metros cuadrados de marco de aluminio o soporte.

La evaluación de los resultados que se presentan en esta fase concretamente son los indicadores que se calcularon mediante la metodología ILCD.

A continuación, se presentan los indicadores ambientales en forma comparativa.

CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE LA METODOLOGÍA ILCD.

Cambio climático

El grafico 3 presenta las emisiones de CO₂, de cada sistema.

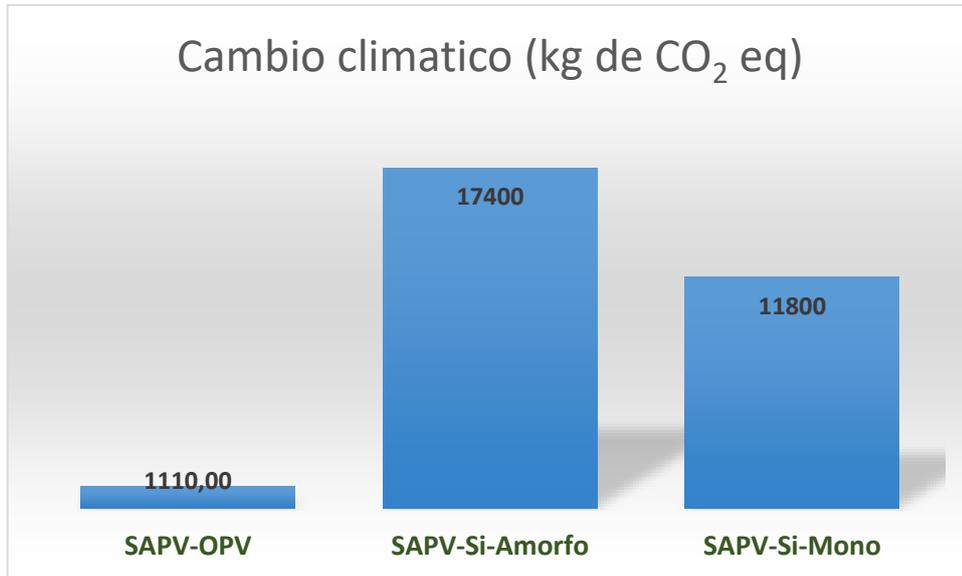


Grafico 3: Comparativa cambio climático, kg CO₂eq.

El grafico 3 muestra la categoría de impacto que contabiliza las emisiones de CO₂ que emite cada sistema, estas emisiones están asociadas a un SAPV de 1kWp de potencia, se observa que el SAPV-OPV es el que menos emite CO₂, sin embargo también se debe considerar que es el que menos vida útil tiene, se pudiera suponer aquí que su comportamiento ambiental es mejor que los de silicio debido a que el BOS del sistema no incluye marco de aluminio.

Contribución a la depleción de la capa de ozono

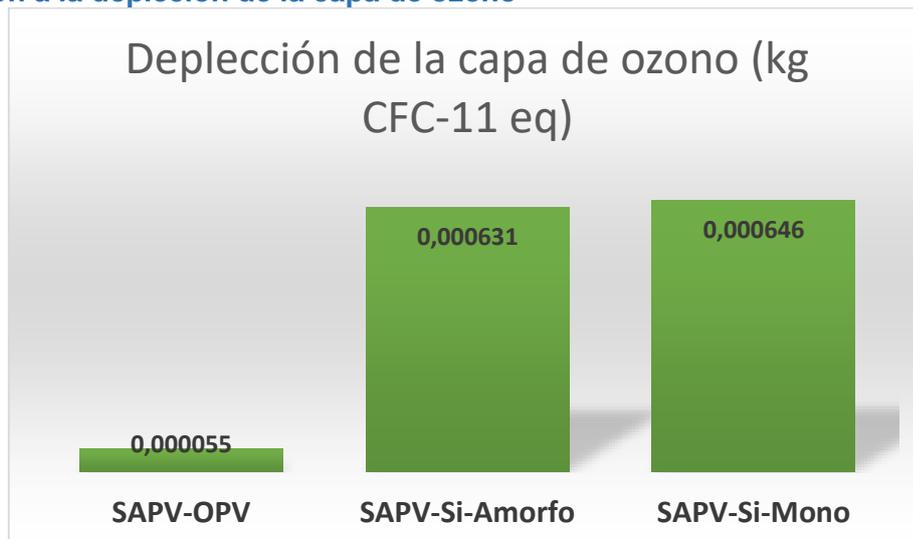


Grafico 4: Contribución a la depleción a la capa de ozono

Nuevamente el gráfico 4 muestra que el SAPV-OPV, es el que menos contribuye a la depleción de la capa de ozono, hasta aquí las gráficas anteriores (3 y 4) ponen en ventaja en referencia a la dimensión ambiental, al sistema con módulos orgánicos, esto es de suponerse ya que es bien sabido que la tecnología orgánica actualmente es la más respetuosa con el ambiente.

Comparativa de las 3 tecnologías en las 16 categorías de impactos

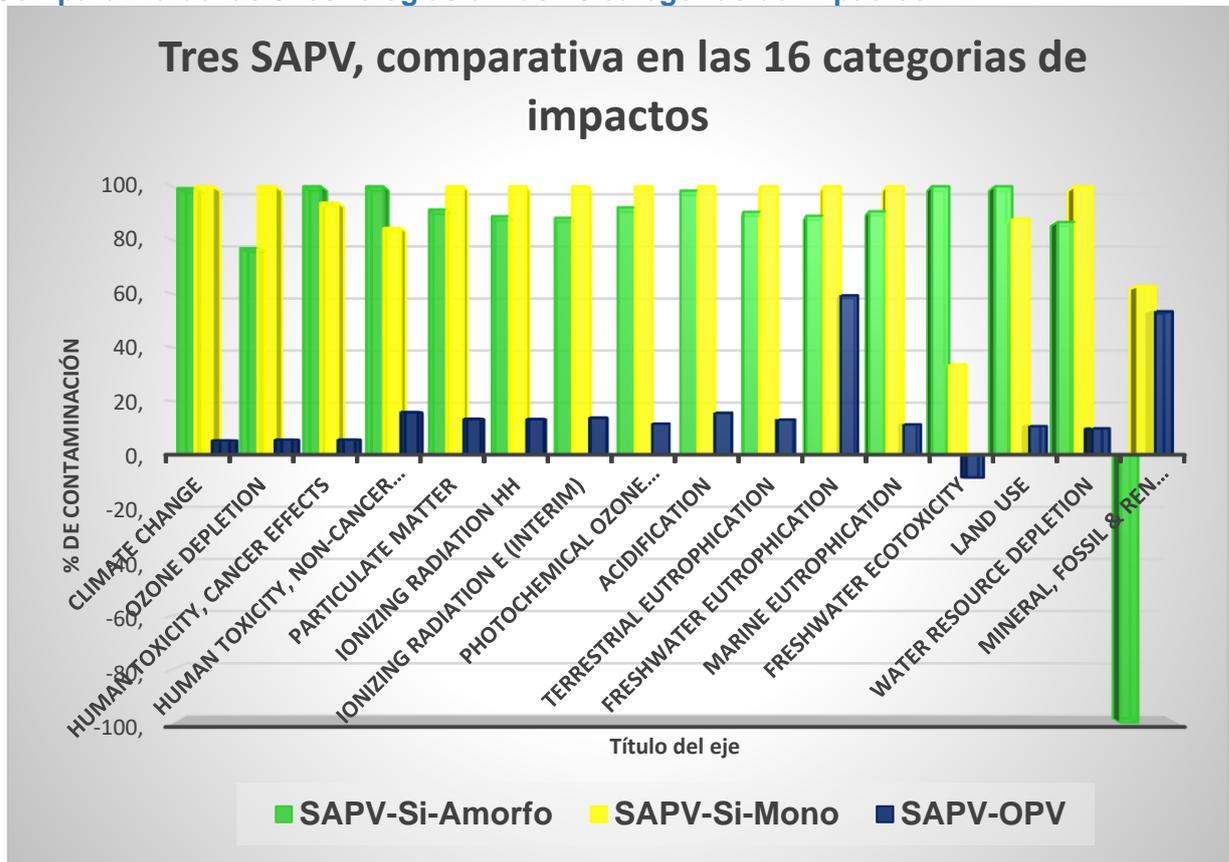


Gráfico 5: Evaluación de las 16 categorías de impacto en los tres SAPV's

En general el gráfico 5 muestra la evaluación de las dieciséis categorías de impacto de la metodología ILCD, para las tres versiones de SAPV, en este gráfico se puede apreciar que el SAPV que incluye los módulos orgánicos es la versión menos contaminante, como conclusión podemos decir hasta ahora en este estudio que el sistema con módulo orgánicos tiene mejor comportamiento ambiental.

Los gráficos anteriores nos dieron una ilustración general del comportamiento de los sistemas, pero resulta interesante comparar solo los BOS y los módulos y determinar las cargas ambientales.

Comparativa de los BOS en las 16 categorías de impacto

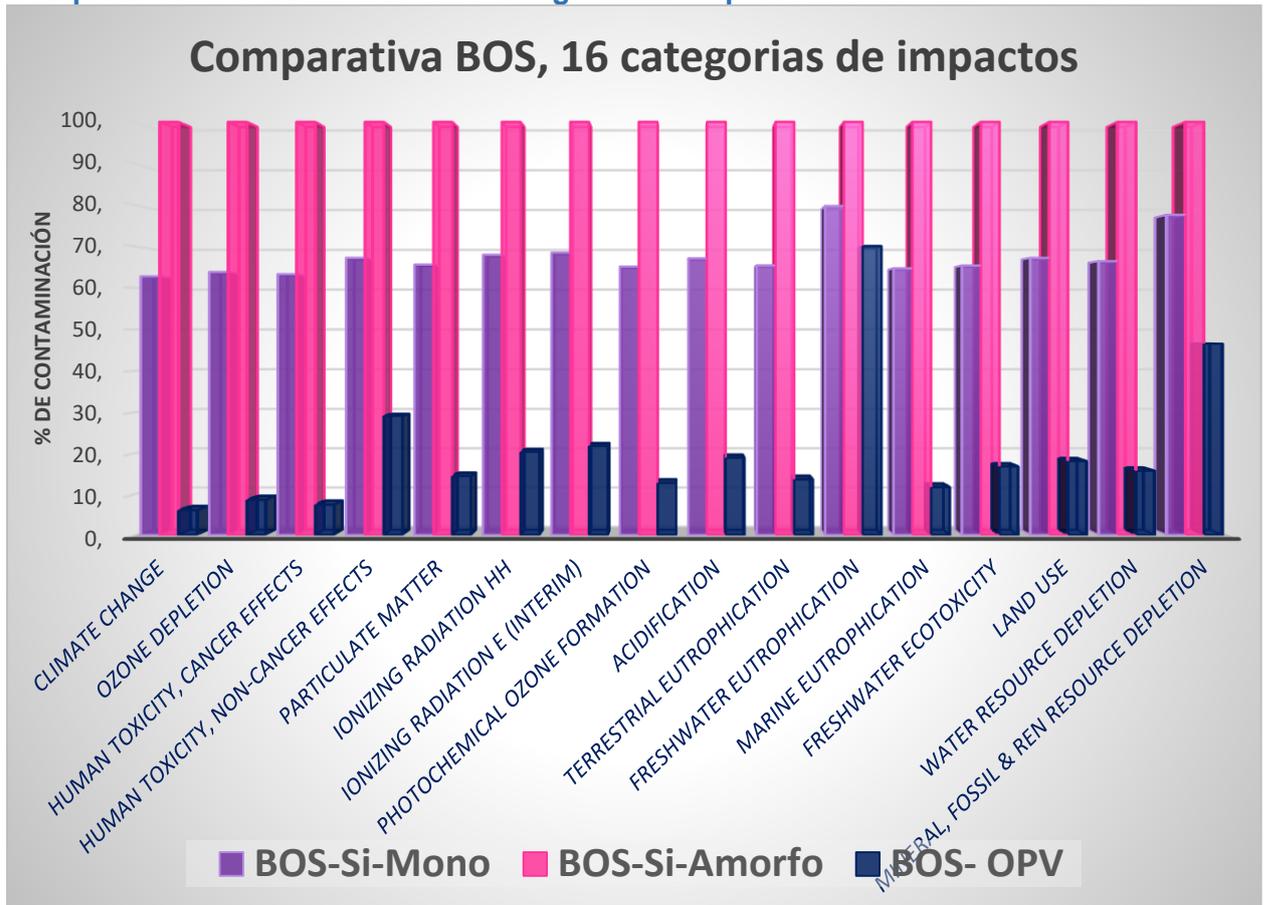


Grafico 6: Comparativa BOS's en la metodología ILCD.

Del grafico 6 se obtiene que el BOS para los módulos de silicio amorfo es el que produce más contaminación en las 16 categorías de impactos de la metodología ILCD, sin embargo en la gráfica anterior a esta (grafico 5) se observa que hay emisiones negativas, eso significa que ese sistema en vez de emitir contaminantes ayuda a evitarlos, si en la contabilidad de esta grafica (6) no se observan emisiones negativas, significa que esas emisiones pertenecen a los procesos de producción de los módulos de silicio amorfo, para comprobarlo se ilustra en el siguiente grafico (grafico 7)

Comparativa de los módulos en las 16 categorías de impacto

Al realizar la comparativa entre los módulos de las tres tecnologías consideradas, se observa que los módulos de células orgánicas son los menos contaminantes, y que la diferencia entre las otras dos tecnologías es muy importante, esto se puede apreciar fácilmente en el siguiente gráfico. También se puede comprobar lo que se supone en el grafico 6, que las emisiones negativas realmente están asociadas a la fabricación de los módulos de silicio amorfo, aunque se ha “tirado” de los procesos, y se localiza que estas

emisiones negativas se deben a que posiblemente no se esté contabilizando una materia prima correspondiente a esa categoría de impacto.

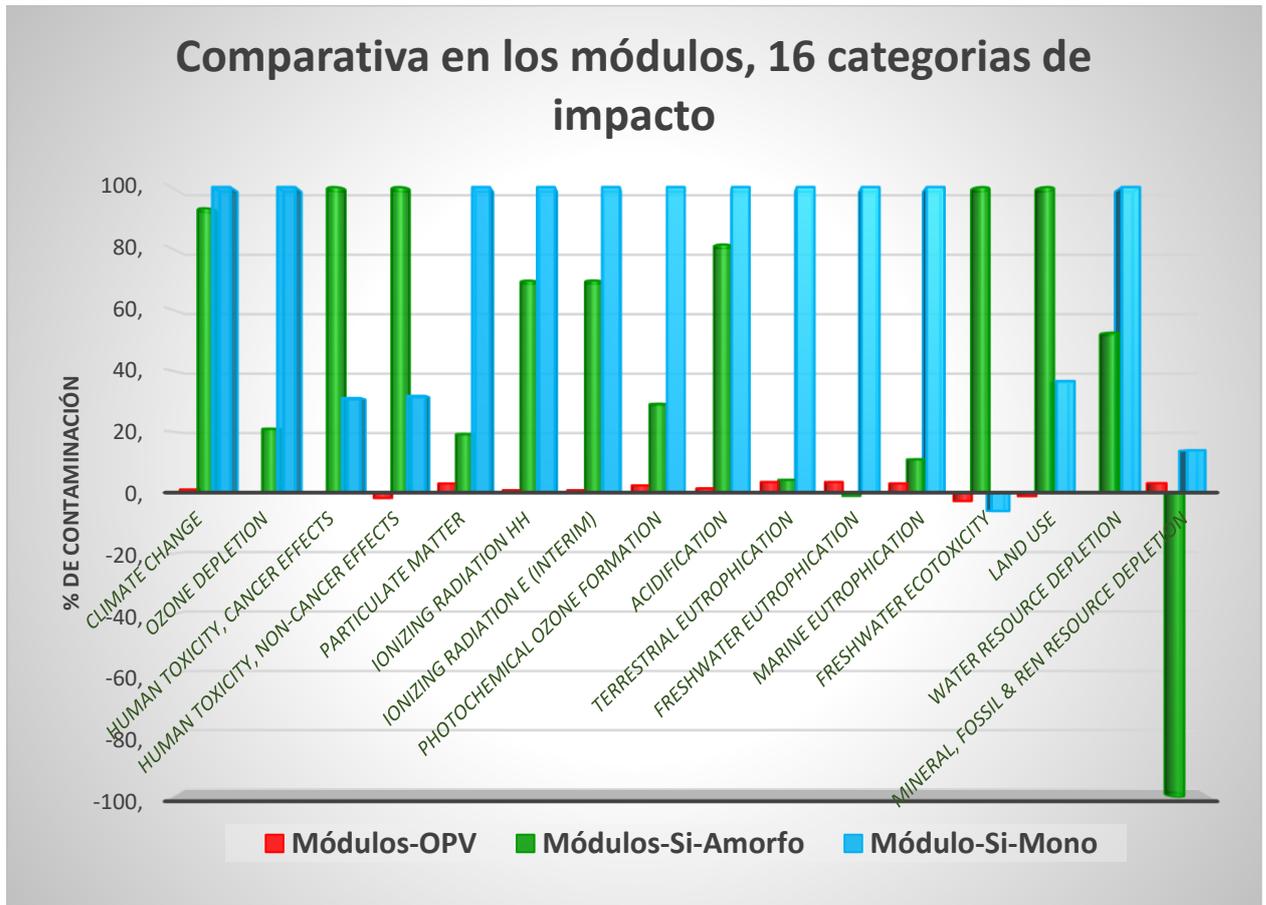


Grafico 7: Comparativa de los módulos en la metodología ILCA.

ENERGÍA EMBEBIDA

La energía embbebida se refiere a la energía que se consume para montar la instalación fotovoltaica, se toma en cuenta la energía que se utiliza para la fabricación de cada uno de los componentes de la instalación. En este estudio se está dimensionando un SAPV con tres tecnologías.

A continuación, se presentan las gráficas generadas por SimaPro, donde podemos ver cuanta energía demanda la instalación del SAPV con las tres tecnologías fotovoltaica consideradas.

Comparativa de energía embbebida en los componentes del SAPV con las tres tecnologías.

La siguiente grafica muestra el total de energía que se invierte en cada sistema, muestra los kWh invertidos en la fabricación de cada componente que integra la instalación, en este análisis se está dimensionando el SAPV con tres tecnologías, se observa que el sistema con la tecnología de Silicio amorfo es la que consume más energía en su fabricación, quedando un consumo de 63113.06 kWh, también se observa que el sistema

integrado por las células orgánicas, es el que menos energía consume en su fabricación requiriendo solo 7702.77 kWh, nuevamente puede asociarse a que el sistema que contiene los módulos orgánicos no incluye el marco de aluminio en su BOS, considerando que el marco de aluminio es el más contaminante y el que tiene asociada más energía embebida.

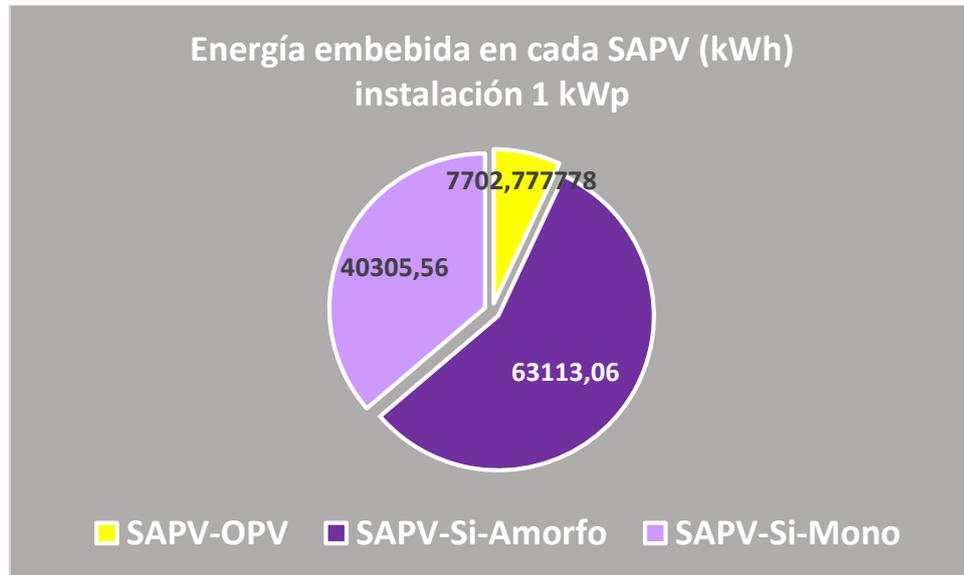


Grafico 8: Energía embebida en los SAPV's

Comparativa de la energía embebida solo en los módulos

La gráfica 9 hace referencia a la energía que se requiere para fabricar solo los módulos de las tecnologías que se están considerando, si comparamos los gráficos 8 y 9 observamos en principio que el que menos requiere energía para su fabricación es el SAPV-OPV, se puede deducir en principio por que dado el inventario, este SAPV no requiere de un marco de aluminio, a diferencia de los SAPV que usan las tecnologías de silicio monocristalino y amorfo, aun cuando ambas en su inventario requieren un marco de aluminio para su instalación, el SAPV-Si-Amorfo es más demandante energéticamente, esta demanda extra se debe a que este sistema requiere mayor cantidad de metros cuadrados de marco de aluminio, 26 m^2 y 11.2 m^2 para el SAPV-Si-Mono, por tanto esa energía extra realmente esta contabilizada en el BOS-Si-Amorfo, ya que la energía que se requiere en la fabricación de los módulos de silicio amorfo es menor a la requerida por los módulos de silicio monocristalino, esto se puede apreciar claramente en el siguiente grafico (grafico 8).

