

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE  
CHIAPAS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS  
RENOVABLES

DOCTORADO EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES

TESIS

“Metodología multicriterio para la selección  
de fuentes alternas de energía  
para deshidratadores de alimentos”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE **DOCTOR EN**  
**MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS RENOVABLES**

PRESENTA

ERICK ALEJANDRO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ

DIRECTORES:

DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT

# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

## SECRETARÍA ACADÉMICA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 22 de septiembre de 2025

Oficio No. SA/DIP/1086/2025

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**C. Erick Alejandro Hernández Domínguez**

**CVU: 808885**

**Candidato al Grado de Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**

**Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables**

**UNICACH**

**P r e s e n t e**

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Metodología multicriterio para la selección de fuentes alternas de energía para deshidratadores de alimentos** y como Director de tesis el Dr. Orlando Lastres Danguillecourt (CVU: 252788) y Co-Director el Dr. Joel Moreira Acosta (CVU 206687) quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Doctor en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento, así como entregar en esta Dirección una copia de la *Constancia de Entrega de Documento Receptorial* que expide el Centro Universitario de Información y Documentación (CUID) de esta Casa de estudios, en sustitución al ejemplar empastado.

Atentamente  
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Dulce Karol Ramírez López  
DIRECTORA



C.c.p. Dr. José Francisco Pola Albores, Director del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.

Dra. Laura E. Vereá Valladares, Coordinadora del Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.

Archivo/minutario.

EPL/DKRL/igp/gtr

**2025, Año de la mujer indígena**  
**Año de Rosario Castellanos**

Ilustración: Noé Zenteno



Ciudad Universitaria, libramiento norte  
poniente 1150, col. Lajas Maciel C.P. 29039.  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México  
[investigacionyposgrado@unicach.mx](mailto:investigacionyposgrado@unicach.mx)

# I. Agradecimientos

Elevo mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser mi guía y fortaleza.

A mi esposa, Alison Ruiz Suárez, por tu amor, paciencia y valioso apoyo en esta investigación. A mis hijas, Sophia y Emma Alessandra, por ser mi mayor motivación e inspiración. Este logro es para ustedes, ejemplo de que siempre sigan sus sueños.

A mi familia, a mis padres y hermanos, por creer en mí en todo momento y su oración constante.

Una mención muy especial y sentida para Domingo López López (Q.E.P.D.), cuya memoria y legado fueron una chispa de inspiración en este camino.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Joel Moreira Acosta, por su confianza y ejemplo de resiliencia y dedicación. Al Dr. Orlando Lastre Danguillecourt, por sus valiosos consejos y su apoyo académico y personal, invaluable para mí.

Agradezco a la Dra. Marcela Torres Wong y a la Dra. Jessica Cienfuegos Martínez por sus valiosas aportaciones en el ámbito social, las cuales enriquecieron de manera significativa esta investigación.

Quiero extender mi gratitud a los doctores Joel Pantoja Enríquez, Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte y Nein Farrera Vázquez, quienes, como revisores de esta investigación, realizaron aportaciones críticas y enriquecedoras que mejoraron significativamente la calidad de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a la comunidad de San Antonio El Porvenir. A quienes les debo una profunda lección de vida. Su generosidad, sabiduría y forma de ver el mundo me enseñaron más de lo que yo pude aportarles.

Agradezco a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables por su valioso respaldo a mi formación. También a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca que hizo posible esta investigación.

## II. Resumen

En climas tropicales y subtropicales, las pérdidas postcosecha limitan la calidad, disponibilidad y comercialización. Los deshidratadores de alimentos híbridos, aunque técnicamente viables, presentan una limitada transferencia tecnológica debido a que en su diseño no se consideran criterios como la compatibilidad energética, la usabilidad y el mantenimiento. Como respuesta, se propone una metodología de apoyo a la toma de decisión basada en análisis multicriterio para evaluar y jerarquizar fuentes alternas de energía renovables y no renovables para diseñar o adaptar sistemas de secado de alimentos de acuerdo con criterios técnicos, económicos, operativos y ambientales. La metodología siguió un orden secuencial: consensuar criterios con modelos participativos, ponderar los resultados y ordenar las alternativas, además, se realizó análisis de sensibilidad para validar los resultados y se finalizó con la implementación de la metodología con casos de estudio. La herramienta anticipó configuraciones óptimas de selección de fuentes de energía alternas y evitó errores de implementación. En conclusión, aportó una herramienta que ayuda al diseño de secadores solares híbridos o por hibridar los existentes, visibilizando criterios subestimados (diseño participativo, separabilidad técnica y mantenibilidad) y confirmando, dada la diversidad de México, la necesidad de adaptar cada solución a su contexto para asegurar su adopción efectiva.

Palabras clave: MCDM, Secador híbrido, DELPHI-AHP-TOPSIS, Seguridad Alimentaria

### **III. Abstract**

In tropical and subtropical climates, postharvest losses limit quality, availability, and marketability. Although operationally viable, hybrid food dehydrators suffer from limited technology transfer because key criteria—such as energy compatibility, usability, and maintenance—are often not considered in their design. In response, a decision-support methodology based on multi-criteria analysis was proposed to evaluate and rank alternative renewable and non-renewable energy sources. The goal is to design or adapt food dehydration systems according to technical, economic, operational, and environmental criteria. The methodology followed a sequential order: reaching a consensus on criteria using participatory models, weighting the results, and ranking the alternatives. Furthermore, a sensitivity analysis was conducted to validate the results, culminating in the implementation of the methodology through case studies. The tool's outcome anticipated optimal configurations for selecting alternative energy sources and prevented implementation errors. In conclusion, it provided a tool that aids in the design of hybrid solar dryers or the hybridization of existing ones, highlighting underestimated criteria (participatory design, modularity and maintainability) and confirming, given Mexico's diversity, the need to adapt each solution to its specific context to ensure its effective adoption.

Keywords: MCDM, Hybrid Dryer, DELPHI-AHP-TOPSIS, Food Security

# INDICE GENERAL

I. AGRADECIMIENTOS .....	I
II. RESUMEN .....	II
III. ABSTRACT.....	III
IV. ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
V. ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
VI. ÍNDICE DE VARIABLES .....	IX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Entorno y conceptualización.....	1
1.1.1. Marco científico/técnico .....	1
1.1.2. Definiciones clave.....	2
1.1.3. Clasificaciones .....	2
1.1.4. Bases conceptuales necesarias .....	4
1.2. Antecedentes y Estado del Arte .....	5
1.2.1. Aplicación de Métodos MCDM en Secadores Híbridos.....	14
1.2.2. Vacíos identificados en la literatura.....	20
1.2.3. Métodos Complementarios Identificados para Fortalecer el Proceso de Evaluación... ..	20
1.3. Definición del Problema .....	21
1.4. Hipótesis .....	21
1.5. Justificación .....	22
1.6. Objetivo General.....	23
1.7. Objetivos Específicos.....	23
1.8. Estructura del documento .....	24
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
2.1. Método Delphi .....	25
2.1.1. Estadísticas Descriptivas para Validar Consenso .....	26
2.1.2. Coeficiente de Kendall W (grado de concordancia).....	27
2.2. Método AHP .....	28
2.2.1. Fundamentos del método .....	28

2.3.	Métodos TOPSIS Fundamentos y Cálculos.....	30
2.4.	Análisis de Sensibilidad y Robustez del Modelo.....	33
2.4.1.	Análisis de Morris Screening: Evaluación Uni Variada de Sensibilidad .....	34
2.4.2.	Índice de Sobol: Análisis Global de Varianza .....	35
2.5.	Justificación: Enfoque Metodológico Integrado .....	36
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA .....		38
3.1.	Diseño de la Metodología y Desarrollo de la Herramienta Computacional .....	38
3.1.1.	Diseño .....	38
3.1.2.	Procedimiento .....	39
3.1.3.	Técnicas e instrumentos.....	39
3.1.4.	Población y Muestra .....	39
3.1.5.	Análisis de Datos .....	40
3.2.	Implementación del Módulo de Análisis de Sensibilidad.....	40
3.2.1.	Diseño .....	40
3.2.2.	Procedimiento .....	41
3.2.3.	Técnicas e instrumentos.....	41
3.2.4.	Población y muestra.....	42
3.2.5.	Análisis de datos .....	42
3.3.	Validación Metodológica a Través de Estudios de Caso.....	42
3.3.1.	Filosofía de Validación: Pragmatismo.....	42
3.3.2.	Diseño .....	43
3.3.3.	Procedimientos.....	43
3.3.4.	Técnicas e Instrumentos.....	44
3.3.5.	Población y Muestra .....	44
3.3.6.	Análisis de Datos .....	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		45
4.1.	Resultados del diseño metodológico y la herramienta computacional .....	45
4.2.	Resultados de la implementación de sensibilidad y robustez del modelo .....	50
4.3.	Resultados de la validación en casos de estudio .....	54

4.3.1. Caso de estudio I: Evaluación post implementación de secador solar híbrido rotatorio de colector solar de tubos de vacío – biomasa de flujo forzado para cacahuete ( <i>Arachis hypogaea</i> ).....	54
4.3.2. Análisis de sensibilidad.....	61
4.3.3. Caso de estudio II: Selección y Validación de Tecnología con Apoyo del Modelo Propuesto.....	69
4.3.4. Análisis de sensibilidad.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXOS .....	94

## IV. Índice de figuras

Figura 1 Encuesta para evaluación de criterios .....	45
Figura 2 Ventanas emergentes a) Delphi, b) AHP, c) TOPSIS.....	49
Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	50
Figura 5 Implementación del método de sensibilidad a la metodología propuesta .....	52
Figura 12 Secador solar híbrido rotatorio de colector solar de tubos de vacío – biomasa de flujo forzado para cacahuete. ....	55
Figura 13 Evaluación Delphi a expertos, usuarios y promedio combinado .....	56
Figura 14 Coeficiente de variación por criterio de expertos y usuarios .....	57
Figura 15 Ranqueo de criterios evaluados por el método Delphi .....	57
Figura 16 Ventana emergente de la evaluación del método AHP .....	59
Figura 17 Ventana emergente con el peso de los criterios y la matriz comparación .....	60
Figura 18 Grafica de ordenamiento de fuentes de energía alternas en sistema post implementación .....	61
Figura 19 Ventana emergente para cargar las matrices y realizar el análisis de sensibilidad ..	62
Figura 20 Ventana emergente para variar manualmente los criterios y evaluar en Morris Screening y Sobol.....	63
Figura 21 Grafica de resultados con pesos de criterios modificados manualmente .....	64
Figura 22 La ventana emergente presenta los cálculos realizados por el análisis de sensibilidad Morris Screening .....	65
Figura 23 <b>Grafica de orden de prioridades post evaluación Morris Screening</b> .....	66
Figura 24 Ventana emergente índice de Sobol a) efectos combinados b) efectos totales.....	66
Figura 25 Grafica de efectos totales, criterios vs efectos totales .....	67
Figura 26 Cooperativa cafetalera san Antonio el porvenir curso introducción al secado .....	70
Figura 27 Grafica de promedios por criterio de acuerdo con paneles de expertos, usuarios y el promedio combinado para un secador solar híbrido de café.....	71
Figura 28 Grafica de cálculo de coeficientes de variación por criterio evaluado por panel de expertos y usuarios .....	72

Figura 29 . <i>Grafica de promedios por criterio expertos, usuarios y el promedio combinado - Segunda Ronda</i> .....	73
Figura 30 <i>Grafica de coeficientes de variación por criterio de segunda ronda</i> .....	73
Figura 31 <i>Ranqueo de criterios evaluados por el método Delphi</i> .....	74
Figura 32 <i>Ventana emergente de la evaluación del método AHP</i> .....	75
Figura 33 <i>Ventana emergente con el peso de los criterios y la matriz comparación</i> .....	76
Figura 34 <i>Grafica de ordenamiento de fuentes de energía alternas en sistema pre implementación</i> .....	77
Figura 35 <i>Ventana emergente para cargar los pesos de los criterios y la matriz alternativas</i> ...	78
Figura 36 <i>Ventana emergente de análisis de sensibilidad pestaña 2 generador de controles</i> ....	79
Figura 37 <i>Grafica de resultados con pesos de criterios modificados manualmente</i> .....	80
Figura 38 <i>Ventana emergente de análisis Morris Screening</i> .....	80
Figura 39 <i>Grafica de ordenamiento de criterios posterior al análisis Morris Screening</i> .....	81
Figura 40 <i>Ventana emergente índice de Sobol a) efectos combinados b) efectos totales</i> .....	82
Figura 41 <i>Grafica de efectos totales, criterios vs efectos totales</i> .....	83



## V. Índice de tablas

Tabla 1	Conceptos enunciados en esta investigación .....	2
Tabla 2	Flujo de aire para secado de alimentos .....	3
Tabla 3	Fuente de energía auxiliar para secadores solares .....	3
Tabla 4	<i>Tipos de colectores solares</i> .....	4
Tabla 5	<i>Escala de implementación</i> .....	4
Tabla 6	Bases conceptuales y metodológicas de la investigación .....	5
Tabla 7	Antecedentes de secado solar híbrido .....	13
Tabla 8	Secadores híbridos realizados en la UNICACH y Universidades en Chiapas .....	14
Tabla 9	Métodos multicriterio implementados en secadores solares.....	18
Tabla 10	<i>Escala de Saaty</i> .....	29
Tabla 11	<i>Entradas, procesos y salidas de método Delphi</i> .....	46
Tabla 12	<i>Entradas, procesos y salidas del método AHP</i> .....	47
Tabla 13	<i>Entradas, procesos y salidas del método TOPSIS</i> .....	48
Tabla 14	<i>Entradas, procesos y salidas del método Morris Screening</i> .....	51
Tabla 15	<i>Entradas, procesos y salidas den índice de Sobol</i> .....	51
Tabla 16	Matriz de decisión AHP sin normalizar.....	58
Tabla 17	<i>Matriz de decisión, alternativas vs criterios seleccionados</i> .....	59
Tabla 18	<i>Ranqueo de criterios, ST y Rango Visual</i> .....	68
Tabla 19	<i>Matriz de Decisión AHP sin normalizar</i> .....	74
Tabla 20	<i>Matriz de decisión, alternativas vs criterios seleccionados</i> .....	75

## VI. Índice de variables

Variable	Método	Descripción
$\mu_i$	Delphi	Media del criterio $i$ (promedio de las valoraciones de los expertos).
$m$	Delphi	Número de expertos participantes en la evaluación
$x_{ij}$	Delphi	Puntuación otorgada por el experto $j$ al criterio $i$
$\sigma_i$	Delphi	Desviación estándar del criterio
$CV_i$	Delphi	Coficiente de variación del criterio $i$ , expresado en %.
$R_i$	Delphi	Suma de rangos del criterio $i$
$r_{ij}$	Delphi	Rango asignado al criterio $i$ por el juez $j$
$\bar{R}$	Delphi	Promedio teórico de las sumas de rangos
$n$	Delphi	Numero de criterios
$S$	Delphi	Suma de cuadrados de las desviaciones de las sumas de rangos respecto al promedio.
$X^2$	Delphi	Prueba de significancia
$a'_{ij}$	AHP	Valor normalizado del elemento $a_{ij}$ de la matriz de comparación, obtenido dividiendo cada elemento por la suma de su columna
$A$	AHP	Matriz de comparación
$a_{ij}$	AHP	Entrada original de la matriz de comparación por pares $A$ , que expresa la preferencia del criterio $i$ sobre el criterio $j$ .
$n$	AHP	Número total de criterios considerados en la matriz
$w$	AHP	Peso o prioridad del criterio $i$ obtenido como promedio de la fila $i$ de la matriz normalizada.
$\lambda_{max}$	AHP	Mayor valor propio asociado a la matriz de comparación; mide cuánta inconsistencia existe
$(Aw)_i$	AHP	Componente $i$ – ésima del producto matricial $A_w$ , usado para estimar $\lambda_{max}$ elemento a elemento.
$w_i$	AHP	Peso del criterio $i$ (entra $i$ del vector $w$ )
$CI$	AHP	Índice de consistencia
$CR$	AHP	Índice de razón de consistencia
$X$	TOPSIS	Matriz de decisión que reúne los desempeños de todas las alternativas en todos los criterios
$x_{ij}$	TOPSIS	Desempeño de la alternativa $i$ en el criterio $j$ (con sus unidades propias: MXN, %, h, etc.).
$m$	TOPSIS	Número de alternativas evaluadas.
$n$	TOPSIS	Numero de criterios considerados
$r_{ij}$	TOPSIS	Valor normalizado de la alternativa $i$ respecto al criterio $j$ , adimensional
$v_{ij}$	TOPSIS	Valor normalizado y ponderado de la alternativa $i$ en el criterio $j$ ; refleja desempeño considerando la importancia del criterio
$w_j$	TOPSIS	Peso asignado al criterio $j$ (normalizado, típicamente obtenido del AHP en las Ecs. 9–13).

$S_i^+$	TOPSIS	Distancia euclídea de la alternativa $i$ a la solución ideal positiva (la opción más deseable en todos los criterios).
$v_j^+$	TOPSIS	Valor ideal positivo del criterio $j$ : <ul style="list-style-type: none"> <li>•Máximo de <math>v_{ij}</math> si el criterio es de beneficio.</li> <li>•Mínimo de <math>v_{ij}</math> si el criterio es de costo.</li> </ul>
$S_i^-$	TOPSIS	Distancia euclídea de la alternativa $i$ a la solución ideal negativa (la opción menos deseable en todos los criterios)
$v_j^-$	TOPSIS	Valor ideal positivo del criterio $j$ : <ul style="list-style-type: none"> <li>•Máximo de <math>v_{ij}</math> si el criterio es de beneficio.</li> <li>•Mínimo de <math>v_{ij}</math> si el criterio es de costo</li> </ul>
$C_i$	TOPSIS	Cálculo del índice de cercanía, que indica la posición relativa de cada alternativa entre los ideales
$\mu_i^*$	Morris	Morris, Importancia global de la variable de entrada $i$ , medida como promedio de los efectos elementales en valor absoluto
$R$	Morris	Número de trayectorias o réplicas realizadas en el análisis de sensibilidad.
$EE_k^{(i)}$	Morris	Efecto elemental de la variable de entrada $i$ en la trayectoria $k$ (definido en la Ec. 22).
$\sigma_i$	Morris	Desviación estándar de los efectos elementales de la variable $i$ ; indica no linealidad y/o interacciones.
$R$	Morris	Número de trayectorias (réplicas) en el experimento de Morris
$EE_k^{(i)}$	Morris	Efecto elemental de la variable $i$ en la trayectoria $k$
$\bar{EE}^i$	Morris	Promedio aritmético de los efectos elementales de la variable $i$ en las $R$ trayectorias
$S_i$	Sobol	Índice de primer orden en $X_i$ ; fracción de la variancia total de $Y$ explicada solo por $X_i$ (sin interacciones)
$VY$	Sobol	Varianza total de la salida del modelo $Y$ . Equivalente $Var(Y)$
$V_i$	Sobol	Componente de variancia atribuible exclusivamente a $X_i$ equivalente a $Var_{X_i}[E_{X_{\sim i}}(Y X_i)]$
$X_i$	Sobol	Variable de entrada $i$ del modelo (una de las $p$ entradas).
$Y$	Sobol	Salida del modelo (métrica de desempeño o índice).
$S_{Ti}$	Sobol	Proporción de la variancia total debida a $X_i$ incluyendo interacciones con cualquier otra entrada
$Var(Y)$	Sobol	Varianza total de la salida
$E_{X_{\sim i}}$	Sobol	Esperanza (promedio) respecto a la distribución de $X_{\sim i}$
$(Y X_{\sim i})$	Sobol	Media condicional de $Y$ al fijar $X$ ; Su variancia captura la parte sin $X_i$

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Entorno y conceptualización

### 1.1.1. *Marco científico/técnico*

Las pérdidas postcosecha constituyen una de las problemáticas más críticas en la cadena agroalimentaria a nivel mundial. De acuerdo con un estudio realizado por (FAO, 2011) aproximadamente el 30% de los alimentos producidos a nivel global se pierde entre la cosecha y el consumo, afectando la seguridad alimentaria, la sostenibilidad de los sistemas productivos y la rentabilidad del sector agrícola. Entre las principales causas de estas pérdidas se encuentra la inadecuada gestión de procesos de conservación, como el secado de productos agroalimentarios.

Con el fin de superar estas limitaciones han surgido tecnologías para deshidratar alimentos más avanzadas como los secadores híbridos. Estos integran múltiples fuentes de energía (solar, biomasa, electricidad, gas natural, gas LP, eólico o almacenamiento térmico mediante PCM), lo que permite mantener perfiles térmicos más estables, eficientes y controlados. Sin embargo, pese a sus ventajas técnicas aún existe una brecha metodológica: no se cuenta con herramientas validadas que permitan seleccionar de manera objetiva la hibridación energética más adecuada en cada contexto.

### 1.1.2. *Definiciones clave*

Para el adecuado entendimiento de esta investigación, se presentan en la tabla 1 algunas definiciones clave:

**Tabla 1**

#### **Conceptos enunciados en esta investigación**

<b>Definición</b>	<b>Descripción</b>
Secador solar	dispositivo que utiliza radiación solar para deshidratar productos agrícolas
Secador híbrido	sistema que combina dos o más fuentes energéticas (solar, biomasa, eléctrica, gas, eólica, etc.) para asegurar estabilidad térmica y continuidad operativa
Hibridación energética	integración de fuentes complementarias de energía para garantizar el funcionamiento eficiente.
Eficiencia térmica	relación entre la energía suministrada al sistema y la efectivamente utilizada para el secado.
Compatibilidad energética	grado en que diferentes fuentes pueden combinarse sin comprometer la operación, eficiencia o costo.
Justicia tecnológica	principio que establece que las comunidades deben decidir sobre las tecnologías que impactan su vida y entorno (Escobar, 2009, 2018)

### 1.1.3. *Clasificaciones*

La literatura especializada (Ekechukwu & Norton, 1999), junto con experiencias recientes en el diseño e implementación de tecnologías de secado, ha permitido establecer diversas clasificaciones de los secadores solares e híbridos. Estas categorizaciones se presentan en las Tablas 1 a 4, cada una enfocada en un criterio específico de diferenciación. En la Tabla 1 se muestra la clasificación según el flujo de aire, en la Tabla 2 la correspondiente a la fuente de energía auxiliar, en la Tabla 3 la relativa al tipo de colector empleado, y en la Tabla 4 la que distingue a los sistemas de acuerdo con la escala de aplicación. Dichas clasificaciones constituyen una base conceptual y técnica fundamental para comprender la diversidad de configuraciones existentes y su pertinencia en distintos contextos productivos y energéticos.

**Tabla 2****Flujo de aire para secado de alimentos**

<b>Tipo de secador</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>	<b>Ventaja</b>
Secadores pasivos	Operan mediante convección natural del aire	Diseño simple, bajo costo y fácil mantenimiento
Secadores activos	Incorporan convección forzada usando ventiladores o bombas de calor	Mayor control de temperatura y velocidad de secado

**Tabla 3****Fuente de energía auxiliar para secadores solares**

<b>Sistema</b>	<b>Fuente auxiliar</b>	<b>Función principal</b>	<b>Ventaja</b>
Solar-biomasa	Biomasa (residuos agrícolas, madera)	Mantener calor sin sol	Uso de recursos locales y renovables
Solar-eléctrico	Electricidad (resistencias, calefactores)	Respaldo eléctrico continuo	Garantiza continuidad operativa
Solar-gas (LP o natural)	Gas LP o natural	Estabilizar temperatura con gas	Alta confiabilidad y rápido calentamiento
Solar-fotovoltaico-térmico (PVT)	Paneles híbridos FV-térmicos	Generar calor y electricidad a la vez	Eficiencia dual: energía térmica + eléctrica
Solar-eólico	Energía eólica (microturbinas)	Impulsar ventilación constante	Aprovecha recursos naturales adicionales
Solar-geotérmico	Geotermia de baja entalpía	Mantener temperatura estable	Estabilidad térmica en climas adversos

**Tabla 4*****Tipos de colectores solares***

<b>Tipo de colector</b>	<b>Función principal</b>	<b>Ventaja</b>
Plano	Captar radiación solar directa sobre superficie plana	Diseño simple, bajo costo, fácil construcción
Tubos evacuados	Reducir pérdidas térmicas mediante vacío entre capas	Alta eficiencia, buen desempeño en climas fríos o nublados
Concentradores parabólicos	Concentrar radiación solar en un punto o línea focal	Alcanza altas temperaturas, adecuado para procesos de gran escala
PCM (almacenamiento térmico)	Almacenar energía solar en materiales de cambio de fase	Permite continuidad del secado durante la noche o nublados

**Tabla 5*****Escala de implementación***

<b>Escala</b>	<b>Aplicación principal</b>	<b>Ventaja</b>
Pequeña escala	Comunidades rurales	Tecnologías accesibles y de bajo costo, adaptadas a recursos locales
Mediana escala	Cooperativas agroindustriales	Permite procesamiento colectivo con mayor eficiencia y rentabilidad
Gran escala	Plantas agroindustriales de procesamiento	Alta capacidad de producción y aprovechamiento de economías de escala

***1.1.4. Bases conceptuales necesarias***

Las bases conceptuales de esta investigación constituyen el marco que orienta el análisis y el desarrollo metodológico. En ellas se reconoce el problema de las pérdidas postcosecha y las limitaciones de los diseños actuales, lo que resalta la necesidad de contar con herramientas rigurosas y participativas para la selección tecnológica. La integración de métodos multicriterio (Delphi, AHP, TOPSIS) y análisis de sensibilidad proporciona solidez y replicabilidad a los

resultados. Finalmente, se plantea como objetivo central lograr una transferencia tecnológica efectiva y justa, que asegure tanto la viabilidad técnica como la pertinencia social y ambiental de los sistemas de secado híbrido.

