

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS

Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

**DOCTORADO EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS
RENOVABLES**

TESIS

**METODOLOGÍA Y SOFTWARE PARA LA
OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO DE SISTEMAS
HÍBRIDOS DE ENERGÍA**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTORA EN MATERIALES Y SISTEMAS

ENERGÉTICOS RENOVABLES

PRESENTA

PAOLA ANDREA URBANO ARCILA

DIRECTOR: DR. ORLANDO LASTRES DANGUILLECOURT

CO-DIRECTOR: DR. GEOVANNI HERNÁNDEZ GALVEZ

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Noviembre de 2021.

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Instituto de Investigación e Innovación en Energías renovables

Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

TESIS

**“Metodología y software para la
optimización multicriterio de sistemas
híbridos de energía”**

**Para Obtener el Grado de:
Doctora en Materiales y Sistemas
Energéticos Renovables**

Presenta:

Paola Andrea Urbano Arcila

DIRECTOR:

Dr. Orlando Lastres Danguillecourt

CO-DIRECTOR:

Dr. Geovanni Hernández Galvez



TUXTLA GUTIÉRREZ- CHIAPAS

NOVIEMBRE DE 2021



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 22 de octubre de 2021

Oficio No. DGIP/784/2021

Asunto: Autorización de impresión de tesis

C. Paola Andrea Urbano Arcila
Candidata al Grado de Doctora en Materiales y
Sistemas Energéticos Renovables
Instituto de Investigación e Innovación
en Energías Renovables
UNICACH
Presente

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Metodología y software para la optimización multicriterio de sistemas híbridos de energía** cuyos directores de tesis son el Dr. Orlando Lastres Danguillecourt y Dr. Geovanni Hernández Galvez, quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección General 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 Doctora en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección General de un ejemplar empastado.

ATENTAMENTE
"POR LA CULTURA DE MI RAZA"

DRA. CAROLINA ORANTES GARCÍA
DIRECTORA GENERAL



DIRECCIÓN GENERAL DE
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

C.c.p. Dr. Pascual López de Paz, Director del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.
Dr. Héber Vilchis Bravo, Coordinador del Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento.
Expediente



*COG/essigipgr

Dirección General de
**Investigación
y Posgrado**

2021. Año de la Independencia

Dirección General de Investigación y Posgrado
Liberamiento Norte Poniente No. 1150
Colonia Lajas Blancas, CP 29025,
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Tel: (761) 617 0448-6594303
www.dgip@posgrado@unicach.mx

CONTENIDO

Acrónimos y siglas.....	8
Índice de Tablas.....	13
Índice de Figuras	15
RESUMEN	18
ABSTRACT.....	19
DEDICATORIA	20
AGRADECIMIENTOS	21
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	22
1.1 El desarrollo sustentable y el trilema energético.	26
1.2 Fuentes renovables de energía. Estado actual en México y resto del mundo.	28
1.3 Experiencias nacionales e internacionales de sistemas híbridos. Principales retos para su desarrollo sustentable.	31
1.3.1 Experiencias nacionales: Sistemas híbridos en México	31
1.3.2 Experiencias Internacionales: Sistemas híbridos alrededor del mundo.	34
1.3.3 Principales retos para el desarrollo sustentable de los sistemas híbridos.	35
1.4 Antecedentes	36
1.4.1 Criterios de sustentabilidad energética utilizados en estudios previos.....	37
1.4.2 Métodos de análisis multicriterio utilizados en la optimización de sistemas energéticos.....	41
1.4.3 Aspectos destacados.....	46
1.5 Descripción y formulación del problema de investigación.	49
1.6 Justificación.....	50
1.7 Preguntas de investigación.....	50
1.8 Objetivos.	51
1.8.1 Objetivo general.....	51
1.8.2 Objetivos específicos	51
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	52
2.1 Sistemas híbridos de generación de energía.	52
2.1.1 Configuraciones principales.....	52
2.1.2 Tecnologías de generación involucradas.	57
2.1.3 Tecnologías de almacenamiento de energía.....	62

2.1.4	Estrategias de control	67
2.1.5	Dimensionado de sistemas híbridos.	73
2.1.5.1	Técnicas clásicas	74
2.1.5.2	Técnicas metaheurísticas	75
2.1.5.3	Técnicas híbridas	76
2.1.5.4	Metodología del mes peor	78
2.1.5.5	Metodologías de diseño multiobjetivo	81
2.2	Criterios e indicadores de sustentabilidad energética. Fundamentos teóricos.	81
2.2.1	Criterios técnicos	83
2.2.2	Criterios económicos	84
2.2.3	Dimensión social	86
2.2.4	Criterios ambientales	89
2.2.5	Criterios institucionales	93
2.3	Metodologías de análisis multicriterio. Fundamentos teóricos.....	94
2.3.1	Método de la Suma de los Pesos	95
2.3.2	Método del Producto de los Pesos	95
2.3.3	AHP	96
2.3.4	ELECTRE	96
2.3.5	TOPSIS.....	97
2.3.6	VIKOR.....	97
2.3.7	PROMETHE	98
2.3.8	MAUT.....	99
2.4	Paquetes de software comerciales para el diseño de sistemas híbridos.....	99
2.4.1	HOMER	99
2.4.2	HYBRID2.....	102
2.4.3	TRNSYS	102
2.4.4	HYDROGems.....	102
2.4.5	INSEL	103
2.4.6	ARES.....	103
2.4.7	RAPSIM	103
2.4.8	SOMES	104
2.4.9	SOLSIM	104
2.4.10	RETSscreen	104

2.4.11	HOGA.....	104
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....		108
3.1	Metodología para identificar las perspectivas en el dimensionado de sistemas híbridos de generación de energía.	108
3.2	Metodología para la selección adecuada de los criterios de sustentabilidad.	110
3.3	Metodología para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio.	114
3.4	Metodología propuesta para resolver un caso de estudio utilizando la herramienta desarrollada.	115
3.4.1	Selección y ubicación de la comunidad caso de estudio.	116
3.4.2	Bases de datos utilizadas en el caso de estudio.	117
3.4.3	Software utilizado.	117
3.4.4	Parámetros utilizados en la validación.	118
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		120
4.1	Análisis comparativo de los métodos de dimensionado de sistemas híbridos. Perspectivas.	120
4.1.1	Algoritmo de la metodología AHP.....	123
4.1.2	Algoritmo de la metodología VIKOR	126
4.1.3	Algoritmo de la metodología TOPSIS	128
4.2	Criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo de sistemas híbridos de generación de energía.....	130
4.2.1	Criterios de sustentabilidad para sistemas energéticos renovables.....	132
4.2.2	Ponderación de pesos de los criterios.....	136
4.3	Descripción de la metodología de optimización y del software desarrollado.	139
4.3.1	Esquema de la metodología obtenida.....	139
4.3.2	Esquema del desarrollo del software.....	144
4.4	Desarrollo de un caso de estudio y comparación con software comerciales.	149
4.4.1	Caso de estudio desarrollado con software comercial.....	162
4.4.2	Comparación de resultados y análisis	168
4.5	Desarrollo de casos de estudio adicionales y comparación de resultados	170
4.5.1	Resultados de los casos adicionales desarrollados.....	175
4.5.2	Análisis de resultados de otros casos desarrollados	188
CONCLUSIONES		192
RECOMENDACIONES.....		193
BIBLIOGRAFÍA.....		194

ANEXOS	208
ANEXO A. Indicadores de Sustentabilidad de la AGENDA 21.....	208
ANEXO B. Optimización Monocriterio de un Sistema Híbrido Usando Homer.	213
ANEXO C. Optimización Monocriterio de un Sistema Híbrido Usando iHOGA.....	216

Acrónimos y siglas

Acrónimos y Siglas	Español	Inglés y otros
AC	Corriente Alterna	Altern Current
ACH	Algoritmo de colonia de hormigas	Ant colony Optimization ACO
AD	Asignación directa	Direct assignation
AHP	Proceso de Jerarquía Analítica	Analytic Hierarchy Process
AMC	Análisis Multicriterio	Multicriteria analysis
AMC3VAT	Análisis multicriterio por 3 metodologías: VIKOR, AHP y TOPSIS	MCDA by 3 methods, VIKOR, AHP and TOPSIS
AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica	Wind Energy Mexican Association
ANFIS	Sistema de interface artificial neural difusa	Adaptive neural-based fuzzy inference system
ANN	Redes neuronales analíticas	Analytic Neural Network
ANP	Proceso Analítico en Red	Analytic Network Process
BCS	Baja California Sur	Baja California Sur
BG	Biogás	Biogas
BP	Petrolera Británica	British Petroleum
CAES	Almacenamiento de energía en aire comprimido	Compressed Air Energy Storage
CC	Ciclo de carga de baterías	Cycle of Charge
Cd	Cadmio	Cadmium
CDMX	Ciudad de México	Ciudad de México
CEM	Enumeración completa	Complete enumeration model
CEO	Director ejecutivo	Chief Executive Officer
CFE	Comisión federal de electricidad	Federal comission of electricity
CIM	Construcción, instalación y manufactura	Construction, installation and manufacturing
CODAS	Evaluación conjunta basada en la distancia	Combinative Distance-based Assessment
COP	Conferencia de las partes, sobre el cambio climático	Conference of Parts, on climate change
COPRAS	Evaluación proporcional compleja	Complex Proportional Assessment
CPP	Comparación pareada o por pares	Pairwise comparison
CSA	Algoritmo de búsqueda de Cuckoo	Cuckoo Search Algorithm
DA	Algoritmo diferencial	Diferential Algorithm
DANP	DEMANTEL ANP	DEMANTEL ANP
DC	Corriente Continua	Direct Current
DEA	Análisis de datos de la envolvente	Data Envelopment Analysis
DEMANTEL	Laboratorio de evaluación de ensayos en la toma de decisiones y evaluación de la toma de decisiones.	Decision Making Trial and Evaluation Decision Making Evaluation Laboratory
DOD	Profundidad de descarga	Deep of Discharge

DOF	Diario Oficial de la Federación	Federation official journal
DP	Programación Dinámica	Dinamic Programming
DS	Simple de Downhil	Downhil Simplex
EDLC	SC Eléctrico de doble capa	Electrostatic double-layer capacitors
EE	Eólica	Wind Energy
EESINTEGRA	Evaluación integral de las viviendas y sus sistemas de suministro de energía	Integrated Assessment of the Building and its Energy Supply Systems
EFC	Ciclos completos equivalentes	Equivalent full cycle
efW	Energía a partir de los desperdicios	Energy from Waste
ELECTRE	Eliminación y elección traducida a la realidad	Elimination and Choice Expressing Reality
ER	Energías renovables	Renewable energy
ESS	Solucionador de ecuaciones de ingeniería	Engineering Equation Solver
EXPANSE	Exploración de Patrones en Escenarios Energéticos Casi Óptimos	Exploration of Paterns in Near-Optimal Energy Scenarios
FA	Análisis factorial	Factor Analysis
FARE	Relación de Factores	Factor Relationship
FEA	Análisis del elemento finito	Finite Element Analysis
FL	Lógica difusa	Fuzzy Logic
FTN	Números difusos triangulares	Fuzzy Triangular Numbers
FV	Fotovoltaicos	Photovoltaic
GA	Algoritmos genéticos	Genetic Algorithm
GAUF	Promedio geométrico de la función de utilidad	Geometric Average Utility Function
gCO ₂ eq	Gramos equivalentes de CO ₂	Equivalentent grams of CO ₂
GHG	Gases de efecto invernadero	Greenhouse Gas
GIS	Sistema de información geográfica	Geographical Information System
GP	Programación objetivo	Goal Programming
GRA	Gris	Gray
HFAC	acoplado a alta frecuencia AC	High frequency alternating current
HID	Hidalgo	Hidalgo
HMI	Interface de interacción humano-máquina	Human machine interface
HOGA	Optimización híbrida por algoritmos genéticos	Hybrid Optimization by Genetic Algorithms
HOMER	Optimización híbrida de múltiples recursos energéticos	Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources
IFE	Instituto de tecnología energética	Institute for Energy Technology
INERE	Inventario Nacional de Energías Renovables	Renewable energy National inventory
IPCC	Panel intergubernamental en cambio climático	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	Agencia internacional de las energías renovables	International Renewable Energy Agency
IT2 FNs	Números difusos tipo 2 de intervalo	Interval Type-2 Fuzzy Numbers
JAL	Jalisco	Jalisco
Lc	Valor crítico de carga	critical load value

LCA	Análisis del Ciclo de Vida	Life Cycle Analysis
Ld	Valor crítico de descarga	critical discharge value
LEC	Costo nivelado de la energía	Levelized cost of energy
LF	Seguimiento de la demanda	Load following
LHS	Muestreo de hipercubo latino	Latin Hypercube Sampling
LNN	Números neutrosóficos lingüísticos	Linguistic Neutrosophic Numbers
LPM	Modelo de programación lineal	Linear programming model
MABAC	Comparación de áreas por aproximación de bordes multiatributivo	Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison
MatLab	Laboratorio de Matemáticas	Mathematics Laboratory
MAUT/MAVT	Teoría de Utilidad Multiatributo	Multi-attribute Value/Utility Theory
MCD A	Análisis multicriterio en la toma de decisiones	Multicriteria decision analysis
MCDM	toma de decisiones multicriterio	Multi Criteria Decision Making
MCP	Matriz de comparación pareada o por pares	Pairwise comparison Matrix
MCS	Simulación de Monte Carlo	Monte Carlo Simulation
MEX	Estado de México	Estado de México
MHYDRO	Microhidráulico	Microhidráulico
MILP	Programación lineal de enteros mixtos	Mixed Integer Linear Programing
MIQP	Programación cuadrática de enteros mixtos	Mixed Integer Quadratic Programming
MODM	Toma de decisiones multiobjetivo	Multi-objective decision making
MODO	Diseño de optimización multiobjetivo	Multi Objective design optimization
MOEA	Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo	Multi-Objective Evolutionary Algorithm
MOGLP	Programación lineal multiobjetivo	Multi Objective Gray Linear Programming
Ni	Níquel	Nickel
NLP	Programación no lineal	Non-linear Programming
NO _x	Eutrofización	Eutrophication
NPC	Costo neto presente	Net present cost
NREL	Laboratorio nacional de energías renovables	National Renewable Energy Laboratory
NSGA	Organización por Algoritmos genéticos no dominados	Non-dominated Sorting GA
O&M	Costos de operación y mantenimiento	Operation and Maintainance
ODI	Orden de importancia	Importance order
OWA	Orden por promedio ponderado	Ordered Weighted Averaging
Pb	Plomo	Lead
PFAC	Acoplado a energía en frecuencia AC	Power frequency AC
PROMETHEE	Método de Organización de Clasificación de Preferencias para la Evaluación de Enriquecimiento	Preference Ranquin Organization Method for Enrichment Evaluations
PSO	Optimización por enjambre de partículas	Particle Swarm Optimization
PW	Pareada	Pairwise
RAPSIM	Simulador de suministro energético para un área remota	Remote Area Power Supply Simulator

RE3ASON	Optimización y análisis de eficiencia energética de sistemas de energías renovables	Renewable Energies and Energy Efficiency Analysis and System OptimizatioN
REMM	Modelo de administración exérgica racional	Rational Exergy Management Model
ROO	Quintana Roo	Quintana Roo
SA	Simulación anidada o recocido simulado	Simulated annealing
SC	Super capacitor	Supercapacitor
SDSS	Sistema de soporte a la decisión espacial	Spatial Decision Support System
SEDESOL	Secretaría de desarrollo social	Social development Secretary
SENER	Secretaría de energía	Energy Secretary
SFLA	Algoritmo de Salto de Rana Combinado	Shuffled Frog Leaping Algorithm
SHGE	Sistemas híbridos de Generación de Energía	Hybrid Renewable Energy System
SIR	Ranquin de superioridad e inferioridad	Superiority and Inferiority Ranquin
SMES	Super conductor magnético de almacenamiento	Superconducting magnetic energy storage
SO ₂	Lluvia Ácida	Acid rain
SOC	Estado de carga de baterías	State of charge of the battery bank
SOV	estado de la tensión	State of voltage
SP	Punto de ajuste	Set Point
SWARA	Análisis de Relación de Evaluación de Peso por Pasos	Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis
SWRE	Revisión estadística de la energía mundial	Statistical Review of World Energy
TAM	Tamaulipas	Tamaulipas
TOPSIS	Técnica de orden de preferencia mediante soluciones similares a la ideal	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TOS	Árbol de la ciencia	Tree of Science
TRNSYS	Programa de simulación de sistemas de energía transitorios	Transient Energy System Simulation Program
TS	Búsqueda Tabú	Tabu Search
UNEP	Programa ambiental de las Naciones Unidas	United Nation Environmental Program
USA	Estados unidos de América	United States of América
UTM	Marcador universal transversal	Universal Transversal de Mercator
UUEE	Unión Europea	Europe Union
VER	Veracruz	Veracruz
VIKOR	Solución compromiso y optimización multicriterio	Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Serbian) Multicriteria Optimization and Compromise Solution (English)
VLRA	Válvulas de regulación plomo-Ácido	Valve-Regulated Lead-Acid
WASPAS	Evaluación de la agregación de pesos por la suma del producto	Weighted Aggregated SumProduct Assessment
WCED	Comisión Mundial Del Desarrollo y Medio Ambiente	World Comission on Environment and Development

WEC	Consejo mundial de energía	World Energy Council
WGS	Sistema geodésico mundial	World geodesic system
WOS	Red de la ciencia	Web of Science
WS	Suma de pesos	Weighted Sum
YUC	Yucatán	Yucatán
ZAC	Zacatecas	Zacatecas
ϵ -constraint	Restricciones Épsilon	Restrictions Ipsilon

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Sistemas híbridos renovables en México.

Tabla 1.2 Sistemas híbridos renovables alrededor del mundo.

Tabla 1.3 Valores estimados de los criterios para las tecnologías renovables consideradas. Valores máximos y mínimos entre paréntesis [43].

Tabla 1.4 Autores que emplearon enfoque multicriterio.

Tabla 1.5 Número de publicaciones (NP) por metodología MCDM o MODM encontradas en la revisión.

Capítulo 2

Tabla 2.1 Tecnologías en energías renovables (Generación y almacenamiento).

Tabla 2.2 Número de ciclos durante la vida útil de las baterías.

Tabla 2.3 Cuadro comparativo de los métodos de diseño de sistemas híbridos.

Tabla 2.4 Diseño de sistemas híbridos con enfoque monocriterio o mono-objetivo.

Capítulo 4

Tabla 4.1 Herramientas MCDM y MODM más empleadas en proyectos que involucran energías renovables.

Tabla 4.2 Ventajas y desventajas de los MCDM más populares en el diseño de sistemas híbridos.

Tabla 4.3 Escala de nueve puntos para comparación pareada de importancia entre criterios.

Tabla 4.4 Índice de consistencia aleatoria [188].

Tabla 4.5 Criterios de sustentabilidad empleados en países desarrollados.

Tabla 4.6 Criterios de sustentabilidad empleados en países en vías de desarrollo.

Tabla 4.7 Listado de criterios de sustentabilidad para el contexto de países en vías de desarrollo.

Tabla 4.8 Compendio de datos de recibos de CFE de una vivienda en Tehuantepec.

Tabla 4.9 Resultados de la optimización mono-criterio.

Tabla 4.10 Alternativas de entrada para el análisis multicriterio.

Tabla 4.11 Criterios de sustentabilidad para el caso de estudio.

Tabla 4.12 Matriz decisional caso de estudio electrificación rural istmo de Tehuantepec.

Tabla 4.13 Matriz de comparación por pares (MCP) obtenida para el caso de estudio.

Tabla 4.14 Valores de los pesos por medio de las tres metodologías de ponderación propuestas.

Tabla 4.15 Resultados del análisis multicriterio.

Tabla 4.16 Alternativas generadas por iHOGA en el diseño mono-objetivo.