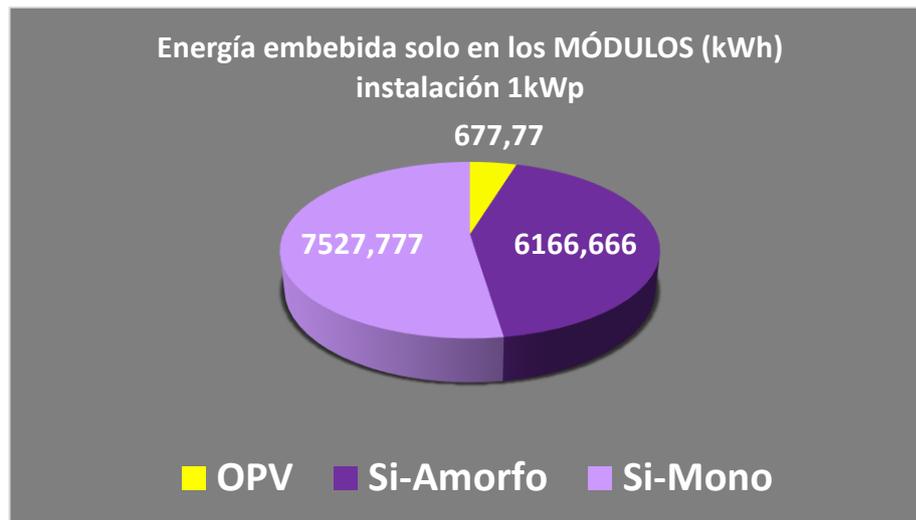


Gráfico 9: Energía embebida en la fabricación de los módulos

Como se supone en la sección anterior, esta ilustración muestra que la fabricación de los módulos de silicio mono cristalino son los que demandan más energía para su fabricación, y que las células orgánicas son las que menos energía necesitan para fabricarse necesitando solo 677.77 kWh, esto es lógico ya que existe una correlación directamente proporcional entre las emisiones y la energía embebida.

Comparativa de la energía embebida en los BOS

En la fase 1 de este ACV, se describen los sistemas que se dimensionan, se muestra que los BOS que integran cada sistema tienen requerimientos distintos, varían de acuerdo a la tecnología, la siguiente grafica hace referencia solo a la energía demandada o embebida para la fabricación de los BOS que incluye cada sistema, como era de suponerse por las deducciones que se hacen en los gráficos anteriores, el BOS-Si-Amorfo es el que mayor energía embebida tiene esto es debido a la cantidad de metros cuadrados de marco de aluminio, ya que es la única diferencia que existe entre el BOS-Si-Amorfo y el BOS-Si-Mono

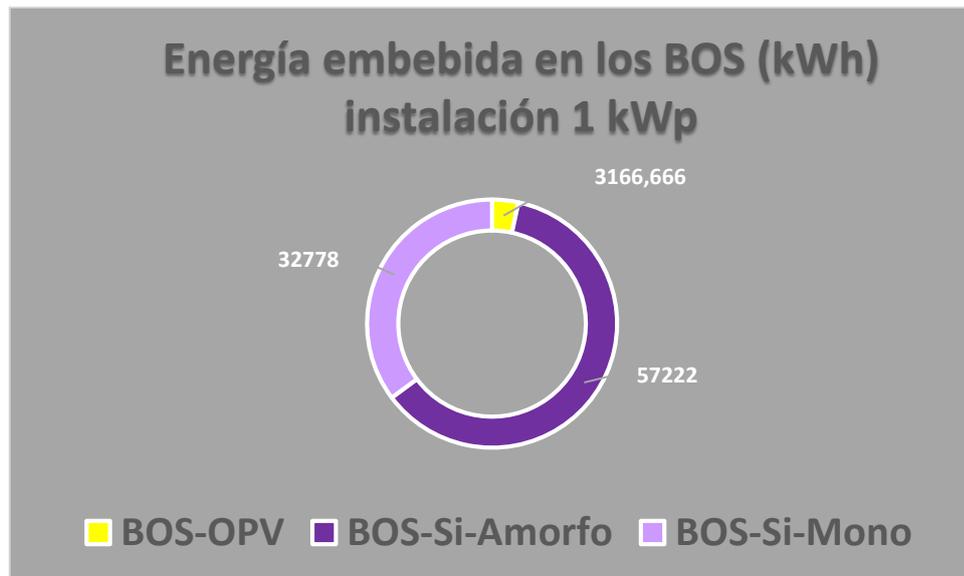


Grafico 10: Energía embebida en la fabricación de los elementos de los BOS

COSTOS DE LOS MÓDULOS

De acuerdo a las cotizaciones actuales y los costos, el siguiente grafico muestra los costos de los módulos de cada tecnología, este grafico hace referencia a la cantidad de módulos necesarios para una instalación de 1 kWp, a pesar que el SAPV-OPV tuvo toda la ventaja en su comportamiento ambiental, en este grafico se muestra el alto costo de las células orgánicas en relación a las otras dos tecnologías, dada esta inversión tan alta, pudiéramos decir que un SAPV-OPV deja de ser atractivo y poco rentable para instalaciones aisladas, si solo se evaluara su costo.

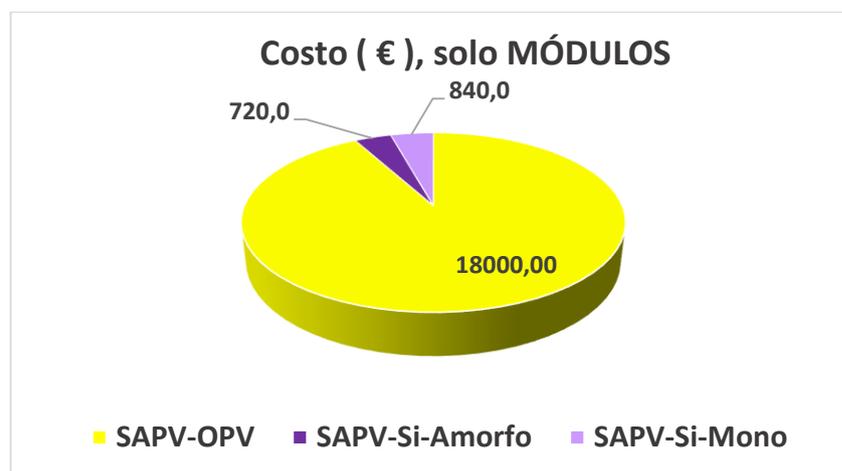


Grafico 11: Costo (€) de los módulos, asociados a 1kWp de potencia

Adicionalmente en esta fase de evaluación se calculan otros indicadores relacionados a las tecnologías analizadas en este estudio, se considera importante determinar el tiempo de vida, la eficiencia y otros parámetros que te permitan analizar e interpretar los resultados.

TIEMPO DE VIDA DE LAS TECNOLOGÍAS

En este apartado se muestra la vida útil para el SAPV con las variantes de las tecnologías, en la mayoría de los casos de las instalaciones fotovoltaicas el tiempo de vida lo determina la vida útil de los módulos que se estén utilizando, sin embargo, en el caso donde se utilizan células orgánicas se toma como tiempo de vida, la vida útil del BOS, que son 10 años. La siguiente tabla muestra la vida útil de las tecnologías utilizadas y los dos elementos principales del BOS.

| ELEMENTOS | TIEMPO DE VIDA (AÑOS) |
|-------------|-----------------------|
| INVESOR | 10 |
| BATERÍA | 10 |
| MÓDULOS OPV | 1.5 |
| MÓDULOS CSI | 25 |
| MÓDULOS ASI | 25 |

Tabla 9: Elementos del SAPV y su tiempo de vida.

La tabla anterior da lugar a la siguiente (tabla 10) donde se determina el tiempo de vida del SAPV variado con las tres tecnologías, esta tabla muestra la vida útil en el SAPV para cada tecnología, y marca los reemplazos que se hacen a lo largo de su tiempo de vida marcado.

ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL Y COSTOS DEL SAPV.

Para determinar la vida útil de un sistema fotovoltaico siempre se determina por la vida útil de los módulos, en este caso tenemos la vida útil o años de funcionamiento del SAPV con las tres tecnologías los cuales son: SAPV-Si-Mono= 25 años, SAPV-Si-Amorfo= 25 años y SAPV-OPV= 10 años, en este último, como la vida útil de los módulos OPV es de 1.5 años, se toman los años de vida útil del BOS, por tanto, se consideran los 10 años de funcionamiento del BOS como vida útil del SAPV-OPV.

| TIEMPO DE VIDA ÚTIL (años) | SAPV's | Línea de tiempo: años de funcionamiento instalación | | | | | | |
|----------------------------|-----------|--|---|---|---------------|-------|---------------|-----|
| | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | |
| 25 | Si-Amorfo | BOS+18 m ² Módulos-Si-Amorfo+26 m ² marco aluminio | | | reemplazo BOS | | reemplazo BOS | |
| 25 | Si-Mono | BOS+6.5m ² Módulos-Si-Mono+11.2 m ² marco aluminio | | | reemplazo BOS | | reemplazo BOS | |
| 10 | OPV | BOS+25 m ² Módulos-OPV | reemplazo de 83.3 m ² de Módulos-OPV | reemplazo de 83.3 m ² de Módulos-OPV | ----- | ----- | ----- | --- |

Tabla 10: línea de tiempo del funcionamiento de cada tecnología, reemplazo de componentes.

La tabla anterior considera el tiempo de vida útil o funcionamiento del sistema con cada una de las tecnologías referenciadas al dimensionado de 1 kWp de potencia, de la tabla anterior se puede observar que el SAPV dimensionado con módulos orgánicos, requiere reemplazo de 25 m² de OPV cada 1.5 años, lo que lleva a un reemplazo de 83.3 m² cada 5 años, por tanto tendría un reemplazo de 166.6 m² de OPV total durante toda su vida útil (10 años) lo cual sería un **gasto total** de módulos de **119,952.00 €** durante su vida útil. En cuanto al SAPV dimensionado con la tecnología de silicio amorfo y monocristalino, su vida útil se define como 25 años, por tanto, el reemplazo que se da es cada 10 años que corresponde a la vida útil del BOS. Realmente el costo inicial de cada versión de SAPV depende de los módulos, ya que el BOS incluye exactamente lo mismo a diferencia del BOS-OPV que no incluye el marco de aluminio, aun con esta ventaja para el SAPV-OPV económicamente sigue en desventaja con respecto a los otros dos SAPV. Comparando ahora solo los SAPV de silicio se observa que el costo de los módulos de silicio amorfo solo tiene una ventaja de 120 € con respecto a los módulos de silicio monocristalino, sin embargo esta ventaja se ve reducida en el extra del BOS, ya que supone un gasto mucho mayor que 120 € los metros cuadrados extras de marco de aluminio que requiere el BOS-Si-Amorfo, por tanto en el criterio costo inicial del sistema se puede deducir que el SAPV-Si-Mono tiene la ventaja sobre las otras dos tecnologías.

COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

ENERGY PAY BACK TIME (EPBT) O TIEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO

El Energy Pay Back Time es el tiempo en que la instalación recupera la energía embebida en la fabricación de sus componentes, a partir de este momento la misma estará evitando emisiones de CO₂.

El EPBT para la instalación diseñada en la variación de las tres tecnologías se calculó de la siguiente forma:

$$EPBT = \frac{\text{Energía Embebida} \times \eta \text{ ter}}{\frac{\text{Energía producida}}{\text{año}}}$$

Se asume una eficiencia termoeléctrica de 35%. Es importante tomar en cuenta que los resultados reales de la instalación fotovoltaica diseñada podrían variar ligeramente, pues el performan ratio (PR) que se asume es de 0.85.

La siguiente tabla muestra el cálculo de energía producida por el sistema en las tres variantes a lo largo de su vida útil.

| TECNOLOGIA | Superficie (m ²) | Vida útil modulo (años) | Eficiencia | kWh/m ² (años) | kWh/vida útil |
|-------------------|------------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|---------------|
| OPV | 25 | 1.5 | 3% | 62.43573 | 2341.339875 |
| AMORFO-SI | 18.4 | 25 | 11% | 228.931 | 105308.2646 |
| MONOCRISTALINO-SI | 6.5 | 25 | 17% | 353.8025 | 57492.90138 |

Tabla 11: Vida útil y producción de energía de cada tecnología.

De la tabla anterior se obtiene el tiempo de retorno energético para la instalación de 1kWp dimensionada con las tres tecnologías.

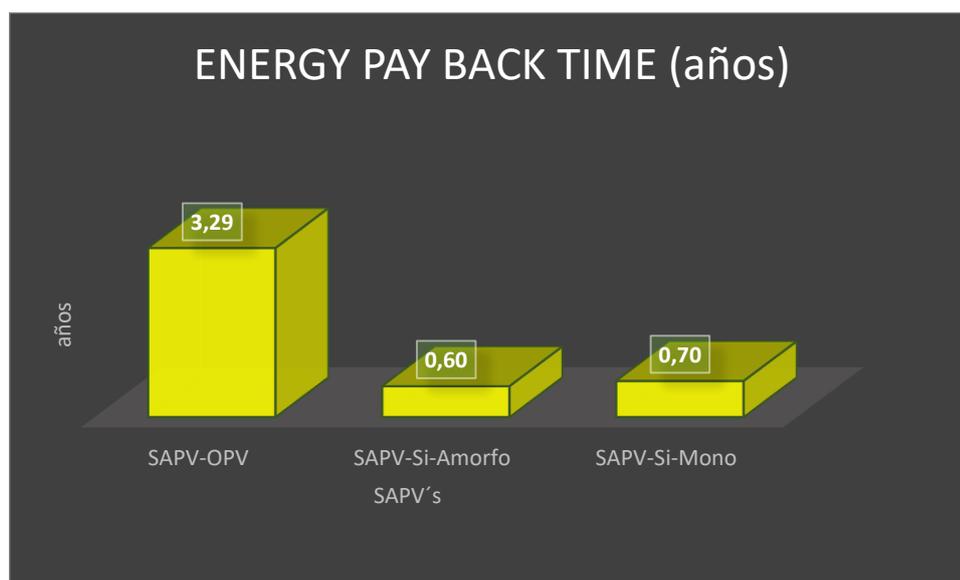


Gráfico 12: Tiempo de retorno energético de los SAPV's

El gráfico 11 muestra claramente que el SAPV-OPV se tarda más años en devolver la energía que se invierte en fabricarlo, esto se debe a su baja eficiencia, ya que es directamente proporcional.

Hasta este punto podemos comparar las tres tecnologías fotovoltaicas en principio con 4 indicadores como se muestra en la tabla de abajo.

| SAPV | | REFERENCIA: 1 kWp potencia | | | |
|------------|------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Generación | Tecnología | EPBT (años) | Emisiones (kg CO ₂) | Energía embebida (kWh) | Costo de los paneles (€) |
| Primera | Si-Mono | 0.70 | 11800 | 11700 | 840 |
| Segunda | Si-Amorfo | 0.60 | 17400 | 63113 | 720 |
| Tercera | OPV | 3.29 | 1110 | 7702 | 18000 |

Tabla 12: Comparativa de las tres tecnologías fotovoltaicas en cuatro indicadores: EPBT, Emisiones de CO₂, Energía embebida y Costo de los paneles.

BOS VS MÓDULOS EN LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS

EMISIONES DE CO₂

En un SAPV con módulos orgánicos referenciado a 1kWp de potencia el mayor responsable de las emisiones de CO₂ es el BOS (grafico 13), esto deja claro que los procesos de fabricación de los módulos orgánicos realmente tienen muy pocas emisiones y que el mayor responsable de las emisiones es el BOS, desagregando y analizando los elementos del BOS-OPV, las baterías son las que tienen mayor carga ambiental a diferencia de los BOS-Si-Mono y BOS-Si-Amorfo, que el marco de aluminio es el que tiene mayor carga ambiental seguido de las baterías. Las siguientes graficas muestran que, para los tres sistemas, el BOS es el responsable de la mayor carga ambiental.

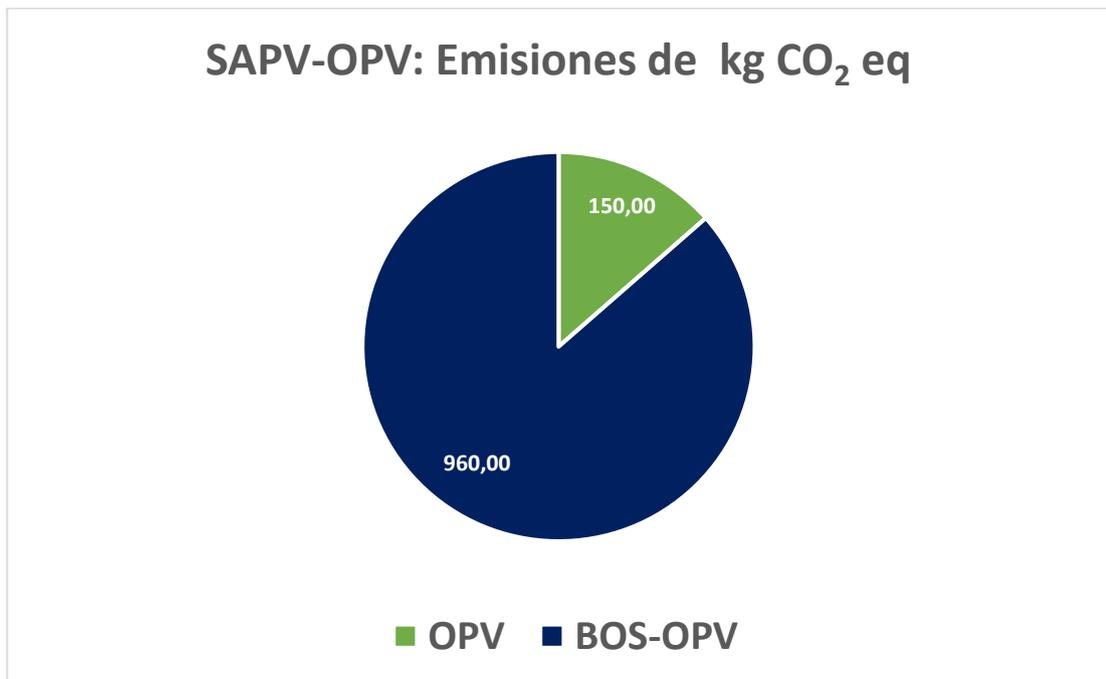


Grafico 13: SAPV con módulos orgánicos, emisiones de kg CO₂

SAPV-Si-Amorfo: Emisiones de kg CO₂ eq

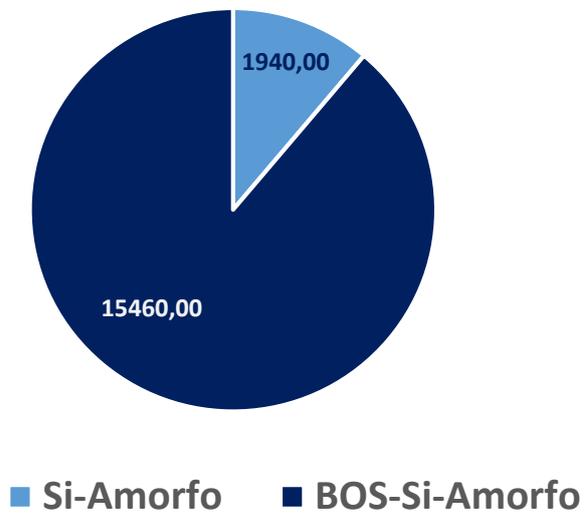


Grafico 14: SAPV con módulos de silicio Amorfo, emisiones de kg de CO₂

SAPV-Si-Mono: Emisiones de kg CO₂ eq

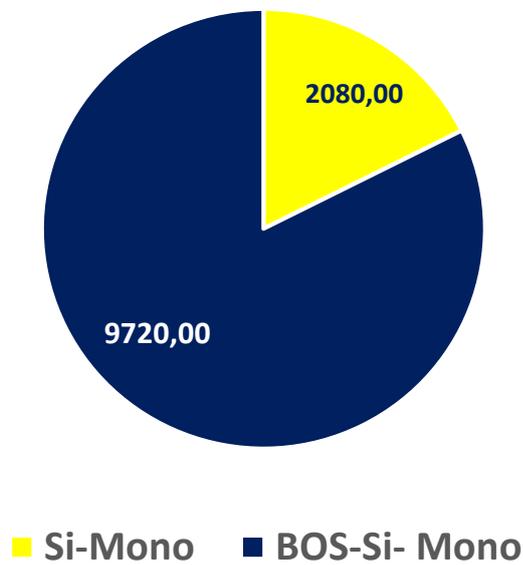


Grafico 15: SAPV con módulos de silicio monocristalino, emisiones de kg de CO₂

De los tres gráficos anteriores (13, 14 y 15) concretamente se concluye que BOS, es el responsable de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, se

resalta que estas emisiones están asociadas a un SAPV de 1 kWp de potencia y que el inventario fue registrado lo más cercano al contexto mexicano.