**Tabla 6**

**Bases conceptuales y metodológicas de la investigación**

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
Problema central	Las pérdidas postcosecha y la ineficiencia de los sistemas actuales de secado exigen soluciones tecnológicas más robustas y adaptadas a las condiciones locales.
Limitación actual	Los diseños de secadores híbridos suelen basarse en heurísticas, conveniencia económica o modelos externos, lo que incrementa los riesgos de ineficiencia o fracaso operativo.
Necesidad identificada	Desarrollar herramientas cuantitativas, participativas y replicables que integren criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales en la selección de tecnologías híbridas de secado.
Base metodológica	Se adopta un enfoque multicriterio que combina los métodos Delphi (consenso de criterios), AHP (jerarquización), TOPSIS (evaluación y ranking) y análisis de sensibilidad (Morris y Sobol).
Objetivo de fondo	Garantizar una transferencia tecnológica efectiva y promover la justicia tecnológica, asegurando que los sistemas híbridos respondan tanto a la eficiencia técnica como a la pertinencia social, económica y ambiental.

**NOTA:** La tabla resume los aspectos clave que sustentan la propuesta metodológica de selección multicriterio

## 1.2. Antecedentes y Estado del Arte

El secado es una operación unitaria esencial en la transformación y conservación de alimentos. Tradicionalmente, se ha realizado mediante exposición directa al sol, aprovechando su disponibilidad gratuita en regiones tropicales y subtropicales. No obstante, este método presenta múltiples limitaciones: dependencia de las condiciones climáticas, tiempos prolongados de

operación, baja uniformidad y vulnerabilidad a la contaminación. Para superar estas barreras, se han desarrollado tecnologías de deshidratación basadas en secadores híbridos, que combinan dos o más fuentes de energía solar, eléctrica, de biomasa, gas natural o gas LP o energía eólica con el fin de mantener un perfil térmico más estable, controlado y eficiente (Bhattacharya et al., 2000; Jha & Tripathy, 2021).

La diversidad de potenciales energéticos disponibles ha derivado en una gran variedad de configuraciones de secadores híbridos, cada una con ventajas y desventajas según el tipo de fuente, las condiciones climáticas, la disponibilidad de insumos y la infraestructura local. Sin embargo, no existe una metodología sistemática que permita seleccionar de forma objetiva y validada la configuración de fuentes de energía más adecuada para cada contexto. En muchos casos, los diseños son elegidos por criterios heurísticos, por conveniencia económica o por imitación de modelos externos, sin considerar adecuadamente las condiciones de operación reales.

(Amer et al., 2010), desarrollaron un sistema híbrido solar con respaldo eléctrico, compuesto por un colector plano con reflectores, intercambiador de calor y un tanque de almacenamiento térmico de 500 litros. El diseño fue evaluado en Alemania para el secado de rodajas de plátano, con resultados notables: el contenido de humedad se redujo del 82% al 18% en apenas ocho horas, frente al 62% de humedad alcanzado por el secado solar abierto en condiciones similares. El sistema operaba con recirculación de aire al 65%, lo que elevó la temperatura interna del secador entre 30 y 40 °C por encima del ambiente. Este diseño híbrido no solo mejoró la eficiencia térmica y la continuidad del secado, sino que también preservó mejor la calidad organoléptica del producto final, evitando rehidratación y deterioro microbiológico.

(Mortezapour et al., 2012), desarrollaron y evaluaron un secador solar híbrido asistido por bomba de calor, alimentado mediante un sistema fotovoltaico-térmico (PVT), con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la calidad del secado de azafrán (*Crocus sativus* L.), uno de los cultivos más delicados y valiosos del mundo. El sistema integró colectores PVT para suministrar energía térmica y eléctrica, la cual alimentó una bomba de calor y ventiladores para el control activo del flujo de aire caliente. El secador operó en un rango de temperatura óptimo de 35–50 °C, preservando las propiedades organolépticas del azafrán como el color, aroma y sabor. Se logró una reducción de humedad de 80% a 10% en menos de 6 horas, con un coeficiente de desempeño

(COP) promedio de 4.25, lo cual evidencia una alta eficiencia del sistema. Los resultados mostraron que el uso de bomba de calor reduce significativamente el consumo energético, especialmente durante días nublados o con baja radiación, mientras que el sistema PVT proporciona autonomía operativa sin conexión a red eléctrica. El estudio concluye que esta combinación tecnológica no solo permite un secado eficiente y de alta calidad, sino que representa un modelo replicable para cultivos de alto valor en zonas rurales con acceso limitado a infraestructura energética.

(López-Vidaña et al., 2013), desarrollaron un sistema de secado híbrido solar-gas (LPG) y evaluaron su desempeño bajo tres configuraciones: solo gas (GHS), solo solar (SHS) y operación híbrida (HHS). El sistema se compone de un colector solar de aire, un calentador auxiliar de combustión de gas propano y una cámara de secado. La eficiencia térmica del colector solar fue de 26% en condiciones actuales, influenciada por el flujo de aire, el ángulo de inclinación del colector y la diferencia de temperatura entre el ambiente y el interior del colector. Las eficiencias de secado obtenidas fueron 86% para GHS, 71% para HHS, y 24% para SHS. El sistema híbrido (HHS) permitió ahorrar 20% de combustible comparado con el uso exclusivo de gas, sin sacrificar la calidad del producto seco. Además, tanto el modo híbrido como el de gas presentaron velocidades de secado similares durante el periodo de tasa constante ( $\sim 0.030$  kgH<sub>2</sub>O/kg m.s. min), lo que demuestra que el sistema híbrido mantiene la eficiencia del gas con menores costos operativos y mayor sustentabilidad.

(Dhanuskodi & S, 2014), diseñaron un secador solar híbrido con biomasa específicamente para el secado de nueces de la India (cashew). El sistema consistía en un colector solar de placa plana, un calentador de biomasa, una cámara de secado y un ventilador centrífugo, diseñado para operar tanto en modo de convección natural como forzada. El secador tenía capacidad para 40 kg de producto y operaba en un rango de temperatura entre 50 °C y 75 °C. La eficiencia del sistema en el modo forzado alcanzó un 5.08%, mientras que en el modo natural fue de 3.17%. En modo forzado, el secado de las nueces desde 9% hasta 3.5% de humedad se logró en 7 horas, mientras que el modo natural requirió 9 horas y el secado solar tradicional más de 14 horas. Además, se demostró que el secador proporcionó una calidad de producto superior, cumpliendo con los estándares de exportación indios, sin presencia significativa de granos rotos o quemados. El estudio concluyó que el diseño híbrido es una alternativa viable y eficiente para agricultores de

pequeña escala en países en desarrollo, permitiendo su uso en diversas condiciones climáticas (sol directo, noche, días nublados).

(Łechtańska et al., 2015), desarrollaron un secador híbrido microondas–infrarrojo para aplicaciones a pequeña escala, enfocado en mejorar la eficiencia energética y reducir los tiempos de secado en productos agrícolas. El sistema fue diseñado para operar en condiciones controladas, con una potencia ajustable de microondas y una lámpara de infrarrojo, permitiendo una distribución uniforme del calor en la cámara de secado. El estudio evaluó el desempeño energético y la cinética de secado sobre muestras vegetales con alto contenido de humedad, mostrando que el sistema híbrido logró tiempos de secado entre 2.5 y 4 veces menores en comparación con el secado por infrarrojo o microondas usados por separado. Además, se obtuvo una mejora sustancial en la eficiencia energética, alcanzando hasta un 60% de reducción en el consumo energético total. Los autores concluyen que este tipo de secadores híbridos no solares representa una solución eficiente y tecnológicamente viable para instalaciones agrícolas de bajo volumen, donde se requiere una operación rápida y controlada, especialmente para productos sensibles al calor prolongado.

(Anum et al., 2017), propusieron un secador solar-biomasa tipo túnel, equipado con respaldo mediante estufa de biomasa, ventilación forzada y un sistema de sensores para el control automático de temperatura y humedad. Esta solución fue diseñada específicamente para contextos rurales sin acceso constante a electricidad. En pruebas experimentales con productos agrícolas como mango, ají y pescado, el sistema mostró una eficiencia energética superior al 30% y logró mantener temperaturas internas constantes entre 50 y 60 °C aun sin radiación solar directa. La adaptabilidad del diseño a productos perecederos y su estabilidad térmica bajo variabilidad climática lo posicionan como una alternativa viable y robusta para comunidades vulnerables.

(Horuz et al., 2017), evaluaron un secador solar indirecto de doble paso con respaldo eléctrico, orientado al secado de alimentos como tomates y uvas en condiciones climáticas de Turquía. El sistema incorporó una superficie absorbente inclinada y ventilación forzada, logrando temperaturas estables de hasta 65 °C y una eficiencia térmica promedio del 25%. Los resultados mostraron una reducción significativa del tiempo de secado comparado con métodos convencionales, con mejoras en la calidad del producto final. Sin embargo, los autores enfatizaron la importancia de un manejo técnico adecuado del sistema para evitar sobrecalentamientos o fallos de ventilación que puedan afectar el rendimiento.

(Eltawil et al., 2018), diseñaron y evaluaron un secador solar híbrido indirecto, integrado con un sistema de respaldo eléctrico, orientado al secado de plantas medicinales sensibles como la menta. El sistema incluyó un colector solar tipo caja de 2.16 m<sup>2</sup> y una cámara de secado equipada con bandejas, operando en un rango térmico de 40 °C a 55 °C. La evaluación demostró una reducción del 30% en el tiempo de secado al utilizar respaldo eléctrico, sin comprometer la calidad fisicoquímica del producto. La eficiencia térmica promedio alcanzada fue del 32.8%, valor competitivo dentro del rango de secadores híbridos indirectos. El estudio concluyó que la integración de energía eléctrica como fuente complementaria asegura la estabilidad del proceso en condiciones de baja radiación solar, y propone esta solución como una alternativa viable, económica y escalable para regiones rurales dedicadas al secado de hierbas medicinales. La investigación subraya la importancia de mantener condiciones térmicas controladas para productos sensibles y valida el modelo híbrido como estrategia replicable en otros contextos agroindustriales.

(Hamdani et al., 2018), desarrollaron y evaluaron un secador solar híbrido alimentado por biomasa para el secado de pescado, considerando tanto el desempeño térmico como la viabilidad económica del sistema. El secador consta de una cámara de secado cubierta con vidrio, combinada con un intercambiador de calor de flujo cruzado conectado a un quemador de biomasa. En la prueba experimental, 25 kg de pescado fueron secados mediante una combinación de energía solar durante el día (09:00 a 16:00 h) y energía térmica de biomasa durante la noche (16:00 a 06:00 h), alcanzando una temperatura promedio de secado de 43.7 °C y una temperatura máxima de 66.7 °C. El sistema logró reducir el contenido de humedad al nivel deseado (~12%) en 15 horas de operación efectiva, con una eficiencia promedio del sistema de biomasa del 47%. En términos económicos, el sistema demostró ser viable: el costo de fabricación fue de \$1,870 USD, con una capacidad de producción de 100 kg de pescado. El análisis financiero indicó un valor presente neto (VPN) de \$21,091, una tasa interna de retorno (TIR) del 18.61%, y un punto de equilibrio de 2.6 años, lo que confirma que el secador híbrido es una solución técnica y económicamente.

(Maurer & Müller, 2019), evaluaron las características de secado del digestato de plantas de biogás en un sistema híbrido que combina calor residual (waste heat) proveniente de un motor CHP (cogeneración) y energía solar térmica. El secador fue diseñado como túnel de lecho fijo, con control de temperatura y flujo de aire. El estudio experimental utilizó digestato fresco con un contenido inicial de humedad de ~76%, alcanzando un 10% tras 6 horas de operación en

condiciones híbridas. Se observó que el modo híbrido mejoró considerablemente la eficiencia del proceso de secado respecto al uso exclusivo de energía solar o calor residual. El rendimiento energético fue de hasta 0.6 kg de agua evaporada por kWh térmico, con una eficiencia energética global de 25%, dependiendo de la tasa de ventilación. Los autores concluyen que esta tecnología representa una solución técnica viable para el tratamiento descentralizado de residuos orgánicos, especialmente en regiones con plantas de biogás en funcionamiento, al tiempo que ofrece beneficios energéticos y ambientales al reducir volúmenes y emisiones.

(Delgado-Plaza et al., 2019), desarrollaron un sistema híbrido innovador para el secado de cultivos y calefacción de invernaderos, que combina energía solar y geotérmica como fuentes térmicas complementarias. El sistema fue modelado y simulado para evaluar su desempeño térmico bajo condiciones climáticas de Irán, considerando una configuración con colectores solares planos y un sistema geotérmico de baja entalpía. Los resultados mostraron que el sistema alcanzó temperaturas del aire de hasta 70 °C en el invernadero, suficientes para el secado de productos agrícolas como frutas y hortalizas. La eficiencia térmica global se reportó en torno al 63%, con una reducción significativa en el consumo energético convencional. El estudio destacó la estabilidad térmica del sistema híbrido, especialmente durante condiciones de baja radiación solar, donde la energía geotérmica suplía la demanda térmica. Además, se evidenció que esta integración permite mantener el microclima ideal en el invernadero y optimizar el proceso de secado, mejorando la productividad y reduciendo el impacto ambiental. Los autores concluyen que esta configuración híbrida es viable para zonas rurales con potencial solar y geotérmico, y representa una solución sostenible para el procesamiento agrícola.

(Rupnar et al., 2020), desarrollaron un sistema de secado híbrido solar–biogás destinado al secado de cebolla, como alternativa sostenible para regiones rurales. El diseño consiste en un colector solar térmico plano y una cámara de combustión de biogás, combinados para suministrar aire caliente a una cámara de secado. El sistema fue evaluado experimentalmente, observando temperaturas de secado estables de 45–60 °C. El uso híbrido permitió reducir significativamente el tiempo de secado respecto al secado solo solar, y se demostró que la integración con biogás permite operación continua, incluso en condiciones de baja radiación solar. El consumo de biogás fue eficiente, y el sistema mostró viabilidad técnica y económica para su implementación rural. El estudio concluye que este tipo de tecnología híbrida puede contribuir a mejorar la calidad del

secado, reducir pérdidas postcosecha y fomentar el aprovechamiento de recursos locales como residuos orgánicos para generar biogás.

(Ndukwu et al., 2020), diseñaron y evaluaron un secador solar híbrido asistido por energía eólica, orientado al secado de hojas de *Ocimum gratissimum* (albahaca africana). El sistema integra un colector solar plano de aire con una cámara de secado de múltiples bandejas y un ventilador impulsado por una microturbina eólica para asegurar el flujo de aire continuo, especialmente durante periodos de baja irradiancia solar. Se evaluaron tres modos de operación: solar natural, solar forzado (con ventilador convencional), y solar-eólico híbrido. Los resultados mostraron que el sistema híbrido redujo significativamente el tiempo de secado, bajando la humedad de las hojas del 86% al 10% en menos de 5 horas, frente a 9 horas en modo solar natural. El sistema híbrido también alcanzó una eficiencia térmica máxima del 49.4%, con un mejor desempeño organoléptico en las muestras secadas. Los autores concluyen que la integración de energía eólica como asistencia mecánica al sistema solar térmico mejora la continuidad del proceso, especialmente en zonas rurales sin acceso eléctrico, posicionando esta tecnología como una opción sustentable y resiliente ante variabilidad climática.

(Singh & Gaur, 2021), desarrollaron e implementaron un secador solar híbrido tipo invernadero activo, integrado con un colector solar de tubos evacuados y un respaldo eléctrico, evaluando tanto su desempeño térmico como su viabilidad ambiental y económica. El sistema se diseñó para operar en condiciones controladas mediante ventilación forzada y calefacción auxiliar, permitiendo mantener temperaturas internas estables incluso bajo radiación variable. Las pruebas se realizaron con 20 kg de hojas de moringa, logrando una reducción del contenido de humedad del 83.5% al 8.9% en 5 horas de operación. El estudio reportó una eficiencia térmica del 41.3% y una reducción significativa en las pérdidas nutricionales y sensoriales en comparación con el secado convencional al sol. Desde el punto de vista ambiental, el uso del colector de tubos evacuados y el respaldo eléctrico alimentado parcialmente con energía solar permitió una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> del 68% respecto a sistemas eléctricos tradicionales. Además, el análisis económico arrojó un período de retorno de inversión (ROI) de 2.8 años, con una tasa interna de retorno (TIR) favorable para su implementación en zonas rurales de la India. Los autores concluyen que este tipo de tecnología híbrida representa una alternativa eficiente, sostenible y escalable para la

agroindustria descentralizada, especialmente en contextos climáticamente adversos o con recursos energéticos limitados.

La evolución de las tecnologías de secado ha dado lugar al desarrollo de sistemas híbridos que integran múltiples fuentes energéticas con el fin de aumentar la eficiencia, mejorar la calidad del producto final y garantizar la continuidad operativa en diversas condiciones climáticas la tabla 1 integra la información antes mencionada para tener un mejor manejo de la información.

Tabla 7

## Antecedentes de secado solar híbrido

Autor (Año)	Tipo de Secador	Generalidades	Eficiencia / Datos técnicos	Conclusión
Amer et al. (2010)	Solar-biomasa	Diseñado para productos agrícolas en Egipto, con colector solar de aire y cámara de combustión.	Reducción del 60% en tiempo de secado respecto al secado al sol.	Aumenta eficiencia energética y mejora la calidad del producto para zonas rurales.
Anum et al. (2016)	Solar indirecto con respaldo eléctrico	Diseñado para secado de ají picante con colector solar, cámara de secado y calefactor eléctrico.	Temperatura de 50–60°C; reducción del tiempo de secado de 30 a 12 horas.	Viable en climas variables; mejora la calidad final del producto.
Horuz y Ekechukwu (2017)	Solar-biomasa indirecto tipo túnel	Incluye colector solar, cámara de combustión y sistema de secado para zonas rurales.	Ahorro del 40% en biomasa, temperaturas de 50–70 °C.	Alta eficiencia térmica, útil en áreas sin acceso a electricidad.
Saravanan et al. (2014)	Solar-biomasa con respaldo eléctrico	Secado de moringa y cúrcuma en India, para preservar propiedades medicinales.	Reducción del tiempo de secado a menos de la mitad.	Tecnología efectiva para productos medicinales y hortícolas.
El-Tawil, El-Shazly y El-Kholy (2018)	Solar-biomasa indirecto para dátiles	Diseñado para condiciones áridas; mejora calidad postcosecha.	Secado en 8 h; reducción de humedad del 70% al 15%.	Reduce pérdidas y mejora eficiencia térmica.
Kowalski, Mierzwa y Pawłowski (2015)	Infrarrojo-microondas (no solar)	Secado de frutas; combinación de calentamiento volumétrico y superficial.	Secado rápido con buena conservación de propiedades.	Prometedor, pero requiere alta inversión energética.
Mortezapour et al. (2012)	Solar-PVT-bomba de calor (HP)	Diseñado para secado de azafrán con módulo fotovoltaico térmico.	Temperatura de 35–60°C; eficiencia global del 22.5%.	Alta eficiencia energética y adecuada para productos de alto valor.
Hamdani, Rizal y Muhammad (2018)	Solar-biomasa con colectores CPC	Aplicado al secado de tomates e higos en climas semiáridos.	Temperatura 60–75°C; reducción del tiempo de secado en 50%.	Alta eficiencia térmica y adaptable a zonas rurales.
Ndukwe, Eke y Uchegbu (2020)	Solar-eólico	Ventilador operado por turbina eólica; sistema pasivo de secado.	Mejor rendimiento con ventilación constante; estabilidad térmica.	Tecnología autónoma para zonas sin red eléctrica.
Pushpendra, Patel y Kumar (2021)	Híbrido activo con colector de tubos al vacío	Diseñado para secado en invernadero; sistema activo y eficiente.	Secado en 18 h con reducción del consumo energético.	Ecológico y eficiente para productos hortícolas.
López-Vidana et al. (2013)	Solar-biomasa indirecto	Diseñado para comunidades rurales sin electricidad; fabricado con materiales locales.	Temperatura de 58–60°C; tiempo de secado: 12 h.	Adecuado para zonas marginadas, favorece transferencia tecnológica.
Maurer & Müller (2019)	Solar-calor residual (waste heat)	Aplicado al secado de digestato de biogás en lecho fijo.	Eficiencia térmica del 25%; consumo de 0.6 kg agua/kWh.	Aprovecha energía residual; solución sustentable.
Rupnar et al. (2020)	Solar-biogás	Diseñado para secado de cebolla; uso continuo día-noche.	Temperatura 45–60°C; autonomía con respaldo de biogás.	Eficiente y viable en entornos rurales con biodigestores.
Mohammadi y	Solar-geotérmico	Aplicado al secado de cultivos y calefacción de invernadero.	Temperatura hasta 70 °C; eficiencia térmica de 63%.	Ofrece estabilidad térmica y reducción de costos energéticos.

---

Ghasempour (2019)

---

**Tabla 8****Secadores híbridos realizados en la UNICACH y Universidades en Chiapas**

<b>Autor</b>	<b>Hibridación</b>
(Morales Ovando & Dominguez Espinosa, 2016)	Solar térmico-Solar FV
(Pavón Gómez, 2015)	termosolar- eólico
(Gutiérrez Gutiérrez, 2024)	solar biomásico
(Conde Díaz, 2020)	solar - biomásico rotatorio
(Iglesias Díaz, 2013)	solar térmico- PCM
(Nein, 2022)	Solar Térmico(Tubos al vacío)/solar FV
(Camacho-Martinez et al., 2019)	Solar Terminal-Solar FV

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, así como otras instituciones educativas, han desarrollado proyectos notables que aportan conocimiento valioso a este campo como se observa en la tabla 2. Demostrando el potencial de innovación regional. Sin embargo, la escasa diseminación tecnológica obedece, en buena medida, a la variabilidad de los contextos de implementación y a la omisión de parámetros sociales, culturales u operativos en el diseño de los sistemas.

En este sentido, la diversidad productiva, climática y sociotécnica de los entornos donde se busca aplicar la tecnología hace inviable el desarrollo de un secador híbrido universal y multipropósito. Por el contrario, la literatura enfatiza la necesidad de avanzar hacia metodologías de diseño flexibles, participativas y adaptadas a las particularidades de cada contexto, con el fin de favorecer una inserción tecnológica efectiva y un impacto sostenible en el sector agroalimentario.

### *1.2.1. Aplicación de Métodos MCDM en Secadores Híbridos*

El diseño e implementación de secadores híbridos requiere considerar múltiples variables técnicas, energéticas y operativas. Para atender esta complejidad, se han aplicado distintos métodos de decisión multicriterio (MCDM) que permiten integrar criterios heterogéneos y jerarquizar

alternativas con base en sus atributos técnicos. Estos métodos son especialmente relevantes en contextos donde se deben comparar diversas configuraciones de secado solar híbrido —como combinaciones con biomasa, electricidad o gas— bajo restricciones de clima, costo, o tipo de producto.