Tabla 4.17 Resultados de la optimización multi-objetivo empleando iHOGA.

Tabla 4.18 Demanda energética bimestral para los casos de estudio 1 a 5.

Tabla 4.19 Datos de inventario del caso de estudio Departamentos.

Tabla 4.20 Perfil típico de una residencia (HOMER).

Tabla 4.21 Otros casos de estudio para aplicar la metodología desarrollada y comparar.

Tabla 4.22 Resultados del desarrollo de otros casos de estudio – Configuración.

Tabla 4.23 Resultados del desarrollo de otros casos de estudio – Criterios.

Tabla 4.24 Asignación de pesos ODI y AD para Casa Oviedo.

Tabla 4.25 Matriz de comparación pareada (MCP) para Casa Oviedo.

Tabla 4.26 Asignación de pesos ODI y AD para Departamentos.

Tabla 4.27 Matriz de comparación pareada (MCP) para Departamentos.

Tabla 4.28 Asignación de pesos ODI y AD para Playa el Bosque.

Tabla 4.29 Matriz de comparación pareada (MCP) para Playa el Bosque.

Tabla 4.30 Asignación de pesos ODI y AD para Casa Porfirio.

Tabla 4.31 Matriz de comparación pareada (MCP) para Casa Porfirio.

Anexos

Tabla A1 Indicadores sociales de la AGENDA 21.

Tabla A2 Indicadores económicos de la AGENDA 21.

Tabla A3 Indicadores ambientales de la AGENDA 21.

Tabla A4 Indicadores institucionales de la AGENDA 21.

Tabla B1 Nomenclatura de las herramientas MCDM y MODM.

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Estructura de la composición de las fuentes de generación de energía eléctrica a nivel global del año

2018. Fuente de los datos: SRWE (*Statistical Review of World Energy*) [3].

Figura 1.2 Porcentaje de participación de las fuentes energéticas a nivel internacional, durante los últimos 4 años. Fuente de los datos: SENER (Secretaría de energía), (Balance nacional de energía, México 2015 [4], 2016 [5], 2017 [6], 2018 [7]) Sección “Contexto energético mundial”.

Figura 1.3 Generación y consumo anual de energía en México para los periodos de 2015 a 2018, en TWh. Fuente de los datos: SENER (Balance nacional de energía, México 2015, 2016, 2017, 2018).

Figura 1.4 Mercado energético de México en 2018. Fuente de los datos: SENER, 2018.

Figura 1.5 Cambios en el porcentaje de participación de las fuentes renovables en México en los periodos 2016 a 2018. Fuente de los datos: SENER (2016, 2017, 2018).

Figura 1.6 Dimensiones del desarrollo sustentable. Reproducido de Porras, 2009 [11].

Figura 1.7 Generación de energía renovable en México durante los últimos 10 años. Fuente de los datos: SENER (2018, 2016).

Figura 1.8 Crecimiento de la capacidad de generación renovable. Fuente: IRENA (2020, [19]).

Figura 1.9 Tendencias en la aplicación de Análisis multicriterio en los proyectos de energías renovables.

Figura 1.10 Número de publicaciones por año de MCDM en SHGE.

Figura 1.11 Número de publicaciones por país. Otros incluyen: Chile, Jordania, Libia, Lituania, México, Cuba, Nigeria, Pakistan, Polonia, Portugal, Korea del Sur, Suiza.

Capítulo 2

Figura 2.1 Sistemas acoplados a DC. Reproducido de [77].

Figura 2.2a Sistemas acoplados a energía en AC - PFAC. Reproducido de [77].

Figura 2.2b Sistemas acoplados a alta frecuencia en AC - HFAC. Reproducido de [77].

Figura 2.3 Sistemas Con acoplamiento híbrido. Reproducido de [77].

Figura 2.4 Aerogeneradores: (a) eje vertical, (b) eje horizontal (© Copyright 2012 Hi-VAWT Technology Corp).

Figura 2.5 Esquema de transferencia de electrones en materiales semiconductores. Banda de conducción (P) – banda de valencia (N) [59].

Figura 2.6 Módulos fotovoltaicos [85].

Figura 2.7 Relación conceptual entre simulación, optimización y análisis de sensibilidad. [94].

Figura 2.8 Esquema con los elementos que pueden componer el sistema a optimizar por HOGA.

Capítulo 3

Figura 3.1 Metodología para revisión bibliográfica empleando la herramienta TOS.

Figura 3.2 Metodología para la obtención del listado guía de criterios de sustentabilidad.

Figura 3.3 Proceso de selección de los criterios de sustentabilidad.

Figura 3.4 Metodología para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio.

Figura 3.5 Metodología para resolver un caso de estudio.

Capítulo 4

Figura 4.1 Dimensiones de la sustentabilidad presentes en los estudios de los sistemas renovables.

Figura 4.2 Distribución geográfica de estudios de sustentabilidad en sistemas energéticos renovables.

Figura 4.3 Diagrama de bloques para la aplicación de la metodología a un caso de estudio.

Figura 4.4 Primera página del software propuesto.

Figura 4.5 Segunda página del software propuesto.

Figura 4.6 Tercera página del software propuesto.

Figura 4.7 Diagrama de bloques del desarrollo del software.

Figura 4.8 Mapa de ubicación del emplazamiento.

Figura 4.9 Interfaz de HOMER Pro con datos de entrada para los cálculos.

Figura 4.10 Resumen de los resultados. Mejor opción para HOMER.

Figura 4.11 Alternativas de configuración de sistemas de generación de energía dada por HOMER.

Figura 4.12 Resultado gráfico del análisis de sensibilidad.

Figura 4.13 Aporte de energía de los generadores al sistema y generación de hidrógeno.

Figura 4.14 Generación de energía solar y eólica en el emplazamiento.

Figura 4.15 Listado de alternativas no truncadas.

Figura 4.16 Matriz de decisiones y vector de conveniencia “bnb” en ventana de AMC3VAT.

Figura 4.17 Matriz MCP, vector ODI, vector AD, y resultados, en la ventana 2 de AMC3VAT.

Figura 4.18 Ranquin aplicando tres metodologías de ponderación de criterios y tres herramientas de análisis multicriterio. Ventana 3 del software AMC3VAT.

Figura 4.19 Sistema renovable sustentable. HOMER.

Figura 4.20 Interfaz de inicio del software iHOGA

Figura 4.21 Perfil de demanda energética. Promedio anual de 3.56 kWh/d (HOMER 3.56)

Figura 4.22 Perfil de recurso solar para un promedio anual de 5.17 kWh/m²/d (HOMER 5.18 kWh/m²/d).

Figura 4.23 Perfil de recurso eólico para un promedio anual de 4.54 m/s (HOMER 4.54 m/s).

Figura 4.24 Interfaz de resultados mono-objetivo (iHOGA)

Figura 4.25 Comportamiento de la energía en las alternativas 0 y 4 de iHOGA mono-objetivo.

Figura 4.26 Interfaz de iHOGA para optimización multi-objetivo.

Figura 4.27 Interfaz de resultados de iHOGA multi-objetivo.

Figura 4.28 Del desempeño energético. Optimización multi-objetivo de iHOGA.

Figura 4.29 Perfil anual de demanda para casos de estudio 1 a 5.

Figura 4.30 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Oviedo.

Figura 4.30 (c) y (d) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Oviedo.

Figura 4.30 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Casa Oviedo.

Figura 4.31 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

Figura 4.31 (c) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

Figura 4.31 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Departamentos.

Figura 4.32 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Playa el Bosque.

Figura 4.32 (c) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

Figura 4.32 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Playa El Bosque.

Figura 4.33 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Porfirio.

Figura 4.33 (c) y (d) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Porfirio.

Figura 4.33 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Casa Porfirio.

Figura 4.34 Sistemas óptimos para Casa Oviedo alternativa 26 (a) y alternativa 1 (b).

Figura 4.35 Sistemas óptimos para Departamentos alternativa 5 (a) y alternativa 9 (b).

Figura 4.36 Esquema del sistema óptimo para Playa el Bosque alternativas 8 y 2.

Figura 4.37 Esquemas de los sistemas óptimos para Casa Porfirio alternativas (a) 21 y (b) 8.

Anexos

Figura C1 Interfaz del software iHOGA.

Figura C2 Matriz de demanda energética anual.

Figura C3 Demanda energética importada, graficada por 7 días.

Figura C4 Ventana de recurso solar iHOGA.

Figura C5 Dar en “calcular” para cargar los datos de irradiancia.

Figura C6 Ventana del recurso eólico.

Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (a) Módulos FV, (b) Aerogeneradores.

Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (c) Baterías, (d) Inversores.

Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (e) Generador AC, (f) Controladores de carga.

Figura C8 Pre-dimensionado y días de autonomía.

Figura C9 Resultados de la simulación mono-objetivo. Generación de alternativas (a) mejores 10, (b) mejores 40.

Figura C10 Tabla en Excel con las alternativas generadas por iHOGA.

Figura C11 Ventana de resultados multiobjetivo iHOGA.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo fue obtener una metodología y un software para la optimización multicriterio de sistemas híbridos renovables, aplicable a una amplia variedad de escenarios de numerosas alternativas bajo numerosos criterios; esto con el fin de obtener propuestas de electrificación a partir de energías renovables para aplicaciones aisladas o interconectadas a la red, tales que cubran la demanda energética determinada, aprovechando los recursos renovables existentes en el emplazamiento, tomando en cuenta factores económicos, ambientales, sociales, institucionales y de diferente índole. La metodología obtenida permite tomar en cuenta las opiniones de los usuarios y administradores de la propuesta, para que todos los interesados aporten a la concepción, implementación y operación del sistema seleccionado, asegurando las condiciones óptimas de mantenimiento y protección, permitiendo que los componentes del sistema perduren durante el tiempo de vida dado por los fabricantes. De esta manera se asegura su perdurabilidad, ya que son muchos los proyectos de sistemas híbridos que han sido desmantelados al no tomarse en cuenta los diferentes pilares de la sustentabilidad.

Para conseguir la meta propuesta se realizó, en primera instancia, una amplia investigación bibliográfica con el fin de identificar las herramientas multicriterio más empleadas para el diseño y optimización de sistemas híbridos renovables. En segunda instancia, se obtuvo un compendio de los criterios de sustentabilidad que más se han tomado en cuenta en dichas investigaciones, así como fuentes bibliográficas para su estimación y cálculo. Con los elementos anteriores, se procedió al desarrollo de la propuesta metodológica y al diseño del software para emplear las tres herramientas de análisis multicriterio más populares (VIKOR, AHP y TOPSIS), con el fin de seleccionar el sistema que representa la opción más sustentable bajo los criterios seleccionados y ponderados por los interesados. En dicho proceso se emplean tres diferentes metodologías de ponderación de pesos (AD, ODI, CPP), obteniéndose nueve listados o ránquines que permiten acotar el problema de selección a una alternativa ganadora, que es la óptima sustentable, para cada caso en particular.

Como paquetes de software complementarios se emplearon HOMER y iHOGA en sus versiones demo (iHOGA PRO con licencia temporal). Además, se empleó la plataforma de programación de uso libre SCILAB, en la cual se desarrolló la programación e interfaz del software AMC3VAT.

Como resultado principal se obtuvo una metodología y un software para la optimización multicriterio de sistemas híbridos, que toma en cuenta las preferencias de los interesados para que el sistema seleccionado cuente con el respaldo social, ambiental, técnico, económico, operativo y de soporte que aseguren su perdurabilidad y correcto funcionamiento.

Palabras clave

Sistemas híbridos de energía; desarrollo sustentable; herramientas de análisis multicriterio; optimización multiobjetivo.

ABSTRACT

The purpose of this work was to obtain a methodology and software for the multi-criteria optimization of renewable hybrid systems, applicable to a wide variety of scenarios of numerous alternatives under numerous criteria; This in order to obtain electrification proposals from renewable energies for isolated applications or interconnected to the grid, such that they cover the determined energy demand, taking advantage of the renewable resources existing in the site, taking into account economic, environmental, social factors, institutional and of different kinds. The methodology obtained allows taking into account the opinions of the users and administrators of the proposal, so that all interested parties contribute to the conception, implementation and operation of the selected system, ensuring optimal maintenance and protection conditions, allowing the system components last for the life time given by the manufacturers. In this way, its durability is ensured, since there are many hybrid systems projects that have been dismantled by not considering the different pillars of sustainability.

To achieve the proposed goal, an extensive bibliographic research was carried out, in the first instance, in order to identify the multicriteria tools most used for the design and optimization of renewable hybrid systems. In the second instance, a compendium of the sustainability criteria that have been most considered in said research was obtained, as well as bibliographic sources for their estimation and calculation. With the above elements, we proceeded to develop the methodological proposal and design the software to use the three most popular multi-criteria analysis tools (VIKOR, AHP and TOPSIS), in order to select the system that represents the most sustainable option under the criteria selected and weighted by the interested parties. In this process, three different weight weighting methodologies are used (AD, ODI, CPP), obtaining nine lists or rankings that allow narrowing down the selection problem to a winning alternative, which is the optimal sustainable one, for each case.

As complementary software, HOMER and iHOGA were used in their demo versions (iHOGA PRO with temporary license). In addition, the free-use programming platform SCILAB was used, in which the programming and interface of the AMC3VAT software were developed.

As the main result, a methodology and software for the multi-criteria optimization of hybrid systems was obtained, which takes into account the preferences of the interested parties so that the selected system has the social, environmental, technical, economic, operational and support that ensures its durability and correct operation.

Key words

Hybrid energy systems; sustainable development; multi-criteria analysis tools; multi-objective optimization.

DEDICATORIA

A Nathalia y Eduardo. A mis padres y hermanos. A mi abuelita, tíos, primos, familia de mi esposo y amigos, compañeros y maestros. A todas las personas que de una u otra manera han sido parte de mi vida y han aportado en mi crecimiento académico y personal. A mis angelitos: abuelito Neftalí y Baloo...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y la colaboración recibida de los maestros y doctores vinculados al programa de Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables y al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Quiero resaltar especialmente, la labor de mi director de tesis Dr. Orlando Lastres Danguillecourt, quien, desde un principio confió en mis capacidades y compromiso para asumir este gran reto y ha sido guía fundamental en este proceso de investigación; de mi co-director de tesis Dr. Geovanni Hernández Galvez, quien pacientemente ha apoyado efectivamente durante este tiempo para dar cumplimiento a los objetivos planteados; y de mi asesor de tesis Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte; quien han sido partícipe activo en el desarrollo y conclusión del presente proyecto de tesis. A este gran equipo, muchas gracias por todos los consejos académicos y apoyo que me han llevado a cumplir esta meta tan anhelada.

Agradezco a mis compañeros de promoción Jazmín, Yanhsy, Jesús, Luis, Yovany e Ignacio, por su apoyo y motivación constante para sacar adelante este proyecto en común. A todos los compañeros de la maestría y del doctorado, con quienes he compartido esta etapa de mi vida. A Marcos, Juan Bernardo y Javier por guiarme cuando me atoré programando.

Agradezco también al grupo de investigación en energía eólica de la UNICACH, quienes han sido de gran ayuda en este proceso brindando opiniones, críticas constructivas y palabras de aliento, aportando a mejorar la forma, el contenido y la difusión de este tema de investigación.

Agradecimientos especiales al Dr. Rodolfo Dufo López, por permitirnos el uso y aplicación del software iHoga en su versión PRO, herramienta fundamental para el desarrollo de este proyecto.

Gracias al programa de becas CONACYT-SENER por el apoyo económico brindado, sin el cual no hubiera sido posible la realización y exitosa culminación de este tema de investigación.

Gracias a todo el personal administrativo, académico, de biblioteca, de idiomas y de servicios generales de la UNICACH; quienes son el apoyo diario para cristalizar y finalizar los estudios universitarios que emprendemos los estudiantes.

De corazón agradezco a todas las mujeres que nos apoyaron a mi hija y a mí, con su acompañamiento en traslados, estancias y clases. Todo esto no hubiera sido posible sin su valiosa colaboración: Niza, Daf, Doña Mati, Aurora, Yessi, Pili, Alejandra, Ángeles, maestra Ana Abigail, Sra. Moni y Mrs. Arely. Les deseo lo mejor de lo mejor en sus vidas.

Gracias al apoyo de toda mi familia grande, y a mi abuelito Neftalí quien nos dejó tantas enseñanzas y amor; supo de este comienzo, pero no alcanzó a acompañarnos en la culminación.

Finalmente, gracias a mi Nathy y a Lalo, amores de mí vida, por su gran amor, tanta paciencia y gran apoyo. Gracias mami y papi por el gran impulso especialmente en el último trayecto. Muchas gracias a Dios por la vida y la salud. Gracias eternas, mi Baloo, compañerito fiel de estudio, amigo, perrito mío, descansa en paz.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar, es importante mencionar que la bibliografía se encuentra enumerada en orden de aparición y la lista puede ser consultada al final de este documento antes de los anexos. De manera similar, las abreviaturas se definen en español en el cuerpo del trabajo solo en su primera aparición. Para consultar las definiciones en cualquier momento de la lectura encontrará una lista en orden alfabético en el Anexo B, así como su definición en inglés u otro idioma de origen de la sigla o acrónimo. Ahora sí, empecemos:

La creciente demanda de energía eléctrica (22.2 TWh, en 2017 [1]), y la contaminación ambiental, que sigue la misma tendencia, han hecho que las investigaciones en torno a las energías renovables (ER) tengan gran relevancia en estos tiempos. Según el reporte más reciente del IPCC (Panel Intergubernamental en Cambio Climático), en 2014 [2], “La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero GEI (Gases de Efecto Invernadero) son las más altas en la historia”. El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, muchos de los cambios no tienen precedentes durante décadas o milenios. La atmósfera y el océano han incrementado su temperatura y nivel del mar, mientras que las cantidades de nieve y hielo han disminuido [2].

Por otra parte, la edición 68 del 2019 del Informe Estadístico Mundial de Energía de la BP (Petrolera Británica) [3], indica que el consumo global de energía primaria creció un 2.9% en 2018, liderado por el gas natural y las ER. Sin embargo, las emisiones de carbono crecieron 2%; la tasa más alta de los últimos 7 años. “Cuanto más tiempo sigan aumentando las emisiones de carbono, más difícil y costoso será lograr la emisión cero de carbono en términos netos”, concluyó Bob Dudley, CEO (Director Ejecutivo) de BP; quien además puntualizó, que no se trata de una carrera hacia las ER, sino de la urgencia que existe para reducir las emisiones de carbono en muchos frentes. A pesar de los progresos, el porcentaje de participación de las fuentes renovables sigue siendo bajo (4%), como se puede observar en la Figura 1.1.

La composición de las fuentes energéticas a nivel internacional ha cambiado levemente los últimos 4 años. Se puede observar en la Figura 1.2 que, para el año 2018 la energía nuclear y las renovables incluyendo la hidroeléctrica, tuvieron menor participación, mientras que el gas natural y el petróleo, incrementaron su porcentaje de participación.

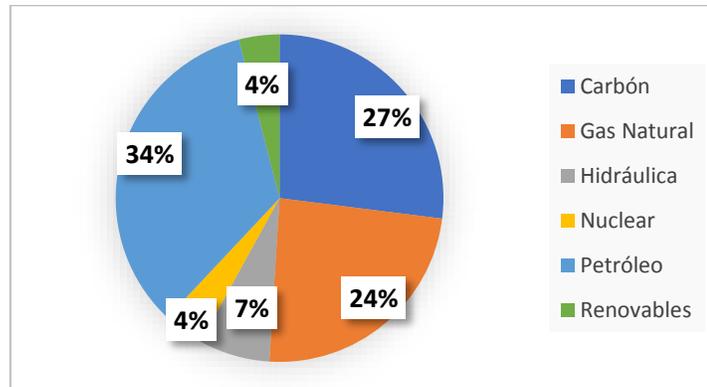


Figura 1.1 Estructura de la composición de las fuentes de generación de energía eléctrica a nivel global del año 2018. Fuente de los datos: SRWE (Revisión estadística de la energía mundial) [3].