Sin embargo, es interesante agrupar y analizar primero cuál de todas las tecnologías (solo módulos) resulta más contaminante, y segundo cuál de las tres versiones de los BOS es el que contabiliza más emisiones. Por esta interrogante se obtiene una gráfica comparativa (grafico 16), mediante este grafico se afirma que la tecnología ligeramente más contaminante en un SAPV de 1kWp son los módulos de silicio monocristalino con respecto a la tecnología de silicio amorfo. Del grafico 17 se confirma nuevamente que el BOS-Si-Amorfo es el mayor contaminante con respecto a los otros dos BOS (OPV y Si-Mono) esto es debido al exceso de metros cuadrado de marco de aluminio, al requerir más energía tiene asociada mayor cantidad de emisiones, la cantidad de marco de aluminio está condicionada por el área o superficie ocupada por el sistema, y esta área depende de la eficiencia, entonces es lógico que el SAPV-Si-Amorfo incluya mayor marco de aluminio porque su eficiencia es más baja que el SAPV-Si-Mono.

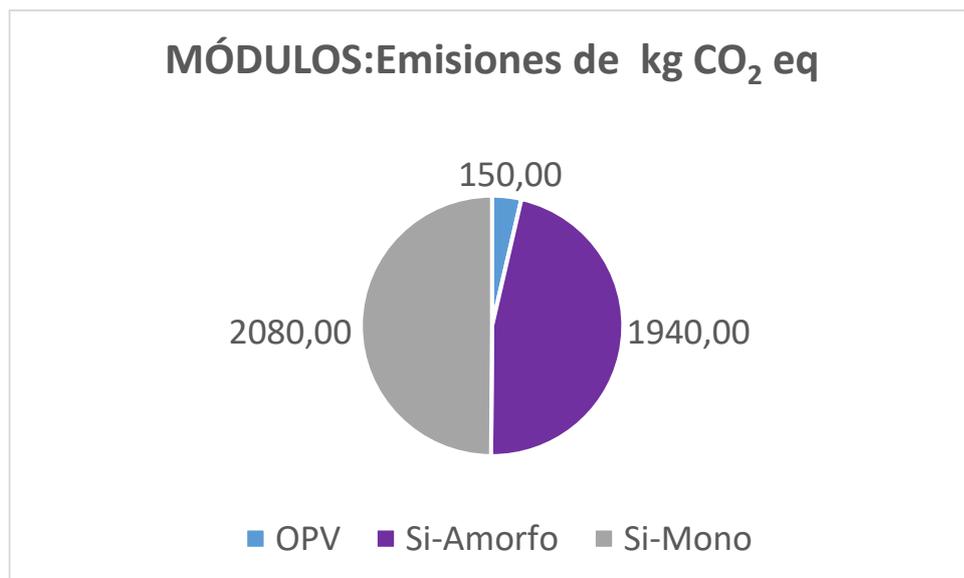


Grafico 16: Comparativa módulos, emisiones de kg de CO₂

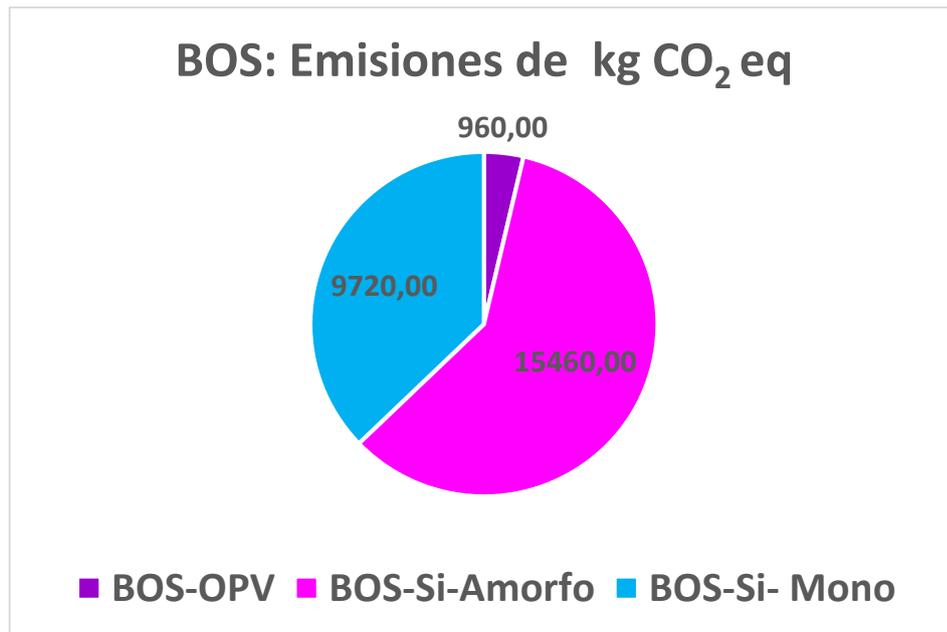


Grafico 17: Comparativa BOS, emisiones kg CO₂

FASE 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Se ha analizado un SAPV de 1 kWp de potencia en tres tecnologías fotovoltaicas, derivado de la evaluación de los indicadores planteados en la etapa 1 de este análisis, en esta fase analizamos finalmente las tres versiones de SAPV con seis indicadores principales: Tiempo de retorno energético (EPBT), Emisiones de CO₂, Energía embebida, Costo de los paneles, Superficie ocupada y Eficiencia, aun cuando algunos de estos indicadores dependen uno de otro, se considera importante evaluar los sistemas de manera desagregada.

La siguiente tabla muestra el resumen comparativo de las tres tecnologías con los indicadores considerados.

| SISTEMA SAPV | | REFERENCIA: 1 kWp potencia | | | | | |
|--------------|------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Generación | Tecnología | EPBT (años) | Emisiones (kg CO ₂) | Energía embebida (kWh) | Costo de los paneles (€) | Superficie ocupada (m ²) | Eficiencia (%) |
| Primera | Si-Mono | 0.70 | 11800 | 40305 | 840 | 6.5 | 17 |
| Segunda | Si-Amorfo | 0.60 | 17400 | 63113 | 720 | 18.4 | 11 |
| Tercera | OPV | 3.29 | 1110 | 7702 | 18000 | 25 | 3 |

Tabla 13: Valor de los indicadores para evaluar los SAPV.

De la tabla anterior deducimos que, el SAPV con los módulos de Silicio mono cristalino, está mejor en 2 de los 6 indicadores (Superficie ocupada y Eficiencia), el que incluye los módulos de silicio amorfo es el mejor en tiempo de retorno energético (EPBT) y costo inicial de los paneles y por último el SAPV que tiene mejor comportamiento ambiental,

es el que esta dimensionado con los módulos orgánicos, siendo el mejor en emisiones de CO₂ y Energía embebida. La interrogante que da respuesta al objetivo principal de este estudio es: ¿Cuál de los tres SAPV es el mejor?, ¿en términos de qué?, si diéramos la respuesta basados en el SAPV que tenga mayor criterios a favor entonces no se podría precisar cuál de los tres SAPV es el mejor, ya que cada uno es mejor en 2 de los 6 indicadores medidos, lo que si podemos decir es que cada uno es bueno en ciertos criterios, por ejemplo si el objetivo fuera buscar el SAPV con mejor comportamiento ambiental, claramente la respuesta seria el que usa módulos orgánicos, o aquel que tiene mejor criterios técnicos, entonces podríamos sugerir particularmente el SAPV-Si-Mono. Sin embargo, hasta este punto es impreciso, ambiguo y sobre todo incierto dar una alternativa ya que el objetivo principal del estudio es determinar el mejor SAPV en los criterios considerados. Debido a esto y como parte de la inclusión de los MDMC en esta fase, se incluye una técnica multicriterio hibrida: AHP-TOPSIS, ya que se conocen los valores cuantitativos ambientales más lo que se agregan con carácter técnico, económico o social, según el contexto. Con este caso justificamos que la metodología del ACV no es capaz de sugerir la mejor alternativa sobre un estudio comparativo, ni ponderar los pesos de los criterios con los que se puede concluir o juzgar un sistema desde un punto de vista contextualizado, con esto lo que se pretende es reducir el grado de incertidumbre sobre las conclusiones del estudio y en particular la sugerencia del mejor SAPV para Cerro Hermoso.

MDMC: AHP-TOPSIS PARA DETERMINAR LA ALTERNATIVA ENERGÉTICA IDEAL

Consideramos las versiones de los SAPV como las alternativas:

ALTERNATIVAS:

- SAPV-MONOCRISTALINO
- SAPV-AMORFO
- SAPV-ORGÁNICO

Y los indicadores de la tabla 14 como los criterios:

CRITERIOS:

- C1: EPBT
- C2: Emisiones CO₂
- C3: Energía embebida
- C4: Costo inicial módulos
- C5: Superficie ocupada
- C6: Eficiencia

Se considera como criterio importante la superficie ocupada ya que en el dimensionado de la instalación la superficie donde se va instalar el SAPV está condicionada por el techo de la vivienda que se está simulando, es por ello que, entre menos área ocupada, mejor.

AHP PARA EL CÁLCULO DE LOS PESOS DE LOS CRITERIOS

Se hace la evaluación de los criterios, se construye la matriz de valoración de criterios por pares (tabla 15), todo esto contextualizado.

| MATRIZ DE VALORACIÓN DE CRITERIOS (AHP) | | | | | | | | | | |
|---|-----|----|-----|-----|-----|-----|------------------|-------|---------------|-----------------|
| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | MEDIA GEOMETRICA | PESOS | VECTOR PROPIO | λ_{max} |
| C1 | 1 | 5 | 4 | 1/5 | 1/5 | 1/7 | 0.697 | 0.078 | 0.557 | 6.534 |
| C2 | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/9 | 1/7 | 1/9 | 0.221 | 0.025 | 0.157 | CI |
| C3 | 1/4 | 3 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 0.464 | 0.052 | 0.337 | 0.107 |
| C4 | 5 | 9 | 5 | 1 | 3 | 1 | 2.962 | 0.330 | 2.049 | |
| C5 | 5 | 7 | 3 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1.506 | 0.168 | 1.109 | CR |
| C6 | 7 | 9 | 5 | 1 | 3 | 1 | 3.133 | 0.349 | 2.204 | 0.086 |

Tabla 14: Cálculo del peso de los criterios, MDMC etapa 4 ACV

TOPSIS PARA EL CÁLCULO DEL RANKING DE LAS ALTERNATIVAS

Se utiliza el método TOPSIS para calcular el ranking de las alternativas, en este caso los SAPV, se valoran con los valores cuantitativos que son tomados de la tabla 14.

| 2.-MATRIZ DE VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS (MATRIZ DE DECISIÓN) | | | | | | |
|--|----------|------------------|----------------|-------------------|------------------------|----------------|
| | C1: EPBT | C2:EMISIONES CO2 | C3: ENERG. EMB | C4: COSTO MODULOS | C5: SUPERFICIE OCUPADA | C6: EFICIENCIA |
| Pesos (W) | 0.078 | 0.025 | 0.052 | 0.330 | 0.168 | 0.349 |
| SAPV-Si Mono | 0.700 | 11800 | 11700 | 840 | 6.500 | 17 |
| SAPV-Si Amorfo | 0.600 | 17400 | 63113 | 720 | 18.400 | 11 |
| SAPV-OPV | 3.290 | 1110 | 7702 | 18000 | 25.000 | 3 |

Tabla 15: Matriz de valoración de alternativas, MDMC etapa 4 ACV

| 3.- MATRIZ DE VALORACIÓN NORMALIZADA | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|------------------|----------------|-------------------|------------------------|----------------|
| | C1: EPBT | C2:EMISIONES CO2 | C3: ENERG. EMB | C4: COSTO MODULOS | C5: SUPERFICIE OCUPADA | C6: EFICIENCIA |
| Tipo criterio | min | min | min | min | min | max |
| Pesos (W) | 0.078 | 0.025 | 0.052 | 0.330 | 0.168 | 0.349 |
| SAPV-Si Mono | 0.205 | 0.560 | 0.181 | 0.047 | 0.205 | 0.831 |
| SAPV-Si Amorfo | 0.176 | 0.826 | 0.976 | 0.040 | 0.580 | 0.537 |
| SAPV-OPV | 0.963 | 0.053 | 0.119 | 0.998 | 0.788 | 0.147 |

Tabla 16: Matriz de valoración normalizada, MDMC etapa 4 ACV.

| 4.- MATRIZ NORMALIZADA PONDERADA | | | | | | |
|----------------------------------|----------|------------------|----------------|-------------------|------------------------|----------------|
| | C1: EPBT | C2:EMISIONES CO2 | C3: ENERG. EMB | C4: COSTO MODULOS | C5: SUPERFICIE OCUPADA | C6: EFICIENCIA |
| SAPV-Si Mono | 0.016 | 0.014 | 0.009 | 0.015 | 0.034 | 0.290 |
| SAPV-Si Amorfo | 0.014 | 0.020 | 0.050 | 0.013 | 0.097 | 0.187 |
| SAPV-OPV | 0.075 | 0.001 | 0.006 | 0.329 | 0.132 | 0.051 |

Tabla 17: Matriz normalizada ponderada, MDMC etapa 4 ACV

| 5.- DETERMINACION DE LA SOLUCION IDEAL POSITIVA (A+) Y NEGATIVA (A-) | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A+ | 0.014 | 0.001 | 0.006 | 0.013 | 0.034 | 0.290 |
| A- | 0.075 | 0.020 | 0.050 | 0.329 | 0.132 | 0.051 |

Tabla 18: Solución ideal positiva y negativa, MDMC etapa 4 ACV

| 6.- CALCULO DE LA MEDIA DE SEPARACION ENTRE UN CONJUNTO DE SOLUCION Y OTRA | | | |
|--|-------|---------------|-------|
| Distancia +A1 | 0.013 | Distancia -A1 | 0.412 |
| Distancia +A2 | 0.129 | Distancia -A2 | 0.351 |
| Distancia +A3 | 0.412 | Distancia -A3 | 0.048 |

Tabla 19: Media de separación entre un conjunto de solución y otra, MDMC etapa 4 ACV

| 7.- CALCULO DE LA PROXIMIDAD RELATIVA | |
|---------------------------------------|---------|
| ALTERNATIVAS | RANKING |
| SAPV-Si Mono | 0.969 |
| SAPV-Si Amorfo | 0.731 |
| SAPV-OPV | 0.105 |

Tabla 20: Ranking de las alternativas, MDMC etapa ACV



Grafico 18: Ranking de las alternativas del SAPV, MDMC etapa 4 ACV.

Basados en la tabla 14 y sobre todo en la modelación de la técnica AHP-TOPSIS para este problema de decisión, en esta etapa se puede deducir que, de acuerdo a los resultados, el mejor sistema de electrificación en Cerro Hermoso, es un SAPV con módulos de silicio mono cristalino de 1 kWp.

Debido a que se concluye que el SAPV-Monocristalino es el mejor sistema energético, resulta interesante citar cuales son las energías participantes para su fabricación.

FUENTES DE ENERGÍA UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SAPV DE SILICIO MONO CRISTALINO.

Módulos:

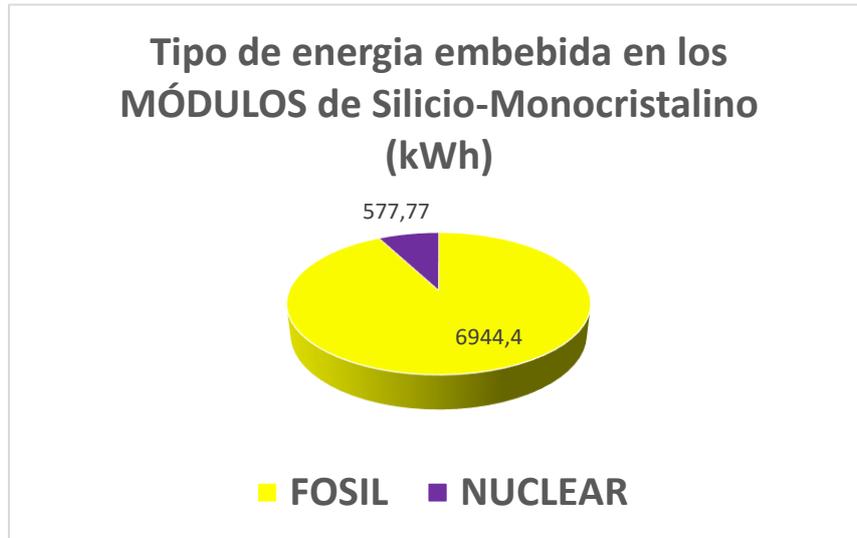


Grafico 19: Tipo de energía embebida en los

BOS

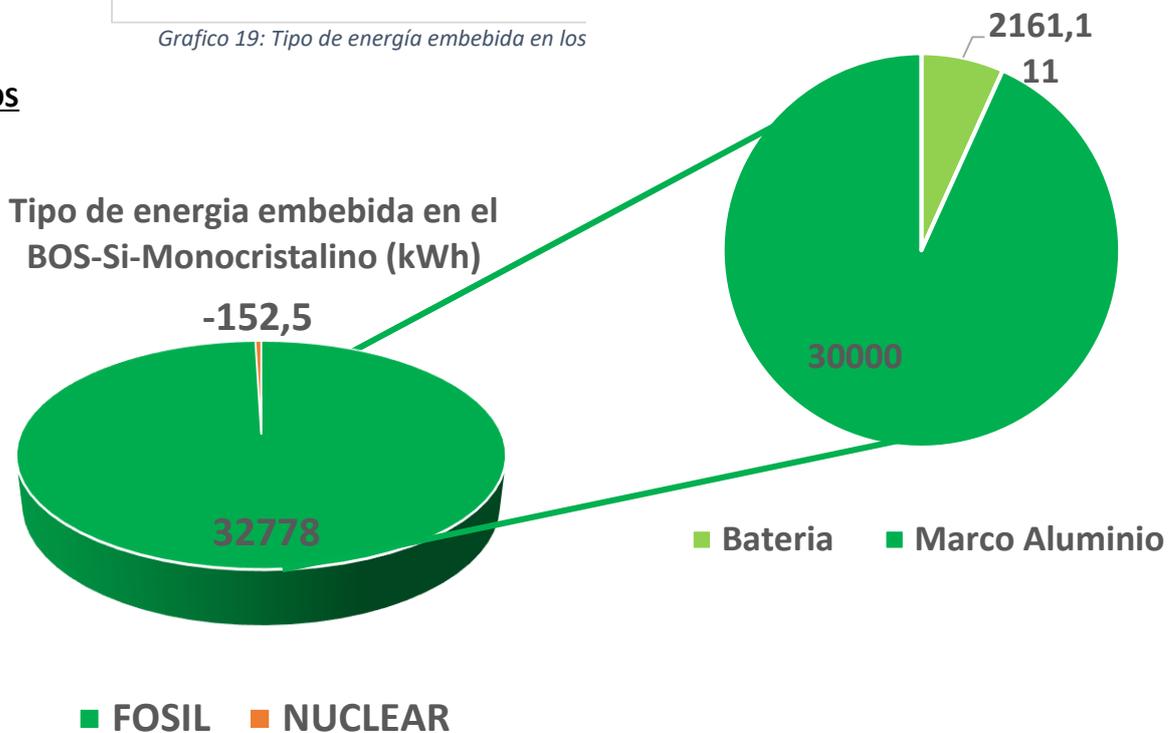


Grafico 20: Tipo de energía embebida en el BOS-SAPV Silicio Monocristalino

Como se aprecia en los gráficos 19 y 20 la energía fósil y la energía nuclear son los tipos de energía embebida en la fabricación de los componentes del SAPV con módulos de Silicio monocristalino.