En particular, métodos como AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) y sus combinaciones con enfoques como Delphi han sido utilizados para jerarquizar criterios, comparar diseños, evaluar alternativas de hibridación y analizar la robustez de los modelos propuestos. Los estudios revisados en esta sección muestran cómo estos enfoques han sido empleados tanto en contextos académicos como aplicados, y revelan la necesidad de metodologías integradas que consideren no solo la eficiencia técnica, sino también la pertinencia contextual, el impacto social y la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de secado.

Este análisis contribuye a visibilizar las brechas existentes, como la escasa incorporación de criterios sociales o de aceptación tecnológica, y fundamenta la necesidad de avanzar hacia modelos de evaluación más holísticos, transparentes y adaptables a condiciones locales.

(Zhao & Guo, 2014) desarrollaron un modelo híbrido de decisión multicriterio (MCDM) para la selección sostenible de proveedores de equipos térmicos, integrando los métodos Best-Worst Method (BWM) y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). El estudio establece un marco de evaluación integral basado en criterios de sostenibilidad agrupados en tres dimensiones principales: ambiental (emisiones, consumo energético), social (responsabilidad social corporativa, seguridad laboral) y económica (costo, calidad, capacidad técnica). La combinación BWM–TOPSIS permitió primero calcular los pesos óptimos de los criterios (BWM) y posteriormente clasificar a los proveedores con base en su cercanía a la solución ideal (TOPSIS). Este enfoque mostró una mayor estabilidad y coherencia en los resultados frente a métodos tradicionales. Aunque el caso de estudio no se centra en secadores solares, este trabajo representa un antecedente metodológico relevante para la aplicación de herramientas MCDM híbridas en decisiones tecnológicas dentro del sector térmico, reforzando la importancia de incorporar múltiples dimensiones de evaluación en contextos industriales complejos.

(Tan et al., 2016) propusieron una evaluación comparativa de sistemas de generación híbrida basados en biomasa y energía solar térmica, aplicando una metodología híbrida MCDM que combina el método Best-Worst Method (BWM) para la ponderación de criterios y el método VIKOR para la priorización de alternativas. Los sistemas fueron evaluados bajo múltiples criterios de sostenibilidad, agrupados en dimensiones ambientales (emisiones, uso del suelo, ahorro energético), económicas (costo nivelado de energía, retorno de inversión) y sociales (creación de empleo, aceptación pública). El estudio concluyó que el sistema solar térmico obtuvo un mejor rendimiento en términos ambientales, mientras que la biomasa resultó más favorable económicamente. La aplicación de BWM–VIKOR demostró ser eficaz para capturar compensaciones entre dimensiones de sostenibilidad en sistemas híbridos. Aunque el caso de estudio no trata directamente sobre secadores solares, este enfoque metodológico proporciona un marco robusto y replicable para evaluar tecnologías híbridas térmicas en función de múltiples objetivos de sostenibilidad.

(Armah et al., 2021) desarrollaron y evaluaron experimentalmente un secador solar híbrido fotovoltaico–térmico (PVT) para el secado de cassava (yuca) en una comunidad rural de Ghana. El sistema integró un colector PVT que suministra simultáneamente energía eléctrica y térmica, permitiendo el funcionamiento de un ventilador para convección forzada y mejorando la estabilidad térmica del proceso. Para seleccionar el sistema más adecuado, los autores aplicaron el método Analytic Hierarchy Process (AHP), comparando el secador híbrido con un secador solar pasivo y el secado al sol abierto, bajo los criterios de costo, eficiencia de secado, calidad del producto, tiempo de secado y facilidad de operación. Los resultados mostraron que el secador híbrido redujo el tiempo de secado en un 52% respecto al secado al sol, con una eficiencia térmica de 31.8%, y mejoró la calidad del producto final. El AHP arrojó que el sistema híbrido era la alternativa óptima, mostrando la utilidad de los métodos multicriterio para apoyar decisiones tecnológicas en contextos rurales de baja capacidad energética.

(Joseph O. Akowuah et al., 2023) realizaron una evaluación comparativa de tres sistemas de secado de baja capacidad diseñados para pequeños productores de maíz en Ghana: el AflaStop (EasyDry M500), el STR Column dryer y el Solar Bubble dryer. La comparación se basó en criterios técnicos tales como la eficiencia de secado, tasa de secado, durabilidad, facilidad de uso, costo de fabricación y costo operativo, utilizando el método AHP para jerarquizar las alternativas

y utilizando criterios como tasa de secado, eficiencia de secado, durabilidad, facilidad de uso, versatilidad y costo de adquisición y costo operacional. Los resultados mostraron que la eficiencia de secado fue mayor en el AflaStop (81.07%), seguido por el STR Column (64.65%) y el Solar Bubble (36.17%), mientras que la tasa de secado fue también superior en el AflaStop (2.20%/h). Sin embargo, al aplicar AHP, el STR Column dryer obtuvo la mayor prioridad global (41%), debido a su balance entre desempeño técnico y simplicidad operativa, superando al AflaStop (34%) y al Solar Bubble (25%). El estudio demuestra que el uso del AHP permite una selección estructurada y transparente entre tecnologías locales de bajo costo, promoviendo decisiones más adecuadas al contexto de agricultores de pequeña escala, y evidencia la utilidad de los métodos multicriterio para mejorar la transferencia y adopción tecnológica en el ámbito agrícola.

(Deb et al., 2025) desarrollaron una metodología de evaluación para la selección sostenible de tecnologías de secado solar, aplicando una combinación de fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process difuso) y fuzzy TOPSIS como herramientas de decisión multicriterio. El estudio analizó cinco tecnologías de secado solar utilizadas en Bangladesh, integrando criterios de evaluación agrupados en dimensiones técnicas (eficiencia de secado, capacidad térmica), económicas (costo de capital, costos operativos), ambientales (impacto ecológico, uso energético) y sociales (aceptación comunitaria, seguridad de operación). Los resultados indicaron que el secador indirecto con colector plano y ventilación forzada fue la alternativa más robusta frente a los criterios evaluados. La aplicación del enfoque difuso permitió capturar la incertidumbre inherente a las valoraciones cualitativas y mejorar la robustez del proceso de decisión. Este estudio representa un aporte metodológico clave en el uso de herramientas MCDM avanzadas para apoyar el diseño y selección de tecnologías de secado solar apropiadas para países en desarrollo.

(Nurba et al., 2025) optimizaron el sistema de aeración en un secador de lecho profundo para arroz mediante simulación CFD y análisis multicriterio AHP-TOPSIS. Evaluaron cuatro configuraciones de piso (cónico e inclinado) y formación de tuberías (rectangular y circular), concluyendo que el modelo con piso inclinado y tuberías circulares (Modelo 4) ofrecía la mayor uniformidad de flujo de aire, temperatura, presión y humedad relativa, alcanzando una tasa de secado de  $2.22\% \text{ h}^{-1}$  y una humedad final promedio del 13.9%. Esta configuración obtuvo la mayor preferencia (0.79) en el análisis TOPSIS, destacándose como la opción más eficiente para el secado uniforme de grano en contextos postcosecha.

**Tabla 9****Métodos multicriterio implementados en secadores solares**

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Método utilizado</b>
Zhao & Guo	2014	BWM + TOPSIS
Tan et al.	2016	BWM + VIKOR
Armah et al.	2021	AHP
Joseph O. Akowuah et al.	2023	AHP
Deb et al.	2025	Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS
NURBA et al.	2025	AHP + TOPSIS

La tabla 3 presenta la síntesis de una serie de estudios clave que han aplicado métodos de decisión multicriterio (MCDM) en el contexto de selección y evaluación de tecnologías energéticas, particularmente centradas en secado solar e híbrido. En estos trabajos, se identifican criterios recurrentes como el costo de implementación, la eficiencia térmica, la sostenibilidad ambiental, así como variables de tipo social como la facilidad de uso o la aceptación comunitaria.

En conclusión, los antecedentes muestran un uso cada vez más extendido de los **métodos de decisión multicriterio (MCDM)** en la evaluación de tecnologías de secado; sin embargo, la mayoría de los estudios aún se realizan bajo condiciones técnicas idealizadas, con poca participación comunitaria, limitada adaptación cultural y sin validación en contextos reales. Esto evidencia la necesidad de metodologías que integren, junto a los criterios técnicos y económicos, dimensiones sociales y ambientales evaluadas de manera participativa.

Si bien los métodos MCDM han sido aplicados desde hace décadas en múltiples ámbitos de la ingeniería y la gestión tecnológica, en la actualidad se observa un **creciente interés en su aplicación a sistemas térmicos**, particularmente en el diseño y evaluación de tecnologías de secado. Esta tendencia abre la posibilidad de fortalecer la **transferencia tecnológica** y de

incrementar la **incidencia social** de los proyectos, al permitir una selección de alternativas más contextualizada, transparente y alineada con las necesidades reales de los usuarios finales.

### ***1.2.2. Vacíos identificados en la literatura***

Estos antecedentes demuestran que el uso de MCDM ha sido útil para sistematizar decisiones tecnológicas en secado híbrido. No obstante, se identifican vacíos comunes:

- Falta de integración de variables centradas en el usuario final: como mantenimiento, adaptabilidad operativa.
- Enfoque restringido a eficiencia térmica: con poca atención a otros factores relevantes como disponibilidad energética local o autonomía.
- Escasa validación práctica en campo o en contextos operativos reales: muchos estudios se limitan a modelos simulados.

### ***1.2.3. Métodos Complementarios Identificados para Fortalecer el Proceso de Evaluación***

Diversos estudios han propuesto la incorporación de métodos complementarios al análisis multicriterio, con el fin de mejorar la consistencia y robustez de los resultados. El método Delphi, por ejemplo, ha sido empleado como técnica de consenso entre expertos para definir criterios relevantes en etapas de diseño o evaluación tecnológica (Pathak et al., 2022; Zakaria & Ahmad, 2022), De forma similar, estudios como el de (Si et al., 2016) destacan que Delphi permite minimizar la subjetividad en la definición de criterios, especialmente cuando se desea aplicar métodos como AHP, ELECTRE o PROMETHEE en tecnologías híbridas energéticas.

Por otro lado, técnicas como Morris Screening (análisis de sensibilidad univariado) o el índice de Sobol han demostrado su utilidad para realizar análisis de sensibilidad sobre los pesos o parámetros del modelo multicriterio. En el caso de tecnologías híbridas de secado,(Hermansyah et al., 2023) aplicaron análisis de sensibilidad para evaluar cuestiones económicas, por otra parte (Kokate, 2024) utilizaron el índice de Sobol para analizar cómo variaciones en la geométrica, formas de almacenamiento de energía y aplicaciones modificaban el comportamiento del sistema. (Balasundaram et al., 2023) por su parte, implementaron el método Morris Screening como técnica

de tamizado de criterios en el método Vikor para selección de materiales de cambio de fase en secadores solares.

Si bien los métodos multicriterio abarcan un espectro amplio de aplicaciones en distintos campos de la ingeniería y las ciencias aplicadas, en esta investigación el análisis se focaliza específicamente en su implementación en la selección de fuentes de energía alternas para el diseño de secadores solares híbridos o adaptar secadores de alimentos ya existentes, dado en el desarrollo de estas tecnologías y su baja transferencia tecnológica. Este enfoque permite adaptar las herramientas multicriterio al contexto particular del secado de alimentos, considerando criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales que influyen directamente en la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas. En complemento a los métodos seleccionados, se incorpora el Decision-Making Paradigm (Budnick et al., 1988) como un marco orientador que organiza de manera lógica y secuencial las fases de la investigación. Si bien no constituye un objetivo particular del estudio, su aplicación brinda soporte metodológico al estructurar la identificación de criterios, la ponderación, la evaluación de alternativas y la validación de resultados, fortaleciendo así la coherencia y proceso investigativo.

### **1.3. Definición del Problema**

El problema central de esta investigación es la falta de metodologías sistemáticas para seleccionar fuentes alternas de energía en deshidratadores de alimentos, lo que ha provocado diseños ineficientes, sobrecostos, fallas operativas y baja adopción tecnológica en contextos productivos reales.

### **1.4. Hipótesis**

La integración de una metodología multicriterio basada en Delphi AHP TOPSIS complementada con un análisis de sensibilidad para la selección de fuentes alternas de energía en secadores híbridos de alimentos, permitiría mejorar la pertinencia y solidez técnica en la selección de configuraciones óptimas de secadores híbridos.

## 1.5. Justificación

Esta investigación es necesaria porque existe una brecha metodológica en la fase de diseño. La selección actual se basa frecuentemente en evaluaciones parciales que consideran parámetros de forma aislada, careciendo de un marco de trabajo sistemático que integre un análisis cuantitativo para una toma de decisión integral.

Es importante el desarrollo de una metodología robusta para la selección de fuentes de energía en secadores híbridos ya que es fundamental para garantizar una transferencia tecnológica sostenible, al proporcionar un marco de decisión confiable que asegure la certidumbre alimentaria (mediante la reducción de pérdidas postcosecha) y la rentabilidad del sector agroindustrial, mediante la optimización de recursos energéticos y económicos.

Esta investigación aporta:

**En lo técnico:** La metodología propuesta es esencial para fundamentar técnicamente el proceso de hibridación, integrando criterios multidimensionales que trascienden lo técnico-económico e incorporan dimensiones sociales y ambientales. Esto asegura que la selección de fuentes de energía no solo sea eficiente y rentable.

**En lo social:** al garantizar que los sistemas sean técnicamente accesibles, culturalmente apropiados y económicamente asequibles para los usuarios finales, promoviendo la adopción efectiva de la tecnología, el fortalecimiento de capacidades locales y la mejora directa en los ingresos y la seguridad alimentaria de las comunidades.

**En lo Económico:** La metodología asegura la viabilidad financiera del sistema híbrido al integrar criterios de rentabilidad de largo plazo, sociales y ambientales en un enfoque participativo. Esto permite identificar configuraciones que equilibren el desempeño técnico, la sostenibilidad económica, la aceptación social y el mínimo impacto ambiental.

**En lo ambiental:** La metodología garantiza que la configuración híbrida resultante minimice los impactos ambientales adversos a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema, esto asegura que la solución tecnológica no solo sea eficiente en operación, sino también sostenible.

## 1.6. **Objetivo General**

Desarrollar una metodología de apoyo a la toma de decisiones, basada en métodos de análisis multicriterio complementada con un estudio de sensibilidad orientado a seleccionar de fuentes alternas de energía para hibridar deshidratadores de alimentos.

## 1.7. **Objetivos Específicos**

1. Diseñar una metodología estructurada y desarrollar una herramienta computacional que implemente los métodos de análisis multicriterio seleccionados para evaluar y ranquear las fuentes alternativas de energía según un conjunto de criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales definidos.
2. Integrar un módulo de estudio de sensibilidad dentro de la herramienta computacional que permita analizar la robustez de los resultados ante variaciones en los pesos de los criterios y en las puntuaciones de las alternativas, identificando los parámetros más críticos en la toma de decisiones.
3. Validar la metodología y la herramienta propuesta mediante casos de estudio en deshidratadores de alimentos, uno posterior a la implementación y otro previo bajo un enfoque participativo, con el fin de demostrar su utilidad en la selección de la fuente de energía y en el apoyo a la toma de decisiones.

## 1.8. Estructura del documento

La presente tesis está estructurada en cinco capítulos, organizados de la siguiente forma:

- **Capítulo 1. Introducción.** Se presenta el contexto general del problema, los antecedentes sobre tecnologías de secado híbrido, el planteamiento del problema, la justificación, la hipótesis y los objetivos de investigación.
- **Capítulo 2. Fundamentos teóricos.** Se revisan los fundamentos conceptuales y técnicos relacionados con el método Delphi, los métodos de decisión multicriterio (AHP y TOPSIS), el análisis de sensibilidad (Morris y Sobol), así como enfoques de evaluación tecnológica integradora.
- **Capítulo 3. Metodología.** Se describe detalladamente la metodología propuesta, incluyendo el proceso Delphi para la validación de criterios, la jerarquización mediante AHP, la evaluación con TOPSIS, y el análisis de sensibilidad. También se expone el desarrollo de la herramienta computacional y su lógica operativa.
- **Capítulo 4. Resultados.** Se presentan los resultados obtenidos en cada etapa del proceso, desde la validación de criterios hasta el ranking de alternativas, con aplicación en un caso de estudio real. Se incluyen gráficas, matrices, análisis de sensibilidad y evaluación comparativa.
- **Conclusiones y recomendaciones.** Se resumen los hallazgos principales, se discuten las implicaciones metodológicas y tecnológicas del trabajo, y se plantean recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras de la herramienta.

## Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sustentan la metodología propuesta para la selección de fuentes alternas de energía para sistemas de secado. En primer lugar, el método Delphi para el consenso de indicadores e importancia; la implementación del método AHP para la obtención de pesos relativos; y TOPSIS para la evaluación y jerarquización de alternativas. Finalmente, se sintetizan los procedimientos de análisis de sensibilidad (Morris Screening y Sobol) requeridos para examinar la robustez de los resultados, junto con enfoques de evaluación de la metodología propuesta que permiten verificar el desempeño técnico, viabilidad económica, operación/mantenimiento y consideraciones ambientales y sociales. Con ello, el capítulo provee el marco conceptual y operativo necesario para desarrollar la metodología y sustentar los análisis presentados posteriormente.

### 2.1. Método Delphi

El método Delphi surgió a comienzos de los años cincuenta dentro del proyecto de investigación de la corporación RAND, definido como una técnica estructurada de comunicación interactiva basada en rondas sucesivas de cuestionarios anónimos, Delphi busca generar un consenso fundamentado entre un panel de expertos, Sus principales características incluyen el anonimato de los participantes, retroalimentación controlada, iteración y uso de estadísticas resumidas entre rondas.

El funcionamiento secuencial del método consiste en:

1. Selección de expertos, elegidos por su conocimiento relevante y diversidad de perspectivas.
2. Primera ronda de cuestionarios, donde se recogen criterios propuestos sin discusión grupal directa.
3. Resumen anónimo de respuestas, que incluye mediana, rango intercuartílico y argumentos clave.

4. Rondas sucesivas, donde los expertos revisan sus juicios originales a la luz de la retroalimentación, promoviendo convergencia del grupo.
5. Criterio de cierre, definido por estabilidad en las opiniones (p. ej., cambio mínimo entre rondas) o por número determinado de iteraciones.

Este método ha sido ampliamente validado en ámbitos globales, extendiendo su uso a áreas como salud, educación, energía renovable y políticas públicas.

### 2.1.1. Estadísticas Descriptivas para Validar Consenso

- Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de cada criterio:

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \mu_i)^2} \quad (2)$$

- $x_{ij}$  : Puntuación del experto j sobre el criterio i.
- Criterio de consenso típico:  $\sigma_i \leq 0.20$  (bajo nivel de dispersión).

- Coeficiente de variación (CV):

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (3)$$

- Útil para priorizar criterios con baja variabilidad relativa

### 2.1.2. Coeficiente de Kendall $W$ (grado de concordancia)

- Suma de rangos por criterio:

$$R_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (4)$$

- Promedio de rangos:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

- El método Delphi utiliza el **coeficiente de concordancia de Kendall (W)** ecuación 7 para evaluar el nivel de consenso entre expertos.

Dispersión de suma de rangos ecuación 6

$$S = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \quad (6)$$

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2(n^3 - n)} \quad (7)$$

Rango  $0 \leq W \leq 1$ , donde valores cercanos a 1 indican alta coherencia

- Prueba de significancia (chi-cuadrado)

$$X^2 \approx m(n - 1)W \quad (8)$$

Comparar con una distribución  $X^2$  con  $n - 1$  grados de libertad, un  $p < 0.05$  confirma consenso significativo.

a implementación del método Delphi combina indicadores descriptivos ( $\mu$ ,  $\sigma$ , CV) con un indicador global de consenso (Kendall W), asegurando rigor en la **validación empírica de criterios**.

## 2.2. Método AHP

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) fue propuesto por Thomas L. Saaty en 1980 como una técnica estructurada para la toma de decisiones complejas con múltiples criterios. Este método permite descomponer un problema en una jerarquía de niveles (objetivo, criterios, subcriterios y alternativas) y asignar pesos relativos mediante comparaciones por pares, evaluadas generalmente por expertos. El AHP ha sido ampliamente utilizado en planificación energética, selección tecnológica y evaluación de proyectos debido a su capacidad para manejar tanto información cuantitativa como cualitativa (Saaty, 1982, 2008)

### 2.2.1. Fundamentos del método

La aplicación del AHP comienza con la estructuración jerárquica del problema. En el nivel superior se ubica el objetivo general, seguido de los criterios relevantes en el segundo nivel, posibles subcriterios en el tercero, y finalmente, las alternativas de decisión.

Posteriormente, se realizan comparaciones por pares entre los criterios para determinar su importancia relativa respecto al objetivo. Estas comparaciones se basan en una escala fundamental de 1 a 9 propuesta por Saaty, donde:

**Tabla 10***Escala de Saaty*

Valor	Interpretación
1	Igual importancia
3	Moderada importancia
5	Fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Importancia extrema

Valores intermedios (2, 4, 6, 8) se usan cuando se requiere matizar los juicios.

a) *Ecuaciones del método AHP*

1. Matriz de comparación por pares:

$$A = [a_{ij}] \text{ Donde } a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1$$

2. Normalización de columnas:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (9)$$

3. Cálculo del vector de prioridades (pesos):

$$w = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad (10)$$

4. Valor propio máximo:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} \quad (11)$$

5. Índice de consistencia (CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (12)$$

6. Índice de Razón de Consistencia (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

- Si  $CR \leq 0.2$  (20%), se considera que los juicios son consistentes.
- Si  $CR > 0.2$ , se recomienda revisar los juicios, ya que hay una inconsistencia significativa.

Donde:

- CI es el Índice de Consistencia calculado a partir de los valores propios de la matriz de comparación.
- RI es el valor promedio del Índice de Consistencia que obtendrían matrices completamente aleatorias del mismo tamaño.

### 2.3. Métodos TOPSIS Fundamentos y Cálculos

El TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) fue desarrollado por (Hwang & Yoon, 1981) Su fundamento es elegir la alternativa que minimiza la distancia al ideal

positivo y maximiza la distancia al ideal negativo, en un espacio normalizado. El método incluye los siguientes pasos clave:

1. Construcción de matriz de decisión (alternativas vs. criterios).

Sea  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  el conjunto de  $m$  alternativas, y  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  el conjunto de  $n$  criterios. La matriz de decisión se representa como:

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (14)$$

Donde  $x_{ij}$  representa el desempeño de la alternativa  $A_i$  con respecto al criterio  $C_j$ .

2. Normalización vectorial de los datos.

Se aplica la normalización vectorial:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (15)$$

Esto asegura que los valores estén en una escala común sin afectar la proporcionalidad.

3. Construcción de la matriz ponderada normalizada.

Multiplicamos cada elemento normalizado por el peso del criterio  $w_j$ :

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (16)$$

Donde  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ , y los pesos pueden provenir, por ejemplo, del método AHP.

4. Determinación de la Solución ideal positiva ( $A^+$ ) y negativa ( $A^-$ ).

$$A^+ = \{\max(v_{ij}) \text{ si beneficio; } \min(v_{ij}) \text{ si costo}\}$$

$$A^- = \{\min(v_{ij}) \text{ si beneficio; } \max(v_{ij}) \text{ si costo}\}$$

5. Cálculo de distancias Euclidianas a la solución ideal positiva ( $A^+$ ) y negativa ( $A^-$ ).

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (17)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (18)$$

6. Cálculo del índice de cercanía, que indica la posición relativa de cada alternativa entre los ideales (Roszkowska, E., 2011)

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (19)$$

Donde:

- $C_i \in [0,1]$
- Un valor más cercano a 1 indica mayor cercanía a la solución ideal y, por tanto, mejor posicionamiento en el ranking.

7. Ordenamiento de las alternativas

Se ordenan las alternativas de mayor a menor según sus valores de  $C_i$ , obteniendo así el ranking final.

TOPSIS es valorado por su simplicidad computacional, transparencia y capacidad para combinar datos no homogéneos. Sin embargo, su sensibilidad al peso de criterios y posibles reversos de ranking son limitaciones reconocidas (Taherdoost & Madanchian, 2023).