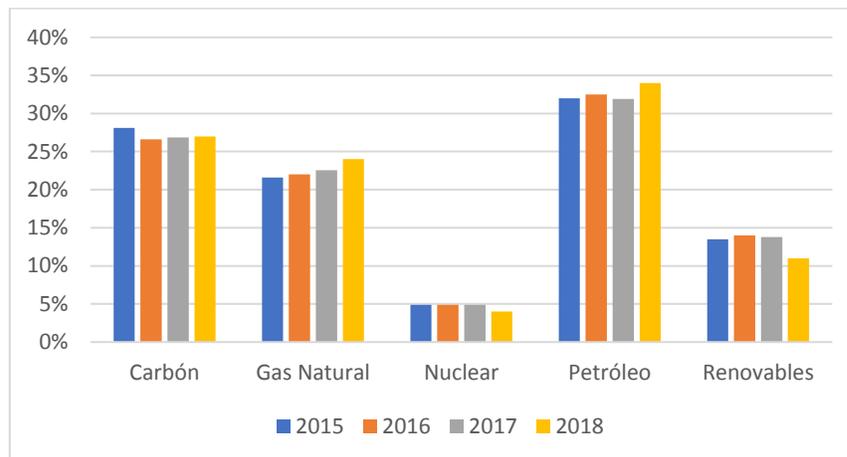


Figura 1.2 Porcentaje de participación de las fuentes energéticas a nivel internacional, durante los últimos 4 años. Fuente de los datos: SENER (Secretaría de energía), (Balance nacional de energía, México 2015 [4], 2016 [5], 2017 [6], 2018 [7]) Sección “Contexto energético mundial”.

En 2018, el consumo y la producción de gas natural aumentaron más del 5%, una de las mayores tasas de los últimos 30 años. Las ER crecieron un 14.5%, llegando cerca del récord alcanzado en 2017, pero esto es solo un tercio del aumento de la generación mundial, de allí que su porcentaje de participación internacional se haya reducido un 3%. El consumo de carbón (1.4%) y la producción (4.3%) aumentaron por segundo año consecutivo en 2018, luego de un periodo de disminución (2014 a 2016). USA (Estados Unidos de América), registró el mayor incremento en la producción de petróleo y gas natural. China, USA e India aportaron las dos terceras partes del incremento en la demanda energética global, siendo USA el más alto de los últimos 30 años [3] “Key findings”.

Los esfuerzos internacionales para disminuir la demanda energética, a la vez que se busca reducir los problemas ambientales tales como el calentamiento global y el efecto invernadero, han mostrado algunos frutos, principalmente entre 2014 y 2016 (Informe BP, edición 66 de 2017), pero nuevamente se ha tomado el camino del no retorno: “Energía en 2018: Un camino insostenible” [3]. El consumo energético mundial en 2018 fue 28.8% en transporte, 28.9% en la industria, y 21.9% en residencias, del cual el 64.7% es suministrado a partir de combustibles fósiles y solo el 14.4% proviene de las fuentes de ER [8].

Consumo energético en México

El consumo energético en México en 2018 fue de 1498.18 TWh, mientras que la generación fue de 2565.79 TWh. La diferencia entre la generación y el consumo se debe a: el consumo del sector energético, el consumo en la transformación, consumo propio, y pérdidas por distribución [7]. El consumo energético en los últimos años ha tenido una variación leve, como se puede observar en la Figura 1.3.

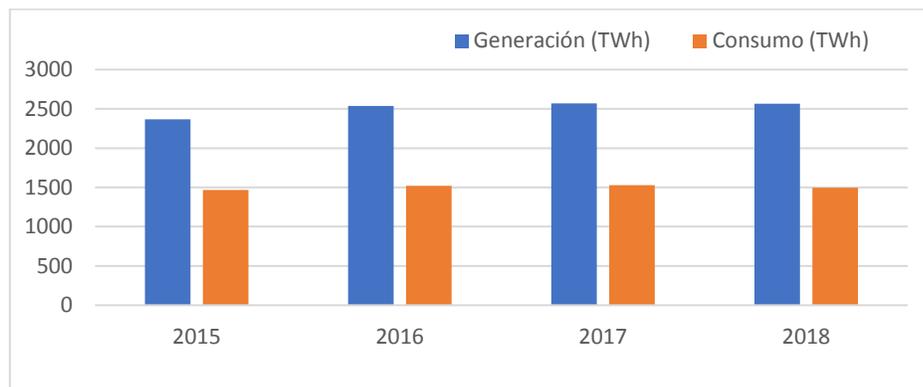


Figura 1.3 Generación y consumo anual de energía en México para los periodos de 2015 a 2018, en TWh. Fuente de los datos: SENER [4, 5, 6,7].

La composición del mercado energético de México para 2018 se presenta en la Figura 1.4; donde las ER, incluyendo la hidroeléctrica, tuvieron una participación del 7%.

Las fuentes energéticas han variado sus porcentajes de participación en el mercado nacional durante los últimos años, como se presenta en la Figura 1.5. El carbón presenta un crecimiento leve; el gas natural, ha crecido visiblemente; los petrolíferos han reducido su participación; la nucleoelectrica ha permanecido estable, mientras que las ER se han incrementado, aunque tuvieron un retroceso en el año 2018.

A pesar de los efectos en cascada que se desprenden de la crisis financiera que afectan de diferente manera a cada sector, la investigación en ER continúa creciendo con una tendencia sostenida.

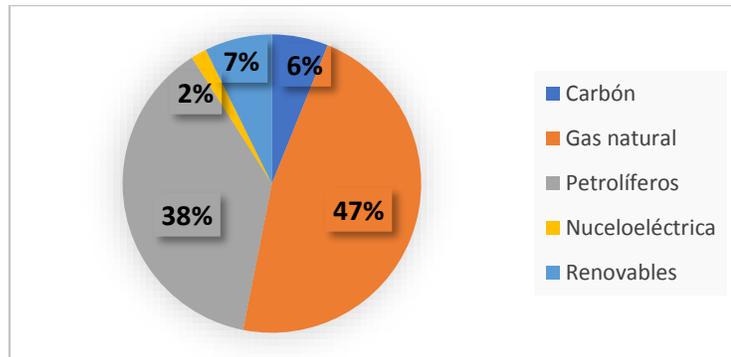


Figura 1.4 Mercado energético de México en 2018. Fuente de los datos: SENER, 2018 [7].

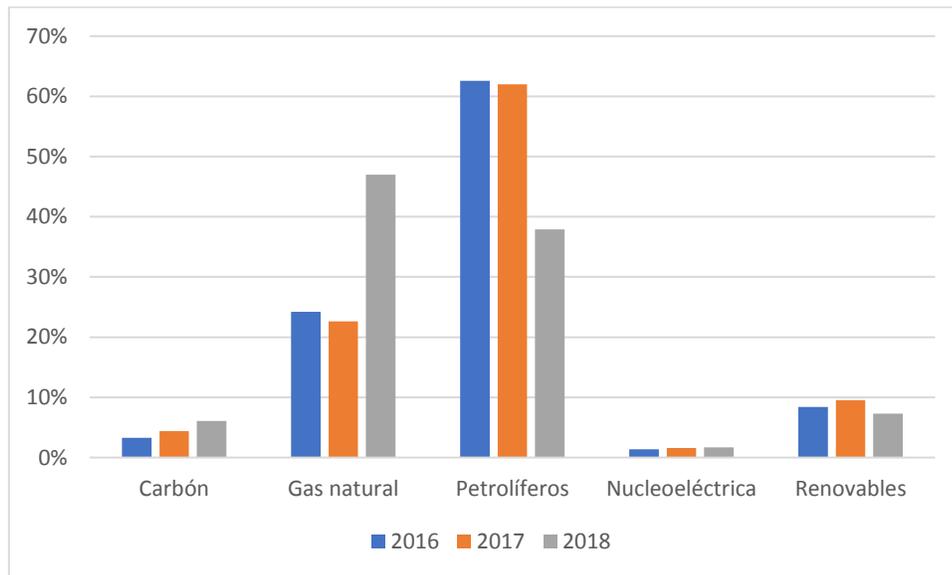


Figura 1.5 Cambios en el porcentaje de participación de las fuentes renovables en México en los periodos 2016 a 2018. Fuente de los datos: SENER (2016 [5], 2017[6], 2018 [7]).

De acuerdo con un programa de la UNEP (Programa Ambiental de las Naciones Unidas), las investigaciones en ER se incrementaron un 5% como prueba definitiva del establecimiento de nuevos métodos de generación de energía y confirma que este sector representa una corriente importante de investigación. El clima de buenos resultados de las ER es el fruto de las interacciones entre el gobierno y el compromiso social para emprender acciones tangibles que mitiguen el cambio climático, reduciendo los GEI y la dependencia del suministro de combustibles fósiles, convirtiendo la seguridad energética en una estrategia prioritaria [9].

Por lo tanto, es primordial continuar e incrementar todos los esfuerzos, en políticas orientadas a promover la sustentabilidad, así como en investigación y desarrollo para la exploración y explotación de fuentes alternativas de energía. Para transitar hacia un modelo energético diferente, sustentable.

1.1 El desarrollo sustentable y el trilema energético.

El concepto de desarrollo sustentable fue presentado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland en 1987 [10], elaborado por distintas naciones, y que se refiere a “el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”. En otras palabras; se puede llamar desarrollo sostenible, aquel desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones.

La WCED (Comisión Mundial Del Desarrollo y Medio Ambiente) consideró al desarrollo sustentable como “un proceso que permite satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas” describiendo la sustentabilidad estrechamente relacionada con la preservación de recursos suficientes para asegurar, a las futuras generaciones, una calidad de vida, mínimo similar a la actual [11]. Entonces, el desarrollo sustentable se identifica como un estadio superior de desarrollo, que debe incluir la sustentabilidad ambiental como una dimensión novedosa vinculada al día a día económico de la sociedad, manteniendo la protección y restauración de los recursos naturales. Para ello, los activos de la naturaleza se deben considerar como bienes escasos, que tienen que restaurarse y protegerse para evitar su agotamiento.

Los tres pilares del desarrollo sustentable son las dimensiones ambiental, económica y social. El desarrollo sustentable debe ser económicamente viable, ambientalmente amigable y socialmente aceptado; pero frecuentemente se encuentran en conflicto ya que las opciones más económicas pueden no ser las más ecológicas, ni las más aceptadas. Entonces el desarrollo sustentable, busca un equilibrio por medio de soluciones viables, equitativas y vivibles, como se muestra en la Figura 1.6.

Siendo la generación de energía eléctrica una necesidad básica para la vida diaria de millones de personas en el mundo es de gran importancia que su producción se desarrolle de una manera sustentable, como se comentó en la sección anterior.

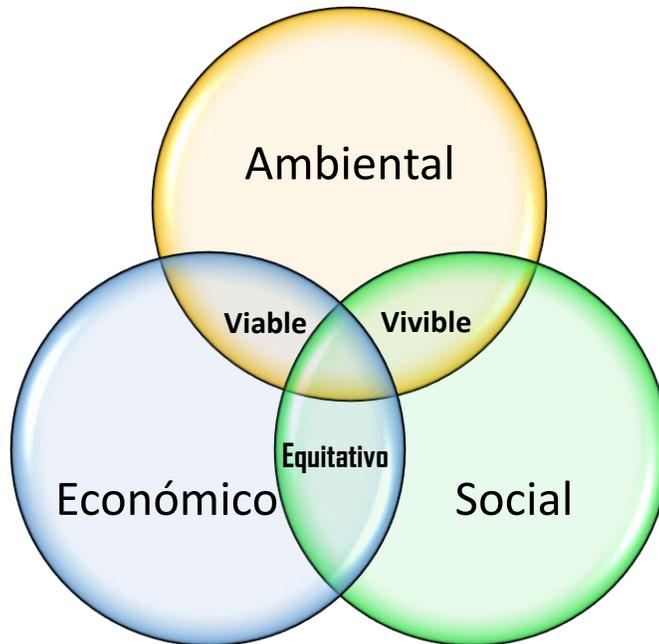


Figura 1.6 Dimensiones del desarrollo sustentable. Reproducido de Porras, 2009 [11].

El desarrollo sustentable en el sector energético ha adoptado el concepto de “trilema energético” [12]; el cual se refiere a los complicados objetivos que afrontan los gobiernos para asegurar el suministro energético competitivo, de acceso universal y promoviendo la protección ambiental. Existen tres aspectos fundamentales de la energía: la seguridad de suministro, la equidad social y la mitigación del impacto ambiental.

- Seguridad energética: Gestión eficaz del suministro de energía a partir de fuentes nacionales y extranjeras, fiabilidad de la infraestructura energética y capacidad de las empresas de energía para satisfacer la demanda actual y futura (para países exportadores, esto también se refiere a mantener los ingresos procedentes de las ventas al exterior);
- Equidad social: que se refiere a la accesibilidad y asequibilidad del suministro de energía para toda la población;
- Mitigación del impacto ambiental: eficiencia y ahorro energético (tanto desde el punto de vista del suministro como del de la demanda) y desarrollo de oferta de ER y de otras fuentes bajas en carbono.

En el contexto de la COP (Conferencia de las partes, sobre el cambio climático) en Catar, y del WEC (Consejo mundial de energía) cuya misión principal es “promover el suministro y el consumo energético sostenibles en beneficio de las personas”; se ha presentado la cuarta edición del informe

“*World Energy Trilemma 2012*” (Trilema energético mundial 2012) antes llamado “*Policy Assessment*” (Evaluación de políticas), que se ha venido publicando anualmente desde 2008. Este estudio se configura como un documento esencial de apoyo a los decisores políticos y a la industria energética en relación con los sistemas energéticos sostenibles [12].

Una de las principales alternativas para conseguir las metas del trilema energético es el desarrollo de las ER, ya que un sistema de ER tiene ventajas tales como el ahorro en costos y en recursos energéticos, y la reducción de emisiones; aunque el rango de los beneficios financieros varía dependiendo de las condiciones climáticas [13].

1.2 Fuentes renovables de energía. Estado actual en México y resto del mundo.

El año 2019 fue un gran año para las ER en México. La energía eólica creció un 26% en capacidad instalada respecto al año anterior, según datos difundidos por el sector en febrero de 2020 [14]. Por su parte, la energía solar avanzó un 76% entre enero de 2019 y febrero de 2020. En conjunto aportaron alrededor de 3.500 MW, suficientes para cubrir las necesidades energéticas de unos 3 millones de viviendas [15]. La eólica añadió 1.280 MW en 2019, “un récord histórico”, según el presidente de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), Leopoldo Rodríguez, “Nunca habíamos tenido instalada tanta capacidad en un solo año”. Esta hornada situó al país en el primer lugar de Latinoamérica en nueva capacidad instalada [16].

En el año 2018, 27 entidades albergaban 227 plantas de energía generada a partir de fuentes renovables: 78 biomasa, 38 eólicas, 5 geotérmicas, 96 hidráulicas y 14 solares. Sin embargo, la mayoría de la energía que se consume en el país sigue siendo generada a partir de combustibles fósiles. De la capacidad instalada para producir energía eléctrica en México, el 69.63% se genera a partir de energías convencionales y 30.37% a partir de ER. La fracción de ER se divide así: hidráulica 71.24%, eólica 18.05%, geotérmica 5.20% y solar 0.70% [17].

México tiene la meta de generar al menos 50% de energía a partir de recursos renovables para 2050. Se espera que para 2021 la capacidad de generación de energía limpia sea del 30%, para 2024 de 35% y así llegar a la meta del 50% para 2050. En la Figura 1.5 se observa un retroceso en el porcentaje de participación de las ER en el mercado nacional, situación que debe cambiar para lograr la meta mencionada.

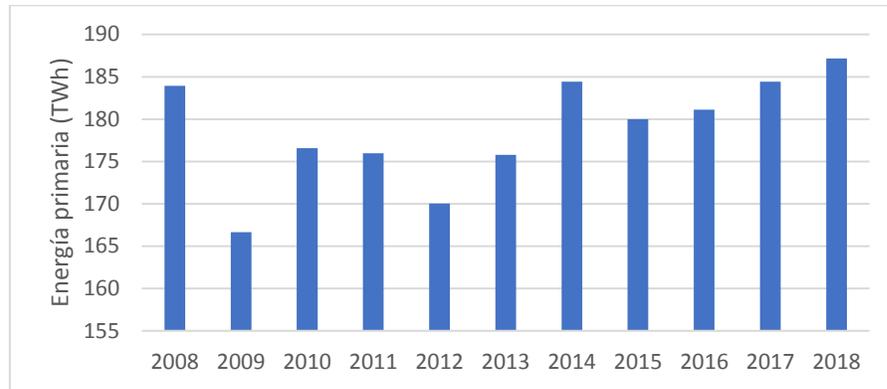


Figura 1.7 Generación de energía renovable en México durante los últimos 10 años. Fuente de los datos: SENER (2016 [5], 2016 [7]).

El objetivo aún está lejos, pero México tiene el potencial para conseguirlo, pues cuenta con amplia disponibilidad de fuentes de energía renovable (ER). Aunque la generación de energía solar ha sido menor con respecto a otras fuentes renovables, existe gran potencial en ese rubro, con una capacidad probada de 16,35 GWh y una generación posible de 6 millones y medio de GWh al año, según el potencial estimado por el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE, 2016-2030). La eólica cuenta también con gran potencial, pudiéndose generar hasta 87,600.00 GWh al año. Estos dos tipos de energía han registrado una reducción en sus costos debido a los avances tecnológicos que han permitido que se incremente su uso como fuente de electricidad limpia [17].

En el año 2014 México fue el cuarto país con mayor producción de energía geotérmica a nivel mundial, con una capacidad instalada de 958 MW que aportaron el 7 por ciento de la producción global. El país se ubica entre el cuarto y séptimo lugar de producción geotérmica. La capacidad instalada los coloca debajo de USA, Filipinas e Indonesia y, según algunos otros autores, también detrás de Turquía, Nueva Zelanda e Italia; refiere Michelle Alejandra Ramírez Bueno, directora de geotermia en la SENER [18].

Pasando al plano internacional, la generación de electricidad a partir de fuentes renovables presenta una tendencia creciente durante los últimos años, como se puede apreciar en la Figura 1.8. La capacidad renovable alcanzó los 2,537 GW a nivel mundial, a finales de 2019, registrando un aumento de 176 GW respecto al año anterior. Asia, una vez más, logró más de la mitad de las nuevas instalaciones a pesar de un ritmo ligeramente más lento. Europa y Norteamérica realizaron su expansión de capacidad. Las energías eólica y solar representaron el 90% de la capacidad renovable

recientemente adicionada en el mundo. Las ER representaron el 72% de las adiciones de capacidad total en 2019, superando una vez más a los combustibles fósiles por un amplio margen.

Algunos datos destacados (Figura 1.8), según el informe de la IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables) en 2020 [19], muestran que el crecimiento de la energía hidroeléctrica fue inusualmente bajo en 2019, debido posiblemente al aplazamiento inesperado de la terminación de grandes proyectos. China y Brasil contaron con la mayor expansión, con 4 GW nuevos instalados. De otro lado, el desempeño de la energía eólica en 2019 fue particularmente bueno, expandiéndose por cerca de 60 GW. China y USA continúan dominando, con incrementos de 26 GW y 9 GW respectivamente. Por su parte, Asia continúa dominando la expansión de la capacidad solar a nivel global con un incremento de 56 GW. China, India, Japón, República de Corea y Vietnam fueron los países con mayor capacidad nueva en 2019. Otros incrementos importantes se dieron en USA, Australia, España, Ucrania y Alemania. China Taipéi, México y Emiratos Árabes Unidos también añadieron más de 1 GW solar en 2019.