Esto puede suceder ya que el ACV se enfocó lo más próximo al contexto energético mexicano, el mix eléctrico mexicano en su mayor porcentaje depende de los hidrocarburos, con aproximadamente un 78 % de fósiles y el resto entre nuclear y un

bajo porcentaje de no más del 15 % de energías limpias, que incluye la hidráulica y las renovables.

Es importante también mencionar que si el objetivo fuera solo buscar el SAPV más económico ambientalmente, sin lugar a duda sería el que incluye módulos orgánicos, sin embargo actualmente lo que se busca en las tecnologías fotovoltaicas y más para instalaciones aisladas: su eficiencia y el costo de inversión inicial, por tanto en este estudio se priorizo determinar el mejor SAPV ambiental, parcialmente económico y técnico, donde el aspecto técnico en este caso solo fue evaluado por el indicador de superficie ocupada ya que la superficie disponible está limitada por el techo de la vivienda donde se modelo la instalación del sistema. Modelando las alternativas disponibles, se deduce que el SAPV con módulos de silicio mono cristalino es la mejor opción aun cuando no es el más barato ambientalmente, ni económicamente.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con un caso práctico se concluye que la metodología de ACV por si sola carece de brindar los lineamientos para la toma de decisiones. Dado que en este estudio se realizó un análisis comparativo, al final en la última fase de la metodología del ciclo de vida, debía determinarse que sistema es mejor que otro, si solo nos limitamos a términos ambientales, es sencillo saberlo ya que la metodología del ACV nos proporciona los indicadores cuantitativos, sin embargo las cosas se complican y surge incertidumbre cuando se tiene la necesidad de incluir una dimensión de evaluación distinta a la ambiental, por ello en este trabajo se incluyó un MDMC en la última fase del ACV y por medio de este se determina con una incertidumbre baja que el SAPV con módulos de silicio mono cristalino es el mejor sistema energético para la comunidad de Cerro Hermoso en México. Tomar esta decisión solo con la tabla 14, sería muy arbitrario y carecería de justificación ya que los tres sistemas tienen 2 indicadores a favor cada uno por lo que tienen exactamente la misma cantidad de puntos a favor, por ello se considera que es aquí donde los MDMC juegan un papel importante ya que permiten acotar o contextualizar para decidir que alternativa, sistema, opción o proceso es mejor que otro. Por ejemplo, para nuestro caso de estudio y basados en la literatura los criterios con mayor peso son la eficiencia y costo de inversión inicial seguido del indicador superficie ocupada, este último se le dio relevancia debido a que la superficie donde se instalara el SAPV está limitada por el techo de la vivienda.

Es evidente que este análisis se puede mejorar y sobre todo contextualizar, en este caso de estudio solo se evaluó el peso de los criterios con un experto, y de manera directa, sin embargo como trabajo futuro se propone que a partir de este, se aplique el MDMC, con al menos 3 expertos, resulta interesante también ponderar el peso de las categorías de impacto, y no solo presentar la dimensión ambiental con los kg de CO₂ emitidos sino más bien ponderar la importancia de las 15 categorías una en relación a las demás de acuerdo al contexto o al sistema analizado, esto se propone como un posible trabajo futuro aplicando un MDMC, enfocado con expertos en ACV.

REFERENCIAS

- [1] T. H. Gerard Bruno, “El proceso de analisis jerarquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en seleccion de proveedores.” Santiago, España, 2001.
- [2] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Inf. Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965.
- [3] L. Suganthi, S. Iniyar, and A. A. Samuel, “Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 585–607, Aug. 2015.
- [4] ISO, “Environmental management -Life cycle assessment- Principles and framework.” 1997.
- [5] G. Finnveden, M. Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinee, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, and S. Suh, “Recent developments in Life Cycle Assessment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, Oct. 2009.
- [6] G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B. P. Weidema, and D. W. Pennington, “Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,” *Environ. Int.*, vol. 30, no. 5, pp. 701–720, Jul. 2004.
- [7] D. W. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg, and G. Rebitzer, “Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice,” *Environ. Int.*, vol. 30, no. 5, pp. 721–739, Jul. 2004.
- [8] Universidad Politecnica de Valencia, “METODOLOGIA DEL ANALISIS DE CICLO DE VIDA,” .
- [9] Dr. Olivia Jolliet, Univ. of Michigan, “‘IMPACT 2002+’ LCIA methodology /.” .
- [10] Instituto de medio ambiente y sostenibilidad EUR 24708, *ILCD handbook International Reference Life Cycle Data System*. 2010.
- [11] “Software ‘Curso Slma-Pro’-2015-evaluación de Impactos ambientales.” .
- [12] R. Garcia-Valverde, C. Miguel, R. Martinez-Bejar, and A. Urbina, “Life cycle assessment study of a 4.2 kW(p) stand-alone photovoltaic system,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1434–1445, Sep. 2009.
- [13] N. Espinosa, R. Garcia-Valverde, A. Urbina, and 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, no. 5, pp. 1293–1302, May 2011.
- [14] W. Chen, J. Hong, X. Yuan, and J. Liu, “Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 1025–1032, Jan. 2016.
- [15] H. Kim, K. Cha, V. M. Fthenakis, P. Sinha, and T. Hur, “Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems,” *Sol. Energy*, vol. 103, pp. 78–88, May 2014.
- [16] Y. Fu, X. Liu, and Z. Yuan, “Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 180–190, Jan. 2015.
- [17] J. Hong, W. Chen, C. Qi, L. Ye, and C. Xu, “Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China,” *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 283–293, Aug. 2016.
- [18] C. Kahraman, İ. Kaya, and S. Cebi, “A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and

- fuzzy analytic hierarchy process,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1603–1616, Oct. 2009.
- [19] C. Kahraman and İ. Kaya, “A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 9, pp. 6270–6281, Sep. 2010.
- [20] M. S. García-Cascales, M. T. Lamata, and J. M. Sánchez-Lozano, “Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 199, no. 1, pp. 373–391, Nov. 2011.
- [21] M. Amer and T. U. Daim, “Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 4, pp. 420–435, Dec. 2011.
- [22] T. Kaya and C. Kahraman, “Fuzzy multiple criteria forestry decision making based on an integrated VIKOR and AHP approach,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 7326–7333, Jun. 2011.
- [23] J. M. Sánchez-Lozano, J. Teruel-Solano, P. L. Soto-Elvira, and M. Socorro García-Cascales, “Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 544–556, Aug. 2013.
- [24] H. Aras, Ş. Erdoğan, and E. Koç, “Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process,” *Renew. Energy*, vol. 29, no. 8, pp. 1383–1392, Jul. 2004.
- [25] K. Nigim, N. Munier, and J. Green, “Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources,” *Renew. Energy*, vol. 29, no. 11, pp. 1775–1791, Sep. 2004.
- [26] F. Cavallaro, “Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1678–1685, Jul. 2009.
- [27] F. Ahammed and A. Azeem, “Selection of the most appropriate package of Solar Home System using Analytic Hierarchy Process model in rural areas of Bangladesh,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 6–11, Jul. 2013.
- [28] J. M. Sánchez-Lozano, J. Teruel-Solano, P. L. Soto-Elvira, and M. Socorro García-Cascales, “Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 544–556, Aug. 2013.
- [29] R. Lozano and D. Huisingh, “Inter-linking issues and dimensions in sustainability reporting,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 2–3, pp. 99–107, Jan. 2011.
- [30] M. Claudia Roldán, M. Martínez, and 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.
- [31] E. Santoyo-Castelazo and A. Azapagic, “Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects,” *J. Clean. Prod.*, vol. 80, pp. 119–138, Oct. 2014.
- [32] A. R. Domingues, P. Marques, R. Garcia, F. Freire, and 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.
- [33] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, and Q. P. Zheng, “Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in US,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 291–307, Jan. 2016.

- [34] P. P. Kalbar, S. Karmakar, and S. R. Asolekar, "Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives," *J. Clean. Prod.*, vol. 117, pp. 64–72, Mar. 2016.
- [35] F. Cucchiella and I. D'Adamo, "A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments," *Int. J. Photoenergy*, p. 627454, 2015.
- [36] S. Gerbinet, S. Belboom, and A. Léonard, "Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 747–753, Oct. 2014.
- [37] E. Strantzali and K. Aravossis, "Decision making in renewable energy investments: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 885–898, Mar. 2016.

ANEXOS

SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE ELECTRIFICACIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP-TOPSIS-FUZZY, PARA LA COMUNIDAD DE CERRO HERMOSO, MÉXICO

1. Descripción del problema

Actualmente Cerro hermoso es una comunidad de unos 12 años de antigüedad ubicada en la costa del estado de Oaxaca en el sur de México, esta zona rural está compuesta de aproximadamente 300 familias, cuenta con servicios comunitarios como: centro de salud, escuela primaria y preescolar, estos servicios están limitados por no tener acceso a la red eléctrica, el problema principal es el suministro de electricidad ya que la comisión federal de electricidad (CFE) considera que el número de familias no es suficiente, así como el tipo de servicio requerido no es rentable para la CFE, la red de electricidad aún no se extiende hasta esta área, en la actualidad solo unas pocas familias cuentan con plantas generadoras de electricidad a partir de diésel y gasolina, el resto se encuentran sin electricidad. Tampoco hay servicio de agua potable, para el suministro, la población tiene que echar mano del agua de pozos profundos que solo las personas que cuentan con las plantas generadoras de electricidad pueden extraerla con bombas eléctricas y el resto de manera artesanal.

Se ha investigado la situación energética actual de la comunidad de Cerro Hermoso a través de entrevistas con las autoridades locales y lo más destacado que se ha obtenido es que el pueblo más cercano que cuenta con electrificación de la compañía federal de electricidad (CFE) se encuentra a 3 km, refiriéndose a la población llamada, Cerro Hermoso "La playa". Los argumentos que ha manifestado la CFE para no extender la red eléctrica hasta Cerro Hermoso, es que la población es mínima y la demanda por familia también es mínima, sin embargo, los pueblos aledaños cuentan con electrificación por la CFE, a pesar que son más pequeños, la diferencia está en que el servicio que demandan es alto (restaurantes, hoteles, cámaras frigoríficas, etc). Debido a la problemática anterior este estudio se basa en determinar la mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso.

2. Objetivo

- El objetivo de este trabajo es analizar y seleccionar el mejor sistema energético de electrificación rural para suministrar electricidad a cada familia que integra la comunidad de Cerro Hermoso, tomando en cuenta que la media de la demanda energética de cada familia es de 3973 Wh, además se considera el dato que Cerro

Hermoso recibe una irradiación media de 6.4 kWh/m²/día, lo cual se traduce en una media de 6.4 horas solares pico por día durante todo el año.

- Este trabajo pretende aplicar un método de decisión multicriterio (AHP-TOPSIS-FUZZY) para seleccionar el sistema eléctrico que se adapte mejor a las condiciones actuales de Cerro Hermoso, considerando su situación actual y la poca probabilidad que la CFE extienda la red hasta esta área.
- Dentro de este estudio se analizarán los resultados con diferentes técnicas de MDMC y se concluye cual es la más adecuada para la toma de decisiones, por ello se lleva a cabo este estudio con técnicas hibridad con y sin números difusos.

3. Alternativas a considerar

Las alternativas consideradas para el suministro de electrificación en Cerro Hermoso para este estudio se definen a continuación.

- **A1: SISTEMA ELÉCTRICO DE LA RED (CFE):** Tomando en cuenta que el pueblo más cercano con electrificación a través de la red está a 3 km aproximadamente, se considera esta alternativa dentro del estudio para el escenario donde la CFE extendiera su red hasta Cerro Hermoso.
- **A2: SISTEMA GENERADOR CON DIÉSEL 1 kWp:** Se considera este sistema electrógeno, ya que actualmente es el único medio de suministro eléctrico con el que cuentan solo 3 familias de las 300 que componen esta comunidad.
- **A3: SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO (SAPV) 1kWp:** Se considera una instalación fotovoltaica aislada de 1 kWp de potencia, debido a las condiciones geográficas de Cerro Hermoso y por ser una de las más usadas en electrificación rural, además por que las horas solares pico promedio diarias para Cerro hermoso son 6. 4 horas.

4. Criterios a considerar

En cuanto a la selección de los criterios que serán los puntos de vista con los que se realice la decisión, se han elegido criterios de dos tipos: cualitativos y cuantitativos, debido a que no se tienen datos exactos sobre los datos cuantitativos se define tratarlos con números difusos.

Cuantitativos:

- **C1: Costo de inversión inicial del sistema:** Este es un criterio **cuantitativo** y se expresa en euros (€) por la potencia instalada, incluye todos los costes relativos a la adquisición de equipamiento mecánico, instalación del sistema energético, servicios de ingeniería, etc.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de inversión inicial (€) |
|--|--|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | € 3833.33 |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | € 2680 |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | € 3700 |

Tabla 21: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio costo de inversión inicial.

- **C2: Vida Útil:** Este criterio, es **cuantitativo** y es expresado en años, hace referencia al tiempo de vida que el sistema funciona en condiciones óptimas.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Vida útil (años) |
|--|----------------------------|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | 50 |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | 10 |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | 25 |

Tabla 22: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio vida útil.

- **C3: Costo mantenimiento anual:** Este criterio, es un criterio **cuantitativo** y se expresa en euros (€) año, es decir cuántos euros me cuesta al año dar mantenimiento al sistema.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de mantenimiento anual (€) |
|--|--|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | € 1533.33 |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | € 804 |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | € 185 |

Tabla 23: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio Manto anual.

- **C4: Costo de generación de kW/h:** Este criterio es un criterio **cuantitativo**, se expresa en euros (€), hace referencia al costo de la producción de un kW/h del sistema.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de generación por kWh (€) |
|--|---|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | € 0.05 |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | € 3.5 |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | € 1.21 |

Tabla 24: Alternativas consideradas, para el sistema de electrificación en Cerro Hermoso, Oaxaca México, evaluadas con el criterio costo de generación por kWh.

Cualitativos:

- **C5: Viabilidad técnica:** Este criterio es **cualitativo**, y se refiere a la disponibilidad del sistema, es decir si está disponible de manera inmediata, a mediano o a largo plazo, se mide en una escala de disponibilidad de alto, medio o bajo.
- **C6: Impacto ambiental del sistema:** Este criterio es **cualitativo**, y mide en una escala de alto, medio o bajo que puede ser el impacto ambiental de cada una de las alternativas.
- **C7: Aceptación social:** Este es un criterio **cualitativo**, y hace referencia a la percepción y aceptación de la comunidad (las personas), para cada sistema energético, este se mide en una escala de alto, medio o bajo.

5. Descripción de la metodología utilizada.

La metodología que se utiliza en este estudio es una metodología híbrida, donde se combina el método AHP y el método TOPSIS, evaluado con números difusos triangulares, se selecciona por el hecho de que los expertos proporcionan sus respuestas en un rango de valores.

6. Descripción de los expertos seleccionados

Los expertos que a continuación se citan, son expertos en el sistema energético mexicano y especialistas en energías renovables, se seleccionan esta combinación de expertos ya que se considera que deben intervenir expertos técnicos en el caso del especialista en instalaciones de la CFE y expertos en investigación en el ámbito de las EERR en el contexto mexicano.

| No. | Experto | Especialidad | Lugar Origen |
|-----|--------------------------------|---|---|
| 1 | Joel Hernández Rubalcaba. | Ing. Industrial, Encargado de instalaciones de la CFE. | Chilpancingo de los Bravos Gro, México. |
| 2 | Luis Alberto Lucrecio González | M.C en Ing. Especialidad en EERR, profesor investigador de la UAGro. | Cruz Grande Gro, México. |
| 3 | Rumaldo García Loeza | M.C en Ing. Sistemas, Especialidad en EERR, Ing. De la Comisión Federal de Electricidad (CFE) | Acapulco Gro, México |

Tabla 25: Expertos seleccionados en el contexto energético mexicano.

7. Encuestas aplicadas

Para este análisis se aplicaron dos tipos de encuestas: encuestas tipo corta y tipo extensa mismas que fueron aplicadas a los tres expertos citados anteriormente, para llevarlas a cabo y capturar las respuestas se utiliza la escala de preferencia de SAATY en ambos formatos. A continuación, se describe la estructura y se muestra el contenido de cada una de las versiones de las encuestas aplicadas.

Encuesta tipo “Corta”

Esta encuesta está dividida en dos partes para que el experto responda, se le determina corta ya que en la primera parte el experto solo ordena los criterios de acuerdo a la importancia que el considere y compara el criterio que el considero más importante con el que considero en segundo lugar, tercero y sucesivos, en la última parte solo debe evaluar cada alternativa con cada uno de los criterios, a continuación, se presenta la encuesta corta que se aplicó a tres expertos

Parte 1: Para determinar el peso de los criterios y la valoración de las alternativas, se encuesta a un experto en la materia, con las siguientes preguntas:

1. ¿Cree usted que todos los criterios tienen el mismo peso a la hora de elegir el mejor sistema de electrificación en una zona rural como Cerro Hermoso?

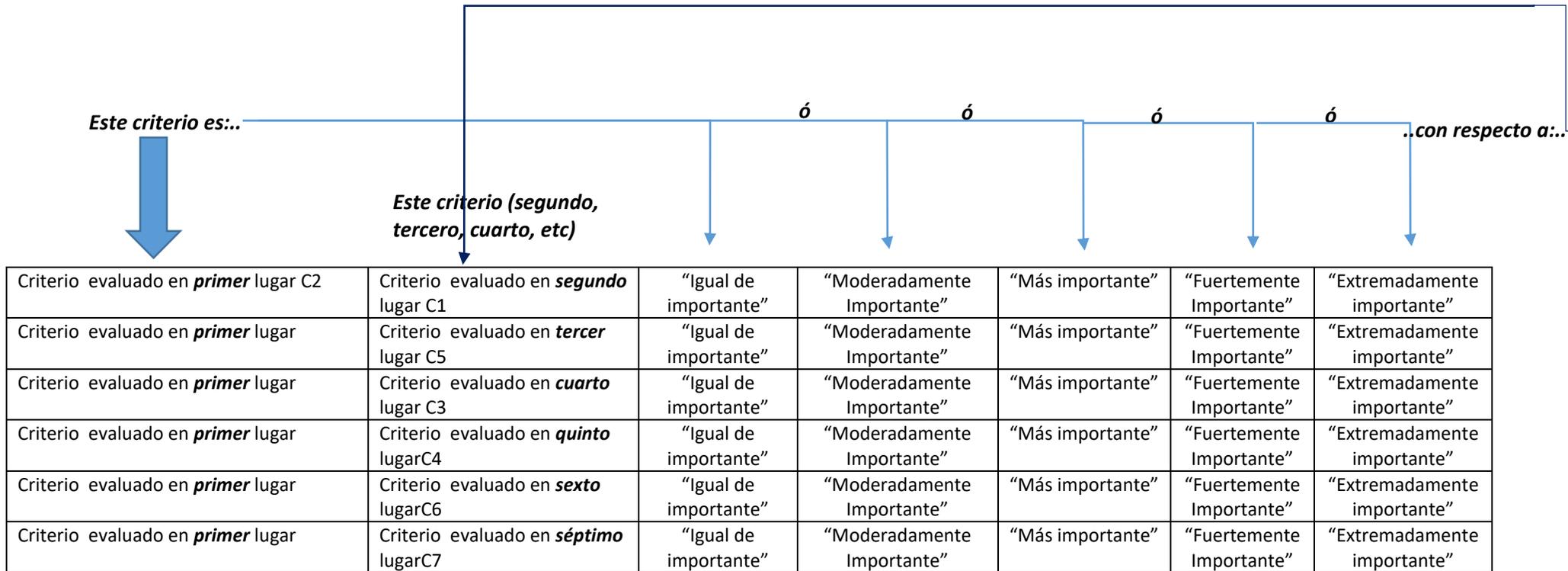
Si

No

2. Marque el orden de importancia que cree usted que debe tener cada uno de los criterios a la hora de elegir el mejor sistema de electrificación en una zona rural como Cerro Hermoso, sabiendo que el 1° es el más importante y 7° es el menos importante.

| | | | | | | | |
|--|----|----|----|----|----|----|----|
| C1: Coste de inversión inicial del sistema | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C2: Vida útil | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C3: Costo mantenimiento anual | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C4: Costo de generación por kWh | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C5: Viabilidad técnica | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C6: Impacto ambiental del sistema | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
| C7: Aceptación social | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |

3. Compare el criterio que usted ha considerado en primer lugar con respecto al que ha considerado en segundo, tercero y sucesivos, utilizando las siguientes etiquetas graduales: **“Igual de importante”**, **“Moderadamente importante”**, **“Más importante”**, **“Fuertemente importante”**, **“Extremadamente importante”**.