## 2.4. Análisis de Sensibilidad y Robustez del Modelo

En el contexto de los métodos de decisión multicriterio (MCDM), la robustez del modelo y la validez de sus resultados son fundamentales para garantizar que las decisiones tomadas no dependan excesivamente de variaciones mínimas en los pesos de los criterios o en los valores de entrada. El análisis de sensibilidad se convierte en una herramienta crítica para evaluar el impacto que dichas perturbaciones tienen sobre el ranking de alternativas. Métodos como Morris Screening e Índices de Sobol permiten realizar una evaluación estructurada de la influencia de cada variable o combinación de variables sobre los resultados, contribuyendo a identificar los criterios más decisivos y validar la confiabilidad del modelo. Estas herramientas son particularmente útiles en sistemas complejos, no lineales, e interdisciplinarios, como la selección de tecnologías híbridas de secado.

El análisis de sensibilidad es un procedimiento mediante el cual se examina cómo varía la salida de un modelo frente a cambios en las entradas o parámetros. En el contexto de modelos MCDM, como AHP o TOPSIS, esta herramienta permite evaluar la estabilidad del ranking de alternativas frente a cambios en los pesos de los criterios, ya sea por incertidumbre, errores de juicio o variabilidad inherente en los datos.

Este tipo de análisis cumple con múltiples propósitos:

- Identifica los criterios más influyentes sobre el resultado final.
- Permite detectar alternativas cuya posición en el ranking cambia drásticamente ante pequeñas perturbaciones (es decir, alternativas no robustas).

- Mejora la transparencia del modelo, fomentando su aceptación por parte de los tomadores de decisión.

Entre los enfoques más utilizados se encuentran los métodos locales (variaciones univariadas de un criterio a la vez) y los métodos globales (consideran interacciones entre múltiples variables). Estudios como los de (Saltelli et al., 2008) y (Sarrazin et al., 2016) destacan la importancia de aplicar análisis de sensibilidad en ingeniería ambiental y energética para validar decisiones basadas en modelos complejos.

#### ***2.4.1. Análisis de Morris Screening: Evaluación Uni Variada de Sensibilidad***

El análisis de Morris Screening, propuesto por Morris (1991), es una técnica de análisis de sensibilidad global que permite identificar las variables más influyentes en un modelo con bajo costo computacional. Es particularmente útil en etapas exploratorias, donde se desea reducir el número de variables a considerar en modelos más complejos.

Fundamento del análisis

El método consiste en aplicar un diseño de un solo factor a la vez (OAT: One-At-a-Time) sobre las variables de entrada  $x_i$  evaluando cómo cambian los resultados y del modelo. La variación elemental de una entrada  $x_i$  se define como:

$$\mu_i^* = \frac{1}{R} E E_k^{(i)} \quad (20)$$

En el método de Morris: desviación estándar de los efectos elementales (mide no linealidad e interacciones).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{R-1} \sum_{k=1}^R (EE_k^{(i)} - \bar{E}E^i)^2} \quad (21)$$

Donde  $\Delta$  es un pequeño cambio en la variable  $X_i$

Se realizan múltiples simulaciones para cada variable, obteniendo una distribución de efectos elementales. A partir de esta, se calculan dos métricas clave:

$\mu^*$ : Promedio absoluto de los efectos elementales, indica la influencia general de la variable.

$\sigma$ : Desviación estándar de los efectos elementales, indica la interacción con otras variables o la no linealidad del modelo.

### 2.4.2. Índice de Sobol: Análisis Global de Varianza

El índice de Sobol es uno de los métodos más robustos para realizar análisis global de sensibilidad. A diferencia del enfoque univariado del método de Morris, Sobol permite evaluar la contribución de cada variable, y de las combinaciones entre ellas, a la varianza total del modelo. Es adecuado para modelos no lineales y con interacciones complejas, como ocurre en evaluaciones multicriterio de tecnologías híbridas.

Fundamento matemático

Sea  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$  el resultado del modelo, donde  $X_i$  son las variables de entrada, el índice de Sobol de primer orden para la variable  $X_i$  se define como:

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{\text{Var}x_i[E_{X_{\sim i}}(Y|X_i)]}{\text{Var}(Y)} \quad (22)$$

Sobol: índice total (aporta el efecto propio de  $X_i$  más todas sus interacciones con otras variables).

$$S_{Ti} = 1 - \frac{\text{Var}x_{\sim i}[E_{X_{\sim i}}(Y|X_{\sim i})]}{\text{Var}(Y)} \quad (23)$$

Este índice incluye la influencia directa e indirecta (interacciones) de la variable  $X_i$ .

Interpretación.

- Si  $S_i \approx S_{Ti}$ : el criterio no tiene interacción significativa con otros.
- Si  $S_i \ll S_{Ti}$ : el criterio participa en interacciones importantes.

Criterios teóricos de interpretación. La evaluación se apoya en tres ejes: (1) fidelidad metodológica (consistencia interna del encadenamiento, reglas de decisión explícitas, reproducibilidad); (2) adecuación contextual (alineación con restricciones técnicas, operativas y socioculturales del entorno); y (3) robustez (estabilidad de la recomendación ante variaciones plausibles de supuestos, informada por análisis de sensibilidad). El razonamiento explicativo se articula mediante construcción de explicaciones y análisis de fallas (*failure modes*) observadas en el caso de bajo desempeño.

Validez y confiabilidad. Para fortalecer validez interna, se establecen cadenas de evidencia y criterios previos de aceptación/rechazo de resultados parciales. La validez externa se aborda delimitando condiciones de frontera (alcance y contexto) y documentando supuestos. La confiabilidad se asegura con protocolos claros, bitácoras de decisiones y triangulación (método, fuentes, participantes). Con ello, la comparación pre-diseño / post-implementación permite valorar, con base teórica, la *efectividad* de la metodología propuesta.

## 2.5. Justificación: Enfoque Metodológico Integrado

La implementación de tecnologías de secado híbridas en diversos contextos, particularmente rurales, exige una metodología que articule rigurosidad analítica con pertinencia contextual. Por esta razón, el presente estudio propone una integración entre métodos estructurados de decisión multicriterio (Delphi, AHP y TOPSIS), complementados con un análisis de sensibilidad (Morris Screening y Sobol), lo cual permite capturar tanto la experiencia técnica de expertos como los

saberes y prioridades de los usuarios finales, asegurando al mismo tiempo la robustez y fiabilidad de los resultados obtenidos.

Esta convergencia metodológica permite:

- Jerarquizar criterios con base empírica y consensuada.
- Evaluar alternativas de manera sistemática y transparente.
- Validar y rediseñar tecnologías desde una lógica comunitaria y adaptativa.
- Confirmar la estabilidad de los resultados frente a variación de los datos y parámetros mediante el análisis de sensibilidad.
- Evaluar la efectividad de la metodología propuesta a través de un caso de estudio de prediseño y el contraste de sus resultados con las lecciones aprendidas de un caso de post implementación de bajo desempeño, cerrando el ciclo diseño–validación–aprendizaje.

El enfoque integrado propuesto supera las limitaciones de estudio previos que han adoptado perspectivas unidimensionales o exclusivamente técnicas, abriendo camino hacia un diseño situado, justo, sostenible y respaldado por un proceso de validación cuantitativa que fortalece la toma de decisiones en tecnologías de secado.

## Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta el diseño metodológico adoptado por la investigación, el cual es mixto, de carácter secuencial, participativo y aplicado, orientado al diseño, implementación y validación de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la selección de fuentes alternas de energía en secadores híbridos en diversos contextos. La metodología integra criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales dentro de un proceso estructurado en fases interdependientes.

Este enfoque responde a la necesidad de resolver no solo los desafíos técnicos de la transferencia energética, sino también los relacionados con la adopción y pertinencia tecnológica en territorios con condiciones particulares de uso, acceso, cultura y disponibilidad energética. En consecuencia, se articulan técnicas cualitativas —para la captura de percepciones y validación contextual— con técnicas cuantitativas —para la jerarquización de criterios, la evaluación de alternativas y la simulación de escenarios—, todo ello implementado en una herramienta computacional modular que fortalece la aplicabilidad y transferibilidad de los resultados.

### 3.1. Diseño de la Metodología y Desarrollo de la Herramienta Computacional

En esta sección se presenta el diseño metodológico adoptado, de carácter mixto y aplicado, estructurado en fases secuenciales interdependientes según el enfoque de (Budnick et al., 1988). El proceso combina validación de criterios mediante Delphi, jerarquización con AHP y evaluación comparativa con TOPSIS, integrados en una herramienta computacional desarrollada en Python.

#### 3.1.1. *Diseño*

El diseño metodológico se basó en un enfoque desarrollo y aplicativo, orientado a la creación de una metodología estructurada y su implementación en una herramienta computacional. La metodología integra de forma secuencial los métodos Delphi, AHP y TOPSIS, con el fin de evaluar y priorizar fuentes alternativas de energía bajo criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. La herramienta se diseñó con arquitectura modular, de manera que cada método se

---

implementa como un módulo independiente pero interconectado, garantizando trazabilidad y flexibilidad en el análisis.

### ***3.1.2. Procedimientos***

El procedimiento contempló tres pasos principales:

*Paso 1:* Validación de criterios: aplicación de Delphi para obtener consenso entre expertos en torno a los criterios más relevantes.

*Paso 2:* Ponderación de criterios: implementación de AHP para asignar pesos relativos mediante matrices de comparación por pares y verificación de consistencia ( $CR \leq 0.1$ ).

*Paso 3:* Evaluación de alternativas: uso de TOPSIS para calcular los índices de cercanía ( $C^*$ ) y establecer el ranking final de alternativas.

Cada paso se programó un módulo en Python, asegurando que los resultados tengan una secuencia en documento de Excel para su trazabilidad de un módulo al siguiente.

### ***3.1.3. Técnicas e instrumentos***

Las técnicas empleadas fueron los métodos multicriterio Delphi, AHP y TOPSIS, integrados en un flujo secuencial. Como instrumentos se utilizó una herramienta computacional propia, desarrollada en Python con apoyo de librerías científicas como NumPy, Pandas y Matplotlib, y una interfaz gráfica en Tkinter. Estos instrumentos permiten cargar datos, ejecutar cálculos y generar visualizaciones de manera interactiva y reproducible.

### ***3.1.4. Población y Muestra***

La población de referencia corresponde al conjunto de criterios y alternativas energéticas. La muestra fue conformada de manera intencional a partir de criterios documentados en la literatura especializada y validados por un panel de expertos, así como un conjunto representativo de alternativas de fuentes híbridas para secado solar.

### ***3.1.5. Análisis de Datos***

El análisis de datos se estructuró en tres niveles:

- Delphi: análisis estadístico de consenso (medias, desviación estándar, coeficiente de variación).
- AHP: derivación de pesos mediante cálculo de vectores propios y razón de consistencia.
- TOPSIS: normalización, cálculo de distancias al ideal y anti-ideal, e índices de cercanía para generar el ranking final.

Este procedimiento asegura resultados claros, precisos y trazables, cumpliendo con el Objetivo Particular 1 definiendo criterios, la ponderación y la evaluación de alternativas energéticas.

## **3.2. Implementación del Módulo de Análisis de Sensibilidad**

En esta sección se detalla la integración de un módulo de análisis de sensibilidad dentro de la herramienta computacional, concebido para evaluar la robustez de los resultados obtenidos mediante métodos multicriterio. El diseño se centra en un enfoque cuantitativo y experimental, incorporando técnicas avanzadas como Morris Screening y Sobol, con el fin de identificar el impacto de la variación de parámetros y asegurar la confiabilidad del ranking de alternativas.

### ***3.2.1. Diseño***

El diseño metodológico de este objetivo se enfocó en la incorporación de un módulo de análisis de sensibilidad dentro de la herramienta computacional desarrollada. Este módulo se concibió para evaluar la robustez y estabilidad de los resultados multicriterio, permitiendo identificar el grado de influencia que ejercen los criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales sobre el ranking final de alternativas. Para ello, se seleccionaron dos enfoques complementarios:

Morris Screening (para identificar efectos principales) y Sobol (para analizar interacciones entre variables).

### ***3.2.2. Procedimiento***

El procedimiento seguido incluyó tres fases principales:

*Paso 1:* Definición de escenarios de variación: se establecieron rangos porcentuales de ajuste para los pesos de cada criterio, con el fin de simular cambios en la percepción o importancia relativa asignada por los expertos.

*Paso 2:* Implementación computacional: se programaron rutinas en Python que permiten la ejecución automática de los métodos de sensibilidad, vinculando las salidas del módulo TOPSIS con los análisis Morris y Sobol.

*Paso 3:* Validación funcional: se realizaron pruebas piloto con diferentes configuraciones de criterios, verificando que el sistema mostrara resultados consistentes y que las gráficas generadas facilitaran la interpretación.

### ***3.2.3. Técnicas e instrumentos***

Las técnicas empleadas fueron el análisis de sensibilidad global y el screening de parámetros, utilizando los métodos de Morris y Sobol, ampliamente reconocidos en la literatura por su eficacia en problemas de decisión multicriterio. Como instrumentos, se desarrollaron interfaces gráficas que permiten seleccionar el método de análisis, definir rangos de variación y visualizar los resultados mediante gráficas de barras y diagramas comparativos. Estas interfaces constituyen un aporte metodológico relevante, al integrar de manera accesible herramientas que tradicionalmente se aplican en entornos de programación avanzada.

### ***3.2.4. Población y muestra***

En este objetivo no se trabajó directamente con una población de personas, sino con una muestra de escenarios de simulación generados a partir de la variación de pesos de criterios. Cada escenario representó un conjunto de supuestos sobre la importancia relativa de los factores técnicos, económicos, sociales y ambientales, con el propósito de evaluar la sensibilidad del modelo frente a cambios en estas condiciones.

### ***3.2.5. Análisis de datos***

El análisis de los datos consistió en interpretar los resultados obtenidos en cada simulación. El método de Morris permitió identificar qué criterios ejercían mayor influencia en el ranking de alternativas, mientras que Sobol proporcionó información sobre la interacción entre criterios y el efecto combinado en la decisión final. Los resultados de este análisis se utilizaron para valorar la estabilidad y confiabilidad de la metodología multicriterio, destacando la pertinencia de integrar un módulo de sensibilidad que fortalezca la transparencia del proceso de selección tecnológica.

## **3.3. Validación Metodológica Mediante Caso de Estudio**

### ***3.3.1. Filosofía de Validación: Pragmatismo***

La validación metodológica en esta investigación se sustenta en el pragmatismo científico, el cual establece que la validez de un constructo se determina por su utilidad en contextos reales y su capacidad para resolver problemas complejos (Creswell & Poth, 2018; Morgan, 2014). Bajo este enfoque, la robustez de la metodología Delphi–AHP–TOPSIS–análisis de sensibilidad se evalúa no solo por su coherencia interna, sino por su desempeño en la optimización de decisiones prácticas.

Este marco implica dos elementos clave:

- Uso de estudios de caso como estrategia de validación, pues permiten comprobar la efectividad de la herramienta en escenarios concretos y replicables (Yin, 2018).

- Integración de modelado y simulación, que funciona como alternativa metodológica cuando la experimentación física presenta limitaciones de escala, costo o control (Law, 2015).

Bajo este marco pragmático, la validación se realizará mediante dos estudios de caso complementarios:

**Caso 1:** aplicación de la herramienta en un secador solar híbrido ya instalado con bajo desempeño, para identificar oportunidades de mejora.

**Caso 2:** diseño participativo de un nuevo secador solar híbrido en una comunidad agrícola, que permita valorar la pertinencia técnica y social de la metodología propuesta.

### ***3.3.2. Diseño***

Estudio de casos múltiples con enfoque aplicado y tipo cuasiexperimental (validación técnica + validación participativa).

### ***3.3.3. Procedimientos***

Caso 1 – Secador instalado:

1. Levantamiento de datos técnicos, económicos y operativos del secador en uso.
2. Ingreso de datos en la herramienta computacional.
3. Obtención del ranking de fuentes de energía alternativas y análisis de desempeño.
4. Propuesta de ajustes de hibridación para mejorar eficiencia y continuidad

Caso 2 – Comunidad agrícola:

1. Convocatoria a talleres participativos con productores.
2. Aplicación de encuestas y dinámicas Delphi para definir criterios sociales, técnicos y económicos
3. Ingreso de datos en la herramienta computacional.
4. Obtención del ranking de fuentes de energía alternativas y análisis de desempeño
5. Diseño Participativo del prototipo del secador híbrido con los usuarios.

### 3.3.4. *Técnicas e Instrumentos*

- Herramienta computacional desarrollada (Python, módulos Delphi–AHP–TOPSIS–Sensibilidad).
- Fichas técnicas de desempeño de secadores solares híbridos.
- Encuestas y cuestionarios participativos.

### 3.3.5. *Población y Muestra*

- Caso 1: Un secador solar híbrido ya instalado con capacidad, más un panel de 5–7 expertos técnicos.
- Caso 2: Comunidad agrícola de 10–15 productores seleccionados por muestreo intencionado (criterio: uso directo de secadores solares o interés en implementarlos).

### 3.3.6. *Análisis de Datos*

- Caso 1: Comparación cuantitativa entre desempeño actual y desempeño simulado posterior a la implementación de la herramienta propuesta
- Caso 2: Análisis mixto:
  - Estadístico (Delphi y AHP: Kendall W, pesos relativos, ranking con TOPSIS).
  - Cualitativo (análisis temático de opiniones comunitarias).
  - Integración final mediante triangulación de resultados.

En síntesis, la validación mediante dos estudios de caso permitió comprobar la eficacia de la metodología y de la herramienta computacional en escenarios complementarios: uno técnico, orientado a mejorar el desempeño de un sistema existente, y otro social, enfocado en el diseño participativo de una nueva solución. Este doble enfoque refuerza la solidez pragmática del modelo, al demostrar que sus resultados no solo son consistentes en términos analíticos, sino también relevantes, transferibles y aplicables en contextos reales de uso.

## Capítulo 4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados del diseño metodológico aplicado a la selección de fuentes de energía para secadores de alimentos.

### 4.1. Resultados del diseño metodológico y la herramienta computacional

En anexo 1 a) se propone una lista de criterios sociales, económicos, ambientales y técnicos propuestos para esta investigación, los criterios indicados en la tabla no son limitativos son propuestos y pueden ser agregados u omitidos de acuerdo a las consideraciones pertinentes de la investigación.

Como se observa en la figura número 1 se presta parte de la encuesta propuesta para la evaluación de los criterios, en el anexo 1 b) se muestra encuesta utilizado para la evaluación de la metodología.

ENCUESTA PARA EXPERTOS Y USUARIOS			
<b>Instrucciones:</b>			
A continuación se presenta un conjunto de 20 criterios agrupados en cuatro dimensiones: técnica, económica, ambiental y social.			
Por favor, evalúe la importancia de cada criterio emitiendo un número en la casilla de acuerdo a su juicio según su juicio: 1-3 = Poco importante, 4-6 = Regular, 7-9 = Muy importante.			
Dimensión: Técnica			
Criterio	1-3 Poco	4-6 Regular	7-9 Importante
Eficiencia energética	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Confiabilidad operativa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vida útil del sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Facilidad de mantenimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nivel de innovación tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 1 Encuesta para evaluación de criterios

A continuación, se presenta tablas de entradas, procesos y salidas de los métodos propuestos en la subsección 3.1.2 , la tabla numero once da inicio al proceso de la toma de decisión multicriterio mediante las encuestas realizadas si se logran los objetivos de salida los resultado obtenido es la entrada para el modulo de AHP descrito en la tabla numero 12, este procesamiento de datos se realiza de forma automática para evitar errores en los procedimientos y una vez se cumplen las condiciones de salida se puede proponer una lista de alternativas o potenciales energéticos para ser comparados y evaluados contra los criterios que hayan sido seleccionados por los usuarios y expertos permitiendo la entrada de datos de la tabla numero 13 con lo cual obtenemos el ranqueo de alternativas propuestas para cada caso de estudio en particular-

**Tabla 11**

*Entradas, procesos y salidas de método Delphi*

<b>Entradas</b>	<b>Procesos en el software</b>	<b>Salidas</b>
Datos capturados en formato Excel (encuestas Delphi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importación de datos</li> <li>- Cálculo automático de media, desviación estándar y coeficiente de variación (CV)</li> <li>- Comparación con umbrales de consenso (<math>\geq 60\%</math>, <math>CV \leq 30\%</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tabla de resultados estadísticos (media, DE, CV)</li> <li>- Ajuste y re-evaluación de criterios si es necesario</li> <li>-Lista final de criterios validados para siguiente fase (AHP)</li> </ul>

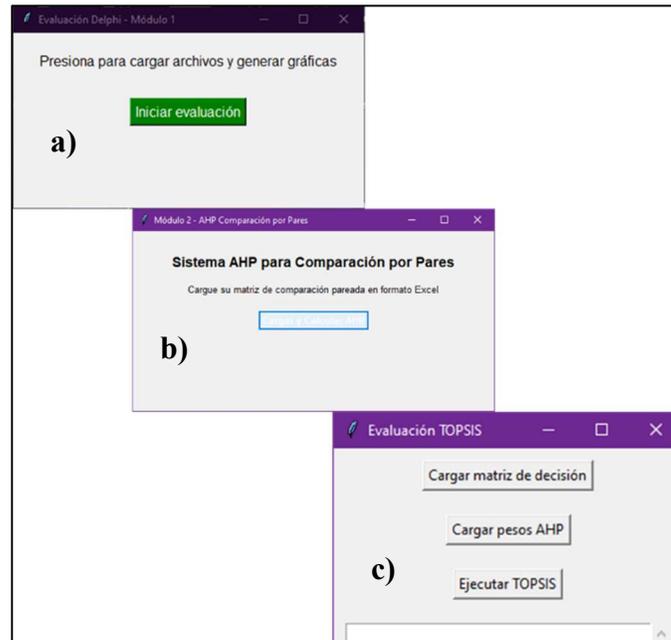
**Tabla 12***Entradas, procesos y salidas del método AHP*

<b>Entradas</b>	<b>Procesos</b>	<b>Salidas</b>
<b>Matriz de comparación por pares</b> de los criterios validados en Delphi (archivo Excel cargado por el usuario)	<b>Normalización de la matriz</b> para homogenizar las comparaciones	Matriz normalizada
Identificación de los <b>criterios de evaluación</b> (técnicos, económicos, ambientales, sociales, etc.)	<b>Cálculo del vector propio principal</b> mediante descomposición de valores y vectores propios	Pesos relativos preliminares de cada criterio
Parámetro del método AHP: número de criterios (n)	<b>Obtención de <math>\lambda_{\text{máx}}</math></b> a partir de la matriz ponderada	Valor de $\lambda_{\text{máx}}$
	<b>Cálculo de indicadores de consistencia:</b> Índice de Consistencia (CI) y Razón de Consistencia (CR)	CI y CR ( $\text{CR} \leq 0.10 =$ juicios consistentes)
	<b>Normalización final del vector de pesos</b> para garantizar que la suma = 1	Pesos normalizados de los criterios (base para TOPSIS)
	<b>Generación de reportes automáticos</b> (tabla de resultados y gráfica de barras)	Tabla de pesos normalizados + gráfica comparativa

**Tabla 13***Entradas, procesos y salidas del método TOPSIS*

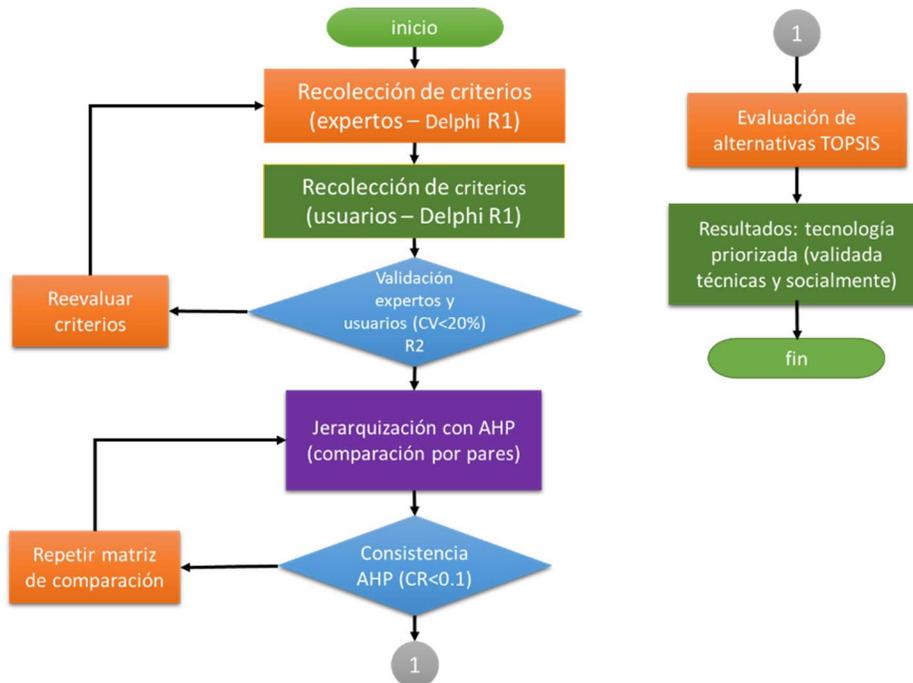
<b>Entradas</b>	<b>Procesos</b>	<b>Salidas</b>
<b>Matriz de desempeño</b> de alternativas frente a los criterios (por ejemplo: energía solar, biomasa, eólico, etc.)	<b>Normalización vectorial</b> de la matriz para homogeneizar unidades	Matriz normalizada
<b>Pesos de criterios</b> obtenidos en AHP	<b>Ponderación de la matriz normalizada</b> multiplicando por los pesos	Matriz ponderada
Número de alternativas a evaluar	<b>Identificación de la solución ideal positiva</b> (valores máximos deseables) y <b>solución ideal negativa</b> (mínimos o peores valores)	Vectores ideal positivo y negativo
	<b>Cálculo de distancias euclidianas</b> de cada alternativa respecto a las soluciones ideal positiva y negativa	Distancia a ideal positivo ( $D^+$ ) y negativo ( $D^-$ )
	<b>Cálculo de índice de cercanía (<math>C^*</math>)</b> para cada alternativa: $C^* = D^- / (D^+ + D^-)$	Índices $C^*$ de las alternativas
	<b>Ordenamiento descendente</b> según $C^*$	Ranking final de alternativas
	<b>Generación de reportes y visualizaciones</b> (tabla de resultados y gráfico de barras/radar)	Tabla con índices $C^+$

La figura 2 muestra las ventanas emergentes desarrolladas en Python mediante la librería Tkinter que permite tener una interfaz grafica y poder realizar la carga de los archivos de Excel de forma sencilla proporcionándonos datos de salidas que se usan de forma secuencial en forma de cascada esto permite tener una trazabilidad de los resultados y además corroborar que los datos procesados son válidos.