La expansión de la capacidad bioenergética permaneció de manera modesta en 2019. China aportó la mitad de la nueva capacidad instalada (33 GW). Alemania, Italia, Japón y Turquía, también incrementaron su capacidad, en menor medida. La energía geotérmica aumentó en 682 MW en 2019, valor levemente superior al 2018. Nuevamente Turquía (+232 MW) lideró la expansión, seguido por Indonesia (+185 MW) y Kenia (+160 MW). Finalmente, la electrificación fuera de la red creció en 160 MW, para alcanzar los 8.6 GW en 2019. La bioenergía aportó el 40% de la capacidad no interconectada, pero su crecimiento es relativamente lento.

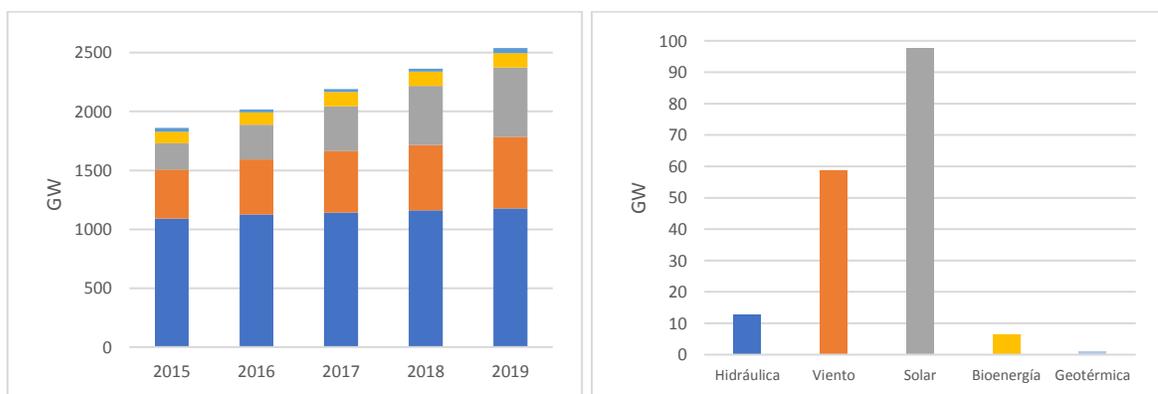


Figura 1.8 Crecimiento de la capacidad de generación renovable. Fuente: IRENA (2020, [19]).

En 2019 la capacidad solar fotovoltaica (FV), se incrementó por 112 MW y la hidroeléctrica creció en 31 MW, en comparación con los 17 MW de crecimiento de la bioenergía; y el mercado de producción de energía renovable se conformó así: Hidráulica 47%, eólica 25%, Solar 23%, otras 5% [19]. Es urgente y factible desarrollar e implementar nuevos proyectos de generación de ER sustentables. Una de las maneras es por medio de los sistemas híbridos de energía (SHGE).

1.3 Experiencias nacionales e internacionales de sistemas híbridos. Principales retos para su desarrollo sustentable.

Las ER son nuevas tecnologías para generar electricidad, con algunas barreras por superar. Una de ellas es el comportamiento estocástico e impredecible del clima. Es por esta naturaleza intermitente, que los sistemas con fuentes de energía renovables individuales tienden a ser problemáticos en términos del rendimiento energético y los costos de operación. Por esta razón, dos o más fuentes renovables están siendo combinadas para conformar un sistema híbrido de generación de energía renovable (SHGE). El principal objetivo de estas uniones es optimizar la producción de energía eléctrica, minimizar costos, reducir los efectos negativos asociados a los combustibles fósiles y mejorar la eficiencia global del sistema [20].

En tiempos recientes, los SHGE están recibiendo mayor atención, porque pueden ser aplicados para suplir la demanda eléctrica con alta eficiencia y confiabilidad hasta el usuario final, a diferencia de los sistemas renovables de una sola fuente [21].

Existen SHGE aislados o interconectados a la red. Los sistemas aislados deben contar con un sistema de almacenamiento para administrar la demanda, mientras que en los sistemas interconectados el almacenamiento puede ser pequeño, y la deficiencia de energía puede adquirirse de la red. Cabe anotar, que los sistemas interconectados requieren de un sistema de adecuación y administración de la energía eléctrica para controlar el suministro, el voltaje, los armónicos y la frecuencia de la demanda. Entonces, la clasificación del modo de operación de un SHGE es aislado (en isla), cuando la electricidad generada es consumida localmente; o interconectado, cuando la fuente de energía renovable está conectada a la red [22].

1.3.1 Experiencias nacionales: Sistemas híbridos en México

Los indicios de la instalación de SHGE en México datan de los años 90, como lo presentó Agredano durante un evento internacional en el año 2000 [23]. También puntualizó que México cuenta con recursos solares y eólicos abundantes, mientras que son pocas las comunidades rurales en las que se han instalado SHGE donde anteriormente utilizaban moto generadores. En 1991 se instaló el

primer SHGE en México con propósitos de electrificación rural, y la última instalación, hasta ese entonces se llevó a cabo durante 1999. Los datos se resumen en la Tabla 1.1, la cual fue complementada con datos recabados durante la presente investigación.

Tabla 1.1 Sistemas híbridos renovables en México.

Localización del sistema	Año de instalación	FV instalado (kWp)	Eólico instalado (kW)	Diésel instalado (kW)	Número de usuarios	Fuente más reciente
Sta. Ma. Magdalena (HID)	1991	4.3	5	18	168	Flores-Lazcano, 2012 [24]
Nueva Victoria (TAM)	1991	8.6	-	28	355	Agredano, 2000
Oyamello (CDMX)	1991	0.76	60	4	*	Agredano, 2000
X-Calak (ROO)	1992	11.2	10	125	232	Flores-Lazcano, 2012
El Junco (ZAC)	1992	1.6	10	-	250	Brambila, 2010 [25]
La Gruñidora (ZAC)	1992	1.2	10	-	230	Agredano, 2000
Ignacio Allende (ZAC)	1992	0.8	10	-	140	Agredano, 2000
El Calabazal (ZAC)	1992	0.8	10	-	130	Agredano, 2000
Aguas Benditas (MEX)	1993	12.4	20	48	250	Flores-Lazcano, 2012
Villas Carrousel (ROO)	1995	0.15	0,5	-	**	Agredano, 2000
Isla Margarita (BCS)	1997	2.25	15	60	200	Agredano, 2000
San Juanico (BCS)	1999	17	70	85	400	Agredano, 2000
Ciudad Franboyanes (VER)	2010	44.88	20	-	*	Rodríguez, 2010 [26]
Vaquerías (JAL)	2013	10,000	50,000	-	17,000 viviendas	Chávez, 2013 [27]
Luminarias Mérida (YUC)	2017	0.12	0.2	-	*	Huerta, 2017 [28]
Cancún (ROO)	2017	3	1,5	-	Comercios	Bornay, 2017 [29]

Agredano [23], también mencionó que algunos de estos SHGE presentaban problemas, que dificultaron que operaran de manera eficiente, ya que pasaron por alto varios aspectos importantes durante su diseño y planificación. Los principales problemas que estos sistemas enfrentan son:

1. Falta de conocimiento respecto a la disponibilidad de recursos renovables (principalmente viento) en algunos proyectos, condujo a subdimensionado de sistemas.

2. La selección de componentes sin tomar en cuenta el ambiente del lugar de instalación de los sistemas, condujo a fallas prematuras de partes y componentes (principalmente en zonas costeras).
3. En algunos diseños no se tomó en cuenta el aumento en el consumo de energía una vez que los usuarios se acostumbran al servicio eléctrico.
4. No se dejaron partes de repuesto y componentes críticos de los sistemas en las comunidades.
5. Los servicios técnicos especializados y las refacciones provienen del exterior.
6. La cuota pagada por el servicio eléctrico en las comunidades solamente cubría costos de operación.
7. En varias comunidades beneficiadas con sistemas híbridos no se crearon estructuras organizacionales.
8. La instalación de prototipos por compañías que no se establecieron en el mercado han dejado a varias comunidades sin la posibilidad de recibir servicios posventa.
9. Proyectos “llave en mano” que dificultan la transferencia de tecnología.
10. En la mayoría de los casos solo se tomó en cuenta la inversión inicial de los proyectos, olvidando los costos de reemplazo de componentes y del mantenimiento del sistema.
11. Se ha hecho evidente la necesidad de tener un organismo, bien sea federal, estatal, municipal u ONG, que apoye a las comunidades usuarias para darle seguimiento a los sistemas una vez las garantías hayan expirado.

Además de estos, Mainali y Silveria en 2015 [30], encontraron varios problemas relacionados con proyectos de electrificación rural, que no contemplaron criterios de sostenibilidad desde un principio. Frecuentemente, el enfoque en los proyectos de electrificación en países desarrollados se da por transferencia tecnológica, y su éxito se mide en términos del número de instalaciones o el número de kW instalados. Por ejemplo, se instalaron varios generadores a diésel en Afganistán donados para la electrificación rural después de la caída del régimen Talibán. Este fue un esfuerzo costoso encaminado a suplir necesidades inmediatas, pero no fue una solución sustentable. Aunado a la continua dependencia de los combustibles fósiles importados, estos esfuerzos no contribuyeron

a una curva de aprendizaje positivo alrededor de las opciones sustentables que pudieron haberse desarrollado a largo plazo en el tiempo [30].

En la actualidad, varios de estos problemas se han podido solucionar. Por ejemplo, el tema de la mano de obra extranjera, que, gracias a los programas de formación de pregrado y postgrado en ER, la investigación y el desarrollo que han sido impulsados durante los últimos años; México cuenta hoy en día con profesionales de calidad en este campo de la ciencia, impulsando el desarrollo de estas nuevas tecnologías y así subsanar parte de esta problemática.

El gobierno federal, ha impulsado algunas políticas en apoyo a los sistemas híbridos. En agosto del año 2019, la Secretaría de Economía dio a conocer en el DOF (Diario Oficial de la Federación), la Declaratoria de Vigencia de la Norma Mexicana NMX-J-657-3-ANCE-2018 que entró en vigor 60 días después de su publicación, que trata sobre los Sistemas Híbridos y la Energía Renovable, como una guía para la electrificación de áreas no urbanas de difícil acceso [31].

1.3.2 Experiencias Internacionales: Sistemas híbridos alrededor del mundo.

Alrededor del mundo, se cuentan innumerables experiencias de aprovechamiento de dos o más fuentes renovables para la generación de electricidad, principalmente en zonas remotas, mediante la instalación y operación de SHGE. Uno de los principales exponentes es la planta de generación híbrida Eólica/FV de la Isla de Kythnos en Grecia, cuya historia data de los años 80. En 1982 instalaron 5 aerogeneradores de 20 kW. En 1983 instalaron 100 kW de paneles solares con almacenamiento en baterías. En 1989 cambiaron los aerogeneradores por 5 de 33 kW. En 1992 instalaron un inversor para conectar el sistema FV a la red. En 1998 instalaron 500 kW adicionales en aerogeneradores. Para el año 2000, entró en operación el sistema completamente automatizado con un sistema de almacenamiento de 500 kW en banco de baterías. En 2001 instalaron tres nuevos sistemas híbridos modulares pequeños y un sistema FV acoplado al bus de corriente alterna. Este proyecto fue realizado gracias al apoyo de los ministerios de Educación e Investigación, y de economía y tecnología Federales de Alemania, y de la Comisión Europea, entre otros patrocinadores [32,33].

Otro ejemplo, de gran importancia por ser el primer sistema híbrido 100% renovable en alcanzar la escala de los megawatts con 2.45 MW de energía eólica (EE) y 0.29 MW FV, es King Island, ubicado entre Australia y Tasmania, donde el costo económico y ambiental de la energía era alto, ya que se obtenía a partir de generadores diésel. Algunos de los hitos alcanzados durante su construcción fueron: en 1998 construyeron el primer parque eólico con 3.25 MW de turbinas Nordex. En 2003

construyeron el segundo parque eólico de 2.85 MW de turbinas Vestas. En 2014 instalaron 3 MW de almacenamiento en banco de baterías. Dentro de las circunstancias que permitieron el desarrollo y conclusión de este proyecto se encuentran: La disponibilidad del gobierno como garantía para la demostración de la tecnología y la comercialización; el fuerte apoyo del gobierno y la empresa, para demostrar liderazgo en tecnologías de energía renovable; fortaleza de las capacidades técnicas al interior de Hydro Tasmania [34]. Otros ejemplos se enlistan a continuación en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Sistemas híbridos renovables alrededor del mundo.

Localización del sistema	Año de instalación	FV instalado (kWp)	Eólico instalado (kW)	Sistema de almacén	Fuente más reciente	Descripción
Borj-Cedra (Túnez)	1981	3.5	0.38	-	Gude, 2018 [35]	FV/ EL/EE
Kythnos Island (Grecia)	1983	100	100	200 diésel 600 Bat	Denis, 2015	FV/EE/DI
Pellworm Island (Alemania)	1983	800	1100	560 kWh Li-ion	Birnbaum, 2013 [36]	FV/ DI/ GC/ EE
Miyakojima (Japón)	1995	4000	4800	13.5 MWh Bat	Miyakojima City, 2016 [37]	FV/EE/ DI
Carloforte, Sardinia (Italia)	1995	300	960	-	Denis, 2007	FV/EE/DI
Magaan (Israel)	1997	3.5	0.6	-	Gude, 2018	FV/EE/DI
King Island (Australia)	1998	390	2450	-	IRENA, 2016	FV/EE/DI
Kamuela, HA (USA)	2001	175	50	-	Kaya, 2007 [38]	FV/DI/EE
Keratea (Grecia)	2004	4	0.9	-	Cipollina, 2014 [39]	FV/EE/DI
Andra Pradesh (India)	2017	120000	40000	40 MWh Bat	NREDCAP, 2021 [40]	FV/EE/DI
South Australia (Australia)	2021	110000	210000	10 MWh Bat	Parkinson, 2020 [41]	FV/EE/DI

*DI: Diésel. EL: Electrólisis. GC: Sistema conectado a la red. FV: Componente fotovoltaica. EE: Componente eólica.

Pradesh (India), es el sistema híbrido de mayor potencia instalada a nivel mundial, actualmente en operación. Mientras que South Australia, está en construcción y se espera que duplique la capacidad del primero, y que inicie operaciones en el año 2021.

1.3.3 Principales retos para el desarrollo sustentable de los sistemas híbridos.

Como se puede observar en las Tablas 1.1 y 1.2, la escala de los SHGE se ha incrementado a medida que avanzan las tecnologías: Eólica de mayor escala, y solar fotovoltaica más eficiente. Los SHGE

instalados en los inicios, fueron diseñados para suministrar electricidad a cientos de usuarios, hoy día se diseñan para electrificar miles de hogares e islas enteras. La gran mayoría de los proyectos exitosos, han contado con el apoyo gubernamental, la aceptación de la comunidad, diseños adecuados para la demanda energética y la planeación estratégica del proyecto, para asegurar su perdurabilidad, en muchos casos durante los 25 años para los que han sido diseñados, y en otros casos, los sistemas han escalado en tecnología suministrado electricidad por un plazo mucho mayor que el inicial.

Los principales retos para la implementación de los SHGE son:

- Adecuada estimación de los recursos renovables disponibles, que permitan un diseño eficiente para suministrar la demanda energética.
- El apoyo gubernamental, político e institucional, que respalden de manera económica y logística el desarrollo de los proyectos desde un comienzo, con el levantamiento de la información comunitaria, la comunicación efectiva con los usuarios y el financiamiento parcial o total de los equipos.
- La planeación estratégica y económica para la operación, mantenimiento y refaccionamiento del SHGE, incluyendo capacitación técnica y transferencia tecnológica.
- Es de gran importancia que todos los interesados en el proyecto se sientan parte de este, den sus puntos de vista y participen en el proceso de la toma de decisiones, y así contar con información suficiente y verídica, que dé transparencia a los procesos financieros, logísticos, técnicos y económicos, que conlleven los proyectos de estas características.

1.4 Antecedentes

Para aplicar las metodologías de análisis multicriterio al diseño y optimización de SHGE, se cuenta con tres elementos principales. El primero de ellos, se refiere a las metodologías de diseño monocriterio de SHGE, a partir del cual se obtienen diferentes alternativas o configuraciones del sistema por medio del cual se realiza la transformación de los recursos energéticos disponibles en el emplazamiento, en energía eléctrica para el autoconsumo. Estas alternativas deben ser comparables entre sí, por medio de 2 o más criterios de sustentabilidad, que conforman el segundo elemento. Estos criterios son características que poseen en común todas las alternativas, pero que pueden tener iguales o diferentes valores cualitativos o cuantitativos. El tercer elemento son las herramientas de análisis de decisión multicriterio (MCDA) o toma de decisiones multicriterio (MCDM), que se componen de una metodología de ponderación de pesos, y de la metodología de

análisis multicriterio en sí. La aplicación de las herramientas MCDM da como resultado un listado de las alternativas, ordenadas desde la más sustentable a la menos conveniente. Este orden depende de los criterios seleccionados, sus valores, la ponderación, y de la herramienta utilizada.

En la actualidad existen más de una docena de MCDM y más de una decena de metodologías para la toma de decisiones multiobjetivo (MODM). Según una amplia revisión bibliográfica, se encontró que son aplicadas con mayor frecuencia las MCDM para resolver conflictos relacionados con proyectos de ER.

1.4.1 Criterios de sustentabilidad energética utilizados en estudios previos.

En una revisión bibliográfica publicada en 2009 por Wang et al. [42] enumeran de manera concreta 25 criterios de sustentabilidad típicamente usados en las herramientas MCDM, la cual fue usada como una base para la formulación de los 9 criterios, seleccionados en el estudio realizado por Troldborg, et. al en 2014 [43]; donde comparan diferentes tecnologías de ER en Escocia. Tomaron tres criterios técnicos (potencial de generación de energía, madurez tecnológica, confiabilidad en el suministro de energía), tres ambientales (emisiones de GEI, impacto a la calidad de vida, requerimientos de área) y tres socioeconómicos (costo nivelado de energía, contribución a la economía, y aceptación social). Exponen que la selección de los criterios es un punto crítico y es importante que sean definidos por un grupo de expertos y por quienes toman las decisiones. El número de criterios a utilizar depende la información disponible sobre cada posible criterio. Algunos de estos son evaluados usando una escala cualitativa en orden de 1 a 5, donde 1 es la puntuación más baja y 5 es la mejor puntuación, como se muestra a continuación en la Tabla 1.3.

Rojas y Yusta en 2015 [44], tomaron criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales; compuestos por 13 subcriterios (Costo presente neto, costo variable de operación y mantenimiento, emisiones de CO₂, emisiones de lluvia ácida (SO₂), emisiones de eutrofización (NO_x), uso de tierras, aceptación social, creación de empleos, índice de desarrollo humano, coeficiente de eficiencia de conversión de energía, disponibilidad de energía para suplir la demanda primaria, confiabilidad de las tecnologías, energía no servida). Los criterios técnicos y económicos que han sido considerados tradicionalmente en la toma de decisiones podrían no ser coherentes con la planeación del sistema de suministro de energía, basándose en condiciones de desarrollo y conservación del ambiente local. Las consideraciones ambientales y sociales han sido escasamente exploradas; sin embargo, estos factores podrían contribuir a propuestas más robustas en la planeación de energía sustentable descentralizada [45].

Tabla 1.3 Valores estimados de los criterios para las tecnologías renovables consideradas. Valores máximos y mínimos entre paréntesis [43].