Parte 2: Valore las alternativas con los criterios cualitativos, utilizando las siguientes etiquetas: **“Muy bajo”, “Bajo”, “Medio Bajo”, “Medio”, “Medio Alto”, “Alto”, “Muy alto”**

1. Con respecto al criterio: **Viabilidad técnica**, valore los diferentes sistemas energéticos marcando la casilla con la etiqueta lingüística que evalué su viabilidad técnica.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | VIABILIDAD TÉCNICA PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|---|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | “Muy baja” | “Baja” | “Medio baja” | “Medio” | “Medio Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | “Muy baja” | “Baja” | “Medio baja” | “Medio” | “Medio Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | “Muy baja” | “Baja” | “Medio baja” | “Medio” | “Medio Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |

2. Con respecto al criterio: **Impacto ambiental**, evalúe las diferentes alternativas de sistemas energéticos, marqué la casilla con la frase lingüística que evalué el impacto ambiental.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | IMPACTO AMBIENTAL PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|---|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| | | | | | | | |
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | “Muy bajo” | “Bajo” | “Medio bajo” | “Medio” | “Medio Alto” | “Alto” | “Muy Alto” |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | “Muy bajo” | “Bajo” | “Medio bajo” | “Medio” | “Medio Alto” | “Alto” | “Muy Alto” |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | “Muy bajo” | “Bajo” | “Medio bajo” | “Medio” | “Medio Alto” | “Alto” | “Muy Alto” |

3. Con respecto al criterio: **Aceptación social**, evalúe que aceptación tienes los diferentes sistemas energéticos, marque la casilla con la frase lingüística que describa la aceptación social para cada alternativa.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | ACEPTACIÓN SOCIAL PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|---|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| | | | | | | | |
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | “Muy baja” | “Baja” | “Media baja” | “Media” | “Media Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | “Muy baja” | “Baja” | “Media baja” | “Media” | “Media Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | “Muy baja” | “Baja” | “Media baja” | “Media” | “Media Alta” | “Alta” | “Muy Alta” |

Encuesta tipo “Extensa”

Esta encuesta nuevamente se divide en dos partes, la primera consiste en que el experto compare directamente los criterios por pares, uno con el resto, generando en este caso 21 preguntas en la parte 1, en la parte dos el experto debe evaluar todas las alternativas, con cada criterio.

Parte 1: Comparación entre pares de criterios, evaluando la importancia de uno respecto al otro.

Primero, para la elección del mejor sistema energético en la comunidad de Cerro Hermoso, se debe saber cuál es la importancia que tienen los criterios respecto a los demás criterios

a) COMPARAMOS EL PRIMER CRITERIO CON EL RESTO

Interpretándose cada comparación como sigue: ¿Qué importancia considera usted que tiene el criterio “costo de inversión inicial”, con respecto al criterio “vida útil”?... si su respuesta es que usted considera que ambos criterios tienen la misma importancia, entonces debe marcar la casilla de en medio donde especifica: “los dos criterios son igual de importantes”, pero si usted considera que el criterio costo de inversión inicial es “mas” importante que el criterio vida útil, debe dirigirse a las casillas en letras azules (derecha) y especificar qué tan “mas” importante es el costo de inversión inicial con respecto al criterio vida útil. Por el contrario si usted considera que el criterio costo de inversión inicial es “menos” importante que el criterio vida útil, entonces debe especificar qué tan “menos” importante es, centrándose en las casillas con letras rojas (izquierda). Esto es el procedimiento de valoración de criterios por pares para todas las casillas en este documento.

Criterio izquierdo: Costo de inversión Inicial

| | | | |
|--|---|-------------------------------------|---|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante” | “Este criterio es fuertemente menos importante” | “Este criterio es menos importante” | “Este criterio es moderadamente menos importante” |

Vs

Criterio derecho: Vida útil

| | | | |
|---|-----------------------------------|---|--|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante” | “Este criterio es más importante” | “Este criterio es fuertemente más importante” | “Este criterio es extremadamente más importante” |

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio izquierdo: Costo de inversión Inicial

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante Que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Costo de mantenimiento anual

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante Que el de la izquierda” |

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio izquierdo: Costo de inversión Inicial

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante Que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Costo generación kWh

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante Que el de la izquierda” |

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio izquierdo: Costo de inversión Inicial

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Viabilidad técnica

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Coste de inversión inicial

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Coste de inversión inicial

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Aceptación social

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

b) COMPARAMOS EL SEGUNDO CRITERIO CON EL RESTO

Criterio izquierdo: Vida útil

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| 1 |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Costo de mantenimiento anual

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Vida útil

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| 1 |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Costo generación kWh

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Vida útil

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| 1 |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Viabilidad técnica

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Vida útil

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Vida útil

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Aceptación social

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

c) COMPARAMOS EL TERCER CRITERIO CON EL RESTO

Criterio izquierdo: Costo de mantenimiento anual

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Viabilidad técnica

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Costo de mantenimiento anual

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Costo generación kWh

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Costo de mantenimiento anual

Vs

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

| |
|--|
| Los dos criterios son igual de importantes |
|--|

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Costo de mantenimiento anual

Vs

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

| |
|--|
| Los dos criterios son igual de importantes |
|--|

Criterio derecho: Aceptación social

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

d) COMPARAMOS EL CUARTO CRITERIO CON EL RESTO

Criterio izquierdo: Costo generación kWh

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante Que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Viabilidad técnica

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante Que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Costo generación kWh

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante Que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante Que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Costo generación kWh

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante Que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Criterio derecho: Aceptación social

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante Que el de la izquierda” |

COMPARAMOS EL QUINTO CRITERIO CON EL RESTO

Criterio izquierdo: Viabilidad técnica

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

Criterio izquierdo: Viabilidad técnica

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Aceptación Social.

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

e) COMPARAMOS EL QUINTO CRITERIO CON EL RESTO

Criterio derecho: Impacto ambiental

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | | |
| “Este criterio es extremadamente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es fuertemente menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es menos importante que el de la derecha” | “Este criterio es moderadamente menos importante que el de la derecha” |

Vs

Criterio derecho: Aceptación Social.

| | | | |
|--|--|--|---|
| | | | |
| “Este criterio es moderadamente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es fuertemente más importante que el de la izquierda” | “Este criterio es extremadamente más importante que el de la izquierda” |

| |
|--|
| |
| Los dos criterios son igual de importantes |

Parte 2: Evaluación de las alternativas (sistemas energéticos) con cada criterio.

A continuación, evalúe las alternativas con cada uno de los criterios antes descritos.

- Con respecto al criterio: **Costo de inversión inicial**, indique cuanto sería el costo de inversión inicial para cada sistema energético considerado:

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de inversión inicial (\$) |
|--|--|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | \$ |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | \$ |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | \$ |

- Con respecto al criterio: **Vida útil**, indique cuantos años aproximadamente sería la vida útil de cada sistema energético.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Vida útil (años) |
|--|-----------------------------------|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | |

6. Con respecto al criterio: **Costo de mantenimiento anual**, indique cuanto seria el costo anual de mantenimiento para cada sistema.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de mantenimiento anual (\$) |
|--|--|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | \$ |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | \$ |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | \$ |

7. Con respecto al criterio: **Costo de generación por kWh**, indique el costo de generación por kWh para cada sistema considerado.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | Criterio: Costo de generación por kWh (\$) |
|--|---|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | \$ |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | \$ |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | \$ |

8. Con respecto al criterio: **Viabilidad técnica**, valore los diferentes sistemas energéticos marcando la casilla con la etiqueta lingüística que evalué su viabilidad técnica.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | VIABILIDAD TÉCNICA PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|--|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| | | | | | | | |
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |

9. Con respecto al criterio: **Impacto ambiental**, evalué las diferentes alternativas de sistemas energéticos, marque la casilla con la frase lingüística que evalué el impacto ambiental.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | IMPACTO AMBIENTAL PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|---|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| | | | | | | | |
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | <i>“Muy bajo”</i> | <i>“Bajo”</i> | <i>“Medio bajo”</i> | <i>“Medio”</i> | <i>“Medio Alto”</i> | <i>“Alto”</i> | <i>“Muy Alto”</i> |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | <i>“Muy bajo”</i> | <i>“Bajo”</i> | <i>“Medio bajo”</i> | <i>“Medio”</i> | <i>“Medio Alto”</i> | <i>“Alto”</i> | <i>“Muy Alto”</i> |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | <i>“Muy bajo”</i> | <i>“Bajo”</i> | <i>“Medio bajo”</i> | <i>“Medio”</i> | <i>“Medio Alto”</i> | <i>“Alto”</i> | <i>“Muy Alto”</i> |

10. Con respecto al criterio: **Aceptación social**, evalúe que aceptación tienes los diferentes sistemas energéticos, marque la casilla con la frase lingüística que describa la aceptación social para cada alternativa.

| SISTEMAS ENERGÉTICOS (alternativas) | ACEPTACIÓN SOCIAL PARA LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS | | | | | | |
|--|--|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|-------------------|
| A1: Sistema Eléctrico de la Red (CFE) [suministro 300 familias] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |
| A2: Sistema Generador de Diésel (SGD) [1kWp] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |
| A3: Sistema Fotovoltaico Autónomo (SAPV) [1kWp] | <i>“Muy baja”</i> | <i>“Baja”</i> | <i>“Media baja”</i> | <i>“Media”</i> | <i>“Media Alta”</i> | <i>“Alta”</i> | <i>“Muy Alta”</i> |

8. Resultados obtenidos, evaluación de los tres expertos

Luego de aplicar las dos encuestas para cada experto seleccionado, utilizamos los métodos AHP y TOPSIS evaluando con números difusos (tabla 26)

MÉTODO AHP (Calculo de la parte 1 de la encuesta): Se utiliza el método AHP para calcular la parte uno de la encuesta, de acuerdo a lo que respondió el experto se transformaron sus respuestas de acuerdo a la escala de preferencia de Saaty (tabla 19), mediante la cual se obtuvieron los siguientes cálculos:

- Matriz de valoración binaria de criterios.
- Media geométrica
- Peso de los criterios
- Vector propio
- Lambda máxima
- Índice de consistencia
- Ratio de consistencia.

| Verbal judgements of preferences between alternative i and alternative j | Fuzzy numbers |
|--|---------------|
| A_i and A_j is equally important to | [1, 1, 1] |
| A_i is slightly more/less important than A_j | [2, 3, 4] |
| A_i is strongly more/less important than A_j | [4, 5, 6] |
| A_i is very strongly more/less important than A_j | [6, 7, 8] |
| A_i is extremely more/less important than A_j | [8, 9, 9] |

Tabla 26: Escala de preferencia de Saaty, con números difusos triangulares.

MÉTODO TOPSIS (Calculo de la parte 2 de la encuesta): Se utiliza el método TOPSIS para calcular la segunda parte de la encuesta, recordando que se está modelando el problema con criterios cualitativos y cuantitativos, los criterios cuantitativos son expresados en las unidades definidas desde la concepción del problema, para la valoración de las alternativas con respecto a los criterios cualitativos se utilizó la tabla 27 que son etiquetas lingüísticas valoradas con números difusos, mediante este método se obtuvieron los siguientes cálculos:

- Matriz de valoración de alternativas
- Normalización de la matriz de decisión
- Ponderación de la matriz de decisión
- Solución ideal positiva y negativa
- Medidas de distancia
- Proximidad relativa
- Orden de preferencia de las alternativas (Ranking)

| Linguistic label type | |
|------------------------------|--------------|
| Description | Fuzzy number |
| Muy bajo (Mub) | [0, 0, 1] |
| Bajo (B) | [0, 1, 3] |
| Medio Bajo (mb) | [1, 3, 5] |
| Medio (m) | [3, 5, 7] |
| Medio alto (mA) | [5, 7, 9] |
| Alto (A) | [7, 9, 10] |
| Muy Alto (MA) | [9, 10, 10] |

Tabla 27: Etiquetas lingüísticas con números difusos triangulares.

Una vez aplicadas las encuestas, se calculan ambas versiones para cada experto y por último la manera agregada en ambos formatos.

9. Cálculo de las encuestas, para cada experto.

En este apartado es importante mencionar que se realizó tanto la encuesta corta como la extensa para los tres expertos, obteniendo cinco encuestas realizadas, debido a que en la encuesta extensa el primer experto fue muy consistente no fue necesario aplicar la encuesta corta, sin embargo, los últimos dos expertos tuvieron una ligera inconsistencia por lo que fue necesario aplicar la encuesta corta. La siguiente tabla muestra el resumen de las consistencias en las evaluaciones.

| EXPERTO | INCONSISTENCIA | |
|---------|------------------|----------------|
| | Encuesta extensa | Encuesta Corta |
| 1 | 9% | No se realizo |
| 2 | 13% | 1% |
| 3 | 11% | 1% |

Tabla 28: Consistencia de los expertos en la encuesta corta y extensa.

De la tabla anterior se observa que se realizaron 5 encuestas donde tres de ellas los expertos fueron consistentes, es importante mencionar que se realiza el cálculo para las cinco encuestas de manera normal y difusa, sin embargo en este apartado solo se muestran los resultados de las evaluaciones de las encuestas donde los expertos fueron consistentes, por tanto presentamos la evaluación del experto 1 en la encuesta extensa con un 9% de inconsistencia, para el experto 2 la evaluación de la encuesta corta con un 1% de inconsistencia y para el experto 3 también la evaluación de la encuesta corta, con un 1% de inconsistencia. Por último debido a los rankings de las alternativas, se presenta la evaluación de la forma agregada en las valoraciones antes mencionadas.

EXPERTO 1:

Se presenta el resultado del experto 1 evaluado en la encuesta extensa, obteniendo un ratio de consistencia del 9%, el ranking en las alternativas para este experto son los que se muestran en la tabla 22. Para este experto la mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso debe ser a través del sistema de la CFE, es importante mencionar que este experto es el ingeniero encargado de instalaciones de la red de la CFE, por ello se supone que su inclinación hacia esta alternativa.

| | |
|-----------------------|------------|
| Sistema CFE | 0.89736488 |
| Sistema Diésel | 0.25693425 |
| SAPV | 0.53092476 |

Tabla 29: Ranking de alternativas, experto 1

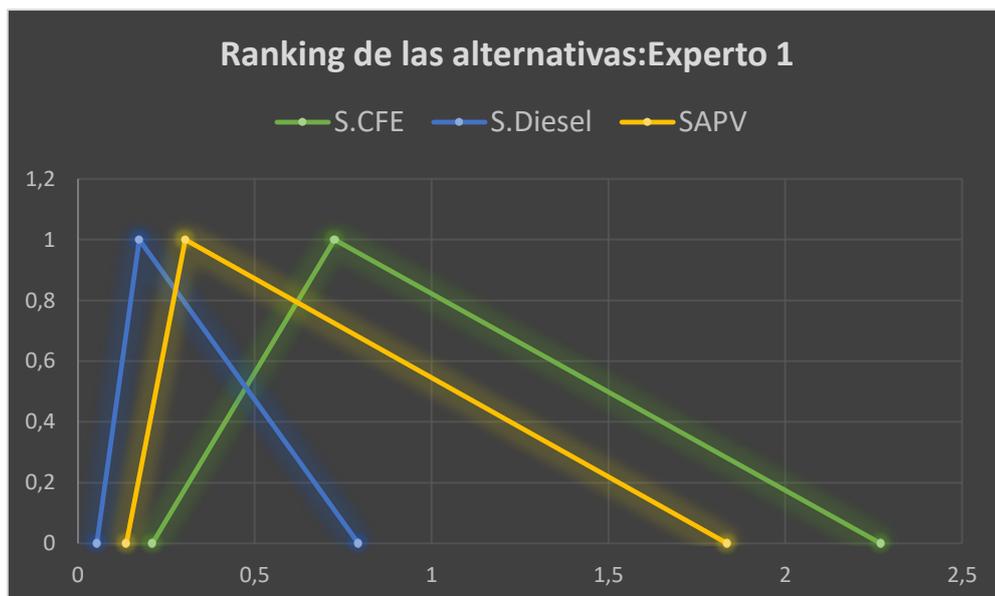


Gráfico 21: Ranking de las alternativas, Experto 1

EXPERTO 2:

Se presentan los resultados del experto 2 con la evaluación de la encuesta corta presentando una inconsistencia del 1%, se analizan las respuestas y se obtiene que para este experto la mejor alternativa de electrificación en Cerro Hermoso es un SAPV, esto se ve numéricamente en la tabla 30 y gráficamente en el gráfico 22.

| | |
|-----------------------|------------|
| Sistema CFE | 0.66420016 |
| Sistema Diesel | 0.66404419 |
| SAPV | 0.79684176 |

Tabla 30: Ranking de alternativas, Experto 2.



Gráfico 22: Ranking en las alternativas, Experto 2.

EXPERTO 3:

Los resultados del experto 3 con la evaluación de la encuesta corta, con un perfil de investigador en energías renovables y además ingeniero de la CFE, presento una inconsistencia del 1%, para este experto la mejor alternativa de electrificación para Cerro Hermoso es un SAPV como lo muestra la tabla 31 y el gráfico 23.

| | |
|-----------------------|------------|
| Sistema CFE | 0.49109792 |
| Sistema Diesel | 0.83386829 |
| SAPV | 1.04834059 |

Tabla 31: Ranking de alternativas, experto 3.