**Figura 2** Ventanas emergentes a) Delphi, b) AHP, c) TOPSIS

La figura 3 muestra el diagrama de flujo de los pasos de la sub sección 3.1.2 (Delphi, AHP, TOPSIS) así como las condiciones que se tienen que cumplir para la continuidad entre métodos permitiendo una secuencia clara y una trazabilidad en el proceso y con esto se da cumplimiento al objetivo particular número uno.



**Figura 3** Diagrama de flujo de la metodología propuesta

## 4.2. Resultados de la implementación de sensibilidad y robustez del modelo

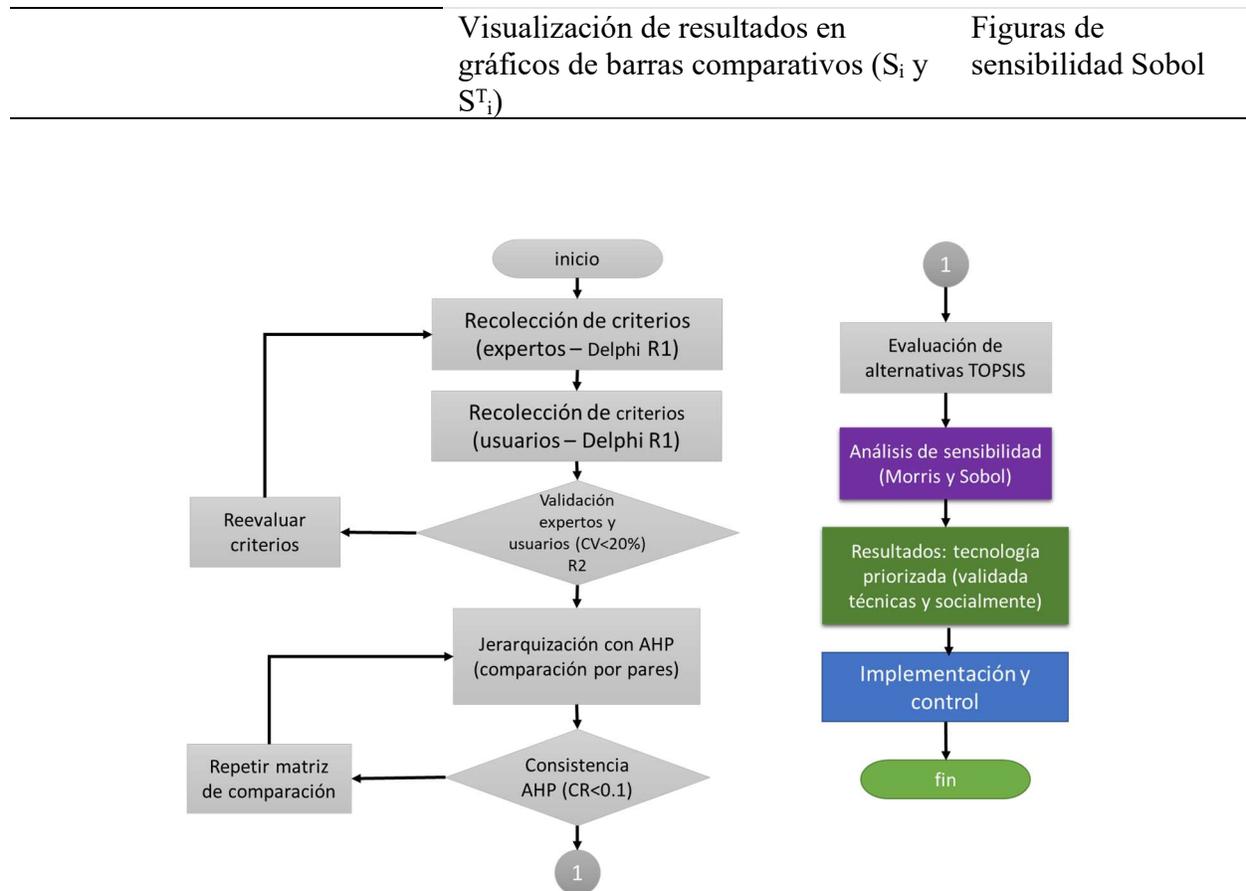
Los resultados de la integración de un módulo de análisis de sensibilidad (implementando métodos Morris y Sobol) fortaleció la consistencia de la metodología al permitir un examen exhaustivo de la robustez de los resultados frente a variaciones en los criterios la Tabla 14 presenta el proceso los datos que se requieren para realizar el índice de sensibilidad de Morris Screening en las cuales se pueden realizar variación manual de los criterios para evaluar su comportamiento en los resultados del ranqueo de tecnologías para realizar hibridaciones en secadores. La tabla 15 presenta los datos necesarios para realizar el análisis de sensibilidad del índice de Sobol presenta las interacciones de efectos individuales y totales de los criterios.

**Tabla 14***Entradas, procesos y salidas del método Morris Screening*

<b>Entradas</b>	<b>Procesos</b>	<b>Salidas</b>
Rango de variación de los <b>pesos de los criterios</b> definidos en AHP	Generación de <b>trayectorias de muestreo aleatorio</b> en el espacio de parámetros	Matriz de escenarios simulados
Número de repeticiones o trayectorias (definidas por el usuario)	Cálculo de los <b>efectos elementales</b> de cada criterio sobre el resultado (ranking TOPSIS)	Conjunto de efectos elementales
Configuración de alternativas y matriz de desempeño	Estimación de la <b>media absoluta de los efectos elementales</b> ( $\mu^*$ )	Medida de <b>influencia global</b> de cada criterio
	Estimación de la <b>desviación estándar de los efectos elementales</b> ( $\sigma$ )	Medida de <b>no linealidad e interacción</b>
	Generación de gráficos ( $\mu^*$ vs $\sigma$ ) para interpretar resultados	Figura de sensibilidad Morris

**Tabla 15***Entradas, procesos y salidas del índice de Sobol*

<b>Entradas</b>	<b>Procesos</b>	<b>Salidas</b>
Rango de variación de los <b>pesos de criterios</b> obtenidos en AHP	Construcción de una <b>matriz de muestreo Monte Carlo</b> (pseudoaleatoria o quasi-aleatoria)	Conjunto de escenarios simulados
Número de muestras (definidas por el usuario)	Ejecución de simulaciones completas del modelo multicriterio (TOPSIS) para cada escenario	Valores de salida (índices $C^*$ por alternativa)
Definición de parámetros de interés (criterios técnicos, económicos, sociales, ambientales)	Cálculo de <b>índices de primer orden</b> ( $S_i$ ): efecto individual de cada criterio	Tabla de índices $S_i$
	Cálculo de <b>índices de segundo orden</b> ( $S_{ij}$ ): efectos de interacción entre pares de criterios	Tabla de interacciones
	Cálculo de <b>índices totales de Sobol</b> ( $S^T_i$ ): efecto combinado de cada criterio (individual + interacciones)	Ranking de criterios por importancia global



**Figura 4** Implementación del método de sensibilidad a la metodología propuesta

La figura 5 ilustra cómo el análisis de sensibilidad se integró dentro del flujo metodológico. Se destacan los métodos Morris Screening y Sobol, que permiten evaluar el impacto de variaciones en los pesos de criterios y en las puntuaciones de alternativas. Con esta integración, la metodología pasa de ser un simple modelo determinístico a convertirse en un sistema capaz de realizar robustez y estabilidad, garantizando que las decisiones no dependan de cambios mínimos en las entradas.

Los resultados de la sección 4.2 confirman el cumplimiento del objetivo particular 2, al integrar un módulo de análisis de sensibilidad que valida la robustez de la metodología. La aplicación de los métodos de Morris y Sobol, junto con la opción de variación manual de criterios, aseguró que el modelo sea confiable, flexible y adaptable a diferentes escenarios de decisión.

En conjunto, los resultados obtenidos en las secciones 4.1 y 4.2 permiten confirmar el cumplimiento de los objetivos particulares 1 y 2. Por un lado, se logró el diseño e implementación

de una herramienta computacional que integra de manera estructurada los métodos Delphi, AHP y TOPSIS, facilitando la sistematización del proceso de toma de decisiones y reduciendo la subjetividad en la priorización de criterios y alternativas energéticas. Por otro lado, la incorporación del módulo de análisis de sensibilidad, basado en los enfoques de Morris y Sobol, aportó un mecanismo de validación de la robustez del modelo, asegurando que los resultados mantengan estabilidad frente a variaciones en los pesos asignados. En su conjunto, estos avances consolidan una metodología transparente, flexible y replicable, capaz de adaptarse a distintos escenarios de selección energética en secadores solares híbridos.

### 4.3. Resultados de la validación en casos de estudio

En esta sección se presenta los resultados obtenidos de la implementación de la metodología propuesta mediante la validación por medio de casos de estudios.

#### *4.3.1. Caso de estudio I: Evaluación post implementación de secador solar híbrido rotatorio de colector solar de tubos de vacío – biomasa de flujo forzado para cacahuete (*Arachis hypogaea*).*

Descripción del sistema instalado:

El caso corresponde a un sistema híbrido solar-biomasa rotatorio instalado en la colonia de Galecio Narcía municipio Chiapa de Corzo, Chiapas. El sistema incluía una cámara de secado rotatorio con una fuente de energía mediante colectores solares de tubos al vacío por flujo forzado y con una hibridación mediante una cámara de combustión de biomasa. El objetivo original del proyecto era mejorar la eficiencia en el secado de productos agrícolas locales, reducir las pérdidas postcosecha y promover el uso de fuentes renovables de energía.

Sin embargo, la evaluación en campo, realizada mediante observación participante, entrevistas etnográficas y diagnósticos participativos, reveló múltiples problemáticas en su funcionamiento. Las principales fallas técnicas detectadas fueron: bajo rendimiento térmico en condiciones reales de uso, ruptura frecuente de tubos al vacío, dificultades en el encendido y mantenimiento de la cámara de combustión, así como un sistema de control inadecuado para las capacidades del operador. Además, se identificó una baja apropiación por parte del usuario principal, quien expresó inseguridad en el uso, falta de capacitación adecuada y escasa confianza en la tecnología.

Ante este escenario, se decidió aplicar de manera retroactiva el modelo Delphi–AHP–TOPSIS con los actores locales y técnicos involucrados, con el objetivo de responder a las siguientes preguntas clave:

- ¿Qué criterios habrían sido más relevantes para evaluar este sistema antes de su implementación?
- ¿Qué peso relativo habría tenido cada uno de esos criterios según la percepción de los usuarios y técnicos?
- ¿Cómo se posiciona el sistema instalado en comparación con otras alternativas híbridas potenciales disponibles en el contexto?
- ¿Qué tipo de tecnología habría resultado más adecuada si se hubiese utilizado este enfoque desde la etapa de diseño?

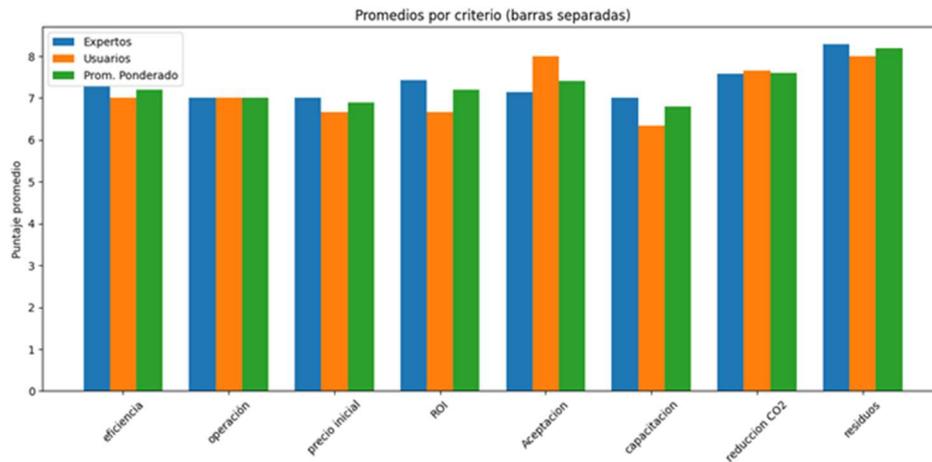
A continuación, se presenta los resultados de la implementación de la metodología propuesta. Para ello, se recuperaron testimonios, percepciones y experiencias de los usuarios directos e indirectos del sistema, así como de técnicos involucrados en la instalación inicial. Esta información permitió simular un proceso de evaluación previo a la decisión tecnológica, utilizando la propuesta metodológica presentada en esta investigación.



**Figura 5** *Secador solar híbrido rotatorio de colector solar de tubos de vacío – biomasa de flujo forzado para cacahuate.*

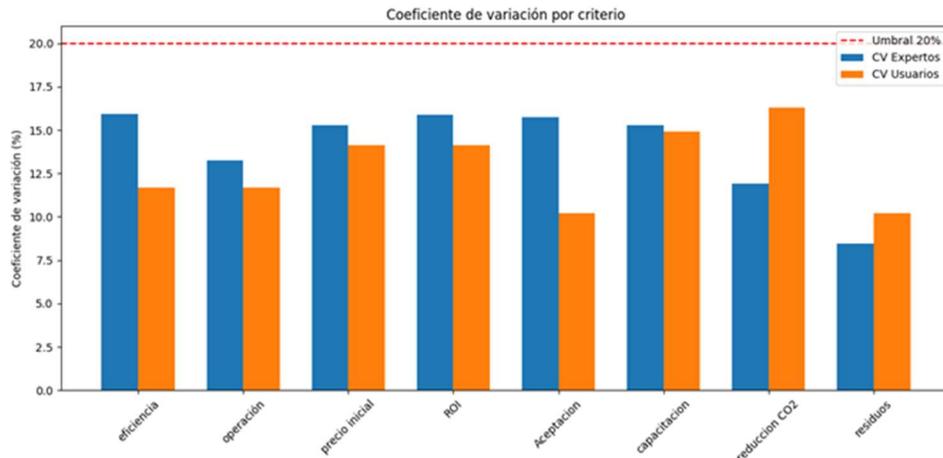
La Figura 5 muestra el secador solar híbrido rotatorio (tubos al vacío-biomasa) para cacahuate, instalado en Galecio Narcia. El sistema combina colectores solares de tubos de vacío con adaptación de flujo forzado y con una cámara de combustión de biomasa (cáscara de cacahuate,  $PCI \approx 18 \text{ MJ/kg}$ ), garantizando operación continua aun con radiación solar ( $< 500 \text{ W/m}^2$ ).

La Figura 13 presenta los resultados del Método Delphi aplicado a paneles de expertos y usuarios finales, mostrando tanto los promedios individuales por grupo como el valor promedio combinado. El análisis revela una convergencia significativa ( $\sigma < 0.8$  en escala Likert) en los criterios evaluados.



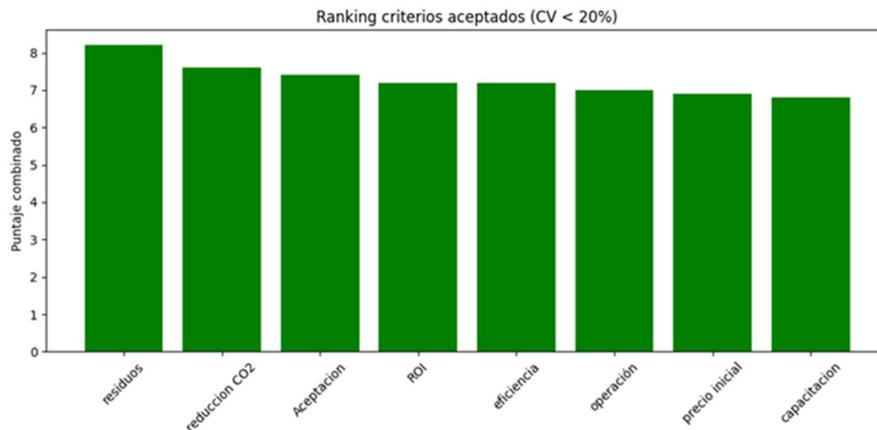
**Figura 6** Evaluación Delphi a expertos, usuarios y promedio combinado

La Figura 14 evidencia un coeficiente de variación ( $CV < 20\%$ ) en las evaluaciones del panel de expertos y usuarios, confirmando un consenso estadísticamente robusto en los parámetros analizados. Los resultados permiten identificar los criterios más relevantes para la implementación del sistema, esta baja dispersión ( $\sigma/\mu < 0.2$ ) valida la confiabilidad metodológica y establece una jerarquización cuantitativa de los factores críticos para la optimización del diseño.



**Figura 7** Coeficiente de variación por criterio de expertos y usuarios

La Figura 15 presenta el ordenamiento preliminar de criterios según el grado de consenso ( $CV < 20\%$ ), donde destacan, 1) valorización de residuos, (2) reducción de  $CO_2$ , aceptación social, Estos resultados constituyen la base para la construcción de la matriz de comparación por pares en el método AHP (Analytic Hierarchy Process), donde se determinará el peso relativo exacto de cada criterio mediante el cálculo de vectores propios ( $\lambda_{max}$ ) y la razón de consistencia (CR). Este enfoque en dos fases garantiza una jerarquización robusta, integrando tanto el consenso estadístico inicial como las interdependencias críticas entre los factores evaluados.



**Figura 8** Ranqueo de criterios evaluados por el método Delphi

Posteriormente a los resultados obtenidos del método Delphi se realiza una comparación por pares de la evaluación por el método Delphi esto con el fin de crear la matriz de decisión buscando un índice de consistencia relativa.

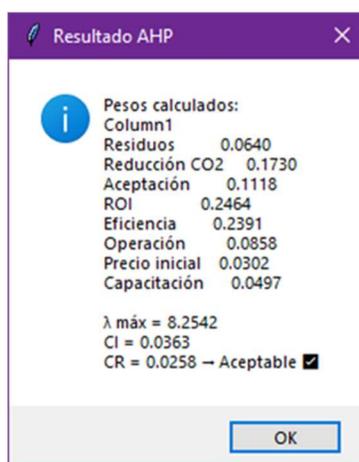
La Tabla 16 presenta la matriz de comparación por pares para el método AHP, construida a partir de los resultados consensuados en el Método Delphi (Figura 6-8). Cada elemento de la matriz refleja la importancia relativa entre criterios (escala 1-9 de Saaty). Los valores se calcularon mediante la normalización de los promedios Delphi ( $CV < 20\%$ ), garantizando consistencia ( $CR < 0.1$ ).

**Tabla 16**

**Matriz de decisión AHP sin normalizar**

	Residuos	Reducción CO2	Aceptación	ROI	Eficiencia	Operación	Precio inicial	Capacitación
Residuos	1	0.33	0.5	0.25	0.2	0.5	3	2
Reducción CO2	3	1	2	1	0.5	2	5	3
Aceptación	2	0.5	1	0.5	0.33	2	4	2
ROI	4	1	2	1	2	3	6	5
Eficiencia	5	2	3	0.5	1	3	6	4
Operación	2	0.5	0.5	0.33	0.33	1	3	2
Precio inicial	0.333	0.2	0.25	0.16	0.16	0.33	1	0.5
Capacitación	0.5	0.33	0.5	0.2	0.25	0.5	2	1

La figura 16 muestra la ventana emergente generada por el software desarrollado en Python para el cálculo de los pesos relativos de los criterios obtenidos en la etapa previa del método Delphi. A partir de la matriz de decisión construida con las comparaciones por pares, el sistema aplica el método AHP para determinar la ponderación de cada criterio evaluado. Asimismo, el programa calcula automáticamente el valor propio máximo. Este último se encuentra por debajo del umbral de 0.10, lo que indica que las comparaciones realizadas por los expertos son consistentes y, por lo tanto, los pesos calculados son válidos para las etapas posteriores del análisis multicriterio.



**Figura 9** Ventana emergente de la evaluación del método AHP

La tabla 17 presenta la evaluación comparativa de las alternativas consideradas, realizada por un panel de expertos previamente seleccionados según su experiencia y conocimiento en el área de estudio. Cada alternativa fue valorada con base en los criterios definidos en la fase metodológica, utilizando una escala numérica estandarizada que permite su posterior normalización en el método TOPSIS.

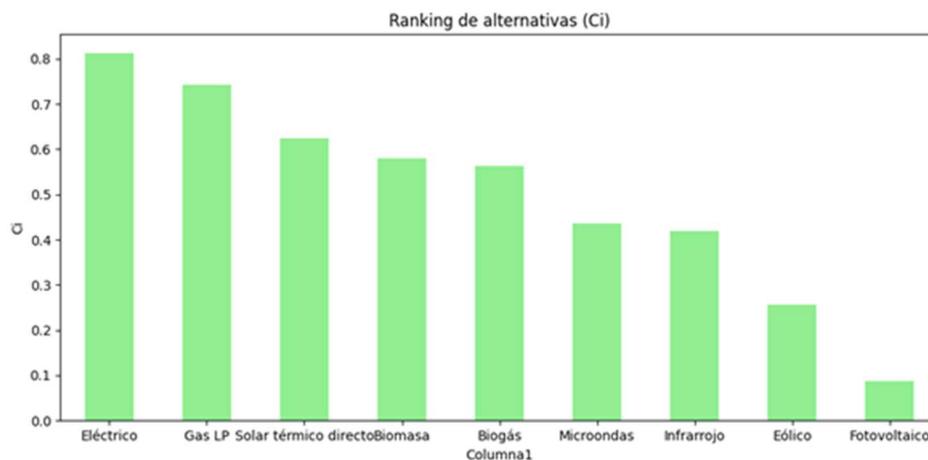
**Tabla 17** Matriz de decisión, alternativas vs criterios seleccionados

Columna1	Residuos	Reducción CO2	Aceptación social	ROI	Eficiencia energética	Facilidad de operación	Costo inicial	Requiere capacitación
Fotovoltaico	4.00	6.00	2.00	3.00	5.00	3.00	3.00	6.00
Biomasa	5.00	8.00	7.00	6.00	7.00	6.00	7.00	5.00
Eólico	6.00	9.00	4.00	4.00	6.00	4.00	8.00	6.00
Eléctrico	9.00	7.00	8.00	7.00	8.00	9.00	7.00	5.00
Gas LP	2.00	2.00	9.00	8.00	7.00	8.00	7.00	5.00
Biogás	4.00	7.00	7.00	6.00	7.00	6.00	7.00	5.00
Microondas	7.00	4.00	3.00	5.00	8.00	6.00	8.00	7.00
Infrarrojo	6.00	5.00	4.00	5.00	9.00	6.00	7.00	7.00
Solar térmico directo	8.00	6.00	7.00	6.00	8.00	8.00	6.00	4.00

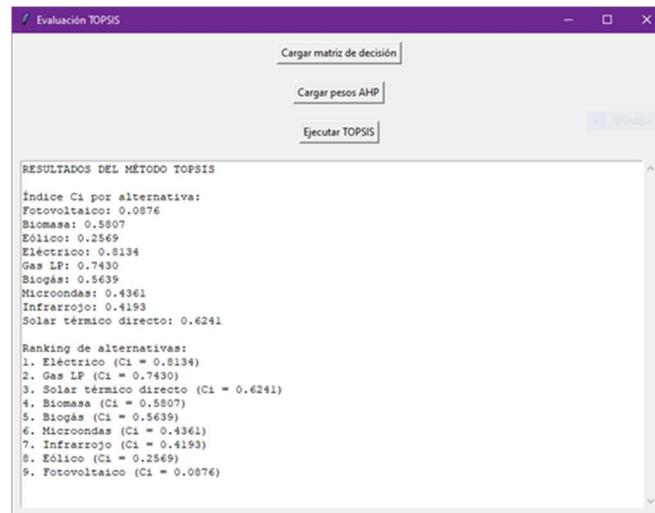
En las filas se listan las alternativas evaluadas, mientras que en las columnas se ubican los criterios de evaluación ponderados en fases previas mediante el método AHP. Las celdas contienen las puntuaciones asignadas por los expertos, que reflejan el grado de cumplimiento de cada alternativa respecto a cada criterio. Estas valoraciones constituyen la matriz de decisión inicial de TOPSIS, a partir de la cual se realizará la normalización de los datos, la ponderación según los pesos de los criterios, y el cálculo de las distancias a las soluciones ideal y anti-ideal, para obtener el ranking final de alternativas.