No	Tecnología renovable	Energía generada total (TWh/año)	Madurez tecnológica (cualitat.)	Confiabilidad en el suministro (cualitat.)	Emisiones de GEI (gCO ₂ eq /kW h)	Impacto a la calidad de vida (cualitat.)	Requerimientos de área (m ² /kW)	Costo nivelado de energía (USD/MWh)	Contribución a la economía (cualitat.)	Aceptación social (cualitat.)
1	Eólica en tierra	45 (25-125)	5 (4-5)	2 (2-4)	15 (5-70)	2 (1-4)	200 (10-1200)	96 (34-172)	3 (2-4)	3 (1-4)
2	Eólica en mar	80 (25-150)	4 (3-4)	3 (2-4)	15 (5-70)	3 (1-4)	200 (10-1200)	151 (69-261)	3 (2-5)	4 (2-5)
3	Hidro-eléctrica	10 (6-25)	5 (4-5)	4 (3-5)	20 (2-60)	2 (1-4)	500 (10-6500)	83 (13-179)	3 (2-5)	4 (2-4)
4	Olas	20 (5-60)	2 (2-3)	3 (2-4)	25 (12-50)	4 (1-4)	150 (10-300)	255 (179-550)	4 (2-5)	4 (2-5)
5	Mareas	20 (5-50)	2 (2-3)	3 (2-4)	25 (10-80)	3 (1-4)	100 (10-300)	220 (110-482)	4 (2-5)	4 (2-5)
6	Geotérmica	2.5 (1 - 10)	4 (3-4)	5 (4-5)	40 (10-80)	4 (1-4)	100 (20-1000)	110 (13-275)	3 (2-5)	3 (1-4)
7	Fotovoltaica	20 (2.5-70)	5 (4-5)	2 (1-3)	60 (20-200)	5 (3-5)	150 (10-500)	468 (69-826)	4 (2-5)	5 (4-5)
8	Solar térmica	11 (2.5-20)	5 (4-5)	2 (1-3)	40 (15-150)	5 (3-5)	40 (10-100)	275 (69-620)	3 (2-4)	5 (4-5)
9	Biomasa dedicada	15 (5-45)	4 (4-5)	4 (3-5)	100 (25-600)	2 (1-4)	4000 (1000-6000)	180 (55-344)	3 (2-5)	3 (1-4)
10	Energía de residuos	2 (2-10)	4 (4-5)	4 (3-5)	350 (100-1000)	2 (1-4)	25 (0-50)	110 (69-234)	4 (2-5)	3 (1-4)
11	Bombas de calor	10 (5-20)	4 (4-5)	4 (3-5)	150 (65-280)	5 (3-5)	50 (10-300)	130 (69-260)	3 (2-4)	5 (3-5)

Los subcriterios, algunos de los cuales podrían verse a simple vista como triviales, fueron estudiados y seleccionados por Rojas y Yusta [46], tomando en cuenta los principios sugeridos por Keeney y Raiffa [47] con relación a que los criterios seleccionados deben poderse complementar y descomponer, deben ser operables, no redundantes y simples, para proveer una estructura robusta de toma de decisiones. Todos los subcriterios seleccionados en esta investigación están asociados con un indicador numérico para facilitar la comparación en la evaluación de las diferentes alternativas.

El tipo y número de criterios seleccionados será esencial para una toma de decisiones consistente y robusta para la electrificación rural. Los criterios deben ser explícitamente seleccionados para evitar inconsistencias cuando se resuelvan las funciones y los cálculos.

Purwanto y Afifah, 2016 [48], contemplan la dimensión institucional al igual que la AGENDA 21 (Anexo A) [49], clasificando los 29 criterios en dimensión técnica, económica, social, ambiental e institucional (Factor de capacidad, compatibilidad con la red a futuro, operación diaria del servicio, disponibilidad de servicios, rentabilidad, repartición de beneficios destinados a la reinversión, tarifas retrasadas, parte de la electricidad consumida por los negocios, proporción de hogares electrificados que usan electricidad para actividades generadoras de ingresos, desarrollo de negocios, proporción de centros de salud y escuelas con electricidad, número de farolas en la zona, posibilidades de microcrédito disponibles para la conexión de servicios de electricidad, porcentaje de población con educación primaria, porcentaje de la población con acceso a la electricidad, subvenciones para servicios de electricidad, participación de los niños económicamente activos, proporción de energía renovable en la producción, emisiones de dióxido de carbono de la producción, proporción de hogares electrificados donde la electricidad ha sustituido a otra fuente de energía para la iluminación, proporción de hogares electrificados donde la electricidad ha sustituido a otras fuentes de energía para cocinar comidas principales, cualquier impacto ambiental serio identificado, condiciones meteorológicas extremas, participación del personal con una educación adecuada, rotación de personal en la organización, número de años en el negocio, participación de pérdidas no técnicas, nivel de satisfacción con los servicios energéticos, auditoría de los informes financieros anuales). Algunos indicadores sociales muestran la medida del impacto de la electrificación. En la investigación que desarrollaron mencionan que el servicio de energía de todas las instalaciones públicas (escuela elemental, mezquita, y alumbrado público) es suministrado por el gobierno municipal, pero en ningún proyecto se contempla el alumbrado de las calles. Se ha encontrado que el alumbrado público reduce el sentimiento de inseguridad cuando se transita por las calles en la noche. Esto puede ser mejorado fácilmente si las luces fueran reparadas, pero nadie toma la responsabilidad de su mantenimiento ya que son un bien público. La disponibilidad del servicio eléctrico que puede proveer una mejor iluminación, se espera que ayude a la calidad de la educación de los residentes. La iluminación permite que se pueda estudiar en casa, incrementa la seguridad, y habilita el uso de medios educativos y de comunicación de las escuelas, incluyendo las tecnologías de información y comunicación. Más del 80% de los encuestados quienes tienen familiares que asisten a la escuela, sienten que hubo beneficios para las actividades de aprendizaje de los niños [48].

Por su parte, Zolfani [50] y Cucchiella [51] aplicaron metodologías de MCDM para la evaluación de diferentes tipos de ER bajo un conjunto de criterios de sustentabilidad, por medio de metodologías

populares. En el primer estudio, emplearon una metodología recientemente desarrollada, denominada SWARA (Análisis de Relación de Evaluación de Peso por Pasos), para realizar evaluaciones de priorización de indicadores de sistemas energéticos. Hacen énfasis en la importancia y urgencia de apoyar el crecimiento de las ER para alcanzar un crecimiento sustentable. La toma de decisiones respecto a proyectos de energía es complicada y riesgosa, por lo tanto, no puede hacerse de manera individual. La metodología seleccionada para esta investigación, en primer lugar, porque tiene una perspectiva diferente a otros métodos similares como AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), ANP (Proceso Analítico en Red) y FARE (Relación de Factores). Permite a los usuarios seleccionar prioridades basados en la situación económica y ambiental actual. Los expertos tienen un papel importante en la evaluación y cálculo de pesos. La habilidad de la opinión experta sobre la relación de importancia de los criterios es el principal elemento de este método. Dentro de los indicadores de sustentabilidad evaluados encontraron que los de mayor peso son los de carácter social, después ambiental, luego económico y finalmente las fuentes.

En el segundo estudio, proponen un análisis de decisión multicriterio para evaluar el desempeño sustentable actual de los países europeos desde una perspectiva ambiental y energética, que partiendo de datos de Eurostat (base de datos estadísticos de Europa) y el AHP, permitan una comparación directa de las naciones. Para este fin, se toman en cuenta múltiples índices, tales como GEI, gastos gubernamentales para la protección ambiental, desperdicios reciclados y reutilizados de equipos eléctricos y electrónicos, desechos reciclados y reutilizados al final del ciclo de vida de los vehículos, materiales reciclados de los desperdicios sólidos municipales, participación de las ER en la electrificación, participación de las ER en transporte, participación de las ER en calefacción, enfriamiento, y consumo energético primario. Este modelo comparativo provee un valor de sustentabilidad para cada país europeo y la clasificación relacionada con el promedio del continente. Los resultados muestran que, aún hoy, 12 de los 28 países de la UUEE (Unión Europea) superan el promedio que se obtuvo para 2013. Los cuatro países con mejores índices de sustentabilidad son Suecia, Dinamarca, Finlandia y Austria, y Suecia es el país con las mejores perspectivas ambientales y energéticas.

De manera general, se puede decir que los criterios de sustentabilidad varían de caso en caso, en cantidad, clasificación, y valores; principalmente para los que se asignan de manera subjetiva.

1.4.2 Métodos de análisis multicriterio utilizados en la optimización de sistemas energéticos.

Cuando los SHGE se diseñan correctamente suelen presentar un costo total neto actualizado menor que los sistemas basados en una única fuente renovable. Sin embargo, el cálculo óptimo de un sistema híbrido es muy complejo, debido a la variabilidad de la disponibilidad de los recursos renovables y de la demanda, además de las características no lineales de algunos componentes y a la complejidad del sistema, por ejemplo, el elevado número de variables interrelacionadas [52].

Según lo anterior, es de gran importancia aplicar el Análisis multicriterio al diseño de SHGE ya que su diseño requiere de múltiples variables y de la toma de varias decisiones que pueden hacer que un sistema sea óptimo para una determinada aplicación, o puede no serlo en otro caso, según el juicio del diseñador, quien define las prioridades y los pesos otorgados a los diferentes aspectos económicos, medioambientales y sociales. Además, este tipo de análisis de sensibilidad que exponen la influencia de cada criterio sobre el sistema como un todo.

Empleando la plataforma de búsqueda estructurada “Árbol de la Ciencia” (TOS), desarrollada por los integrantes de un grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales [53], se realizó la búsqueda y el análisis de las publicaciones relacionadas con las palabras claves “renewable energy systems multicriteria optimization”

Las metodologías de MCDM se han aplicado al diseño de SHGE para promover la explotación sostenible de las ER, en sistemas aislados [54-57], para mitigar la variabilidad inherente a las fuentes. Mientras que en sistemas interconectados a la red [55-58], esto se hizo para promover la diversificación de las fuentes de energía, para reducir las emisiones de GEI, y la dependencia de los combustibles fósiles.

El análisis multicriterio para el diseño y optimización de SHGE se ha ubicado a la vanguardia de la investigación en el campo de los SHGE, lo cual denota la importancia y el interés que se le ha venido dando a esta temática para el futuro desarrollo de la economía. Sin embargo, la mayoría de estos proyectos se han desarrollado en países desarrollados tales como Portugal, Francia, Estados Unidos, Brasil, España, Francia, Omán, Turquía, India, Escocia y Austria; donde al contarse con recursos para el desarrollo de las ER a gran escala autónomos o conectados a la red, son menos estudiados los sistemas autónomos medios y pequeños, que resultan de gran interés desde el punto de vista energético para los países en vías de desarrollo [52].

A continuación, se presenta un breve resumen las diferentes investigaciones relacionadas con el diseño óptimo de SHGE. En primera instancia, diseños empleando metodologías monocriterio. En segundo lugar, metodologías empleando herramientas multicriterio. Y finalmente una revisión sobre los SHGE y las investigaciones desarrolladas en este tema para emplazamientos ubicados en México.

Optimización Monocriterio

Urbano [59] desarrolló la tesis de maestría en el tema de estrategias de control para sistemas de generación de baja potencia. Donde se enfocó en el estudio de las estrategias de control aplicables a un sistema híbrido que tenía como fuentes la energía eólica y la energía solar fotovoltaica, con almacenamiento en banco de baterías. En este trabajo resalta se la importancia de un análisis adecuado de operación, optimización y sensibilidad, de los sistemas instalados para obtener un mejor provecho de los recursos disponibles sin requerir de nuevas inversiones. La optimización monocriterio se centró en los aspectos económicos del sistema [59].

Zahboune et al. [60], presentaron una metodología de diseño de SHGE para la generación de electricidad tomando como base el método de análisis de sistema de cascada eléctrica modificada, para un sistema EE/FV, con unidades de almacenamiento. La simulación se llevó a cabo en MatLab (Laboratorio de Matemáticas). Para la validación emplearon simulaciones en el software comercial HOMER Pro (Optimización híbrida de múltiples recursos energéticos, Profesional), demostrando que ambas metodologías convergen a la misma solución con una diferencia del 0.04% en la energía generada, 5.4% en exceso potencial de energía y de 0.07% en el costo de la energía.

En 2018, Ramli et al. [61], analizaron la factibilidad económica de un sistema EE/FV en la costa oeste de Arabia Saudita. Enfatizaron en la producción de energía y el costo de esta. También tomaron en cuenta la cantidad de energía no servida, así como el exceso de energía generada. Para las simulaciones utilizaron los paquetes de software HOMER y MatLab. Concluyen que la energía eólica generada es más costosa que la generada por el panel FV para el emplazamiento analizado; además que el mayor costo de inversión inicial es el sistema de almacenamiento de energía.

En el mismo año, Guzmán et al. [62], propusieron un nuevo indicador de confiabilidad basado en la mínima cantidad de energía eléctrica por hora que se puede obtener del viento y del sol usando una aproximación probabilística. Este indicador se compara con otros indicadores y el resultado mostró que se incrementa la confiabilidad del sistema, maximizando el uso de las fuentes renovables.

Sinha y Chandel, también en 2017 [63], realizaron el diseño de un sistema híbrido para emplazamientos con bajas velocidades del viento. El sistema era predominantemente FV. Sin embargo, lograron utilizar el recurso eólico disponible para complementar el recurso solar mejorando la confiabilidad y reduciendo el tamaño del sistema de almacenamiento, el cual representa el equipo de mayor costo en los SHGE. La metodología desarrollada puede usarse para identificar sistemas óptimos micro-EE/FV para locaciones con bajas velocidades de viento.

Sin embargo, los esfuerzos anteriores pueden ser realmente importantes si además de los indicadores económicos se toman en cuenta aspectos ambientales y sociales, que impulsen la instalación y operación perdurable de los SHGE que han diseñado. Al incluir indicadores sociales y ambientales puede conseguirse el apoyo económico a los proyectos de SHGE, proveniente de diferentes instituciones interesadas en invertir en proyectos de corte social o ambientalista, con el fin de llevarlos a cabo y a buen término. Además de otros aspectos como el seguimiento a los sistemas instalados, la capacitación del usuario y del personal de mantenimiento, permitirán que estos sistemas que se han diseñado bajo parámetros de optimización sean realmente útiles y cumplan su función en el tiempo de vida total estipulado en el proyecto. Es por tanto que surge la necesidad de aplicar herramientas de optimización multicriterio que permitan darles mayor confiabilidad a los sistemas óptimos diseñados bajo análisis monocriterio. A continuación, se presentan algunos trabajos recientes.

Optimización Multicriterio

Tiberiu et. al [64], utilizaron una aproximación científica del análisis multicriterio para la toma de decisiones, en el diseño de sistemas multifuente y la selección de la mejor alternativa teniendo en cuenta diferentes criterios. Describen la herramienta ELECTRE III (Eliminación y elección traducida a la realidad) y posteriormente presentan un ejemplo de aplicación. El trabajo desarrollado presentó buenos resultados ya que se pudo establecer de manera científica la prioridad de los criterios que proveen una mejor guía durante el proceso de toma de decisiones, teniendo en cuenta criterios económicos (Reducción de energía primaria, tiempo de recuperación de la inversión) y ambientales (reducción de emisiones de CO₂).

Más adelante, Tiberiu et. al [65], plantearon que el diseño de sistemas multifuentes bajo un análisis multicriterio requiere de un método que apoye el proceso de decisiones que además sea fácil de utilizar. Tienen en cuenta el desempeño energético, así como el impacto ambiental, dejando de lado

el aspecto social. Nuevamente usaron ELECTRE III como herramienta de MCDM para la selección del sistema más adecuado según las necesidades energéticas y los recursos disponibles. Concluyen que al análisis multicriterio permite obtener un listado en orden descendente de las mejores alternativas bajo los criterios que se han seleccionado, teniendo en cuenta los pesos y prioridades asignadas en cada caso.

También en 2011, Hernández-Galvez [52], aplicó la herramienta de MCDM de programación compromiso para el desarrollo de una metodología de diseño de sistemas de electrificación aislados, cuya fuente principal es la energía eólica, teniendo en cuenta aspectos económicos y sociales. El resultado fue un algoritmo de 7 pasos. Se llevó a cabo la validación de la metodología por medio de la optimización multicriterio de un sistema aislado para la electrificación de una comunidad rural cubana. El algoritmo presenta una estructura simple y de fácil aplicación, pero no tiene en cuenta múltiples fuentes renovables. Menciona la importancia del aspecto social, sin incorporarlo al MCDM como tal.

Taha y Daim en 2013 [66], realizaron una revisión de los proyectos que hacen uso de las herramientas de MCDM aplicadas para la optimización de sistemas renovables. Plantean que la solución al problema es la mejor negociada, y no explícitamente la óptima y que el uso de MCDM provee una metodología confiable, para ordenar las alternativas de las fuentes renovables, las tecnologías y los proyectos en presencia de diferentes objetivos y restricciones. Aunque existen múltiples herramientas de MCDM ninguna sobresale entre las otras o es considerada como la mejor. Es notable que la herramienta más aplicada es la AHP, dada su estructura simple y la facilidad de negociar los resultados ofreciendo alternativas de consenso de juicios. La pregunta sigue siendo, “¿cuál es la mejor herramienta para cada situación?”.

En 2015, Rojas-Zerpa y Yusta [44], estudiaron las alternativas de electrificación de zonas rurales remotas aplicando herramientas de MCDM. Hacen énfasis en que, en el proceso de planeación de este tipo de proyectos pocas veces se han tenido en cuenta factores ambientales y sociales; los cuales, además, juegan un papel antagónico a los criterios técnicos y económicos. Proponen un método que surge de la combinación de dos herramientas, por un lado, AHP y por otro lado VIKOR (Solución compromiso y optimización multicriterio), para facilitar la selección de la mejor solución para la electrificación de zonas rurales remotas. Consultaron con un grupo de expertos para la asignación de pesos a los diferentes criterios. Se presentaron tres tipos de configuraciones posibles: Generación dispersa descentralizada, generación descentralizada compacta y la opción de extender

la red pública. Los resultados demostraron que el MCDM permite la selección del sistema más apropiado de una manera robusta, comprensible, transparente y coherente con los requerimientos de desarrollo sustentable. La generación descentralizada compacta resultó ser la mejor alternativa. Para el dimensionado de los SHGE descentralizados utilizaron la herramienta HOGA (Optimización híbrida por algoritmos genéticos). El método planteado es completo, pero aún de difícil aplicación.

La herramienta PROMETHEE II (Método de Organización de Clasificación de Preferencias para la Evaluación de Enriquecimiento) también fue implementada por Alsayed et al. [57], a un SHGE EE/FV interconectado a un sistema de generación existente. Posteriormente, Strantzali et al. [54] aplicaron el PROMETHEE II a un sistema aislado compuesto por energía eólica y gas natural licuado, con un generador de combustible fósil como sistema de respaldo. En una investigación más reciente [55], donde se aplicó el algoritmo de búsqueda CSA (Algoritmo de búsqueda de Cuckoo) a un diseño de sistema EE/FV, con un digestor gasificador de ciclo combinado.

Hernández-Galvez et al. [56], aplicó la metodología VIKOR para realizar la selección óptima de dos SHGE; uno de ellos interconectado a la red, utilizando recursos eólicos y solares, para abastecer la demanda de los laboratorios de la universidad del Istmo campus Tehuantepec. Y otro sistema, también EE/FV, para la electrificación de una zona rural en Cuba. En otros estudios de sistemas EE/FV, han aplicado TOPSIS (Técnica de orden de preferencia mediante soluciones similares a la ideal), en su forma básica [67] o combinado con una lógica compleja, definiendo la metodología TOPSIS difuso [58].