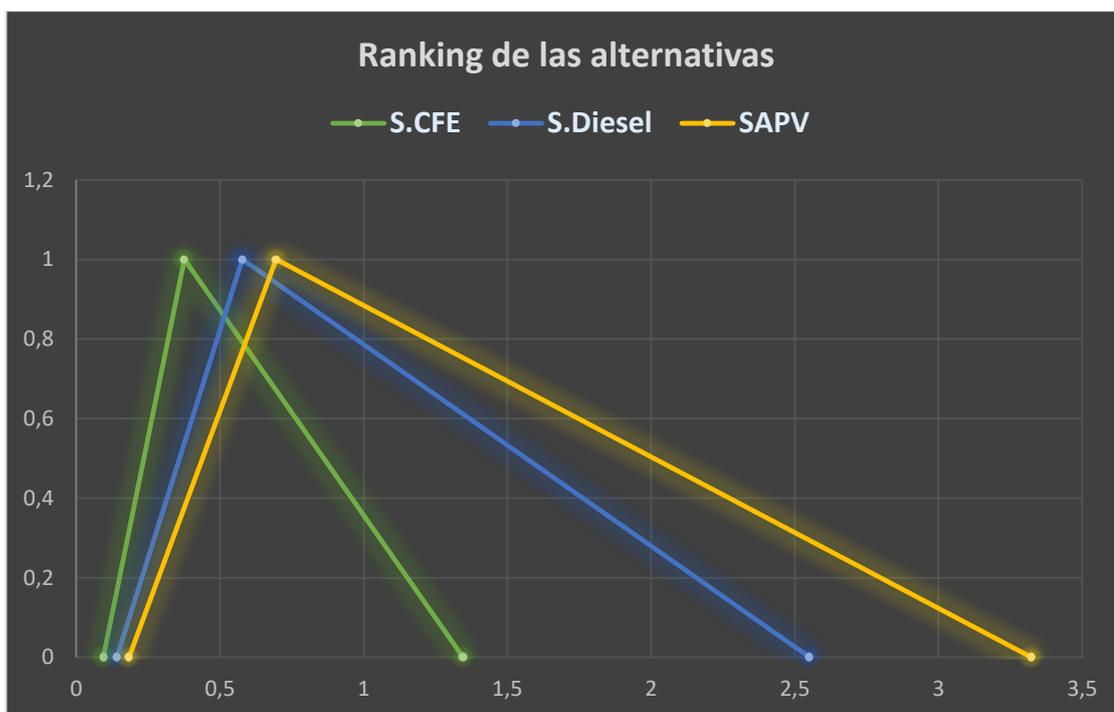


Grafico 23: Ranking alternativas, Experto 3.

10. Conclusiones de la evaluación de cada experto.

Como se observa en los resultados que se obtuvieron al aplicar la encuesta extensa, en el primer experto es consistente y la alternativa con mayor preferencia es el Sistema de electrificación de la CFE con una valoración de 0.66 en la valoración numérica normal y un 0.89 en la evaluación con números difusos. El segundo experto resulto con una inconsistencia ligera de acuerdo a lo que recomienda la escala de Saaty, que el menor o igual al 10 %, teniendo este un 13% de inconsistencia, la alternativa con mayor preferencia para este resultado ser el sistema de electrificación mediante un sistema autónomo fotovoltaico (SAPV) con 0.65 puntuación en la valoración numérica normal y con 0.79 en la valoración con números difusos. El tercer experto nuevamente presenta una inconsistencia muy ligera de un 11 %, nuevamente la alternativa con mayor preferencia resulto el SAPV con 0.75 de puntuación en la evaluación numérica normal y 1.0 en la valoración con números difusos. La siguiente tabla muestra el resumen de las

evaluaciones de los expertos, es importante mencionar que, para los tres expertos, primero se valoró con números normales y debido a la variación de los valores en las respuestas, se procedió a realizar la evaluación con números difusos triangulares,

| Experto | Especialidad-perfil | Alternativa preferida | Ranking numérico | Ranking difuso | Inconsistencia | Criterio primer lugar peso |
|---------|---------------------|-----------------------|------------------|----------------|----------------|--|
| 1 | CFE | Sist.CFE | 0.66 | 0.89 | 9% | Costo Inversión Inicial / Vida útil |
| 2 | EERR | SAPV | 0.65 | 0.79 | 13% y 1% | Costo Inversión Inicial / Viabilidad Técnica |
| 3 | CFE-EERR | SAPV | 0.75 | 1.0 | 11% y 1% | Viabilidad Técnica |

Tabla 32: Resumen de las encuestas a los tres expertos, ranking, inconsistencia, criterio con mayor peso, alternativa preferida.

11. Cálculo de la manera agregada.

Esta sección presenta el desarrollo del cálculo de la manera agregada de este estudio, en la parte anterior se presenta la evaluación de cada experto de manera individual, pero dado que hay una diferencia en la preferencia de alternativa entre el primer experto y los dos últimos, este apartado detalla el cálculo de la manera agregada de las tres evaluaciones presentadas anteriormente.

Parte 1 Manera agregada: Orden de los criterios, Matriz de comparación binaria de criterios por pares, media geométrica, pesos criterios, lambda máxima, índice de consistencia.

En esta primera parte todos los cálculos se realizan utilizando el método AHP, partimos citando las matrices de comparación de cada experto.

Matriz de comparación binaria experto 1

| EXPERTO1: Matriz de comparación binaria de criterios (Metodo AHP) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | | | |
| | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | | 6 | | | 7 | | |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 |
| C | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 6 | 7 | 8 |
| C | 3 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 |
| C | 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 |
| C | 5 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 1/3 | 3/5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 | 1 2/5 | 2 |
| C | 6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3/4 | 1 | 1 1/3 |
| C | 7 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/2 | 5/7 | 1 | 3/4 | 1 | 1 1/3 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 33: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 1.

Matriz de comparación binaria experto 2

| EXPERTO 2: Matriz de comparación binaria de criterios (Metodo AHP) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|
| | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | | | |
| | 1 | | | 5 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 6 | | | 7 | | |
| C 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| C 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| C 2 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 | 2 | 3 | 4 1/2 |
| C 3 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 1/3 | 1 4/5 | 2 1/4 |
| C 4 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 1/3 | 1 4/5 | 2 1/4 |
| C 6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/7 | 1 1/2 |
| C 7 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 2/9 | 1/3 | 1/2 | 4/9 | 5/9 | 3/4 | 4/9 | 5/9 | 3/4 | 2/3 | 7/9 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 34: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 2

Matriz de comparación binaria experto 3

| EXPERTO 3: Matriz de comparación binaria de criterios (Metodo AHP) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|
| | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | | | |
| | 5 | | | 1 | | | 4 | | | 2 | | | 3 | | | 6 | | | 7 | | |
| C 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| C 1 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 | 1 2/3 | 3 | 1 1/2 | 2 1/3 | 4 | 2 | 3 | 4 1/2 |
| C 4 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 1/3 | 1 4/5 | 2 1/4 |
| C 2 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 1/3 | 1 4/5 | 2 1/4 |
| C 3 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 3/5 | 1 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 2/3 | 1 | 1 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/5 | 2 | 1 1/3 | 1 4/5 | 2 1/4 |
| C 6 | 1/8 | 1/7 | 1/6 | 1/4 | 3/7 | 2/3 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1/2 | 5/7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 2/7 | 1 1/2 |
| C 7 | 1/9 | 1/9 | 1/8 | 2/9 | 1/3 | 1/2 | 4/9 | 5/9 | 3/4 | 4/9 | 5/9 | 3/4 | 4/9 | 5/9 | 3/4 | 2/3 | 7/9 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 35: Matriz de comparación binaria de criterios, experto 3.

Matriz de comparación binaria agregada

A partir de las tres matrices anteriores se calcula la matriz de comparación binaria agregada, esto es calculando la media geométrica, la cual da lugar a la matriz agregada.

| Matriz de comparación binaria de criterios (Metodo AHP)-MANERA AGREGADA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | C | | | | | |
| | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | | 6 | | | 7 | | |
| C 1 | 1 | 1 | 1 | 1 1/4 | 1 5/7 | 2 2/7 | 2 | 3 | 4 1/6 | 2 | 3 | 4 1/6 | 1 | 1 1/5 | 1 4/9 | 3 7/9 | 4 6/7 | 6 1/3 | 4 4/7 | 5 3/4 | 6 7/8 |
| C 2 | 3/7 | 3/5 | 4/5 | 1 | 1 | 1 | 7/8 | 1 5/7 | 3 1/3 | 7/8 | 1 5/7 | 3 1/3 | 3/7 | 2/3 | 1 1/7 | 1 2/3 | 2 5/6 | 5 | 2 | 3 1/3 | 5 4/9 |
| C 3 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 3/5 | 1 1/7 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 2 | 1/4 | 2/5 | 5/7 | 1 | 1 2/3 | 3 1/6 | 1 1/9 | 2 | 3 3/7 |
| C 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 3/5 | 1 1/7 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1/4 | 2/5 | 5/7 | 1 | 1 2/3 | 3 1/6 | 1 1/9 | 2 | 3 3/7 |
| C 5 | 2/3 | 5/6 | 1 | 7/8 | 1 4/9 | 2 2/7 | 1 2/5 | 2 1/2 | 4 1/6 | 1 2/5 | 2 1/2 | 4 1/6 | 1 | 1 | 1 | 2 5/8 | 4 | 6 1/3 | 3 1/6 | 4 5/6 | 6 7/8 |
| C 6 | 1/6 | 1/5 | 1/4 | 1/5 | 1/3 | 3/5 | 1/3 | 3/5 | 1 1/9 | 1/3 | 3/5 | 1 1/9 | 1/6 | 1/4 | 3/8 | 1 | 1 | 1 | 5/7 | 1 1/5 | 1 4/5 |
| C 7 | 1/7 | 1/6 | 2/9 | 1/5 | 2/7 | 1/2 | 2/7 | 1/2 | 1 | 2/7 | 1/2 | 1 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 5/9 | 5/6 | 1 2/5 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 36: Matriz AGREGADA de comparación binaria de criterios.

| Media Geométrica | | |
|------------------|----------------|-----------------|
| 1.89336 | 2.42 | 3.06 |
| 0.90066 | 1.41 | 2.23 |
| 0.50531 | 0.83 | 1.38 |
| 0.50531 | 0.83 | 1.38 |
| 1.38329 | 2.04 | 2.90 |
| 0.32112 | 0.50 | 0.75 |
| 0.29211 | 0.42 | 0.63 |
| 5.80115 | 8.44374 | 12.31852 |

Tabla 37: Media geométrica agregada

| PESOS DE LOS CRITERIOS | | | |
|------------------------|-----------|-------------|-------------|
| C 1 | 0.1536999 | 0.286326624 | 0.526880302 |
| C 2 | 0.0731142 | 0.167444826 | 0.383984602 |
| C 3 | 0.0410207 | 0.097922328 | 0.237269463 |
| C 4 | 0.0410207 | 0.097922328 | 0.237269463 |
| C 5 | 0.1122932 | 0.241497228 | 0.500025212 |
| C 6 | 0.0260681 | 0.058993493 | 0.129438724 |
| C 7 | 0.0237127 | 0.049893174 | 0.10859229 |

Tabla 38: Peso de los criterios, de la manera agregada.

Parte 2: Matriz de valoración de alternativas con los criterios, ranking de las alternativas

Para el cálculo de esta segunda parte se hace mediante el método TOPSIS, nuevamente se parte de la valoración de los tres expertos en la matriz de valoración de alternativas, tomado solo como variante los últimos tres criterios que son los cualitativos: Viabilidad técnica, Impacto ambiental y Aceptación social.

Criterios cualitativos experto 1:

| C5: <i>Viab. Técnica</i> | | | C6: <i>Impact. Ambiental</i> | | | C7: <i>Acep. Social</i> | | |
|-----------------------------|----|----|---------------------------------|----|----|----------------------------|---|----|
| 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 7 | 9 | 10 |
| 1 | 3 | 5 | 9 | 10 | 10 | 3 | 5 | 7 |
| 9 | 10 | 10 | 0 | 0 | 1 | 5 | 7 | 9 |

Tabla 39: Criterios cualitativos, experto 1

Criterios cualitativos experto 2:

| C5: <i>Viab. Técnica</i> | | | C6: <i>Impact. Ambiental</i> | | | C7: <i>Acep. Social</i> | | |
|-----------------------------|---|---|---------------------------------|---|----|----------------------------|---|----|
| 1 | 3 | 5 | 3 | 5 | 7 | 7 | 9 | 10 |
| 3 | 5 | 7 | 7 | 9 | 10 | 3 | 5 | 7 |
| 3 | 5 | 7 | 0 | 1 | 3 | 3 | 5 | 7 |

Tabla 40: Criterios cualitativos, experto 2

Criterios cualitativos experto 3:

| C5: | | | C6: | | | C7: | | |
|---------------|---|---|-------------------|----|----|--------------|---|----|
| Viab. Tecnica | | | Impact. Ambiental | | | Acep. Social | | |
| 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 7 | 9 | 10 |
| 5 | 7 | 9 | 9 | 10 | 10 | 3 | 5 | 7 |
| 5 | 7 | 9 | 0 | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 |

Tabla 41: Criterios cualitativos, experto 3

De las valoraciones anteriores obtenemos una sola matriz agregada de valoración de alternativas, generando la siguiente tabla que es la matriz de valoración de las alternativas agregada.

Matriz de valoración de las alternativas agregada-fuzzy

| Matriz de valoración de alternativas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|--------|---------|-----------|----|----|------------------|------|--------|----------------|------|-------|---------------|---|---|-------------------|----|----|--------------|------|-------|
| CRITERIOS | C1: | | | C2: | | | C3: | | | C4: | | | C5: | | | C6: | | | C7: | | |
| | Coste Inver. Inic | | | Vida útil | | | Cost.Manto Anual | | | Cost. Gen. kWh | | | Viab. Tecnica | | | Impact. Ambiental | | | Acep. Social | | |
| ALTERNATIVAS | (€) | | | (años) | | | (€) | | | (€) | | | | | | | | | | | |
| 1.- Sistema eléctrico de la CFE | 3450 | 3833.3 | 4216.66 | 45 | 50 | 55 | 1380 | 1533 | 1686.7 | 0.045 | 0.05 | 0.045 | 0 | 2 | 4 | 5 | 7 | 9 | 7 | 9 | 10 |
| 2.-Sistema Generador de diesel | 2610 | 2900 | 3190.00 | 5 | 10 | 15 | 783 | 870 | 957 | 3.15 | 3.5 | 3.15 | 2 | 5 | 7 | 9 | 10 | 10 | 3 | 5 | 7 |
| 3.-Sistema Autónomo FV | 3330 | 3700 | 4070.00 | 20 | 25 | 30 | 166.5 | 185 | 203.5 | 1.089 | 1.21 | 1.089 | 5 | 7 | 9 | 0 | 0 | 1 | 3.593 | 5.59 | 7.593 |

Tabla 42: Matriz agregada de valoración de las alternativas.

A partir de la tabla anterior se aplica paso a paso el algoritmo de la metodología TOPSIS y se calcula completamente la manera agregada.

Matriz con peso de los criterios agregada-fuzzy

| 2.-Matriz con el peso de los criterios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--------|---------|-----------|------|------|------------------|-------|--------|----------------|------|-------|---------------|--------|-------|-------------------|------|---------|--------------|------|----------|
| CRITERIOS | C1: | | | C2: | | | C3: | | | C4: | | | C5: | | | C6: | | | C7: | | |
| PESOS | 0.15 | 0.29 | 0.53 | 0.07 | 0.17 | 0.38 | 0.041 | 0.098 | 0.2373 | 0.04 | 0.10 | 0.24 | 0.11 | 0.24 | 0.50 | 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.02 | 0.05 | 0.11 |
| | Coste Inver. Inic | | | Vida útil | | | Cost.Manto Anual | | | Cost. Gen. kWh | | | Viab. Tecnica | | | Impact. Ambiental | | | Acep. Social | | |
| ALTERNATIVAS | (€) | | | (años) | | | (€) | | | (€) | | | | | | | | | | | |
| 1.- Sistema eléctrico de la CFE | 3450 | 3833.3 | 4216.66 | 45 | 50 | 55 | 1380 | 1533 | 1686.7 | 0.045 | 0.05 | 0.045 | 0 | 2.0801 | 4.217 | 4.7177 | 6.8 | 8.57262 | 7 | 9 | 10 |
| 2.-Sistema Generador de diesel | 2610 | 2900 | 3190.00 | 5 | 10 | 15 | 783 | 870 | 957 | 3.15 | 3.5 | 3.15 | 2.466 | 4.7177 | 6.718 | 8.2768 | 9.65 | 10 | 3 | 5 | 7 |
| 3.-Sistema Autónomo FV | 3330 | 3700 | 4070.00 | 20 | 25 | 30 | 166.5 | 185 | 203.5 | 1.089 | 1.21 | 1.089 | 5.13 | 7.0473 | 9.047 | 0 | 0 | 1.44225 | 3.557 | 5.59 | 7.611663 |

Tabla 43: Matriz agregada con el peso de los criterios

Matriz normalizada agregada-fuzzy

| 3.- Normalización de la matriz de decisión. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|--------|------|-----------|--------|-------|------------------|-------|--------|----------------|--------|------|---------------|--------|------|-------------------|------|------|--------------|------|------|
| CRITERIOS | C1: | | | C2: | | | C3: | | | C4: | | | C5: | | | C6: | | | C7: | | |
| | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | |
| TIPO CRITERIO | Coste Inver. Inic | | | Vida útil | | | Cost.Manto Anual | | | Cost. Gen. kWh | | | Viab. Tecnica | | | Impact. Ambiental | | | Acep. Social | | |
| ALTERNATIVAS | (€) | | | (años) | | | (€) | | | (€) | | | | | | | | | | | |
| 1.- Sistema eléctrico de la CFE | 0.15 | 0.2863 | 0.53 | 0.07 | 0.1674 | 0.384 | 0.041 | 0.098 | 0.2373 | 0.04 | 0.10 | 0.24 | 0.11 | 0.24 | 0.50 | 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.02 | 0.05 | 0.11 |
| 2.-Sistema Generador de diesel | 0.391 | 0.4781 | 0.74 | 0.078 | 0.0016 | 0.30 | 0.402 | 0.491 | 0.60 | 0.945 | 0.945 | 0.95 | 0.205 | 0.5403 | 1.18 | 0.6246 | 0.82 | 1.05 | 0.209 | 0.43 | 0.83 |
| 3.-Sistema Autónomo FV | 0.499 | 0.61 | 0.94 | 0.31 | 0.0041 | 0.61 | 0.085 | 0.104 | 0.13 | 0.327 | 0.3267 | 0.33 | 0.426 | 0.8071 | 1.59 | 0 | 0 | 0.15 | 0.247 | 0.48 | 0.91 |

Tabla 44: Normalización de la matriz agregada.

Ponderación de la matriz normalizada agregada-fuzzy

| 4.- Ponderación de la matriz normalizada | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------|------|-----------|------|------|------------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|-------------------|---|------|--------------|---|------|
| CRITERIOS | C1: | | | C2: | | | C3: | | | C4: | | | C5: | | | C6: | | | C7: | | |
| | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | | MINIMIZAR | | | MAXIMIZAR | | |
| TIPO CRITERIO | Coste Inver. Inic | | | Vida útil | | | Cost.Manto Anual | | | Cost. Gen. kWh | | | Viab. Tecnica | | | Impact. Ambiental | | | Acep. Social | | |
| ALTERNATIVAS | (€) | | | (años) | | | (€) | | | (€) | | | | | | | | | | | |
| 1.- Sistema eléctrico de la CFE | 0.08 | 0.181 | 0.41 | 0.1 | 0.15 | 0.43 | 0.03 | 0.08 | 0.25 | 0 | 0 | 0.00 | 0 | 0.06 | 0.37 | 0.01 | 0 | 0.12 | 0.01 | 0 | 0.13 |
| 2.-Sistema Generador de diesel | 0.06 | 0.137 | 0.39 | 0 | 0 | 0.12 | 0.02 | 0.05 | 0.14 | 0.04 | 0.09 | 0.22 | 0.02 | 0.13 | 0.59 | 0.02 | 0 | 0.14 | 0 | 0 | 0.09 |
| 3.-Sistema Autónomo FV | 0.08 | 0.175 | 0.50 | 0 | 0 | 0.23 | 0 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.05 | 0.19 | 0.79 | 0 | 0 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0.10 |

Tabla 45: Ponderación de la matriz normalizada agregada

Solución positiva y negativa

| 5.- Determinación de la solución positiva (A+) y Solución negativa (A-) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|---|------|
| Solución A+ | 0.06 | 0.137 | 0.39 | 0.1 | 0.15 | 0.43 | 0 | 0.01 | 0.03 | 0 | 0 | 0.00 | 0.05 | 0.19 | 0.79 | 0 | 0 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0.13 |
| Solución A- | 0.08 | 0.181 | 0.50 | 0 | 0 | 0.12 | 0.03 | 0.08 | 0.25 | 0.04 | 0.09 | 0.22 | 0 | 0.06 | 0.37 | 0.02 | 0 | 0.14 | 0 | 0 | 0.09 |

Tabla 46: Solución ideal positiva (A+) y negativa (A-), manera agregada.

Ranking de las alternativas

| | | | |
|-----|-------|---------|---------|
| RA1 | 0.068 | 0.51273 | 3.32231 |
| RA2 | 0.045 | 0.32194 | 2.6602 |
| RA3 | 0.085 | 0.52919 | 5.25756 |

Tabla 47: Ranking de las alternativas manera agregada.