La figura 18 muestra la interfaz del módulo de evaluación TOPSIS implementado en el software desarrollado en Python. En esta etapa, el usuario carga la matriz de decisión con las valoraciones de las alternativas frente a los criterios definidos y, posteriormente, los pesos calculados mediante AHP. Estos resultados constituyen la base para la toma de decisiones, permitiendo priorizar aquellas alternativas con mejor desempeño global según los criterios y ponderaciones previamente establecidos.

La figura 17 muestra la gráfica muestra el ordenamiento de las alternativas evaluadas según su coeficiente de cercanía (con el método TOPSIS) Esta representación visual facilita la comparación del desempeño global de cada alternativa frente a los criterios y ponderaciones establecidos.



**Figura 10** Ventana emergente con el peso de los criterios y la matriz comparación

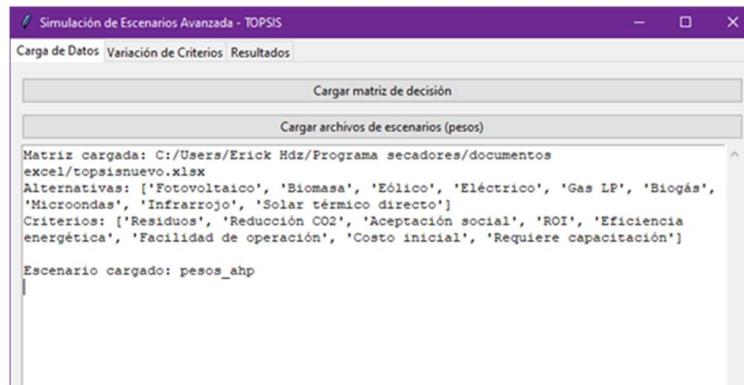


**Figura 11** *Grafica de ordenamiento de fuentes de energía alternas en sistema post implementación*

#### 4.3.2. *Análisis de sensibilidad*

La figura 19 presenta la interfaz inicial del módulo de simulación de escenarios del software, utilizada para la evaluación de sensibilidad mediante el método de Morris. En esta ventana, el usuario carga la matriz de decisión en formato Excel, que contiene las alternativas a evaluar y sus valoraciones frente a los criterios previamente definidos.

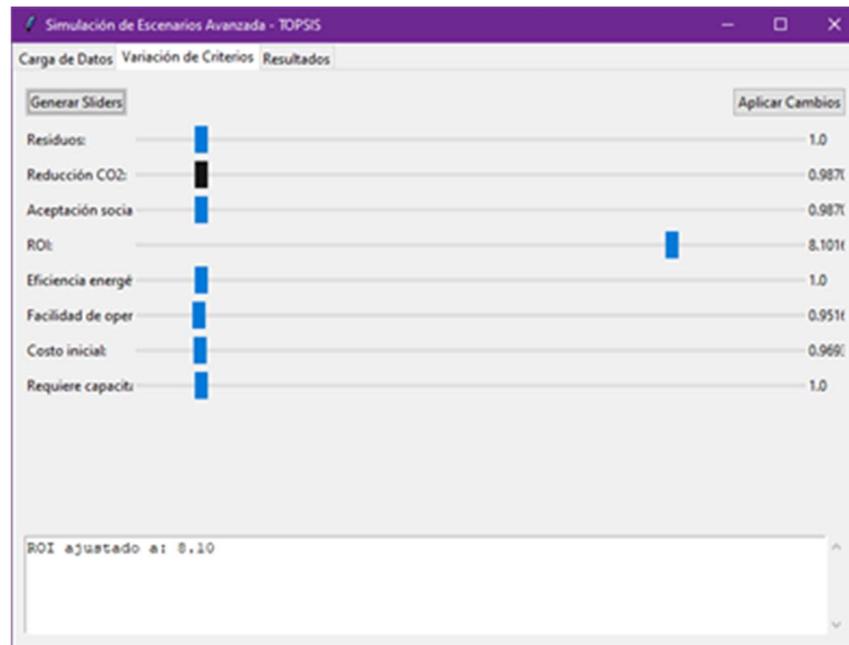
Además, se carga un archivo de escenarios que contiene los pesos obtenidos mediante AHP, los cuales servirán como base para la posterior variación sistemática de criterios en el análisis de sensibilidad. Esta etapa asegura que los datos de entrada estén correctamente definidos antes de ejecutar las simulaciones y calcular la influencia relativa de cada criterio en el resultado final.



**Figura 12** Ventana emergente para cargar las matrices y realizar el análisis de sensibilidad

La figura 20 muestra la ventana del módulo de variación de criterios dentro de la herramienta de simulación de escenarios avanzada para el método TOPSIS. En esta interfaz, el usuario dispone de barras deslizantes (sliders) asociadas a cada criterio de evaluación, las cuales permiten modificar manualmente su valor con el fin de analizar el impacto de dichas variaciones en el ranking final de alternativas.

Esta funcionalidad facilita el análisis de sensibilidad, ya que permite probar escenarios hipotéticos variando un criterio en particular mientras los demás permanecen constantes, proporcionando una visión clara de la robustez del modelo de decisión frente a cambios en las ponderaciones.

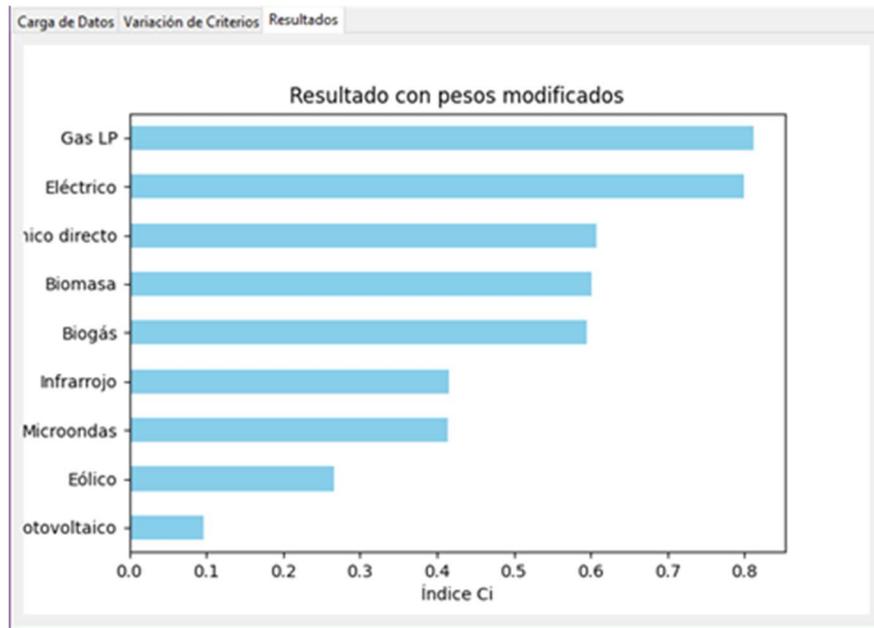


**Figura 13** Ventana emergente para variar manualmente los criterios y evaluar en Morris

### *Screening y Sobol*

La figura 21 presenta el ranking de alternativas obtenido después de modificar los pesos de los criterios en la simulación de escenarios, como parte del análisis de sensibilidad tipo Morris Screening. Este procedimiento permite evaluar la robustez del modelo multicriterio y la influencia de variaciones en las ponderaciones sobre el resultado final.

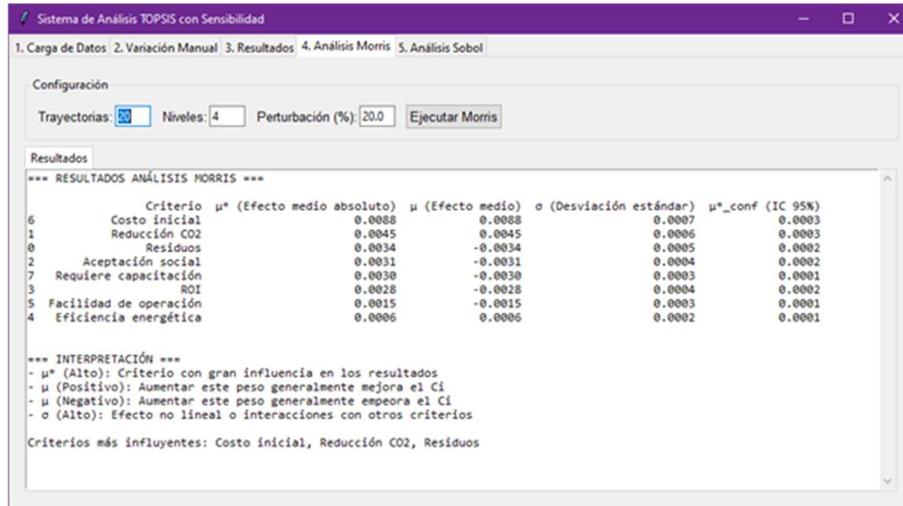
Estos cambios en el ordenamiento evidencian que el modelo es sensible a la variación de ciertos criterios, lo que subraya la importancia de identificar aquellos con mayor peso en la decisión final y de considerar diferentes escenarios antes de establecer la alternativa óptima.



**Figura 14** *Grafica de resultados con pesos de criterios modificados manualmente*

La figura 22 presenta la ventana del módulo de análisis de sensibilidad del software, donde se muestran los resultados obtenidos tras ejecutar el método Morris Screening. En la parte superior, el usuario puede configurar el número de trayectorias, niveles y porcentaje de perturbación antes de iniciar el cálculo.

La interpretación automática señala que los criterios con mayor influencia en los resultados son Costo inicial, Reducción de CO<sub>2</sub> y Residuos, los cuales presentan valores elevados de  $\mu^*$  y, por lo tanto, un impacto significativo en el ranking de alternativas. Este análisis otorga certeza a los cálculos, al identificar los factores más determinantes y cuantificar el efecto de su variación sobre la decisión final.



**Figura 15** La ventana emergente presenta los cálculos realizados por el análisis de sensibilidad *Morris Screening*

La figura 23 presenta la relevancia relativa de cada criterio evaluado, calculada mediante el efecto medio absoluto ( $\mu^*$ ) obtenido en el análisis de sensibilidad tipo Morris Screening. Este valor indica la magnitud de la influencia de cada criterio sobre el índice de cercanía ( $Ci$ ) sin considerar el signo del efecto, por lo que refleja únicamente su importancia en el modelo de decisión.

Esta representación visual permite identificar de forma clara los criterios críticos a considerar en la toma de decisiones y respalda la priorización de recursos hacia aquellos con mayor potencial de modificar el ranking de alternativas.

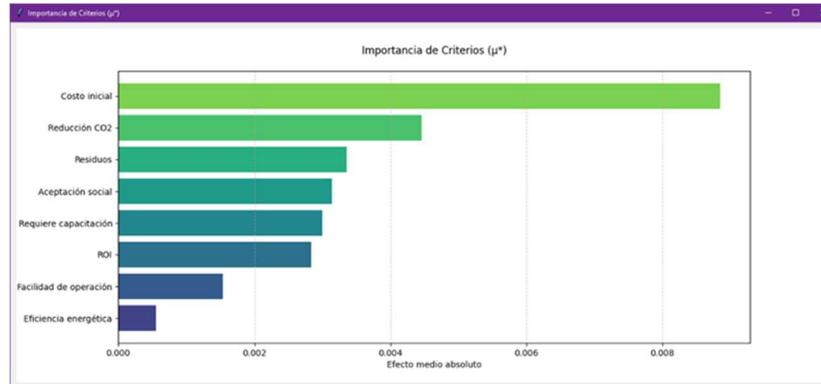


Figura 16 *Grafica de orden de prioridades post evaluación Morris Screening*

La figura 24 muestra la ventana del módulo de análisis de sensibilidad Sobol del software, que permite configurar el número de muestras y el porcentaje de variación para la simulación antes de ejecutar el cálculo. Este método cuantifica la influencia de cada criterio en el resultado final del índice de cercanía ( $C_i$ ) del método TOPSIS, considerando tanto efectos individuales como interacciones entre criterios. Esta funcionalidad permite evaluar con precisión qué factores influyen más en los resultados y cómo las variaciones simultáneas de varios criterios pueden modificar el ranking de alternativas.

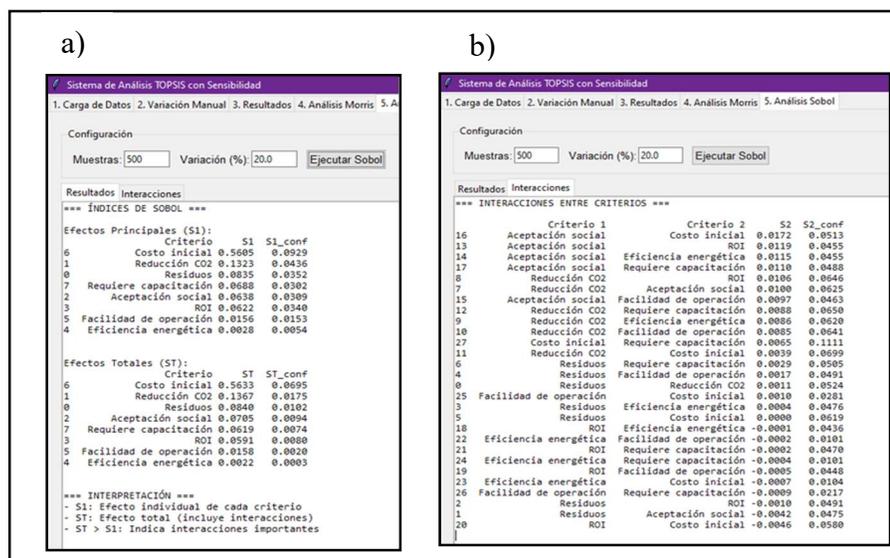
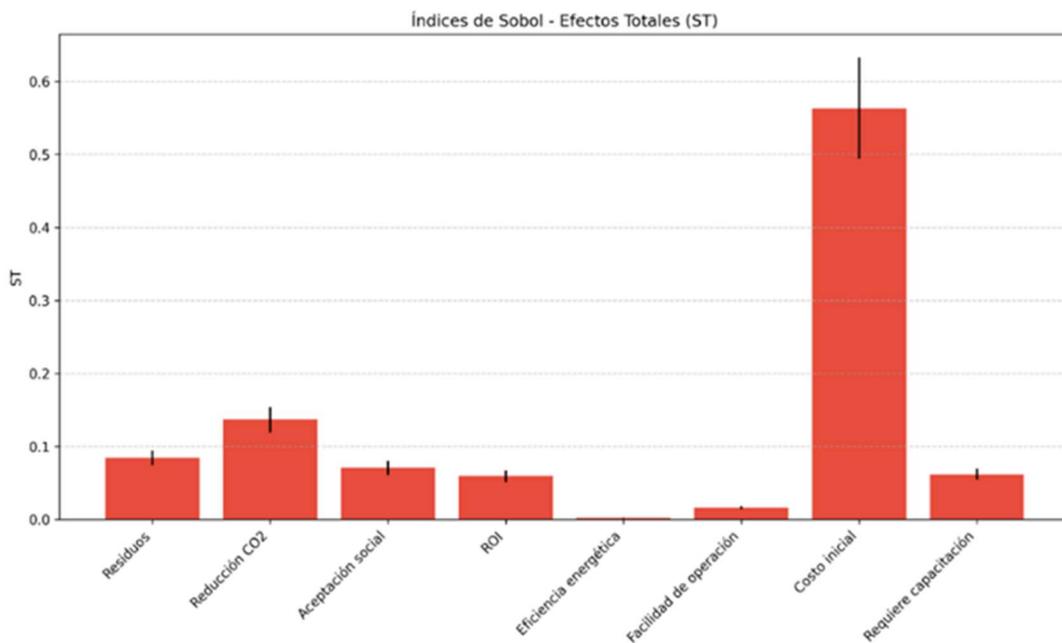


Figura 17 *Ventana emergente índice de Sobol a) efectos combinados b) efectos totales*

La gráfica 25 muestra análisis de sensibilidad global con índices de Sobol de efecto total (ST) evidencia una concentración marcada de la sensibilidad en el criterio económico de Costo inicial. En esta ejecución, Costo inicial domina el comportamiento del modelo ( $ST \approx 0.57$ ; IC visual  $\approx 0.50 - 0.63$ ), superando ampliamente al resto de factores. En segundo término, se sitúa Reducción de CO<sub>2</sub> ( $ST \approx 0.14$ ), seguida por Residuos ( $ST \approx 0.09$ ). Con contribuciones menores aparecen Aceptación social ( $ST \approx 0.07$ ), ROI ( $ST \approx 0.06$ ) y Requiere capacitación ( $ST \approx 0.06$ ), mientras que Facilidad de operación ( $ST \approx 0.02$ ) y Eficiencia energética ( $ST \approx 0.00$ ) resultan prácticamente no influyentes dentro de los rangos considerados. La amplitud de la barra de incertidumbre asociada a Costo inicial sugiere priorizar el refinamiento de supuestos y cotizaciones (por proveedor/escenario)

dado su potencial para alterar el resultado. En suma, el sistema es esencialmente sensible a la barrera económica de entrada; por tanto, estrategias de mitigación del costo inicial (financiamiento, arrendamiento, pago diferido) y, en segundo plano, acciones ambientales (reducción de CO<sub>2</sub>) ofrecen el mayor retorno marginal sobre el desempeño global reportado por el modelo.



**Figura 18** Gráfica de efectos totales, criterios vs efectos totales

La tabla 18 muestra de forma ordenada los resultados mostrados en la figura 18 lo cual nos permite observar de forma clara el orden de prioridad de los criterios así como los resultados y una nota rápida para guiar al lector.

**Tabla 18** *Ranqueo de criterios, ST y Rango Visual*

Ranking	Criterio	ST( $\approx$ )	Rango visual (IC)	Nota rápida
1	Costo inicial	0.57	0.50–0.63	Control Principal; mitigar con financiamiento/arrendamiento.
2	Reducción de CO <sub>2</sub>	0.14	0.13–0.16	Impacto ambiental claro; priorizar si hay metas climáticas.
3	Residuos	0.09	0.08–0.10	Gestión operativa/ambiental; relevancia baja-media.
4	Aceptación social	0.07	0.06–0.08	Trabajar con usuarios; pilotos y demostraciones.
5	ROI	0.06	0.05–0.07	Revisar supuestos; baja influencia frente al costo inicial.
6	capacitación	0.06	0.05–0.07	Plan de entrenamiento básico mejora adopción.
7	Facilidad de operación	0.02	0.015–0.03	Casi nulo; mantener simple pero no crítico.
8	Eficiencia energética	0.00	$\approx$ 0.00–0.005	Efecto despreciable en este rango/normalización.

En síntesis, el caso confirma que el desempeño estuvo condicionado menos por la sofisticación técnica que por la pertinencia sociotécnica y los costos de adopción. La aplicación ex ante de una evaluación multicriterio con análisis de sensibilidad global habría orientado la decisión hacia una alternativa más simple, asequible y operable, con requerimientos mínimos de capacitación. a fin de descartar tempranamente opciones costosas o frágiles y verificar su robustez ante la variabilidad contextual. Con ello se mitigará el riesgo de fallas y se favorecerán la aceptación y la sostenibilidad del sistema en condiciones reales.

### ***4.3.3. Caso de estudio II: Selección y Validación de Tecnología con Apoyo del Modelo Propuesto***

Descripción del sistema a instalar:

El segundo caso de estudio es la evaluación de la metodología previo al diseño de un secador solar híbrido rotatorio, orientado al secado de café pergamino bajo estándares de calidad diferenciada. Esta experiencia se construyó desde un enfoque participativo y metodológicamente estructurado, integrando las etapas de diseño participativo, jerarquización de criterios y análisis multicriterio.

El sistema fue concebido para operar en la comunidad de San Antonio El Porvenir, ubicada en el municipio de La Independencia, Chiapas. Esta localidad representa un desafío importante para tecnologías que dependen exclusivamente de la radiación solar, si bien las bases de datos reportan su irradiancia solar global (GHI) en promedio 5.6 KWh/m<sup>2</sup> Día la realidad difiere mucho de lo reportado no obstante, cuenta con abundante disponibilidad de biomasa residual, especialmente proveniente de podas agrícolas y forestales, lo que motivó el desarrollo de un sistema híbrido que combine energía solar térmica con respaldo por combustión de biomasa.

Una particularidad clave del sistema es la incorporación de un tambor rotatorio, requerido para asegurar una calidad homogénea en el secado del café, así como la inclusión de sensores de temperatura y humedad, y un sistema de control automático. Estas características implican una demanda constante y confiable de energía eléctrica, que no puede depender de la intermitencia solar. Por ello, se evaluó también la posibilidad de incorporar un respaldo eléctrico o una solución fotovoltaica con almacenamiento, que garantice la operación del motor rotativo y del sistema de control.

El procesamiento del café en San Antonio el porvenir conlleva la generación de residuos orgánicos, particularmente el bagazo, cuyo tratamiento convencional suele limitarse a pozos de descarga prediseñados por las certificadoras o en ocasiones algunos productores solo descargan en ríos u arroyos causando daños significativos a los ecosistemas. Sin embargo, esta práctica, aunque común, resulta insuficiente frente a las crecientes exigencias ambientales. En este sentido, la

consideración de alternativas tecnológicas como los biodigestores adquiere relevancia, ya que permiten simultáneamente la producción de energía térmica y la obtención de bioabono susceptible de ser reincorporado al sistema agrícola, cerrando así el ciclo productivo. De manera complementaria, la incorporación sistemática de fuentes renovables de energía en el procesamiento favorecería la certificación del café como producto orgánico, lo cual no solo incrementa su valor de mercado, sino que también genera beneficios económicos tangibles para los productores. No obstante, es necesario subrayar que la tecnología actualmente disponible en el estado aún carece de la madurez suficiente para garantizar procesos de transferencia tecnológica eficientes, lo que limita la sostenibilidad de estas iniciativas y plantea la necesidad de un desarrollo adicional para su consolidación.

El diseño base fue desarrollado en Tuxtla Gutiérrez por un equipo técnico-académico, pero se prevé su validación in-situ en la comunidad mencionada, como parte de una experiencia piloto. Esta intervención representa una oportunidad estratégica para aplicar de forma anticipada el modelo Delphi–AHP–TOPSIS propuesto en esta investigación, permitiendo seleccionar la mejor configuración tecnológica según los criterios definidos colectivamente, y asegurar una mayor apropiación local del sistema.