Bakhtiari & Naghizadeh [68] propusieron el método multicriterio (Algoritmo de Salto de Rana Combinado) SFLA / ϵ -constrain (Restricciones Épsilon), para un diseño SHGE que incluye una turbina eólica, energía solar fotovoltaica, celdas de combustible, electrolizador, tanque de hidrógeno y un banco de baterías, con un perfil de carga intermitente. Por otro lado, Ifaei et al. [69] simularon un sistema híbrido FV/EE/Biogás/Hidroturbina/Biomasa como unidad piloto, para evaluar el potencial de energía renovable en Irán aplicando TOPSIS difuso. Para un caso de estudio en Inglaterra, [70], donde se sugirió implementar tecnologías energéticas con bajas emisiones de CO₂ y reducir el uso de carbón y gasolina. El enfoque de la metodología GRA-MOGLP (Programación lineal multiobjetivo-gris) proporciona una herramienta eficaz para la evaluación y optimización de la planificación de la generación eléctrica sostenible. Luego se propuso un sistema de tratamiento de aguas residuales adaptable, asequible y sostenible, energizado por energía solar y eólica, basado en teoría y tecnología [71]. Del mismo modo, MacKenna et al. (2018, [72]), presentó una propuesta de

Programación lineal de enteros mixtos (MILP) híbrida, combinando (Optimización y análisis de eficiencia energética de sistemas de energías renovables) RE3ASON/MAVT (Teoría del valor multiatributo, o MAUT) para ER, utilizando fuentes EE/FV/Biomasa. Trutnevyyte [73] desarrolló el área de interacciones de fuente y diseño de SHGE presentando EXPANSE (Exploración de Patrones en Escenarios Energéticos Casi Óptimos). Esto se hace para la evaluación del potencial económico de las Fuentes de ER desde una perspectiva híbrida (mezcla energética que aborda dos evaluaciones de las limitaciones del potencial económico de las Fuentes de ER: en primer lugar, no capta que el potencial económico depende de la participación de cada energía dentro del mix, o no proporcionan un costo óptimo dentro de la combinación. Y, en segundo lugar, no permite construir un consenso entre las partes interesadas relevantes. Theodosius et al. [58] utilizaron el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) y las metodologías MCDM para diseñar un SHGE con fuentes convencionales y renovables. Finalmente, Kim et al. [74] aplicaron la metodología AHP, PROMETHEE, ELECTRE, para comparar los resultados obtenidos, enfatizando en el sistema de almacenamiento.

Lo anteriormente expuesto, puede resumirse en la Tabla 1.4:

Tabla 1.4 Autores que emplearon enfoque multicriterio.

ENFOQUE MULTICRITERIO		
AUTOR	SISTEMA	OBSERVACIONES
Tiberiu, 2010	Multifuentes	Electre III → prioridades con bases científicas.
Tiberiu, 2011	Multifuentes	Electre III → alternativas en orden prioritario.
Hernández-Galvez, 2011	Eólico/hidrógeno	VIKOR → Sistema monofuente económicas y ambientales.
Taha y Daim, 2013	Revisión	Ninguna de las MCDM es la mejor → La más aplicada es AHP.
Rojas-Zerpa y Yusta, 2015	Zonas rurales	AHP y VIKOR → generación descentralizada compacta.

1.4.3 Aspectos destacados.

Después de realizar una extensa revisión bibliográfica referente a los indicadores de sustentabilidad se puede observar que en los estudios de optimización MCDM, se tienen en cuenta el mismo tipo de criterios en la mayoría de los casos. Los valores encontrados para la generación de energía eólica y solar serán de gran utilidad para el desarrollo de este estudio.

Además de los indicadores señalados por los autores de los estudios de optimización de sistemas renovables, se pueden tener en cuenta otros criterios que aplican para los países en vías de

desarrollo que no son tenidos en cuenta de manera frecuente ya que la gran parte de las investigaciones son desarrollados para países del primer mundo.

Es importante resaltar el aporte socioeconómico y la nueva perspectiva que este tema me ha abierto como investigadora, ya que son gran cantidad de criterios fuera de los comúnmente utilizados, que son primordiales y que no son analizados ni tenidos en cuenta. A futuro, y teniendo en cuenta el enfoque de sustentabilidad, los proyectos deben pensarse como proyectos de desarrollo integrales, que no solo impliquen llevar electricidad a las comunidades que aún no tienen acceso a este servicio básico, sino también involucrar a los pobladores a nuevas actividades que permitan aprovechar al máximo este nuevo recurso y a mejorar todos los indicadores de sustentabilidad que pueden cambiarse gracias a la adquisición de este servicio, en referencia a la educación, los hábitos de consumo y las actividades económicas y de protección ambiental.

En la Figura 1.9 se aprecia que, la aplicación de metodologías MCDM a las RES, se ha utilizado con mayor frecuencia para los SHGE (23%) y para la planificación energética distribuida (17%). El diseño de SHGE se proyecta como una de las áreas de investigación más amplias para la aplicación de las herramientas MCDM en la toma de decisiones grupales.

Llama la atención, que el número anual de publicaciones que definen las tendencias del uso de herramientas MCDM en las ER ha aumentado considerablemente (Figura 1.10). Este hecho está relacionado con la conciencia global de los problemas asociados al uso de combustibles fósiles y su incidencia en el cambio global. Cada vez más, las instituciones académicas y científicas, así como el gobierno y la sociedad en general, son conscientes de la necesidad de hacer un desarrollo energético sostenible. Pero, para lograrlo, es necesario tomar decisiones que incorporen múltiples criterios, desde los tres pilares del desarrollo sostenible y desde el ámbito institucional.

Sin embargo, los esfuerzos internacionales en esta dirección tienen diferentes dimensiones de un país a otro. Eso se nota al analizar la distribución por países, de las investigaciones encontradas por la herramienta TOS, que definen las tendencias de los métodos MCDM (Figura 1.11). Por ejemplo, hay muy pocas publicaciones de los países latinoamericanos. Solo Figuran Chile, Cuba y México; cada uno con un solo caso de estudio publicado.

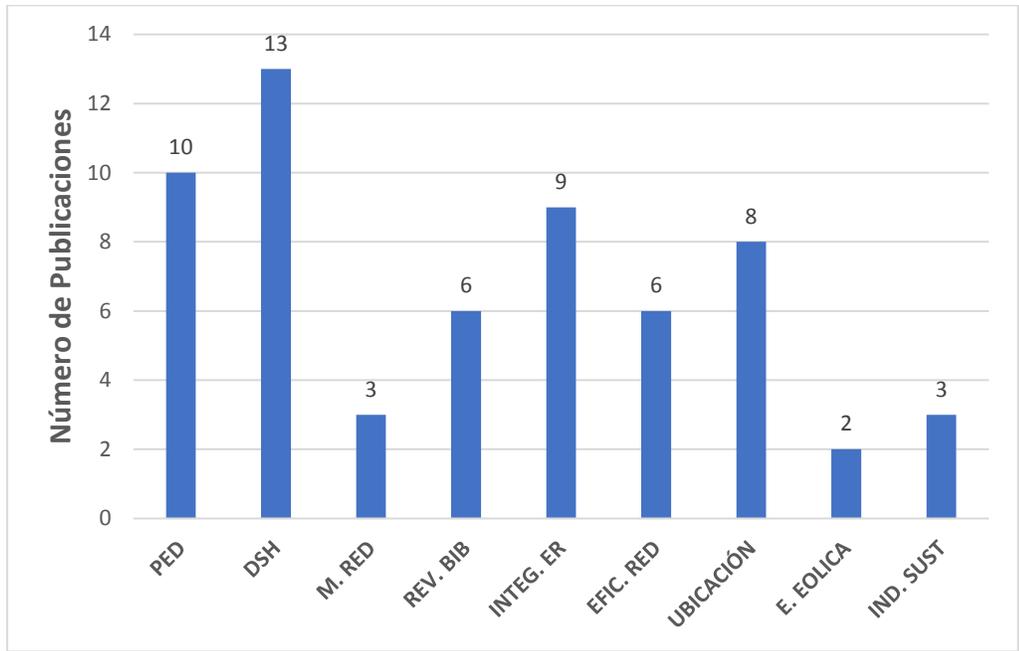


Figura 1.9 Tendencias en la aplicación de Análisis multicriterio en los proyectos de RE.

*PED: Planeación energética distribuida; DSH: Diseño de sistemas híbridos; M. RED: Microredes; Rev. Bib: revisiones bibliográficas; Efic. Red: Eficiencia de redes; E. Eólica: Energía Eólica; Ind. Sust: Indicadores de sustentabilidad.

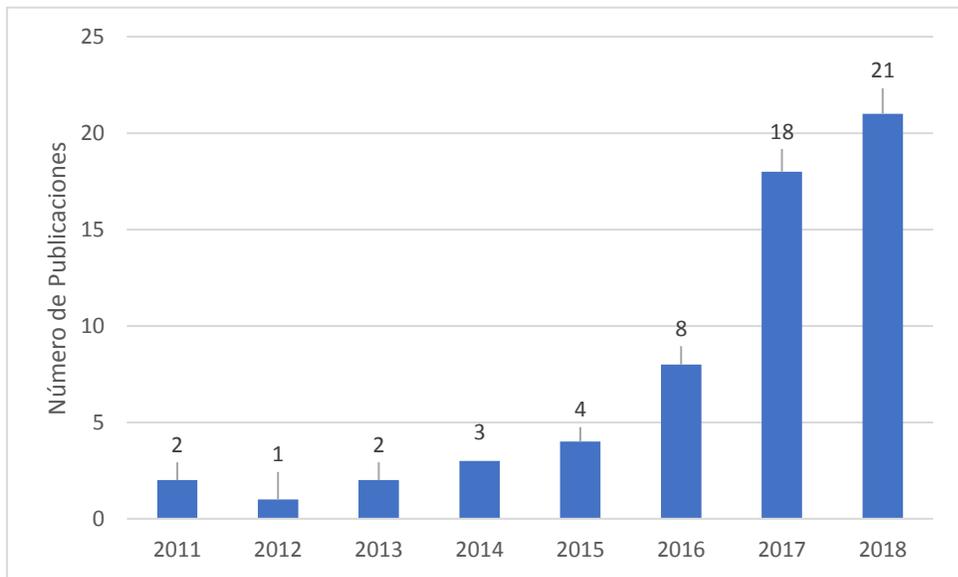


Figura 1.10 Número de publicaciones por año de MCDM en SHGE.

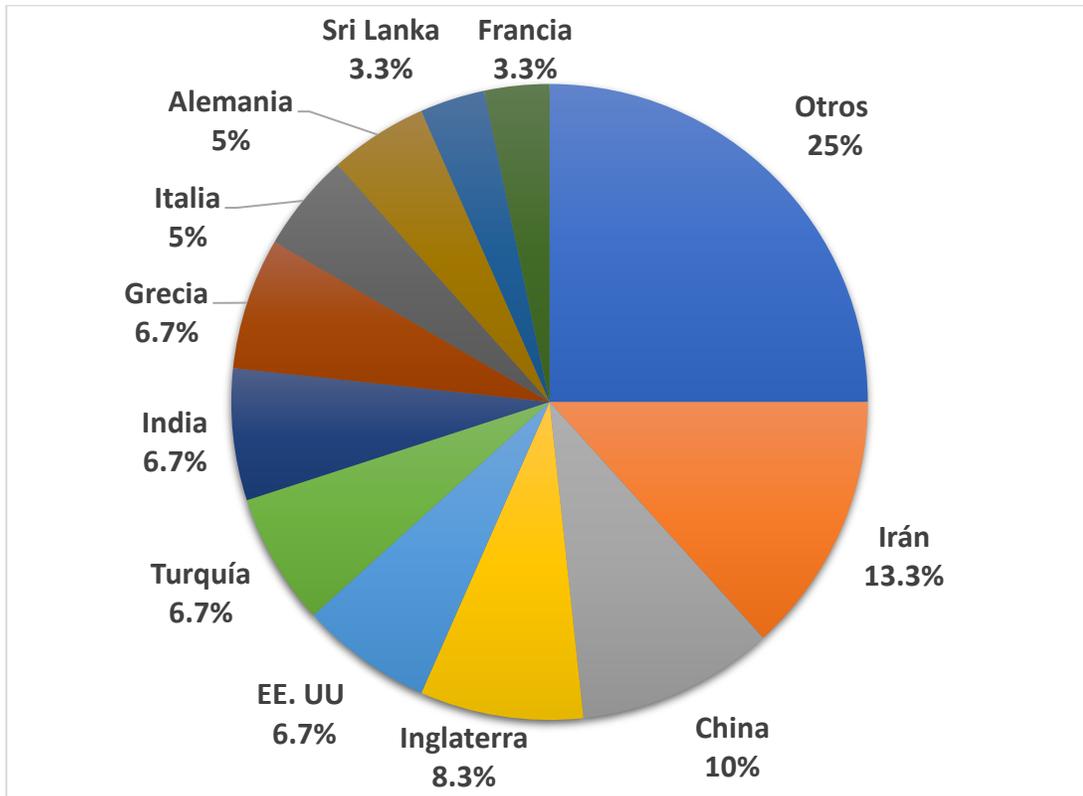


Figura 1.11 Número de publicaciones por país. Otros: Chile, Jordania, Libia, Lituania, México, Cuba, Nigeria, Pakistán, Polonia, Portugal, Corea del Sur, Suiza.

Se espera que las herramientas MCDM se utilicen con mayor frecuencia en los campos de las ER y por un mayor número de países, ya que pueden ayudar a resolver los desacuerdos entre las partes interesadas durante la, compleja y urgente, transición energética de fuentes convencionales a renovables. Aquí radica la importancia de utilizar las estructuras básicas de las herramientas de MCDM, para motivar a las comunidades a utilizar esas metodologías de resolución de problemas con el fin de ayudar en el proceso de toma de decisiones; como el apoyo y la participación en proyectos de generación de energía basados en una o más fuentes renovables. Esto asegurará su operación y funcionamiento durante todo el ciclo de vida del proyecto diseñado, a través de usuarios interesados e involucrados.

1.5 Descripción y formulación del problema de investigación.

Existen diferentes métodos para el dimensionado de SHGE tales como HOMER, RETScreen, Hybrid2 y TRNSYS, entre otros, que optimizan los SHGE en función únicamente de los aspectos técnicos y económicos. Por otro lado, existen diferentes técnicas de análisis multicriterio que permiten dar confiabilidad al buen término de un proyecto donde, además de los aspectos técnicos, es de vital

importancia tener en cuenta los aspectos ambientales y sociales, para que estén alineados con los criterios relativos a la sustentabilidad.

Pero existe la carencia de una metodología unificada y de fácil implementación que permita el dimensionado de un SHGE bajo un enfoque de sustentabilidad, tal que brinde la confianza suficiente a los interesados, de un sistema técnicamente eficiente, ambientalmente amigable y socialmente compatible y operable; de tal suerte que se logre dar un nuevo impulso y apoyo a los diversos proyectos de explotación de ER para los diferentes usuarios, a diferentes escalas.

1.6 Justificación.

Es necesaria la aplicación de técnicas de análisis multicriterio al diseño de SHGE ya que estos han presentado diferentes problemas de tipo operativo, porque que no se ha brindado la información suficiente a los usuarios y los sistemas terminan inutilizados causando un impacto ambiental negativo.

Este campo de investigación es de gran importancia ya que se puede mejorar el desempeño y la vida útil de los SHGE para diversas aplicaciones. Se pretende obtener una metodología superior a las actuales, en cuanto a que considerarán factores que permitan evaluar y planear de manera integral los proyectos de electrificación bajo un enfoque de sustentabilidad, dando un aporte social al incluir dentro de los interesados a los usuarios finales. Este es un aporte científico ya que se implementan metodologías, herramientas matemáticas y de software para tal fin, que además puede generar un impacto económico positivo, por la aplicación de una metodología integradora que permita acercar el diseño de los SHGE a diferentes niveles académicos, así como guiar la planeación de proyectos sean rentables y perdurables en el tiempo.

1.7 Preguntas de investigación.

¿Cuáles son los retos y perspectivas de los actuales métodos de dimensionado de sistemas híbridos de energía?

¿Cuáles son los criterios de sustentabilidad y las herramientas de análisis multicriterio más adecuados para la optimización de sistemas híbridos de energía?

¿La optimización multicriterio de sistemas híbridos de energía bajo un enfoque de sustentabilidad, es ventajosa frente a los métodos actuales?

1.8 Objetivos.

1.8.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología y un software basados en herramientas de análisis multicriterio para optimizar sistemas híbridos de energía con un enfoque de sustentabilidad.

1.8.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis crítico de los métodos actuales de dimensionado de sistemas híbridos que permita identificar sus principales retos.
- Determinar los criterios de sustentabilidad y las herramientas de análisis multicriterio aplicables al desarrollo de sistemas híbridos de energía.
- Desarrollar una metodología y un software que permita realizar la optimización multicriterio de sistemas híbridos de energía.
- Comparar la metodología obtenida con otros métodos de dimensionado, mediante el análisis de casos de estudio reales.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas híbridos de generación de energía.

Un sistema híbrido de generación de energía (SHGE) consta de dos o más recursos renovables energéticos, un equipo de acondicionamiento de energía, un controlador y un sistema de almacenamiento. Adicionalmente estos sistemas requieren de una tercera fuente de energía de respaldo que puede ser generación a partir de diésel o la red de conexión eléctrica local, que permita suplir la carga energética cuando las fuentes energéticas renovables no están disponibles, por ejemplo, cuando las velocidades del viento y la irradiación solar son bajas o nulas [20].

Se denominan SHGE, a los sistemas que disponen de una o más fuentes renovables (solar fotovoltaica, eólica, minihidráulica, biogás y/o biomasa) y que también pueden disponer de fuentes no renovables (por ejemplo, un generador diésel) [52].

Los SHGE pueden definirse como una combinación de un conjunto de tecnologías, renovables, y/o convencionales, para producir, administrar, almacenar y usar diferentes vectores energéticos [75]. Consiste en dos o más fuentes energéticas, uno o varios equipos de generación y acondicionamiento de energía, un controlador y un sistema de almacenamiento [76].

De manera general, los SHGE convierten todos los recursos en una forma de energía (generalmente eléctrica) o la almacenan en otra forma (química, aire comprimido, térmica, mecánica, volante de inercia, etc.), y la sumatoria obtenida se usa para suplir una variedad de cargas o demanda energética. La hibridación puede resultar en el incremento de la confiabilidad; sin embargo, la selección apropiada de las tecnologías, así como el dimensionado de las unidades de generación, son esenciales en el diseño de dichos sistemas para el mejoramiento del desempeño operacional y el control de la operación y despacho de energía [77].

2.1.1 Configuraciones principales.

Existen diferentes configuraciones de SHGE, y entre las más factibles se encuentran las que contemplan los recursos solar y eólico. Generalmente, estos sistemas requieren de una tercera fuente de energía que puede ser un sistema de generación a partir de diésel, o la red de conexión eléctrica local (si se tiene una conexión cercana); que permita suplir la carga energética cuando las velocidades del viento y la irradiancia solar son bajas o nulas [78]. Actualmente se proyectan SHGE en los que las fuentes renovables y el almacenamiento proporcionan hasta un 80 - 90 % de la necesidad energética, dejando al diésel solo la función de emergencia.

Generalmente los SHGE tienen los siguientes componentes:

- a. Dispositivos de explotación de los recursos renovables: Para los SHGE son dos o más dispositivos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (aerogeneradores, módulos FV)
- b. Dispositivos de almacenamiento de energía generada no consumida (bancos de baterías, celdas de combustible)
- c. Elementos de adecuación de la energía eléctrica para ser entregada a la demanda o inyectada a la red (inversores, rectificadores, convertidores)
- d. Sistemas de respaldo de energía eléctrica cuando los dispositivos que operan con fuentes renovables no generan la energía necesaria para cubrir la demanda y las baterías se encuentran descargadas o, la estrategia de despacho de energía impide que éstas se descarguen por debajo de cierto valor límite (generadores a diésel, red eléctrica, sistemas de hidrógeno).

Tabla 2.1 Tecnologías en energías renovables (Generación y almacenamiento).