El ranking de las alternativas se presenta en forma difusa como se muestra en la tabla anterior, sin embargo, para una mejor comprensión, se hace la defusificación y se obtiene el ranking de las alternativas como se ve en la siguiente tabla.

| | |
|-----------------------|----------|
| Sistema CFE | 0.9069 |
| Sistema Diésel | 0.665424 |
| SAPV | 1.243135 |

Tabla 48: Ranking de las alternativas, manera agregada

Conclusión de la evaluación de la manera agregada-Fuzzy

En este estudio se evalúa la manera agregada con números difusos, con tres expertos, utilizando tres de las cinco encuestas resueltas, se utilizaron solo las encuestas donde los expertos resultaron consistentes: Experto 1 encuesta extensa con 9% de inconsistencia, Experto 2 encuesta corta con 1% de inconsistencia y Experto 3 encuesta corta con 1% de inconsistencia, así se calculó la manera agregada y se obtiene que la mejor alternativa para electrificación en Cerro Hermoso es mediante un SAPV como lo muestra el grafico 23.

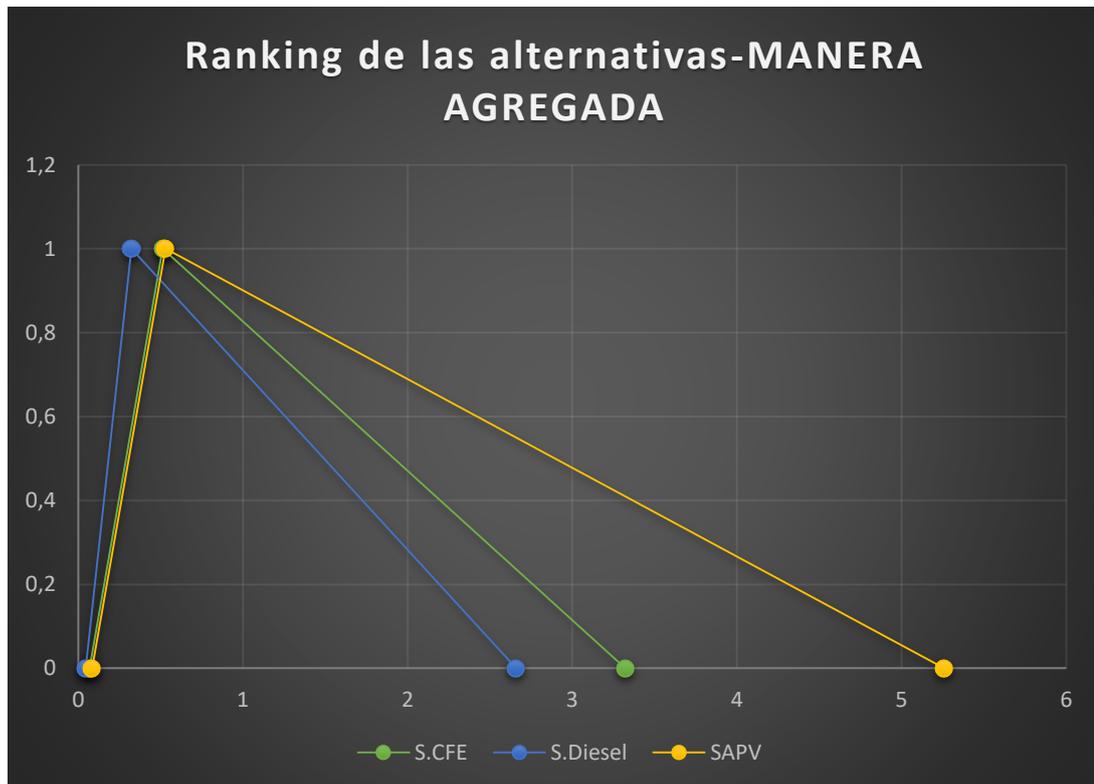


Grafico 24: Ranking de las alternativas, MANERA AGREGADA

Justificando a través de esta metodología que la mejor alternativa de electrificación es un SAPV, para Cerro Hermoso, en la siguiente sección se desarrolla el dimensionado de la instalación.

DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN PARA EL CASO DE ESTUDIO

El emplazamiento donde se encontrará la instalación fotovoltaica que sirve como objeto para este caso de estudio, se refiere a una comunidad rural llamada Cerro Hermoso, ubicada al sur de México en el estado de Oaxaca, y cuyas coordenadas geográficas son: Latitud: 15.972507 y Longitud: -97.527261.

Aprovechando el techo firme de las viviendas que se construyen para cada familia, se propone realizar la instalación sobre el techo de estas viviendas, donde se plantea utilizar solo una parte del techo (aprox. 24 m²), en este caso la que está orientada al sur.

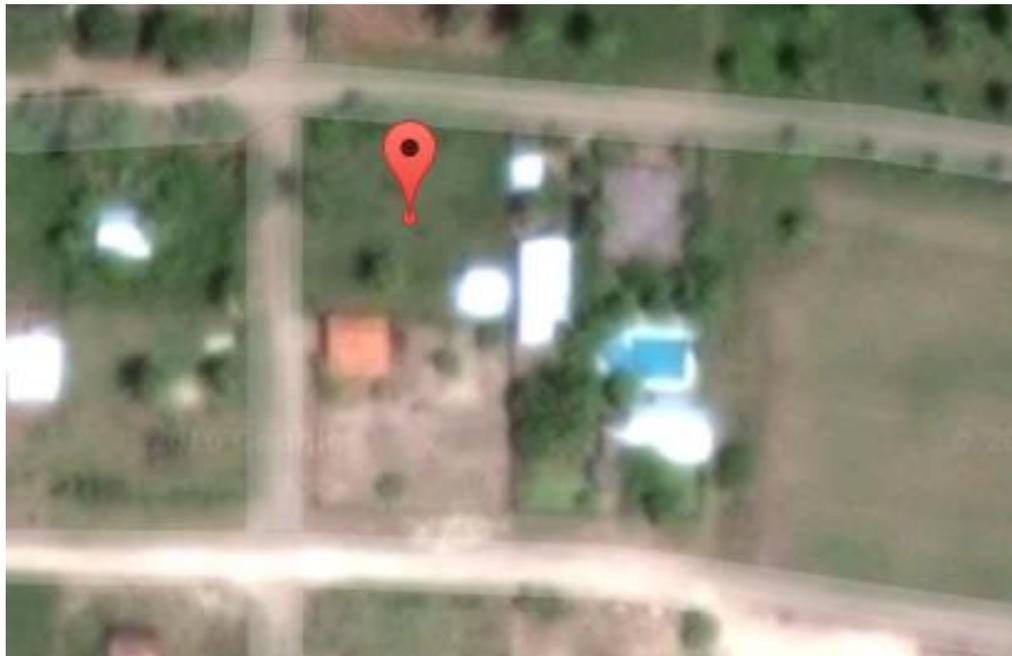


Figura 5: ubicación geográfica para la instalación

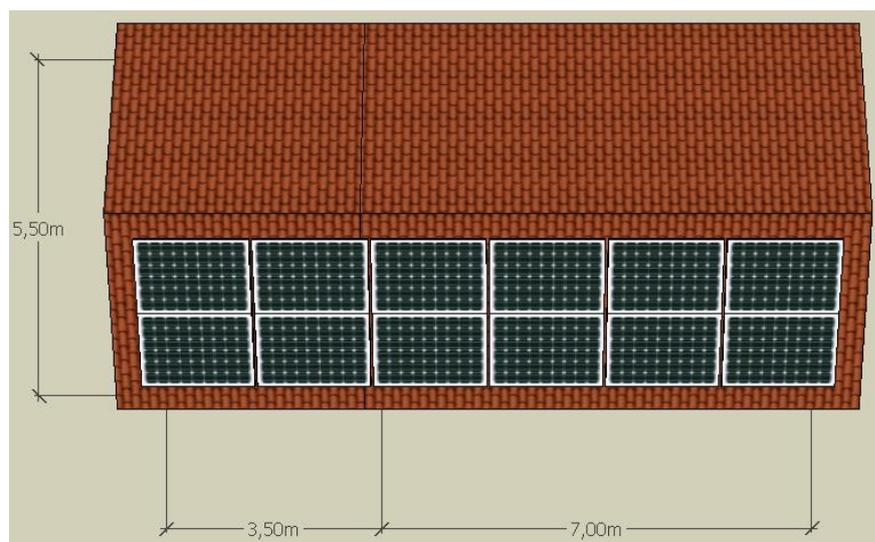


Figura 6: Parte superior del techo para instalar el SAPV.

DATOS DE IRRADIANCIA EN CERRO HERMOSO, OAXACA, MÉXICO.

Con los datos disponibles de la NASA, podemos saber los valores de radiación para Cerro Hermoso en la latitud: 15.972507 y longitud: -97.527261. La información de las tablas es el resultado promedio de los datos de radiación de 22 años, desde julio del 83 hasta julio 05.

La información de la tabla 1 muestra los datos de radiación directa para la ubicación de la instalación, los mismos están dados en kWh/m²/día.

| | | | | | |
|-------|---------|------------|---------|-----------|-----------|
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO |
| 8.3 | 8.68 | 8.83 | 8.39 | 7.12 | 5.24 |
| JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 5.79 | 5.52 | 4.71 | 6.63 | 7.77 | 8.05 |

Tabla 49: Irradiación directa

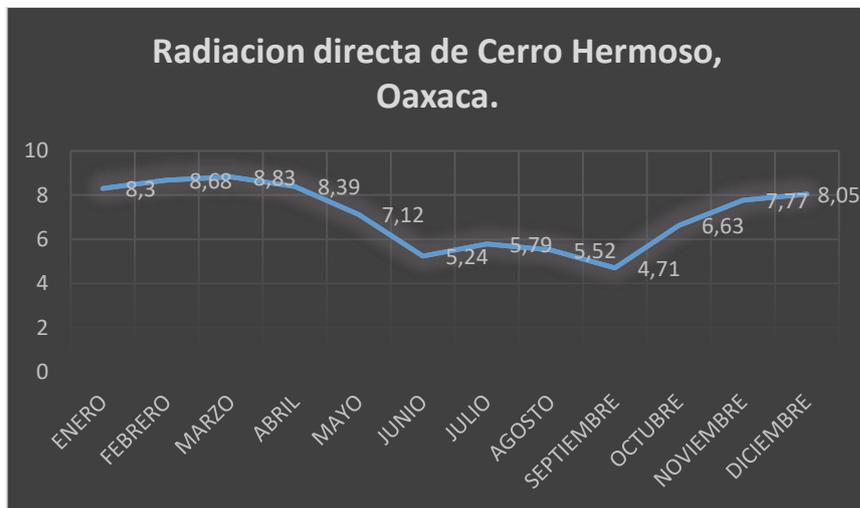


Grafico 25: Curva de radiación directa (kWh/m²/día) en Cerro Hermoso (FUENTE: BD DE LA NASA)

| | | | | | |
|-------|---------|------------|---------|-----------|-----------|
| ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO |
| 6.03 | 6.74 | 7.47 | 7.75 | 7.53 | 6.79 |
| JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 6.74 | 6.78 | 6.21 | 6.65 | 6.07 | 5.74 |

Tabla 50: Irradiación Indirecta Cerro Hermoso, Inclinación 15 °

El promedio anual de los valores anteriores desde el año 1983 hasta el 2005 es de 6.70 kWh/m²/día, como podemos ver si comparamos los promedios de la radiación directa en plano horizontal y la radiación en el plano inclinado cuando inclinamos los paneles tenemos un mejor aprovechamiento de la radiación que recibimos.

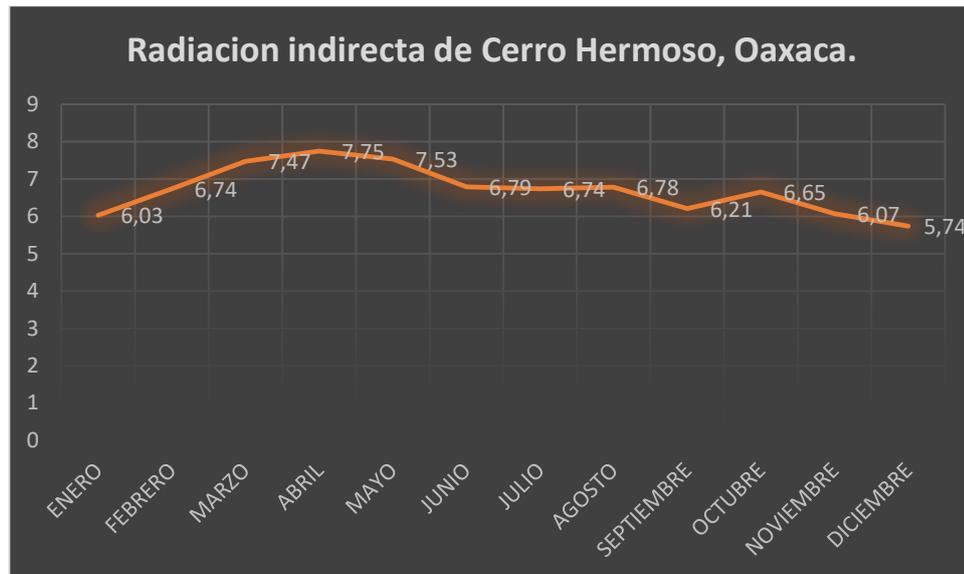


Grafico 26: Curva de radiación indirecta (kWh/m²/día) en Cerro Hermoso.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Estimación del consumo eléctrico de una vivienda convencional en Cerro Hermoso.

La instalación propuesta está diseñada para suministrar la energía necesaria que demanda una vivienda convencional en una zona rural, de acuerdo a los datos proporcionados en la comunidad de Cerro Hermoso, aproximadamente la energía necesaria promedio demandada por vivienda es la que se muestra en las tablas 3 y 4.

| FOCOS (corriente continua) | | | | | |
|-----------------------------------|----|----------|-------|---------------|------------|
| <i>Estancia</i> | No | No focos | Watts | Horas uso día | Wh/d |
| <i>Cuarto</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Baño</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Cocina</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Patio</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| <i>Sala</i> | 1 | 1 | 15 | 8 | 120 |
| Total | | | | | 600 |

| ELECTRODOMESTICOS (Corriente Alterna) | | | | |
|--|----|-------|---------------|------|
| <i>Dispositivo</i> | No | Watts | Horas uso día | Wh/d |
| <i>Televisor</i> | 1 | 75 | 4 | 300 |
| <i>Refrigerador</i> | 1 | 110 | 23 | 2530 |
| <i>Lavadora</i> | 1 | 200 | 0.83 | 166 |
| <i>ventilador pedestal</i> | 2 | 15 | 3 | 90 |

Total

3686

Energía demandada=3686 watts, con el 0.9 del rendimiento del inversor tenemos una la demanda energética es 4095 wh/d

Debido a que la instalación se encontrara en el techo de la vivienda como lo modelan las figuras 3, 4 y 5 y además tomando en cuenta que, los terrenos donde se encuentran las viviendas, están prácticamente a intemperie, es decir no existe ningún factor que pueda actuar como sombra sobre los paneles, no se toman en cuenta perdidas por sombra.

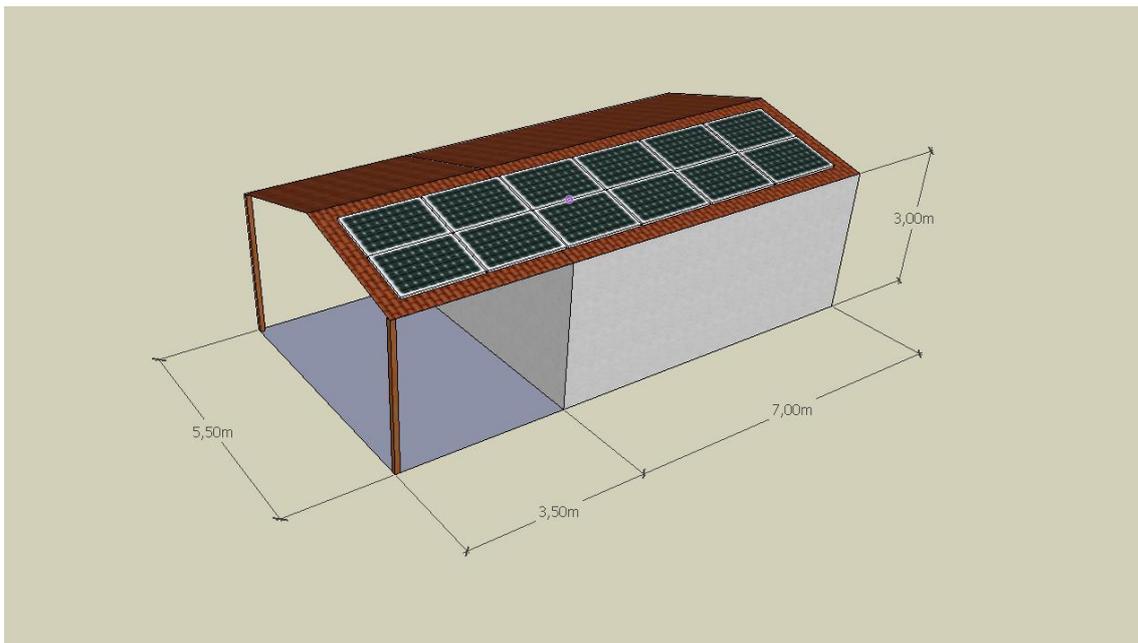


Figura 7: Vista de la instalación en el techo de la vivienda.

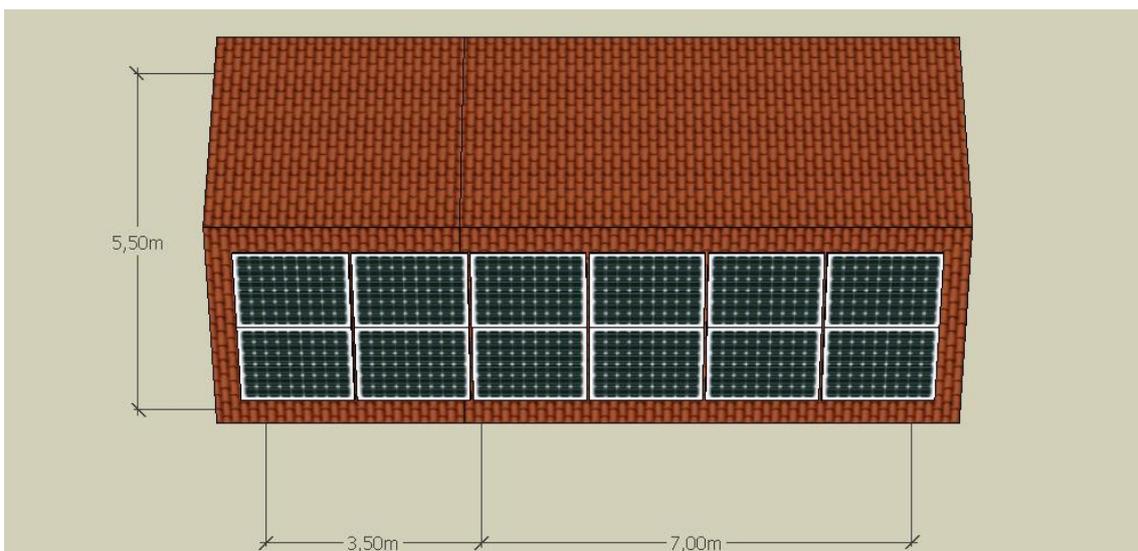


Figura 8: Vista superior de la vivienda.