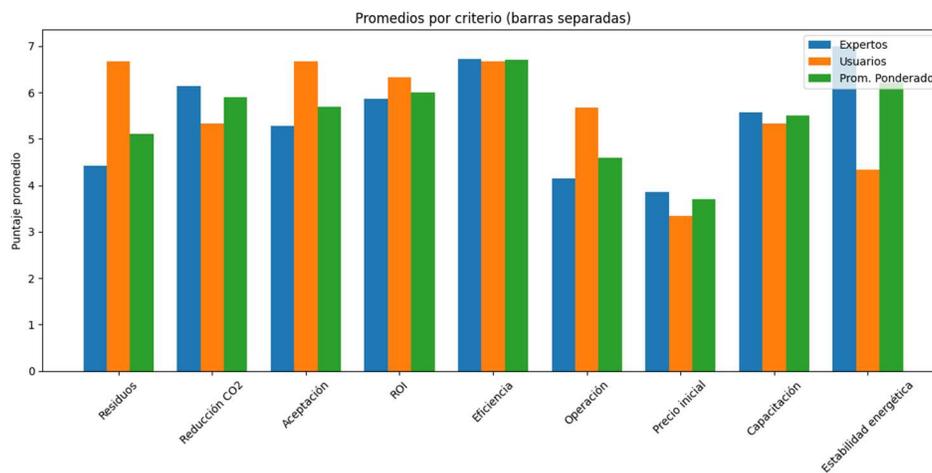


**Figura 19** *Cooperativa cafetalera san Antonio el porvenir curso introducción al secado*

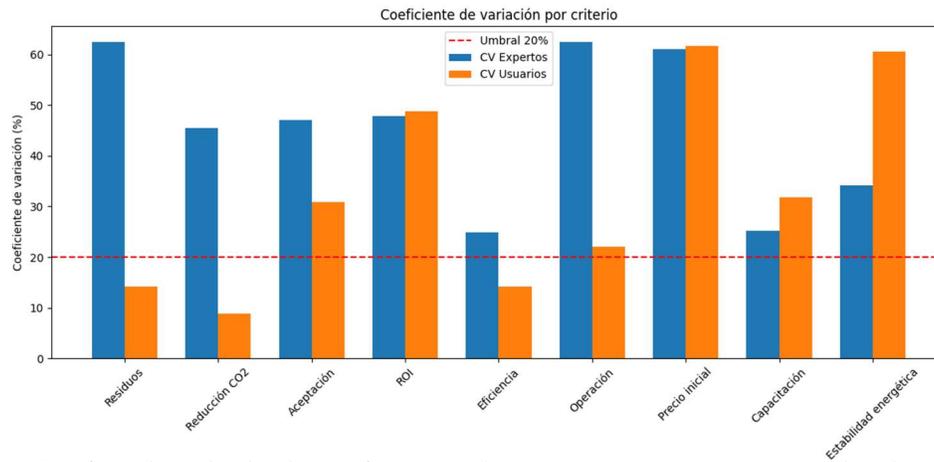
La figura 26 muestra a la comunidad cafetalera quienes recibieron un curso introductorio de secado así mismo se realizaron pruebas y evaluaciones para tener retroalimentación de sus experiencias

con el secado del café además de proporcionarnos las encuestas necesarias para realizar el método Delphi.

La figura 27 muestra los resultados obtenidos de la evaluación Delphi de expertos y los usuarios, mostrando tanto los promedios individuales por grupo como el valor promedio combinado., por otra parte, la figura 21 nos muestra como no se logra llegar a un consenso entre expertos y usuarios superando el umbral del 20% del coeficiente de variación de manera tal que se requiere volver a realizar las encuestas hasta lograr un consenso del coeficiente de variación menor al 20%.

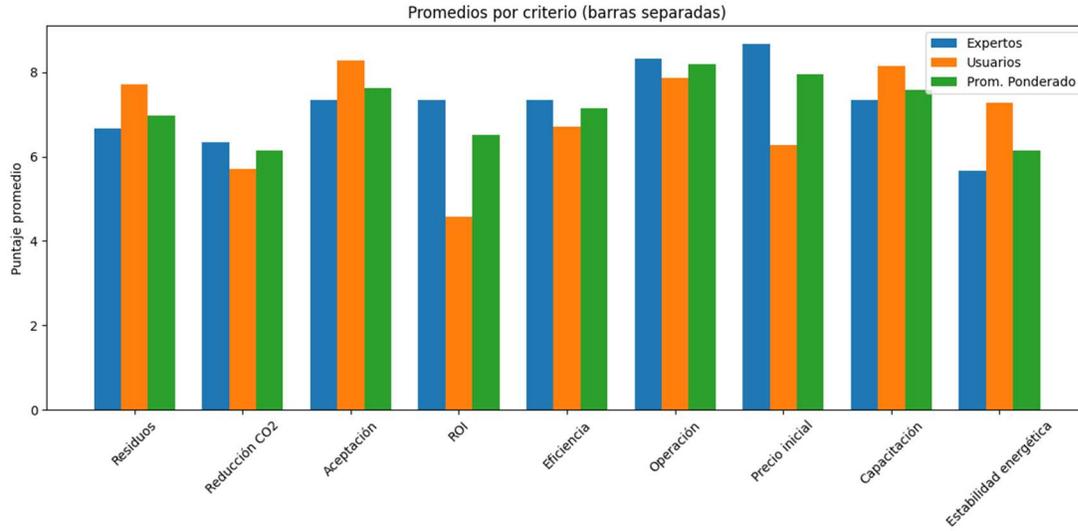


**Figura 20** *Grafica de promedios por criterio de acuerdo con paneles de expertos, usuarios y el promedio combinado para un secador solar hibrido de café*

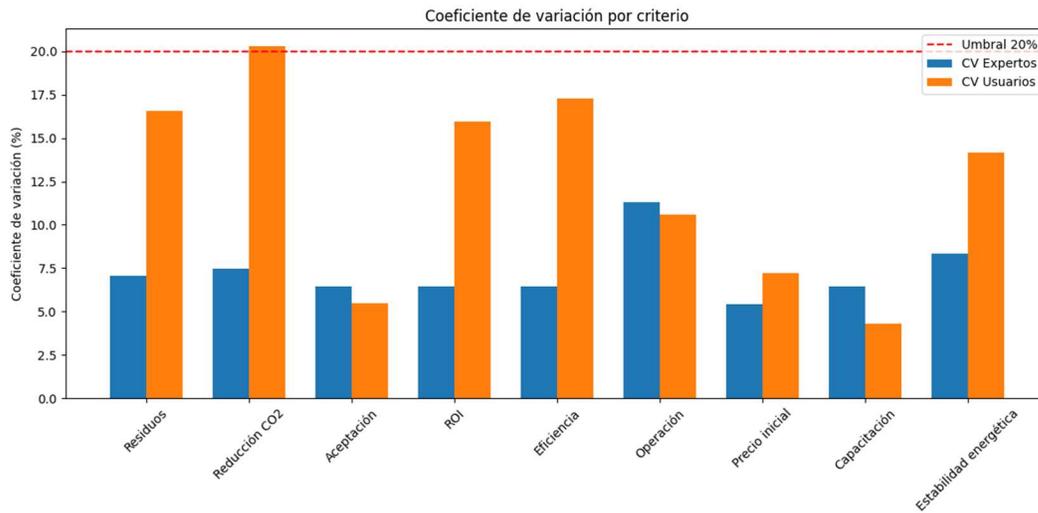


**Figura 21** *Grafica de cálculo de coeficientes de variación por criterio evaluado por panel de expertos y usuarios*

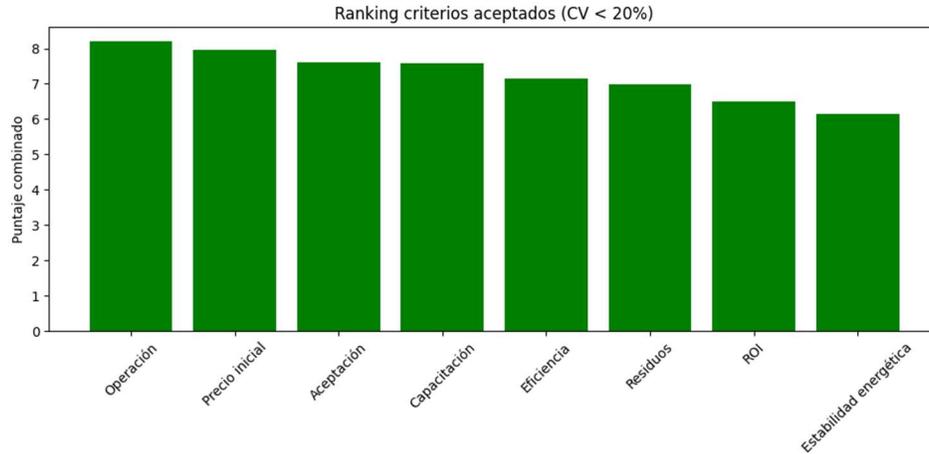
En la Segunda ronda de participación Delphi como se observa en la figura 28 la cual muestra los resultados y los promedios conjuntos, por otra parte en la figura 29 se presenta la figura de coeficiente de variación de segunda ronda esto para mostrar que el coeficiente variación por debajo del 20% y tener un consenso adecuado de los criterios .



**Figura 22 . Grafica de promedios por criterio expertos, usuarios y el promedio combinado - Segunda Ronda**



**Figura 23 Grafica de coeficientes de variación por criterio de segunda ronda**



**Figura 24** Ranqueo de criterios evaluados por el método Delphi

La figura 31 presenta el ranqueo de criterios seleccionados para ser evaluados calcular los pesos en el método de análisis jerárquico

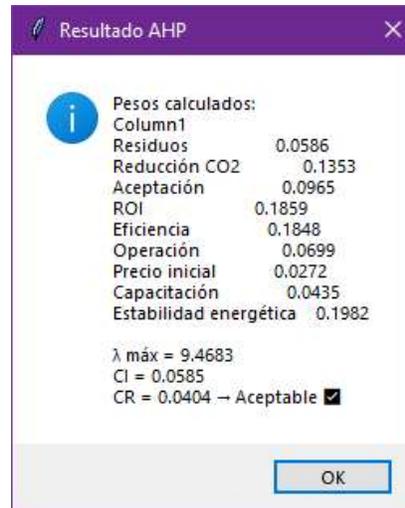
En la tabla 19 se presenta la matriz de decisión para implementar la metodología AHP y conocer cuál es el peso los criterios.

**Tabla 19**

*Matriz de Decisión AHP sin normalizar*

	Residuos	Reducción CO2	Aceptación	ROI	Eficiencia	Operación	Precio inicial	Capacitación	Estabilidad energética
Residuos	1	0.33	0.5	0.25	0.2	0.5	3	2	0.5
Reducción CO2	3	1	2	1	0.5	2	5	3	0.5
Aceptación	2	0.5	1	0.5	0.33	2	4	2	0.66
ROI	4	1	2	1	2	3	6	5	0.5
Eficiencia	5	2	3	0.5	1	3	6	4	0.5
Operación	2	0.5	0.5	0.33	0.33	1	3	2	0.33
Precio inicial	0.33	0.2	0.25	0.16	0.16	0.33	1	0.5	0.25
Capacitación	0.5	0.33	0.5	0.2	0.25	0.5	2	1	0.33
Estabilidad energética	2	2	1.5	2	2	3	4	3	1

La figura 32 presenta una ventana emergente después de cargar la matriz de decisión en el programa desarrollado el cual muestra los pesos y si cumple la relación de consistencia.



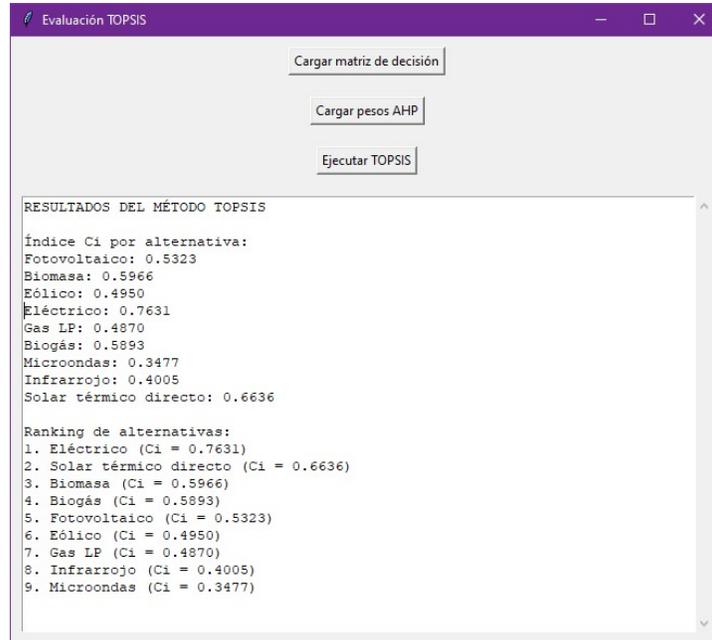
**Figura 25** Ventana emergente de la evaluación del método AHP

En la tabla 20 se muestra en las columnas los criterios y en las filas las alternativas de las cuales son evaluadas por expertos y esto nos permitirá determinar en el método TOPSIS junto con los resultados del método AHP cuál es el orden de importancia a implementar.

**Tabla 20** Matriz de decisión, alternativas vs criterios seleccionados

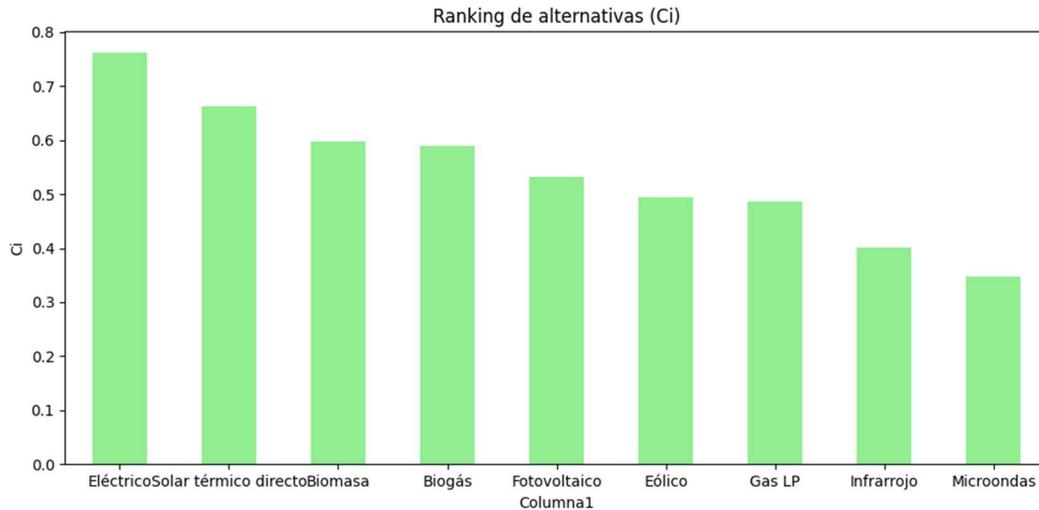
Columna1	Residuos	Reducción CO2	Aceptación social	ROI	Eficiencia energética	Facilidad de operación	Costo inicial	Requiere capacitación
Fotovoltaico	9	7	8	7	8	9	6	4
Biomasa	5	8	7	6	7	6	7	5
Eólico	6	9	6	5	6	7	8	6
Eléctrico	3	3	5	7	9	8	5	4
Gas LP	2	2	4	6	8	7	6	5
Biogás	4	7	7	6	7	6	7	5
Microondas	7	4	3	5	8	6	8	7
Infrarrojo	6	5	4	5	9	6	7	7
Solar térmico directo	8	6	7	6	8	8	6	4

En la figura 33 se muestra una pantalla emergente donde se muestran cargadas la matriz de decisión (AHP) y la matriz de decisión de Alternativas (TOPSIS) para ser evaluadas en software y obtener un ranqueo de alternativas



**Figura 26** Ventana emergente con el peso de los criterios y la matriz comparación

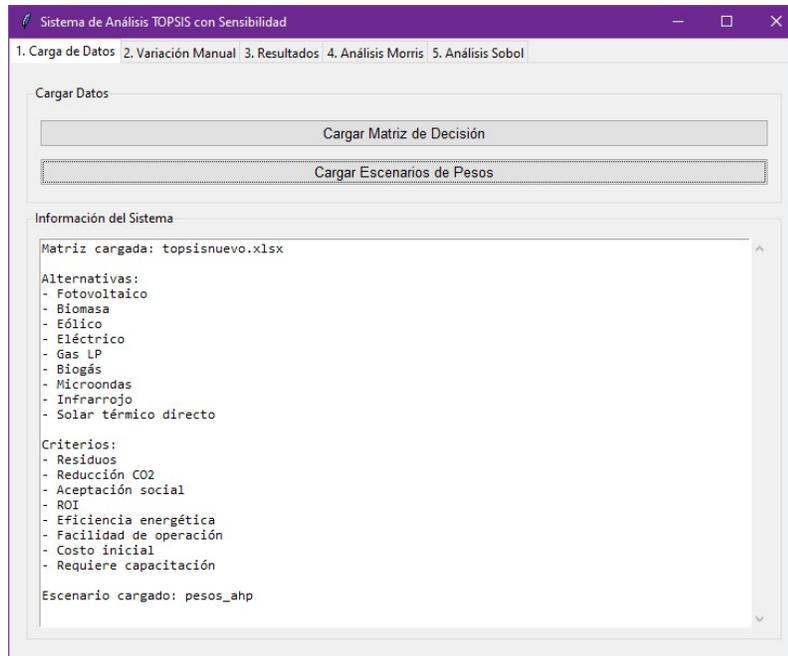
La figura 34 muestra el orden de alternativas para poder realizar hibridaciones de acuerdo los datos proporcionados por los usuarios y los expertos este orden no es de orden obligatorio sin embargo permite al diseñador tener una mejor perspectiva al momento de la toma de decisiones.



**Figura 27** *Grafica de ordenamiento de fuentes de energía alternas en sistema pre implementación*

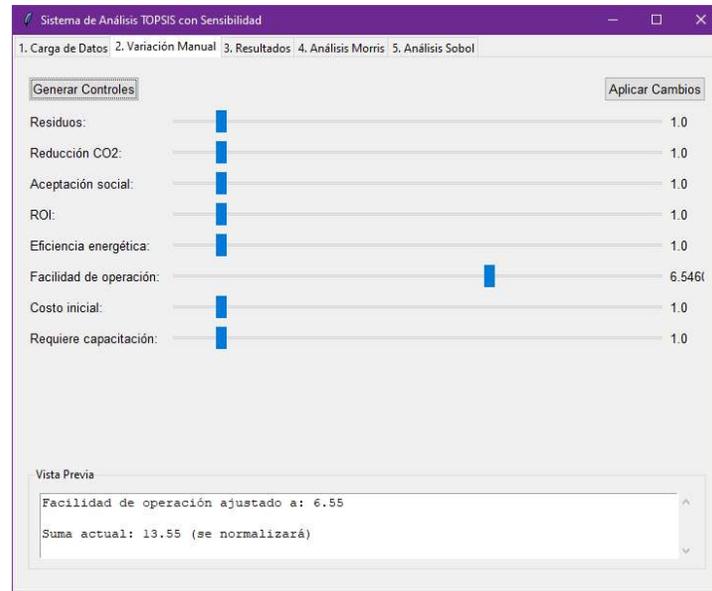
#### **4.3.4. Análisis de sensibilidad**

La figura 35 muestra una pantalla emergente donde se carga la matriz de decisión y la matriz de pesos esto con la finalidad de realizar un estudio de sensibilidad, aquí el diseñador podrá realizar variaciones manuales de los criterios observar si existe un cambio en el ordenamiento de las alternativas.



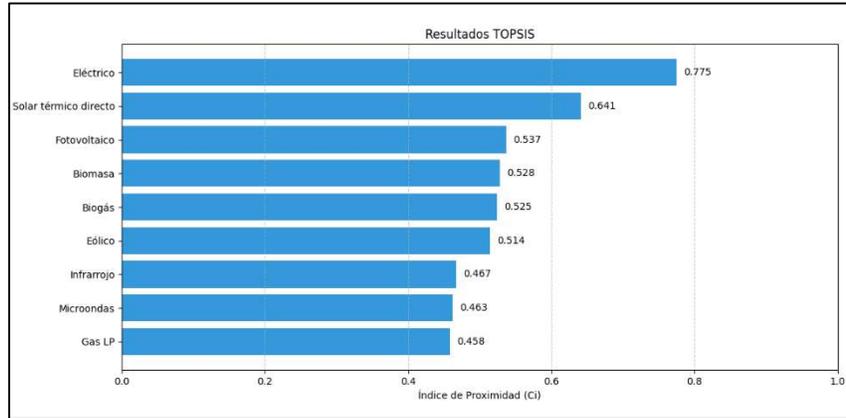
**Figura 28** Ventana emergente para cargar los pesos de los criterios y la matriz alternativas

Como se puede observar en la figura 36 se generan los controles para hacer las modificaciones manuales a cada criterio de acuerdo a las consideraciones de quien o quienes diseñan el secador para observar si existe algún cambio en el ranqueo de alternativas si existe una modificación ligera de los criterios o por otra parte hacer una modificación extrema de algún criterio en particular el cual se desee destacar independientemente de los resultados obtenidos del método AHP



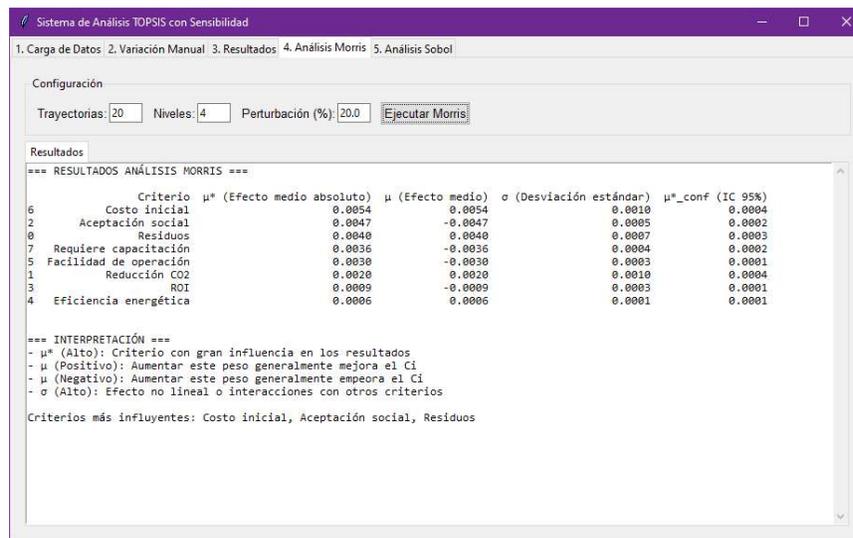
**Figura 29** Ventana emergente de análisis de sensibilidad pestaña 2 generador de controles

La figura número 37 presenta los resultados obtenidos posterior la modificación manual del criterio de facilidad de operación y en comparación con la figura 27 se observa un cambio en el orden de alternativas pasando el sistema solar fotovoltaico al tercer puesto y re ordenando a la biomasa y al biogás al puesto 4 y 5, estos cambios se realizaron de acuerdo a consideraciones técnicas específicas del usuario los cuales eran que cuentan con una red eléctrica sin embargo es inestable y con bajos voltajes.



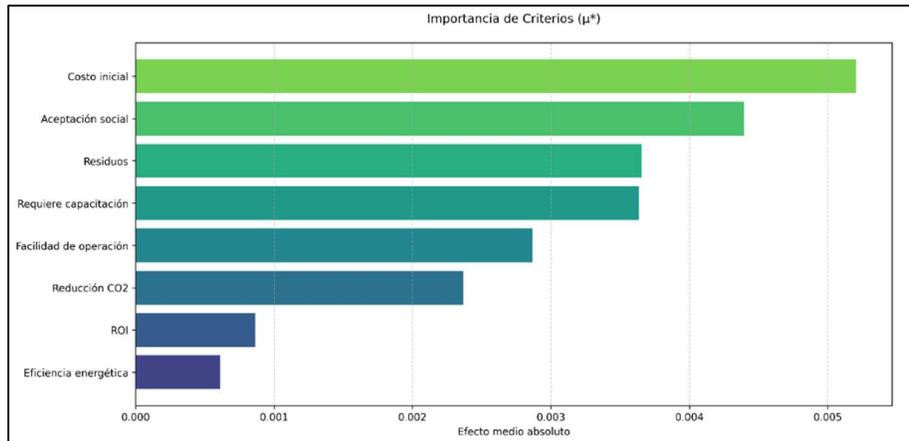
**Figura 30** Grafica de resultados con pesos de criterios modificados manualmente

La figura 38 muestra los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad Morris Screening en el cual se ingresó una perturbación del 20% y determinar cuales son los criterios mas influyentes en la selección de las alternativas energéticas.