Principales tecnologías de energías renovables o alternativas*	Tipo de almacenamiento de energía
Biomasa	Baterías
Geotérmica	Aire comprimido
Hidráulica/microhidráulica	Volantes de inercia
Olas del mar/ mareas	Hidrógeno
Solar fotovoltaica/térmica	Bombeo hidráulico
Eólica	SMES (superconductor magnético de almacenamiento)
Celdas de combustible*	Supercapacitor (SC)
Microturbinas*	Térmico

Cualquier combinación de tecnologías de generación de ER o energías alternativas, junto con un adecuado sistema de almacenamiento y la posibilidad de ser combinado con alguna otra tecnología convencional (generador a diésel) pueden conformar un SHGE. Por ejemplo, un sistema SHGE puede tener cualquier combinación de EE, FV, microhidráulica, microturbina, generador a diésel, banco de baterías, y celda de combustible/electrolizador, en conexión a red o en configuración aislada, denominada con frecuencia como microrred.

Las fuentes renovables tienen diferentes características operacionales; por lo que es esencial tener bien definido y estandarizado el procedimiento para el conexionado de un sistema híbrido, a un

conjunto de fuentes de generación distribuida, almacenamiento energético y cargas integradas en un mismo entorno, siendo capaces de operar de manera autónoma. Existen varias maneras de integrar fuentes de ER de generación de energía para conformar un sistema híbrido. Estos métodos pueden clasificarse en tres categorías: Acoplamiento a DC (corriente continua), Acoplamiento a AC (corriente alterna) y acoplamiento híbrido. Estos métodos se explican brevemente a continuación:

- 1) Sistemas acoplados a DC: En una configuración acoplada a DC como se muestra en la Figura 2.1, las diferentes fuentes energéticas se conectan al bus DC a través de una interfaz de circuitos de electrónica de potencia adecuada. Las fuentes DC deben estar conectadas directamente al bus DC, de ser posible.

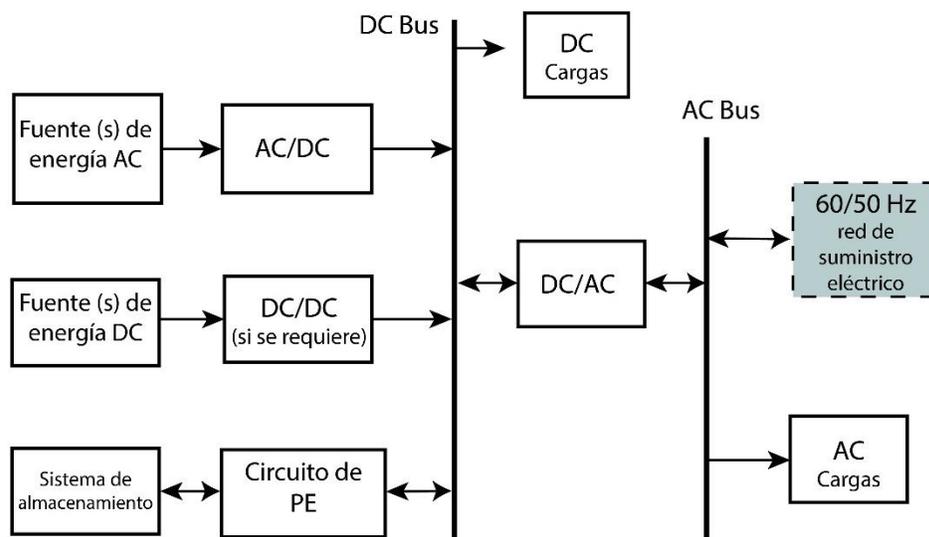


Figura 2.1 Sistemas acoplados a DC. Reproducido de [77].

Si existen cargas DC también pueden conectarse directamente al bus DC a través de convertidores DC/DC para alcanzar el voltaje apropiado. El sistema puede suplir una demanda energética de AC (50 Hz o 60 Hz), o puede interconectarse a una red de suministro a través de un inversor, cuyo diseño y control permitan el flujo bidireccional de energía. El acoplamiento a bus DC es un esquema simple que no necesita sincronización para integrar diferentes fuentes de energía, aunque también tiene desventajas. Por ejemplo, si el inversor del sistema está fuera de servicio, entonces todo el sistema no estará disponible para suplir la demanda AC.

- 2) Sistemas acoplados a AC: Pueden dividirse en dos subcategorías: acoplado a energía en frecuencia AC (PFAC) o acoplado a alta frecuencia AC (HFAC). El esquema de la primera subcategoría se presenta en la Figura 2.2a, donde diferentes fuentes de energía están integradas a través de una interfaz de circuitos propios a un bus de frecuencia AC. También

se requiere de inductores de acoplamiento entre los circuitos de la electrónica de potencia y el bus AC para obtener el suministro de flujo energético deseado; el esquema de la segunda subcategoría se presenta en la Figura 2.2b, donde las diferentes fuentes de energía están acopladas a un bus HFAC, al cual las cargas HFAC están conectadas.

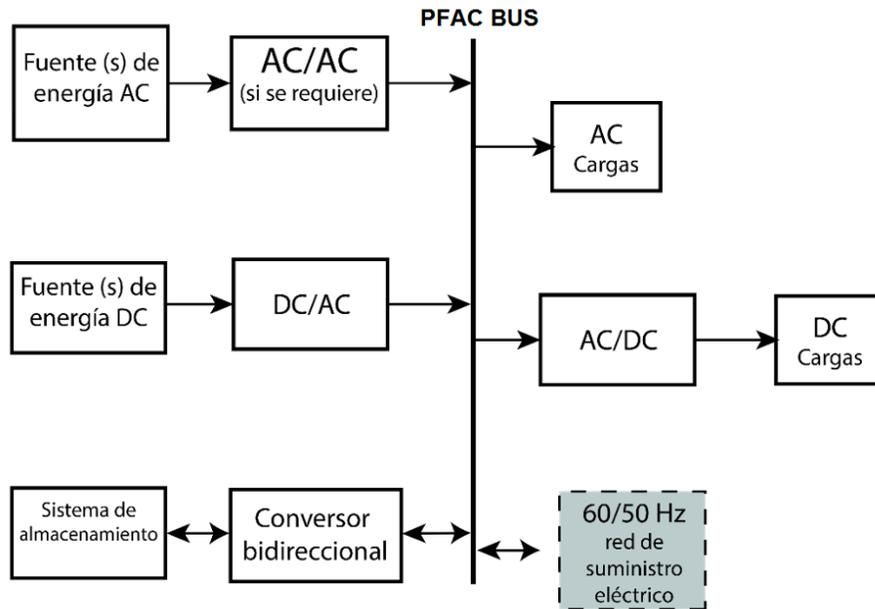


Figura 2.2a Sistemas acoplados a energía en AC - PFAC. Reproducido de [77].

Esta configuración se ha empleado principalmente en aplicaciones con cargas de alta frecuencia (por ejemplo 400 Hz) tales como aviones, submarinos, buques, y aplicaciones aeroespaciales.

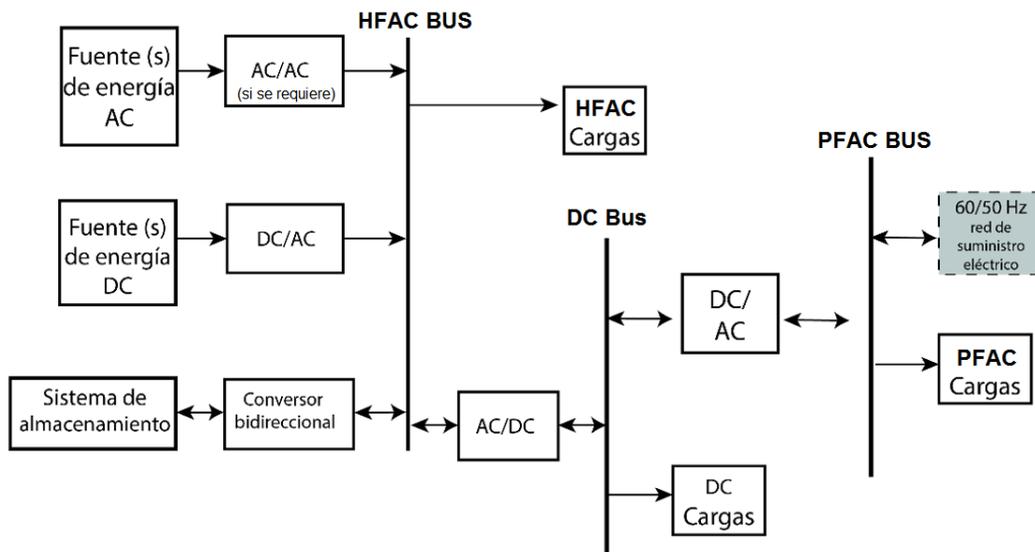


Figura 2.2b Sistemas acoplados a alta frecuencia en AC - HFAC. Reproducido de [77].

- 3) Sistemas con acoplamiento híbrido: En lugar de conectar todas las fuentes de generación distribuida a un solo bus AC o DC, las diferentes fuentes pueden conectarse a un bus AC o DC del acoplamiento híbrido. La Figura 2.3 muestra un sistema de acoplamiento híbrido donde los recursos de generación distribuida están conectados a un bus DC o a un bus AC. En esta configuración, algunas fuentes de energía pueden estar conectadas directamente sin interfaces de circuitos. Como resultado, el sistema puede ser altamente eficiente a costos reducidos. De otro lado, el control y suministro de energía pueden ser mucho más complejos que en los esquemas de las Figuras 2.1 y 2.2a.

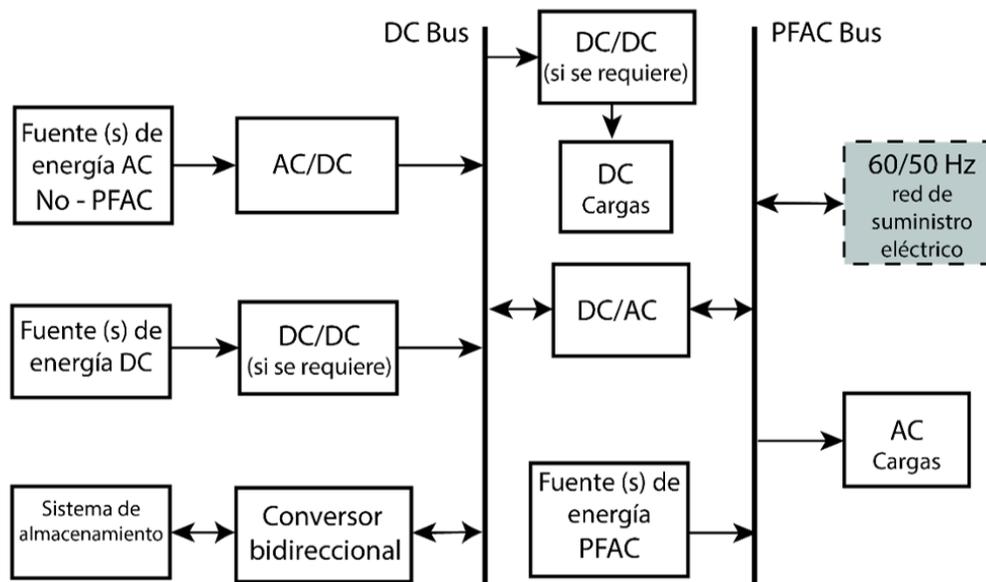


Figura 2.3 Sistemas con acoplamiento híbrido. Reproducido de [77].

Los esquemas presentados anteriormente representan seis configuraciones básicas de las cuales se desprende una variedad de sistemas finales en los cuales las fuentes de energía AC, pueden ser aerogeneradores, generadores a diésel, la red eléctrica si está disponible, entre otros; las fuentes de energía DC pueden ser aerogeneradores, módulos solares FV, entre otros; el sistema de almacenamiento puede ser un banco de baterías, volantes de inercia, o un sistema de almacenamiento en hidrógeno, entre otros; y las demandas energéticas que dependerán de cada caso en particular, podrían componerse de una única carga, o de una primaria y una secundaria, por ejemplo. Ejemplos concretos de dichas configuraciones finales de sistemas energéticos renovables (aislados) pueden encontrarse en la tesis de doctorado de Hernández-Galvez, páginas 129 y 130 [52] donde presentan los esquemas de diferentes SHGE generados en el software HOMER. En un estudio

reciente [79] mencionan diferentes investigaciones reportadas en la literatura basadas en el uso de HOMER para el desarrollo de microrredes para ubicaciones rurales.

2.1.2 Tecnologías de generación involucradas.

Dentro de las tecnologías de generación de ER en SHGE aislados, se encuentran comúnmente los aerogeneradores, que aprovechan la energía contenida en el viento; los módulos FV, que aprovechan la radiación solar; los dispositivos bioenergéticos; que emplean como materia prima para la generación de energía, el biogás, el biodiésel, y otros combustibles de origen biológico u orgánico; y los generadores a diésel, cuya fuente energética son los combustibles de origen fósil (gasolina, diésel). A continuación, se presentan generalidades de estas tecnologías.

Aerogeneradores: Los aerogeneradores o turbinas eólicas son máquinas que convierten la energía cinética contenida en el viento en energía eléctrica. En contraste con un molino de viento que convierte la energía del viento en energía mecánica. Como los aerogeneradores producen electricidad, están conectados a una red eléctrica, la cual incluye circuitos de carga de baterías, sistemas residenciales para el escalado de la energía eléctrica, redes aisladas o conectadas fuera de la red nacional, y extensas redes de servicio público. Los aerogeneradores que se encuentran con mayor frecuencia son relativamente pequeños (del orden de los 10 kW o menos), tanto de eje vertical como de eje horizontal (Figura 2.4).

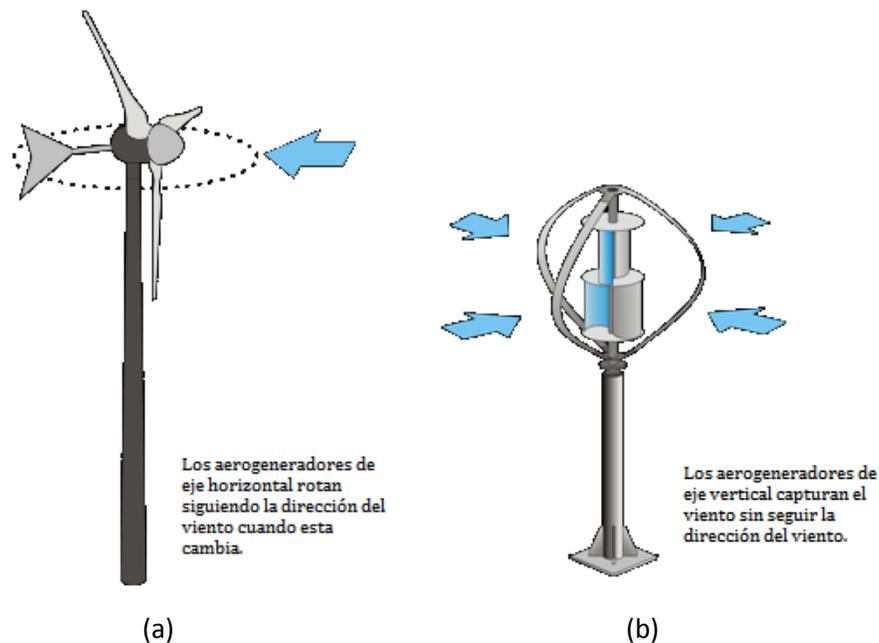


Figura 2.4 Aerogeneradores: (a) eje vertical, (b) eje horizontal (© Copyright 2012 Hi-VAWT Technology Corp).

Los aerogeneradores de eje horizontal son más grandes en términos de cantidad de energía generada; se encuentran en el rango de los 500 kW a los 10 MW. Por ejemplo, la turbina eólica Seatitan AMSC [80]. Estos equipos pueden tener altas eficiencias, siempre que se instalen en zonas ventosas. Un aerogenerador puede proporcionar más energía que la mayoría de las celdas fotovoltaicas. Sin embargo, el viento es un fenómeno aún más irregular que la radiación solar, y por lo tanto existen más dificultades en el tratamiento de la energía generada a partir del viento.

En los aerogeneradores modernos, el proceso de conversión de la energía cinética lineal en energía cinética rotatoria usa la fuerza aerodinámica básica de levantamiento para producir un torque positivo en un eje rotatorio, resultando primero en la producción de energía mecánica y luego su transformación a energía eléctrica en el generador. Los aerogeneradores, a diferencia de otros generadores, pueden producir energía solo en respuesta al viento que está inmediatamente disponible. No es posible almacenar el viento y usarlo en otro momento, el viento no es transportable: solo puede ser convertido donde existe el recurso eólico apropiado para su explotación. Hoy día, la posibilidad de transmitir la energía eléctrica vía líneas de energía compensa la inhabilidad del viento a ser transportado [81]. Por tanto, el producto de una turbina eólica es inherente a las fluctuaciones y, por tanto, no es apta para ser despachada directamente. Cualquier sistema que esté conectado a un aerogenerador debe tener en cuenta esta variabilidad.

En sistemas eléctricos de gran magnitud, los aerogeneradores sirven para reducir el número de generadores convencionales que se están usando o para disminuir la cantidad de combustible en los generadores que están operando. En sistemas eléctricos de menor capacidad, debe existir almacenamiento de energía, generadores de respaldo, y algún tipo de sistema de control especializado.

Módulos FV: La energía solar fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida en un dispositivo llamado módulo FV, el cual se compone de determinado número de celdas solares fotovoltaicas, en las cuales se produce el llamado efecto fotovoltaico (generación de una diferencia de potencial en la unión de materiales semiconductores, debido a procesos de absorción de radiación y transporte de portadores de cargas, tales como los pares electrón-hueco, fotogenerados). Dichas celdas se componen de películas semiconductoras y conductoras. Se suelen emplear materiales inorgánicos, aunque en los últimos años ha crecido el interés por los materiales orgánicos [82]. Lo interesante de los semiconductores es que su pequeña conductividad eléctrica es debida, tanto a la presencia de

electrones en la banda de conducción, como a los huecos o ausencia de electrones en la banda de valencia [83].

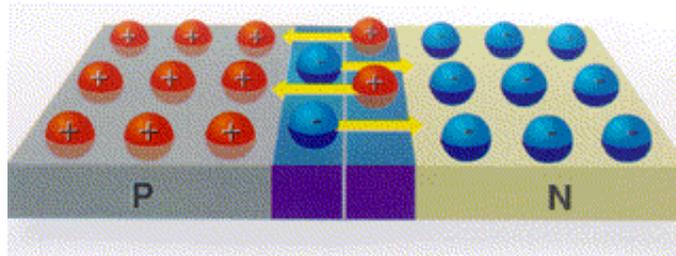


Figura 2.5 Esquema de transferencia de electrones en materiales semiconductores. Banda de conducción (P) – banda de valencia (N) [59].

Existen tres tipos de celdas fotovoltaicas, según el material de fabricación:

Monocristalinas: Se cortan de un solo cristal de silicio, como una rebanada del cristal que se caracteriza por tener una textura suave. Estos son los más eficientes y los más caros de producir. También son rígidos y deben ser montados en una estructura rígida para su protección.

Policristalina: Es una reducción del corte de un bloque de silicio, compuesto de un gran número de cristales. Son un poco menos eficientes y un poco menos costosas que las celdas monocristalinas. También deben ser montadas en un marco rígido.

Amorfas: Manufacturadas mediante la colocación de una fina capa de silicio amorfo (no cristalino) sobre una amplia variedad de superficies. Este tipo es el menos eficiente y costoso de producir, entre los tres. Debido a la naturaleza amorfa de la capa fina, es flexible, y si se fabrica sobre una superficie flexible, entonces, el panel solar entero puede ser flexible. Una característica de las celdas solares amorfas es que su potencia se reduce con el tiempo, especialmente durante los primeros meses, después de los cuales es básicamente estable [84].

Estos módulos FV están formados por un cristal o lámina transparente superior y un cerramiento inferior entre los que queda encapsulada la celda y sus conexiones eléctricas. La lámina inferior puede ser transparente, pero es más frecuente de plástico de teldar. Para encapsular se añaden unas láminas finas y transparentes de EVA (etilvinilacetato) que se funden para crear un sellado antihumedad, aislante, transparente y robusto.