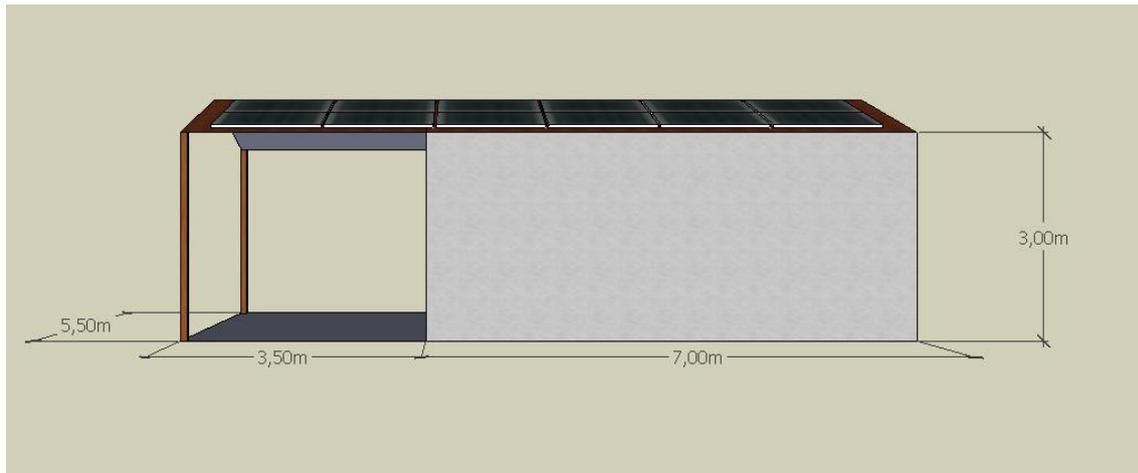


Figura 9: Vista lado sur de la vivienda.

DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN

De acuerdo a los estándares mexicanos, establecen el voltaje de un sistema generador, de acuerdo a la potencia necesaria para cada caso, la siguiente tabla muestra la tensión recomendada para un sistema fotovoltaico de acuerdo a su potencia demandada.

| Tabla 1. Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico | |
|--|--|
| Potencia demandada (en W) | Tensión de trabajo del sistema fotovoltaico (en V) |
| < de 1500 W | 12V |
| Entre 1500 W y 5000 W | 24V ó 48V |
| > 5000 W | 120V ó 300V |

Tabla 51: Tensión de trabajo de un sistema fotovoltaico.

1. Potencia del generador

- Radiación media: 6.70 kWh/m² /día
- Consumo estimado: 4095 wh/día
- Factor de seguridad de los paneles: 1.23
- Tensión del sistema: 24 v
- **Potencia mínima del generador: 763 wp**

2. Capacidad nominal de las baterías

- Profundidad de descarga: 0.8
- **Capacidad mínima de las baterías: 15356.25 wh**

DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN

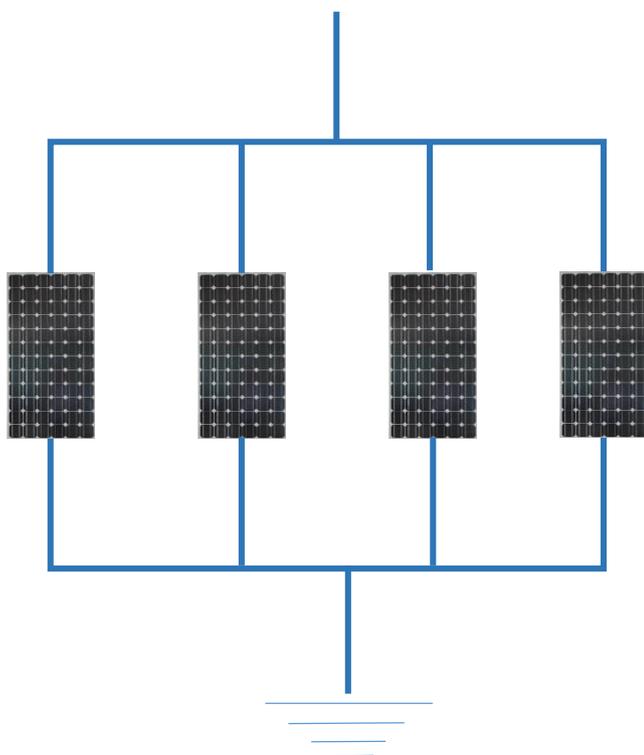
GENERADOR FOTOVOLTAICO

De acuerdo a la energía demandada la potencia de nuestro generador debe ser mínimo de 763 Wp aproximadamente.

Para esta instalación se utilizarán 4 módulos de 250 Wp de potencia cada uno, por lo que finalmente tendremos una potencia total de 1000 Wp.

A continuación, se ven las características técnicas de los módulos seleccionados, es importante mencionar que se seleccionaron estos paneles, ya que son fabricados en los Estados Unidos, y distribuidos en México.

DISEÑO DEL GENERADOR



DATOS DEL GENERADOR

$$V_{oc} : 1 \times 38 = 38 \text{ V.}$$

$$I_{sc} : 4 \times 8.75 = 35 \text{ A.}$$

$$\text{Pot. Pico} = 4 \times 250 = 1000 \text{ Wp}$$

Paneles serie= 1

Paneles paralelo=4

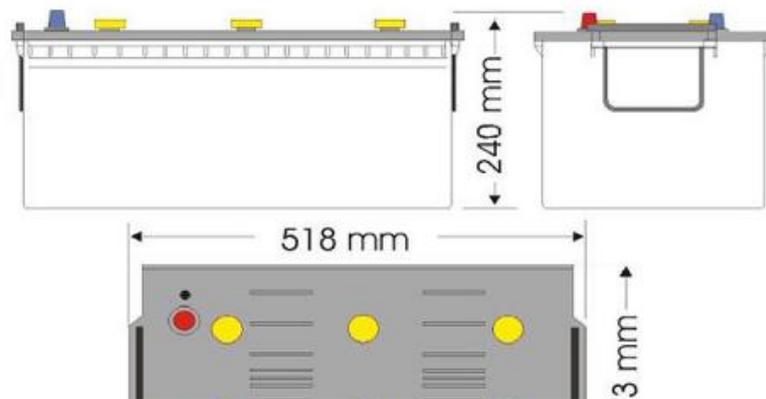
Area ocupada por el generador: 6.5 m²

Peso total del generador= 74 kg aprox

DISEÑO DE LAS BATERIAS

- Factor de seguridad de las baterías: 3 (días de autonomía)
- Tensión C.C= 24 V
- Profundidad de descarga: 0.80
- Capacidad de las baterías: 15356.25 Wh
- Fabricada en Estados Unidos

A continuación se dan las características técnicas de la batería que se usa, también se seleccionan estas baterías ya su fabricación es en los Estados Unidos.



Bateria monoblock U-POWER 250ah 12v UP-SPO250 250ah

Características

- Específicamente diseñada para aplicaciones que requieren un suministro permanente y duradero energía eléctrica
- Apto para aplicaciones cíclicas, así como para arranque
- 300 ciclos a 75 por ciento D.O.D. según EN50342 estándar (1997 Eurobat)
- Alta resistencia a los ciclos de descarga profunda y repetida
- Mayor vida útil
- Placas más gruesas placas con geometría radial para aumentar la vida y proporcionar mayor CCA.
- Placas ancladas a prueba de vibración y golpes.
- Material activo con una composición específica para minimizar el estrés cíclico.
- Aleación especial que asegura la resistencia contra la corrosión de las rejillas y la conductividad de los materiales activos

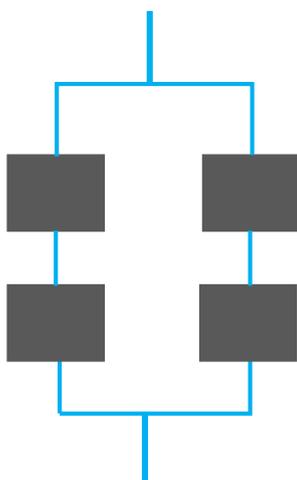
Aplicaciones

Energía fotovoltaica, Carretillas elevadoras, plataformas elevadoras, vehículos eléctricos barredoras, fregadoras, elevadores, apiladores, caravanas, auto caravanas, barcos, luminarias de carretera

Dimensiones :

- L-520 x AN-278 x AL-240
- 58 Kg

Diseño del banco de baterías



DATOS DEL BANCO BATERIAS

- 24 V
- 500 Ah

REGULADOR DE CARGA

- Intensidad mínima del regulador: 35 A, con el sobredimensionado del 25 % tenemos una intensidad mínima total: 43.75 A con 24 V.

INVERSOR

De acuerdo a la potencia pico del generador (1kWp) y tomando 1.25 como factor de seguridad, la potencia del inversor debe tener como mínimo 869.56 W, para este dimensionado se utiliza 1 inversor monofásicos de alta eficiencia de 1000 W, sin transformador, ligero, robusto y duradero, con el cual se puedan obtener picos de eficiencia de a 95.5% al convertir la energía solar e inyectarla a la red eléctrica.

A continuación, se dan las especificaciones técnicas del inversor que se usa para esta instalación.

| Especificaciones eléctricas | |
|--|---|
| Modelos | Prosine 1000 |
| Potencia de salida | 1000 watts |
| Capacidad de sobrecarga | 1500 watts |
| Corriente de salida máxima | 25 Amperios |
| Voltaje de salida (sin carga) | 120 VCA RMS +/-3% |
| Voltaje de salida (sobre carga completa y rango de voltaje de la batería) | 120 VCA RMS +4%, -10% |
| Frecuencia de salida | 60 Hz+/-0,05 (estabilizado por cristal) |
| Forma de onda de salida | Onda sinusoidal pura (<3% THD) |
| Eficiencia máxima | 90% |
| Consumo de corriente sin carga (modo de búsqueda) | <1,5 W |
| Consumo de corriente sin carga (modo inactivo) | <22 W |
| Rango de voltaje de entrada (12 V/24 V) | 10 - 16 VCC / 20 - 32 VCC |
| Índice del relé de transferencia (modelos de relé de transferencia/cableado) | 15 A |

| Especificaciones generales | |
|--|---|
| Rango de temperatura de funcionamiento | 0°C - 60°C |
| Rango de temperatura de almacenamiento | -30°C - 70°C |
| Tipos de salida de CA | Cableado |
| | Cableado y relé de transferencia |
| | Toma de CA Schuko |
| Panel de visualización LCD | Extraíble; se puede montar en ubicaciones rem |
| Fusible de CC recomendado (modelo de 12 V) | 175 A (según los códigos de instalación que correspondan) |
| Fusible de CC recomendado (modelo de 24 V) | 90 A (según los códigos de instalación que correspondan) |
| Dimensiones (Al x An x L) | 115 x 280 x 390 mm |
| Peso | 7,0 kg |
| Garantía | 2 años |
| Números de referencia | 806-1070 (12 V/230 SCHUKO) |
| | 806-1073 (12 V/230 Cableado) |
| | 806-1074 (12 V/230 relé de transferencia y cableado) |
| | 806-1080 (24 V/230 SCHUKO) |
| | 806-1083 (24 V/230 Cableado) |
| | 806-1084 (24 V/230 relé de transferencia y cableado) |
| | 808-1800 Kit de interfaz remota) |

CÁLCULO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR EL SAPV EN CERRO HERMOSO.

Para realizar el cálculo de la energía total que producirá el sistema fotovoltaico a lo largo de su vida útil, realizamos los siguientes pasos:

a. Cálculo de la irradiación recibida por un año del SAPV

Obtenemos la aproximación de la energía total por un año, utilizando los datos de radiación presentados anteriormente y calculamos mes a mes la radiación recibida multiplicando por los días del año, luego realizamos la sumatoria de la radiación de cada mes para obtener la energía total recibida en el año.

La siguiente tabla muestra los cálculos que se describen en el punto anterior.

| Mes | Día/mes | Radiación (kWh/m ² /día) | Energía (kWh/m ²) |
|--|---------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Enero | 31 | 6.03 | 186.93 |
| Febrero | 28 | 6.74 | 188.72 |
| Marzo | 31 | 7.47 | 231.57 |
| Abril | 30 | 7.75 | 232.5 |
| Mayo | 31 | 7.53 | 233.43 |
| Junio | 30 | 6.79 | 203.7 |
| Julio | 31 | 6.74 | 208.94 |
| Agosto | 31 | 6.78 | 210.18 |
| Septiembre | 30 | 6.21 | 186.3 |
| Octubre | 31 | 6.65 | 206.15 |
| Noviembre | 30 | 6.07 | 182.1 |
| Diciembre | 31 | 5.74 | 177.94 |
| Energía Anual (kWh/m²) | | | 2448.46 |

Tabla 52: Irradiancia anual recibida por el SAPV

b. Cálculo de la irradiación recibida a lo largo de la vida útil del SAPV

- Tomando 25 años como vida útil del sistema

Una vez realizado el cálculo de la energía total producida por el sistema durante un año, calculamos la energía durante la vida útil del sistema multiplicando por 25 años.

Energía durante 25 año (kWh/m²) 61211.5

Tabla 53: Energía generada durante la vida útil del SAPV (25 años)

c. *Cálculo de las horas solares pico por año en Cerro Hermoso*

Es necesario realizar el cálculo de la cantidad de horas en que la instalación estará recibiendo radiación solar, para poder hacer el cálculo de la energía teórica total generada por el SAPV.

La hora solar pico es la cantidad total de horas en que recibe radiación solar a 1000W/m² que es la radiación estándar. Para el cálculo de las horas solar pico dividimos la energía producida durante los 25 años entre 1kW/m².

| | |
|---------------------------|----------------|
| Horas solares pico | 61211.5 |
|---------------------------|----------------|

Tabla 54: Cálculo de horas solares pico

d. *Cálculo de la energía teórica producida por el SAPV*

La energía teórica se obtiene multiplicando las horas solar pico por la potencia nominal instalada del generador.

| | |
|--------------------------------------|----------------|
| Energía Teórica (25 años) kWh | 61211.5 |
|--------------------------------------|----------------|

| | |
|------------------------------------|----------------|
| Energía Teórica (1 año) kWh | 2448.46 |
|------------------------------------|----------------|

e. *Cálculo de la energía real producida por el SAPV, durante toda su vida útil*

La energía real que producirá el sistema se obtiene multiplicando la energía teórica calculada por el Performance Ratio.

El Performance ratio es una variable importante para evaluar la eficiencia, rendimiento y desempeño de una instalación FV. Esta describe la relación entre la energía generada realmente y la energía teórica, mientras más cerca esté el valor del 100% más eficiente es la instalación, aunque en la realidad no se alcanza

$$PR = \frac{\text{Energía producida (real)}}{\text{Energía Teórica}}$$

un 100% debido a que siempre hay algún tipo de pérdidas de energía.

En nuestro caso, para la instalación diseñada en Cerro Hermoso, utilizaremos varios valores de PR para instalaciones aisladas, suponiendo condiciones estándar de funcionamiento. Dichos valores de Performance Ratio (PR) estarán

entre 0.7 y 0.85, con esto estimaremos un valor más cercano de lo que sería la producción real de nuestra instalación en Cerro Hermoso.

Si multiplicamos la energía teórica por el PR tendremos:

| PR | Energía Real producida/Año (kWh) | Energía Real producida/25 Años (kWh) |
|------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 0.7 | 1713.922 | 42848.05 |
| 0.75 | 1836.345 | 45908.625 |
| 0.8 | 1958.768 | 48969.2 |
| 0.85 | 2081.191 | 52029.775 |

Tabla 55: Energía producida por el SAPV con diferentes PR.

TABLA RESUMEN DEL ACV DE LAS TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

Unidad de Referencia: 1 SAPV de 1kWp de potencia

| COMPARANDO LOS SISTEMAS COMPLETOS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|---------|-----------------------|------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Categorías ILCD | Climate Change | Ozone depletion | H. toxicity, cancer effects | H. toxicity, non-cancer effects | Particulate matter | Ionizing radiation HH | Ionizing radiation E(interim) | Photochemical ozone formation | Acidification | Terrestrial eutrophication | | Marine eutrophication | Freshwater ecotoxicity | | Water resource depletion | Mineral, fossil & renewable resource |
| SISTEMAS | kg CO2 eq | kg CFC-11 eq | CTUh | CTUh | kg PM2.5 eq | kBq U235 eq | CTUe | kg NMVOC eq | molc H+ eq | mol N eq | kg P eq | kg N eq | CTUe | g C deficit | m3 water eq | kg Sb eq |
| OPV-SYSTEM | 1110.00 | 0.000055 | 0.000072 | 0.000638 | 2.42 | 24.2 | 0.000174 | 8.5 | 28.9 | 29.2 | 1.17 | 2.26 | -4470.00 | 2660.00 | 3030.00 | 1.85 |
| Amorfo-Si | 17400 | 0.000631 | 0.00107 | 0.00353 | 13.90 | 144.00 | 0.000993 | 57.10 | 156.00 | 170.00 | 1.58 | 15.20 | 49100.00 | 21800.00 | 23200.00 | -3.62 |
| Mono-Si Modulos (€) | 11800 | 0.000646 | 0.000639 | 0.00205 | 10.80 | 133.00 | 0.000933 | 43.7 | 112.00 | 132.00 | 1.47 | 11.80 | 8790.00 | 13200.00 | 21000.00 | 1.72 |
| COMPARANDO SOLO LOS MODULOS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| OPV | 150.00 | 0.00000468 | 0.000000428 | -0.000112 | 0.40 | 3.66 | 0.0000262 | 1.33 | 1.56 | 5.42 | 0.0524 | 0.443 | -6360.00 | -384.00 | 73.90 | 1.08 |
| Si-Amorfo | 1940.00 | 0.000059 | 0.00011 | 0.00091 | 0.37 | 45.80 | 0.000334 | 2.34 | 12.80 | 0.92 | 0.00 | 0.23 | 32700.00 | 4720.00 | 4480.00 | -4.94 |
| Si-Monocristalino | 2080.00 | 0.000281 | 0.000185 | 0.000904 | 1.92 | 196.00 | 0.000481 | 8.04 | 15.80 | 22.00 | 1.09 | 2.28 | 18100.00 | 1730.00 | 8560.00 | 0.69 |
| COMPARANDO SOLO LOS BOS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BOS-OPV | 960.00 | 0.0000499 | 0.000071 | 0.000750 | 2.02 | 20.54 | 0.000148 | 7.17 | 27.34 | 23.78 | 1.12 | 1.82 | 1890.00 | 3044.00 | 2956.10 | 0.77 |
| BOS-Si-Amorfo | 15460.00 | 0.000572 | 0.000959 | 0.002624 | 13.5 | 98.20 | 0.000659 | 54.76 | 143.20 | 169.08 | 1.58 | 14.97 | 16400.00 | 17080.00 | 18720.00 | 1.32 |
| BOS-Si- mono | 9720.00 | 0.000365 | 0.000454 | 0.001146 | 8.88 | -63.00 | 0.000452 | 35.66 | 96.20 | 110.00 | 0.38 | 9.52 | -9310.00 | 11470.00 | 12440.00 | 1.03 |

Tabla 56: Resumen del ACV con la metodología ILCD del SAPV con las tres tecnologías

| COMPARATIVA CON RESTO DE INDICADORES | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Categorías ILCD | CED | ENERGIA EMBEBIDA | ENERGIA ANUAL PRODUCIDA KWH | EPBT (AÑOS) | COSTO (solo modulos) | SUPERFICIE OCUPADA | PESO (solo modulos) | Vida util sistema |
| SISTEMAS | (MJ) | (kWh) | (Kw) | (años) | (€) | (M ²) | (kg) | (años) |
| SAPV-OPV | 27730,00 | 7702,777778 | 2341,3 | 3,29 | 18000,00 | 25,00 | 8,00 | 1,5 |
| SAPV-Si-Amorfo | 227207,00 | 63113,06 | 105308,3 | 0,60 | 720,0 | 18,40 | 150,88 | 25 |
| SAPV-Si-Mono | 145100,00 | 40305,56 | 57492,9 | 0,70 | 840,0 | 6,5 | 74,0 | 25 |
| MODULOS | | | % correspondiente | Transporte (MJ) | Transporte (kWh) | | | |
| OPV | 2440 | 677,77 | 18% | 484 | 134,444 | | | |
| Si-Amorfo | 22120 | 6144,444444 | | NA | NA | | | |
| Si-Mono | 27100 | 7527,777 | 19% | NA | NA | | | |
| BOS | | | Bateria (MJ) | Bateria (kWh) | % Bateria | Marco (kWh) | % Marco | |
| BOS-OPV | 11400 | 3166,666 | 7510 | 2086 | 56% | NA | NA | |
| BOS-Si-Amorfo | 206000 | 57222 | 7780 | 2161 | 4,2% | 49444 | 84,5% | |
| BOS-Si-Mono | 118000 | 32778 | 7780 | 2161,111 | 5,35% | 30000 | 74% | |

Tabla 57: Resumen del ACV con el EPBT, CED, COSTO de los SAPV en las tres tecnologías.