**Figura 31** Ventana emergente de análisis Morris Screening

La figura 39 muestra una gráfica posterior al análisis de sensibilidad donde se muestra el raqueo de criterios de mayor a menor influencia en el proceso de toma de decisión donde observamos que el costo inicial es el más importante. Por otra parte, se observa un ordenamiento de criterios económicas y sociales más influyentes vs los criterios técnicos y ambientales.

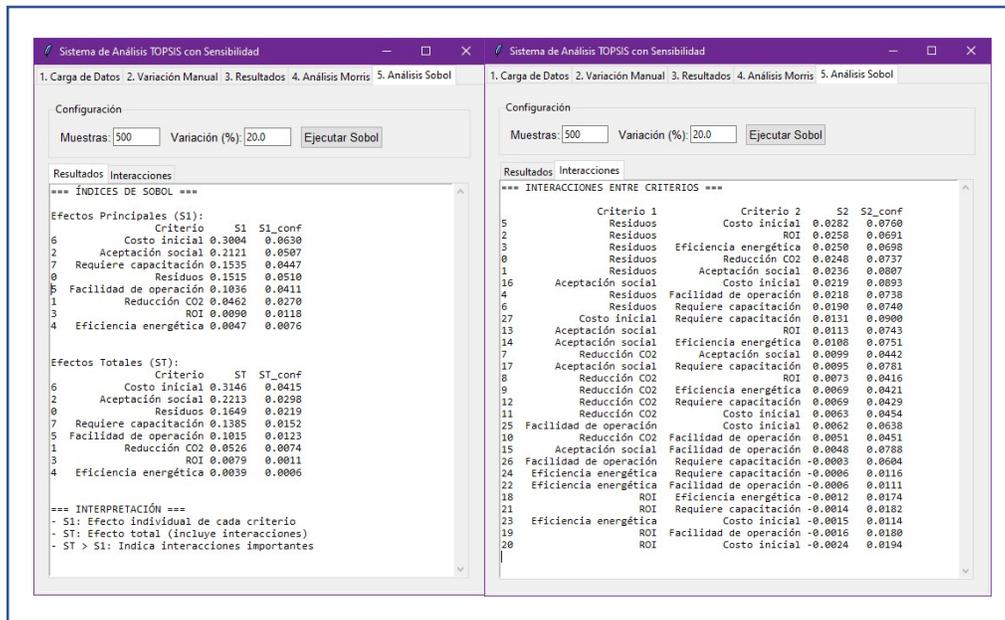


**Figura 32** Gráfica de ordenamiento de criterios posterior al análisis Morris Screening

La figura 40 muestra la ventana del módulo de análisis de sensibilidad Sobol, que permite configurar el número de muestras y el porcentaje de variación para la simulación antes de ejecutar el cálculo. Este método cuantifica la influencia de cada criterio en el resultado final del índice de cercanía ( $C_i$ ) del método TOPSIS, considerando tanto efectos individuales como interacciones entre criterios. Esta funcionalidad permite evaluar con precisión qué factores influyen más en los resultados y cómo las variaciones simultáneas de varios criterios pueden modificar el ranking de alternativas.

a)

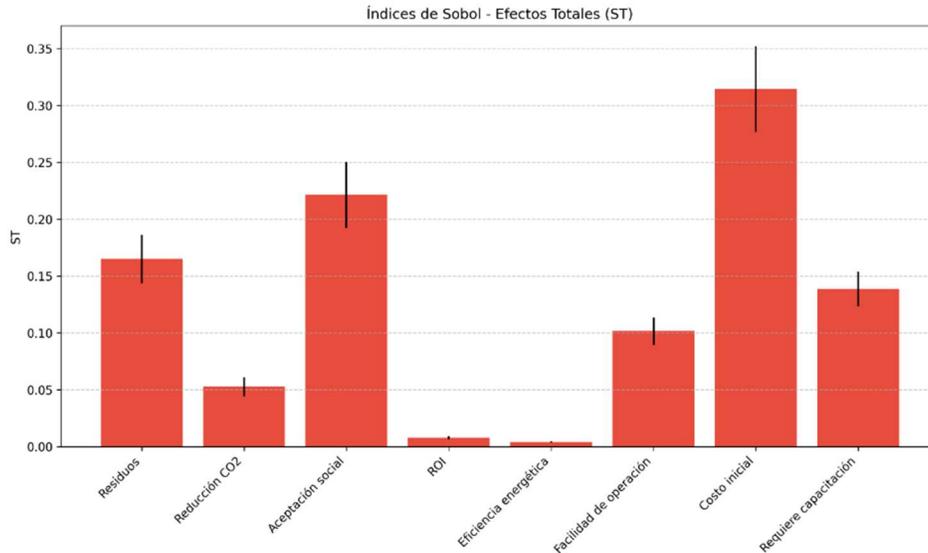
b)



**Figura 33** Ventana emergente índice de Sobol a) efectos combinados b) efectos totales

La gráfica 41 muestra el análisis de sensibilidad global mediante índices de Sobol de efecto total (ST) muestra que el desempeño del modelo está dominado por variables socio-económicas. En particular, Costo inicial presenta la mayor influencia (ST≈0.31; IC visual ~0.28–0.35), seguido de Aceptación social (ST≈0.22; ~0.19–0.25) y Residuos (ST≈0.16). Con una contribución media se ubican Requiere capacitación (ST≈0.14) y Facilidad de operación (ST≈0.10). En contraste, Reducción de CO<sub>2</sub> aporta poco (ST≈0.055) y los criterios ROI (ST≈0.007) y Eficiencia energética (ST≈0.003) resultan prácticamente no influyentes dentro de los rangos asumidos. La amplitud de las barras de incertidumbre en Costo inicial y Aceptación social sugiere que mejorar la calidad/variabilidad de datos en estos criterios podría modificar el orden relativo. En síntesis, el sistema es más sensible a barreras de entrada económica y adopción social que a métricas técnico-

energéticas; por tanto, estrategias de financiamiento, acompañamiento/entrenamiento y gestión de aceptación tendrían mayor efecto marginal sobre los resultados que optimizaciones técnicas.



**Figura 34** *Gráfica de efectos totales, criterios vs efectos totales*

En síntesis, la evaluación ex ante confirmó la pertinencia de un esquema híbrido con respaldo energético para garantizar la operación del tambor rotatorio y del control en un entorno de irradiancia variable y suministro eléctrico inestable. La aplicación participativa Delphi–AHP–TOPSIS permitió jerarquizar criterios y alternativas con base en consenso metodológico, fortaleciendo la coherencia de la decisión. En las pruebas de sensibilidad (ajustes manuales, Morris y Sobol), el costo inicial emergió como factor dominante y la estabilidad energética como condicionante del ordenamiento final, lo que respalda la selección de configuraciones robustas ante la variabilidad contextual.

En el **anexo 1 inciso c** se se observa la construcción solar rotatorio que con ayuda de esta metodología integro sus sistemas alterno de energía

## Conclusiones y recomendaciones

Conclusión del objetivo general.

La metodología multicriterio diseñada e implementada en una herramienta computacional permitió integrar criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales en la selección de fuentes de energía para secadores híbridos de alimentos. Su validación en un caso de estudio evidenció que la propuesta no solo es replicable y robusta, sino también útil para reducir riesgos de implementación y orientar decisiones hacia configuraciones sostenibles y socialmente aceptadas.

Conclusión del objetivo particular 1.

Se consolidó una metodología clara y secuencial que combina Delphi, AHP y TOPSIS, traducida en una herramienta computacional funcional en Python. Esta integración permitió procesar criterios complejos de forma accesible, asegurando transparencia en el cálculo y facilitando su aplicación en contextos reales.

Conclusión del Objetivo particular 2.

El módulo de sensibilidad incorporado permitió evaluar la robustez de los resultados frente a cambios en pesos y puntuaciones, identificando al costo inicial y la estabilidad energética como factores críticos. Esto aportó mayor confianza en la solidez de las decisiones y otorgó a la herramienta un carácter predictivo frente a la incertidumbre.

Conclusión del objetivo particular 3.

Caso de Estudio I (post-implementación):

La aplicación retrospectiva de la metodología a un secador híbrido previamente instalado permitió evidenciar que la alternativa elegida no era la óptima. El análisis multicriterio mostró que una configuración más simple y de menor costo habría resultado más adecuada, lo que confirma la capacidad del modelo para anticipar fallas de diseño y orientar decisiones más acertadas.

### Caso de Estudio II (pre-diseño):

En el diseño prospectivo de un secador para café, la metodología guio la selección de una configuración híbrida robusta que combinó energía solar, biomasa y respaldo fotovoltaico. El proceso participativo y el análisis de sensibilidad validaron la solidez de la decisión, asegurando una solución técnica viable y socialmente aceptada por la comunidad.

## Referencias bibliográficas

- Amer, B. M. A., Hossain, M. A., & Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, *51*(4), 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.016>
- Anum, R., Ghafoor, A., & Munir, A. (2017). Study of the Drying Behavior and Performance Evaluation of Gas Fired Hybrid Solar Dryer. *Journal of Food Process Engineering*, *40*(2), e12351. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12351>
- Armah, K. A., Akowuah, J. O., Obeng-Akrofi, G., & McNeill, S. G. (2021). Application of Analytic Hierarchy Process in Selection of an Appropriate Drying Platform for Maize Drying in a Solar Bubble Dryer. *Open Journal of Applied Sciences*, *11*(01), 157–175. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2021.111011>
- Balasundaram, P., Baranidharan, B., & Sivaram, N. M. (2023). A VIKOR based selection of phase change material for thermal energy storage in solar dryer system. *Materials Today: Proceedings*, *90*, 245–249. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.174>
- Bandeiras, F., Gomes, Á., Gomes, M., & Coelho, P. (2025). Multi-criteria sustainability assessment of energy resources in the energy supply chain of smart city ecosystems. *Energy Nexus*, *18*, 100441. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100441>
- Bhattacharya, S. C., Ruangrunchaikul, T., & Pham, H. L. (2000). Design and Performance of a Hybrid Solar/Biomass Energy Powered Dryer for Fruits and Vegetables. En *World Renewable Energy Congress VI* (pp. 1161–1164). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50240-3>

- Budak, G., Chen, X., Celik, S., & Ozturk, B. (2019). A systematic approach for assessment of renewable energy using analytic hierarchy process. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0219-y>
- Budnick, F. S., MacLeavey, D. W., Mojena, R., & McLeavey, D. (1988). *Principles of operations research for management* (2. ed). Irwin.
- Camacho-Martinez, H. A., Antonio-Gordillo, D. M., Robles-Ocampo, J. B., & Sevilla-Camacho, P. J. (2019). Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano. *Revista de Sistemas Experimentales*, 26–33. <https://doi.org/10.35429/JOES.2019.21.6.26.33>
- Chatterjee, K., & Kar, S. (2018). A multi-criteria decision making for renewable energy selection using Z-numbers in uncertain environment. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(2), 739–764. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1261375>
- Conde Diaz, O. A. (2020). *Desarrollo de un secador solar—Biomásico rotatorio autoamantizado, para el deshidratado de granos de café*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1490>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry & research design: Choosing among five approaches* (Fourth edition, international student edition). SAGE.
- Deb, A., Mandal, S. K., & Das Ghatak, M. (2025). An MCDM approach for selection of a biomass fuel for a natural convection dryer based on thermo-economic-environmental analysis. *Engineering Research Express*, 7(1), 015505. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ada224>
- Delgado-Plaza, E., Peralta-Jaramillo, J., Quilambaqui, M., Gonzalez, O., Reinoso-Tigre, J., Arevalo, A., Arancibia, M., Paucar, M., & Velázquez-Martí, B. (2019). Thermal

- Evaluation of a Hybrid Dryer with Solar and Geothermal Energy for Agroindustry Application. *Applied Sciences*, 9(19), 4079. <https://doi.org/10.3390/app9194079>
- Dhanuskodi, S., & S, W. (2014). Design and thermal performance of the solar biomass hybrid dryer for cashew drying. *Facta Universitatis*, 12(3), 277–288.
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4)
- Eltawil, M. A., Azam, M. M., & Alghannam, A. O. (2018). Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar collector for drying mint (*Mentha Viridis*). *Journal of Cleaner Production*, 181, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.229>
- Escobar, A. (2009). “Postdesarrollo” como concepto y práctica social. *Revista Española de Desarrollo y Cooperación*, 24, 81–99.
- Escobar, A. (2018). *Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Duke University Press. <https://www.dukeupress.edu/designs-for-the-pluriverse>
- FAO. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention; study conducted for the International Congress Save Food! at Interpack 2011, [16 - 17 May], Düsseldorf, Germany* (J. Gustavsson, Ed.). International Congress Save Food!, Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gutiérrez Gutiérrez, M. S. (2024). *Construcción y evaluación de un secador híbrido solar biomásico*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/5696>

- Hamdani, Rizal, T. A., & Muhammad, Z. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. *Case Studies in Thermal Engineering*, *12*, 489–496.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008>
- Hermansyah, H. D., Anggraeni, D., Mariastuty, T. E. P., Alfa, M. N., Agusta, W., Royanti, I., & Dyah, C. K. (2023). Feasibility Study of Hybrid Dryer Utilization to Produce Red Ginger Simplicia in Pekalongan Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1246*(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1246/1/012028>
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., & Maskan, M. (2017). Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, *230*, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.046>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. En M. Beckmann & H. P. Künzi (Eds.), *Multiple Attribute Decision Making* (Vol. 186, pp. 58–191). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)
- Iglesias Díaz, R. (2013). *Diseño, construcción, evaluación y validación de un secador solar para el secado del té limón*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/430>
- Jha, A., & Tripathy, P. P. (2021). Recent Advancements in Design, Application, and Simulation Studies of Hybrid Solar Drying Technology. *Food Engineering Reviews*, *13*(2), 375–410. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09223-2>
- Joseph O. Akowuah, Owusu, G., Obeng-Akrofi, G., & Adjei, P. D. (2023). Comparative assessment of three low-capacity drying systems using the analytical hierarchy process. *Journal of the Ghana Institution of Engineering (JGhIE)*, *23*(4), 17–25.  
<https://doi.org/10.56049/jghie.v23i4.101>

- Kokate, Y. D. (2024). A recapitulation of solar dryers in realm—Evaluating geometry, modes, thermal energy storage, and applications in agricultural produce. *Journal of Thermal Engineering*, 1647–1678. <https://doi.org/10.14744/thermal.0000875>
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (Fifth Edition). McGraw-Hill US Higher Ed USE Legacy.
- Łechtańska, J. M., Szadzińska, J., & Kowalski, S. J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 98, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.001>
- López-Vidaña, E. C., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. *Solar Energy*, 93, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.027>
- Maurer, C., & Müller, J. (2019). Drying Characteristics of Biogas Digestate in a Hybrid Waste-Heat/Solar Dryer. *Energies*, 12(7), 1294. <https://doi.org/10.3390/en12071294>
- Morales Ovando, M. A., & Dominguez Espinosa, M. E. (2016). *Cálculo y diseño de dos secadores solares con sistema fotovoltaico para deshidratación de alimentos*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/1880>
- Morgan, D. L. (2014). Pragmatism as a Paradigm for Social Research. *Qualitative Inquiry*, 20(8), 1045–1053. <https://doi.org/10.1177/1077800413513733>
- Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., & Khoshtaghaza, M. H. (2012). Saffron Drying with a Heat Pump–Assisted Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Dryer. *Drying Technology*, 30(6), 560–566. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.645261>

- Ndukwu, M. C., Onyenwigwe, D., Abam, F. I., Eke, A. B., & Dirioha, C. (2020). Development of a low-cost wind-powered active solar dryer integrated with glycerol as thermal storage. *Renewable Energy*, *154*, 553–568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.016>
- Nein, uvm. (2022, noviembre 3). *Investigadores de UVM desarrollan Cámara de doble combustión en secadores de café para impulsar a productores del estado de Chiapas*. <https://laureate-comunicacion.com/prensa/investigadores-de-uvm-desarrollan-camara-de-doble-combustion-en-secadores-de-cafe-para-impulsar-a-productores-del-estado-de-chiapas/>
- Nurba, D., MARDJAN, S. S., & WULANDANI, D. (2025). Aeration system optimization for a deep bed dryer for paddy grain using computational fluid analysis and the AHP-TOPSIS method. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, *12*(2), 308. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024577>
- Pathak, S. K., Sharma, V., Chougule, S. S., & Goel, V. (2022). Prioritization of barriers to the development of renewable energy technologies in India using integrated Modified Delphi and AHP method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *50*, 101818. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101818>
- Pavón Gómez, G. (2015). *Sistema híbrido termosolar- eólico para la conservación de productos agropecuarios*. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/716>
- Roszkowska, E. (2011). *Multi-criteria decision making models by applying the TOPSIS method to crisp and interval data* (Multiple Criteria Decision Making, pp. 200-230.).
- Rupnar, A. K., Jain, S., Panwar, N. L., & Jain, S. K. (2020). Design and Development of Solar-biogas Hybrid Dryer for Onion Drying. *International Journal of Environment and Climate Change*, *65–73*. <https://doi.org/10.9734/ijec/2020/v10i730212>

- Saaty, T. L. (1982). The Analytic Hierarchy Process: A New Approach to Deal with Fuzziness in Architecture. *Architectural Science Review*, 25(3), 64–69.  
<https://doi.org/10.1080/00038628.1982.9696499>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons.
- Sarrazin, F., Pianosi, F., & Wagener, T. (2016). Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation. *Environmental Modelling & Software*, 79, 135–152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.005>
- Si, J., Marjanovic-Halburd, L., Nasiri, F., & Bell, S. (2016). Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. *Sustainable Cities and Society*, 27, 106–115.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.013>
- Siksnyte-Butkiene, I., Zavadskas, E. K., & Streimikiene, D. (2020). Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) for the Assessment of Renewable Energy Technologies in a Household: A Review. *Energies*, 13(5), 1164. <https://doi.org/10.3390/en13051164>
- Singh, P., & Gaur, M. K. (2021). Environmental and economic analysis of novel hybrid active greenhouse solar dryer with evacuated tube solar collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101428. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101428>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>

- Tan, J., Low, K. Y., Sulaiman, N. M. N., Tan, R. R., & Promentilla, M. A. B. (2016). Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) for multi-criteria selection of microalgae harvesting and drying processes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(7), 2049–2063. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1163-6>
- Ulewicz, R., Siwiec, D., Pacana, A., Tutak, M., & Brodny, J. (2021). Multi-Criteria Method for the Selection of Renewable Energy Sources in the Polish Industrial Sector. *Energies*, 14(9), 2386. <https://doi.org/10.3390/en14092386>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (Sixth edition). SAGE.
- Zakaria, M. H., & Ahmad, M. F. (2022). The preferences towards local and imported matured coconut using the Delphi and AHP approach. *Economic and Technology Management Review*, Vol. 19, 43–53.
- Zhao, H., & Guo, S. (2014). Selecting Green Supplier of Thermal Power Equipment by Using a Hybrid MCDM Method for Sustainability. *Sustainability*, 6(1), 217–235. <https://doi.org/10.3390/su6010217>

## Anexos

a)

### Propuesta de criterios para utilizar en la metodología

Dimensión	Criterio	Breve descripción	Referencia
Social	Aceptación pública	Grado en que la comunidad/locales aceptan la instalación y uso de la tecnología energética.	(Siksnylyte-Butkiene et al., 2020)
	Creación de empleo local	Número de empleos directos o indirectos que la tecnología puede generar en la zona.	(Chatterjee & Kar, 2018)
	Conciencia sociocultural	Nivel de conocimiento e interés de la población en temas de energía renovable o impacto ambiental.	(Siksnylyte-Butkiene et al., 2020)
	Impacto sobre salud / calidad de vida	Efectos de la fuente de energía sobre la salud humana (emisiones, contaminación, ruido) y sobre la vida diaria.	(Siksnylyte-Butkiene et al., 2020)
	Inclusión social / equidad	Qué tan justa es la distribución de los beneficios/costos sociales entre diferentes grupos (pobreza, género, comunidades rurales).	(Budak et al., 2019)
Económico	Costo de inversión inicial	Gasto requerido para adquisición, transporte y montaje de la tecnología.	(Siksnylyte-Butkiene et al., 2020)
	Costo de operación y mantenimiento	Gastos periódicos para mantener la fuente energética operativa.	(Chatterjee & Kar, 2018)
	Periodo de retorno de la inversión	Tiempo que tarda que los beneficios recuperen el gasto inicial.	(Siksnylyte-Butkiene et al., 2020)
	Rentabilidad / beneficio económico	Relación entre beneficios económicos esperados y costos, puede incluir ingresos por venta de energía o subsidios.	(Ulewicz et al., 2021)
	Estabilidad de precios	Qué tan susceptibles son los costos operativos a variaciones del mercado o políticas (precio de insumos, tarifas).	(Budak et al., 2019)

Ambiental	Emisiones de gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> , GHG)	Cantidad de emisiones generadas por la fuente energética con relación a su producción.	(Siksnelyte-Butkiene et al., 2020)
	Uso del suelo / impacto en ecosistemas	Alteraciones del uso del suelo, pérdida de biodiversidad, impacto sobre flora y fauna.	(Chatterjee & Kar, 2018)
	Consumo de agua / uso de recursos hídricos	Cantidad de agua utilizada, demanda de agua para refrigeración, limpieza, etc.	(Ulewicz et al., 2021)
	Residuos y contaminación (otra que emisiones)	Generación de residuos sólidos, contaminación del suelo, emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , etc.	(Siksnelyte-Butkiene et al., 2020)
	Impacto del ciclo de vida (LCA)	Evaluación del impacto ambiental a lo largo de todas las etapas, desde extracción hasta disposición.	(Bandeiras et al., 2025)
Técnico	Eficiencia energética / rendimiento	Qué fracción de la energía suministrada se convierte en salida útil de secado o trabajo.	(Chatterjee & Kar, 2018)
	Fiabilidad operativa / tiempo de disponibilidad	Capacidad del sistema para funcionar sin fallas, operar cuando se requiere.	(Siksnelyte-Butkiene et al., 2020)
	Vida útil / durabilidad del equipo	Tiempo durante el cual los componentes mantienen desempeño aceptable.	(Chatterjee & Kar, 2018)
	Facilidad de mantenimiento / accesibilidad técnica	Grado de complejidad técnica, necesidad de capacitación, accesibilidad para repuestos y mantenimiento.	(Budak et al., 2019)
	Nivel de innovación / madurez tecnológica (TRL)	Qué tan desarrollada está la fuente energética, tecnología probada, grado de riesgo tecnológico.	(Chatterjee & Kar, 2018)

b)

## ENCUESTA PARA EXPERTOS Y USUARIOS

## Instrucciones:

A continuación se presenta un conjunto de 20 criterios agrupados en cuatro dimensiones: técnica, económica, ambiental y social.

Por favor, evalúe la importancia de cada criterio enunciando un número en la casilla de acuerdo a su juicio según su juicio: 1-3 = Poco importante, 4-6 = Regular, 7-9 = Muy importante.

## Dimensión: Técnica

Criterio	1-3 Poco	4-6 Regular	7-9 Importante
Eficiencia energética	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Confiabilidad operativa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vida útil del sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Facilidad de mantenimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nivel de innovación tecnológica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Dimensión: Económica

Criterio	1-3 Poco	4-6 Regular	7-9 Importante
Costo de inversión inicial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Costo de operación y mantenimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Periodo de retorno de inversión	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rentabilidad esperada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estabilidad de precios	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Dimensión: Ambiental

Criterio	1-3 Poco	4-6 Regular	7-9 Importante
Emisiones de GEI	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Uso de recursos hídricos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Impacto en ecosistemas terrestres	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Residuos y contaminación no gaseosa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Impacto del ciclo de vida (LCA)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Dimensión: Social

Criterio	1-3 Poco	4-6 Regular	7-9 Importante
Aceptación social	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Generación de empleo local	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nivel de capacitación requerida	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conciencia sociocultural	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inclusión social / equidad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

\*Si considera que en la presente evaluación se omite algún criterio que usted considere necesario enuncie con una breve justificación

Anexo 1