La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un inversor e inyectarla en la red eléctrica, operación actualmente sujeta a subvenciones en muchos lugares para una mayor viabilidad económica.

En entornos aislados, donde se requiere poca potencia eléctrica y el acceso a la red es difícil, como estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones, se emplean los módulos fotovoltaicos como alternativa económicamente viable. Para comprender la importancia de esta posibilidad, conviene tener en cuenta que aproximadamente una cuarta parte de la población mundial no tiene acceso a la energía eléctrica.

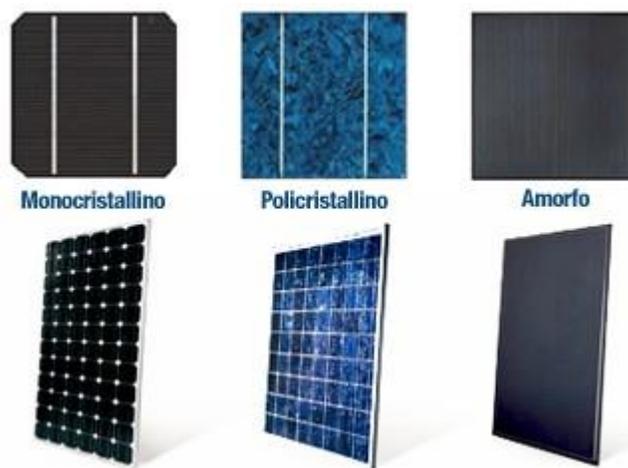


Figura 2.6 Módulos FV [85].

Generadores bioenergéticos: La bioenergía es la energía renovable que se obtiene a partir de materiales derivados de fuentes biológicas. La biomasa, es una fuente de energía renovable, compuesta por material biológico de organismos vivos o en descomposición, incluyendo animales y plantas. La biomasa puede ser transformada en gas metano, etanol y biodiésel. En alrededor de 50 países, existen plantas de generación de bioenergía para suplir la creciente demanda energética [86]. El crecimiento de la explotación de esta fuente renovable incluye la biomasa sólida, en forma de pelets de madera, uso de biomasa a escala de hogares y comunidades, para generación de energía eléctrica y térmica. Los generadores bioenergéticos son los dispositivos que realizan la conversión de estos componentes orgánicos o provenientes de organismos o seres vivos, o sus derivados; en energía eléctrica para su aprovechamiento de manera inmediata o para el almacenamiento y posterior utilización.

El ejemplo más popular de equipo de convertidores de biomasa en biogás es el biodigestor (o digestor), el cual consiste en una cámara hermética e impermeable, que proporciona condiciones anaeróbicas para la fermentación de sustratos compuestos de agua, materia orgánica, y minerales disueltos, para la producción de biogás, biosol y biol. Estos pueden ser de tipo hindú, chino o taiwanés. Coto et al. [87] describen uno de tantos ejemplos de reemplazo de parcial de combustibles fósiles por biogás en motores con generadores de energía eléctrica, mediante el uso de biogás, cuyo potencial energético reside en la presencia del metano que puede ocupar entre un 50 y un 70% en la composición total del biogás. El biogás puede reemplazar la gasolina o el diésel en motores de combustión interna. En el caso de motores a gasolina puede reemplazarse el 100% de este combustible. En motores diésel, solamente puede sustituirse el 80% de este combustible, debido a que el biogás no es explosivo por compresión. Este tipo de motor carece de bujías las cuales se encargan de producir la chispa inicial que causa la explosión dentro de la cámara de combustión.

Generadores a diésel: Los generadores diésel son grupos electrógenos compuestos principalmente por un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico generalmente síncrono, que convierten la energía contenida en los combustibles fósiles en energía mecánica a través del motor de combustión, que mediante un acoplamiento mecánico mueve un generador eléctrico con el fin de convertir la energía mecánica en eléctrica. En general los grupos electrógenos incorporan sistemas de control de frecuencia y de tensión, que suelen ser de tipo PID, aunque últimamente se ha implementado la lógica difusa. Cuando se utilizan para cargar baterías, se requiere de un rectificador que convierte la corriente generada AC en corriente DC. Algunos fabricantes recomiendan que el tiempo mínimo de operación sea de 30 minutos. El parámetro más importante es la potencia nominal aparente (VA), que es la potencia que puede suministrar por tiempo prolongado. El valor de la potencia nominal solo coincide con la potencia activa si el factor de potencia de las cargas es igual a 1; si éste es menor que la unidad, la potencia activa es inferior a la nominal debido a la limitación de corriente por los devanados del generador [88].

Presentan un comportamiento eficiente cuando operan entre el 80 y el 100% de su capacidad, con una eficiencia típica de 3 kWh/l. Cuando opera por debajo del 30% la eficiencia decrece considerablemente. Algunos de los parámetros que se consideran para la simulación son: la potencia aparente nominal, el tiempo de vida estimado, potencia mínima de funcionamiento recomendada por el fabricante, tipo de combustible y precio; inflación anual esperada, parámetros de la recta de consumo, las emisiones de CO₂ por cada unidad de combustible, costos de adquisición, operación y

mantenimiento. Los costos de mantenimiento por unidad de potencia suelen ser mayores para los generadores pequeños.

2.1.3 Tecnologías de almacenamiento de energía.

El almacenamiento energético es una parte integral de los SHGE. Las tecnologías de almacenamiento orientadas a la capacidad, tales como los sistemas de bombeo hidroeléctrico, almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES), y el almacenamiento en hidrógeno, generalmente no tienen un tiempo de respuesta rápido y son empleados para el almacenamiento y entrega a largo plazo, como el suministro de cargas con variaciones lentas. De otro lado, los equipos orientados al acceso con tiempos de respuesta rápidos, tales como baterías, volantes, SC y SMES se emplean para responder a perturbaciones de corto tiempo, como variaciones transitorias y problemas de calidad energética [77].

Sistemas de bombeo hidroeléctrico: En el caso que exista consumo de agua procedente de un sumidero (río, o pozo), se puede almacenar la energía generada, como energía potencial al bombear el agua a cierta altura para que se encuentre disponible para su uso cuando se requiera. La energía de bombeo se considera aparte de la demanda energética y no como una carga AC o DC. Esta energía de bombeo (AC o DC en dependencia del tipo de bomba), se toma como almacenamiento energético, que utiliza la energía producida en el momento en que se genera y no como carga energética a ser suplida, en el momento en que se requiera de agua bombeada. Pasa de ser una carga, a ser un sistema de almacenamiento y aprovechamiento de energía.

Aire comprimido: Sistemas que utilizan el proceso de compresión de aire en un periodo de exceso de generación de energía, almacenándola en reservorios y permitiendo su expansión para obtener en un periodo de alta demanda de electricidad [89].

Almacenamiento en hidrógeno: En la actualidad existen distintas formas de almacenar hidrógeno, tanto para aplicaciones estacionarias como para el sector del transporte (en forma gaseosa, líquida, combinado químicamente o adsorbido en sólidos porosos), dependiendo su elección de diferentes factores como el proceso final en el que se vaya a emplear, la densidad energética requerida, la cantidad a almacenar y la duración del almacenamiento, la existencia de otras posibles formas de energía disponibles, los costos y necesidades de mantenimiento de la instalación, y los costos de operación [90].

Almacenamiento en forma gaseosa: Dado que el hidrógeno es producido en forma gaseosa y sus aplicaciones suelen requerir que se encuentre en este estado la vía más simple podría ser su almacenamiento a alta presión. Este tipo de almacenamiento (presiones superiores a 20 MPa) requiere que los depósitos sean pesados y voluminosos, además de plantear cuestiones de seguridad. Cuando se compara esta alternativa frente al empleo de otros combustibles, el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en recipientes a presión no resulta competitivo debido a su baja densidad y al elevado costo de los recipientes a presión y del propio proceso de compresión del hidrógeno.

Almacenamiento en forma líquida: La opción del almacenamiento de hidrógeno en estado líquido en recipientes criogénicos requiere de temperaturas muy bajas (21.2 K), haciendo inevitable su pérdida por volatilización incluso empleando las mejores técnicas de aislamiento. Además, el alto consumo energético asociado al enfriamiento, aproximadamente el 30 % de la energía almacenada, hace que esta opción resulte inviable en la práctica, salvo en aquellas aplicaciones donde el costo de hidrógeno no sea un factor crítico.

Combinación química (hidruros metálicos): Numerosos metales de transición, y sus aleaciones, pueden ser utilizados para almacenar hidrógeno en forma de hidruros metálicos, los cuales se forman por reacción con hidrógeno, siendo éste absorbido en la estructura metálica, y pudiendo ser desorbido gracias a pequeñas variaciones de presión. Además de la dificultad que supone el intentar reducir la temperatura y presión de desorción de los hidruros con mayor capacidad de almacenamiento de hidrógeno, esta alternativa presenta un serio problema relacionado con el elevado peso del sistema de almacenamiento como consecuencia de los bajos niveles de retención de hidrógeno que se consiguen.

Adsorción en sólidos porosos (nanoestructuras de carbono): Recientemente, se ha planteado la adsorción en un sólido poroso, lo que presentaría la ventaja de ser una forma más segura y sencilla de manejar el hidrógeno, reduciéndose drásticamente la presión necesaria para su almacenamiento. En este sentido, los primeros trabajos publicados basados en nanoestructuras de carbono mostraban almacenamientos excepcionales de hasta el 60% en peso. Desde entonces y hasta el momento, se está dedicando un gran esfuerzo al estudio de nanoestructuras de carbono con elevada superficie específica (fibras, nanotubos y carbones activos) concluyendo que la cantidad de hidrógeno

adsorbida a baja temperatura (77 K) es proporcional a la superficie específica BET¹ de la nanoestructura de carbono, con valores máximos muy inferiores a los anteriormente indicados.

Bancos de baterías: Un banco de baterías es un conjunto de acumuladores o baterías recargables, son dispositivos electroquímicos que pueden transformar energía eléctrica en energía química almacenada (carga) e invertir el proceso, aportando la energía otra vez (descarga). Una batería consiste esencialmente en elementos electroquímicos, o celdas, conectadas en serie y en paralelo. Los componentes principales de una celda electroquímica son los electrodos, el separador y el electrolito. La característica de una batería depende de la selección de los materiales que la componen, la configuración de las celdas individuales y del diseño total de la batería.

Un banco de baterías debe ser utilizado en los sistemas autónomos basados en fuentes de energía intermitentes tales como Sol y viento debe, además de ser rentable, debe estar diseñada según los criterios siguientes:

- a) Vida útil elevada (es decir, muchos ciclos de carga-descarga)
- b) Alto índice de capacidad en descarga lenta
- c) Buena confiabilidad bajo condiciones cíclicas de descarga
- d) Alta eficiencia en diversos niveles del estado de carga (SOC)
- e) Vida larga, diseño robusto y bajos requisitos de mantenimiento
- f) Amplia gama de temperaturas de operación
- g) Baja auto-descarga

Estos criterios excluyen las baterías pequeñas (tipo A, C, y D) u otras baterías pequeñas usadas en la electrónica de energía (radios, cámaras de vídeo, teléfono portátil y herramientas). Así, solamente los sistemas de baterías secundarias clasificadas como grandes son aplicables en los sistemas autónomos.

Clasificación de las baterías: Se pueden clasificar según su madurez tecnológica o disponibilidad comercial. Frecuentemente se conocen como sistemas de baterías convencionales o avanzadas. La definición de baterías avanzadas incluye baterías que son usadas durante algún tiempo en

¹ Corresponde a las iniciales de los científicos *Brunauer, Emmett, y Teller*, quienes optimizaron la teoría de medición de áreas superficiales. La superficie *BET* es una propiedad muy importante de muchos tipos de materiales avanzados, como los nanomateriales, materiales farmacéuticos, fibras, pigmentos y minerales, entre otros.

aplicaciones especiales (por ejemplo, baterías de níquel-hidrógeno para la industria aeroespacial), pero que aún no constituyen un competidor comercial.

Según los criterios relacionados anteriormente, las baterías convencionales que resultan convenientes para los sistemas autónomos son las siguientes [78]:

- ✓ Baterías de plomo-ácido (Pb-ácido)
- ✓ Baterías de plomo ácido con válvulas de regulación (VLRA)
- ✓ Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)

Algunas baterías avanzadas que se han propuesto como almacenamiento de energía a corto plazo para los sistemas autónomos son:

- ✓ Las baterías de níquel-hidrógeno (por ejemplo, hidruros de níquel)
- ✓ Las baterías de litio a temperatura ambiente (por ejemplo, polímero de litio, litio-ión)
- ✓ Las baterías acuosas (por ejemplo, bromuro de cinc, las de flujo redox)
- ✓ Las baterías de altas temperaturas (por ejemplo, el sulfuro de sodio, sulfuro de litio-hierro)

Los primeros dos tipos pertenecen a la categoría de nuevos o recientemente comercializados, mientras que los dos últimos pertenecen a la categoría de sistemas de batería en desarrollo. Sin embargo, la batería de níquel-hidrógeno basada en los hidruros metálicos es el sistema de batería que está más cerca de ser comercializado.

Volantes de inercia: El almacenamiento energético en volantes de inercia, utiliza motores eléctricos para conducir al volante a rotar a altas velocidades, tal que la energía eléctrica sea transformada y almacenada en forma de energía mecánica, y cuando sea necesario, el volante de inercia activará el generador para producir energía. Los volantes operan en un ambiente de alto vacío. Este tipo de dispositivo de almacenamiento energético se caracteriza por tener bajas pérdidas por fricción, baja resistencia al viento, bajos impactos al ambiente, y no requiere de mantenimiento. Son aplicables para la modulación de frecuencia de energía para conexiones a la red y garantizan la calidad de la energía. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes tales como, baja densidad energética, y altos costos en garantizar la seguridad del sistema. Sus principales ventajas no son visibles a escalas pequeñas. Hasta el momento, se emplean principalmente como suplemento para los sistemas de baterías [91].

Los volantes, se encuentran actualmente en fase experimental y existen aún cinco problemas técnicos:

1. El rotor: Es la parte más importante del sistema de almacenamiento en volantes de inercia. La transformación de la energía en todo el sistema depende de la rotación del volante. Es necesario desarrollar volantes de alta resistencia y estructura adecuada según el diseño dinámico del rotor.
2. Cojinete de apoyo: La tecnología en cojinetes para soportar un volante de inercia de alta velocidad, es uno de los factores clave que restringen la eficiencia y la vida útil del volante.
3. Sistema de conversión de energía: La parte central del sistema de almacenamiento es la conversión entre electricidad y energía mecánica, que ajusta la entrada y salida de energía en el proceso de conversión para coordinar la frecuencia y la fase. La unidad de conversión de energía determina la eficiencia del sistema y gobierna el funcionamiento del sistema de volante.
4. Generador/motor: La alta velocidad del rotor del volante de almacenamiento energético conduce a altas velocidades en el motor, el cual requiere de alta eficiencia, bajo consumo de energía y alta confiabilidad del sistema del motor. Las investigaciones actuales sobre los motores de imanes permanentes se centran en reducir las pérdidas y resolver su sensibilidad a la temperatura.
5. Cámara de vacío: Este es un sistema auxiliar del volante, que aísla al sistema de las condiciones ambientales exteriores, para operar bajo una atmósfera de vacío.

Supercapacitores (SC) y superconductores magnéticos SMES: Los SC representan una alternativa a las tan comunes baterías electroquímicas, principalmente las baterías de ión-Litio ampliamente conocidas. Por su mecanismo físico y principio de operación, los SC son más cercanos a las baterías que a los capacitores (sus propiedades son intermedias entre ambos tipos de dispositivo). Son capaces de recolectar rápidamente gran cantidad de energía (menos que las baterías – menor densidad de energía desde el punto de vista de peso y volumen) y su respuesta a la carga es más lenta que en los capacitores cerámicos. El más común es el SC eléctrico de doble capa (EDLC). Otros tipos de SC son un híbrido de ión-litio y pseudo-SC. El EDLC usa una película dieléctrica en la interfase electrodo-electrolito para el almacenamiento de la energía. Los otros dos tipos de SC operan por medio de reacciones electroquímicas redox y la energía es almacenada en los enlaces químicos de estos materiales [92].

Por otra parte, SMES almacenan energía en un campo magnético, el cual es generado por una corriente DC que circula a través de una bobina de material superconductor. En un cable conductor

normal, cuando la corriente eléctrica circula, se pierde algo de energía en forma de calor debido a la resistencia eléctrica. Sin embargo, en un sistema SMES el material superconductor del cable se ha enfriado criogénicamente por debajo de su temperatura crítica. Como resultado, la corriente puede circular casi sin resistencia, lo que permite que la energía se almacene en un sistema SMES durante un tiempo prolongado. Los materiales más utilizados en este tipo de dispositivo incluyen el mercurio, el vanadio y el niobio-titanio. La energía se descarga conectando un convertidor de AC a la bobina conductora. Los sistemas SMES son extremadamente eficaces, pero tienen una densidad energética muy baja y aún están lejos de ser viables económicamente [93].

2.1.4 Estrategias de control.

Las estrategias de control y despacho de energía son un conjunto de reglas que controlan la operación de los generadores eléctricos y de los bancos baterías dentro de los SHGE, siempre que las ER sean insuficientes para satisfacer la demanda [94].

Dentro de los diferentes paquetes de software de simulación y optimización de sistemas híbridos que se encuentran en el mercado, sobresale por su popularidad y porque en un principio fue de uso libre, el programa HOMER. Las estrategias empleadas por HOMER para la simulación de SHGE son: Seguimiento de la demanda energética (LF) y seguimiento del ciclo de carga de las baterías (CC). Además, para sistemas cuyo respaldo energético es un motor a diésel o gasolina, se cuenta con una combinación de ambas estrategias, donde el uso de una u otra, va determinado por el valor crítico de carga (L_c) y por el valor crítico de descarga (L_d) del banco de baterías. La estrategia óptima entre ellas depende de muchos factores, incluyendo los tamaños de los generadores y del banco de baterías, el precio del combustible, los costos de operación y mantenimiento, la cantidad de fuentes renovables en el sistema y el carácter de los recursos renovables. El usuario puede seleccionar que la optimización se realice contemplando las tres opciones de estrategia (LF, CC o combinada), ante lo cual HOMER simula cada alternativa del sistema, usando una por una las estrategias seleccionadas y luego se puede ver cuál es la óptima [52].

Seguimiento de la Demanda

Bajo la **estrategia seguimiento de la demanda (LF)**, las baterías sólo son cargadas por los recursos renovables y nunca por el sistema de respaldo. Si las baterías pueden suministrar la demanda que no cubren las ER, el sistema de respaldo permanecerá apagado. Cuando las baterías no pueden

suministrar la energía que no cubren las fuentes renovables, es el sistema de respaldo que la suministra. Esta estrategia tiende a ser la óptima en sistemas con alta participación renovable.

La estrategia de seguimiento de la demanda es una estrategia de despacho de energía por lo cual cada vez que un generador opera, éste solo produce la energía necesaria para cubrir la demanda primaria. Los objetivos de menor prioridad, como cargar la batería o suplir demandas secundarias se cubren con la generación de energía a partir de las fuentes renovables.

Bajo la estrategia de seguimiento de la demanda, HOMER despacha las fuentes de potencia controlables (generadores, red, banco de baterías) para cubrir la demanda primaria al mínimo costo total cada hora, mientras se satisfacen los requerimientos de reserva operativa. El costo total incluye el costo del combustible, operación y mantenimiento, y reemplazo de equipos. Para cumplir lo anterior, HOMER calcula el costo fijo y el costo marginal de cada fuente de despacho.

- El costo fijo de un generador es igual al costo de operación y mantenimiento por hora más el costo de reemplazo por hora más el costo de consumo de combustible. El costo marginal es igual al producto de la pendiente de la curva del combustible por el costo de este. Si se puede recuperar el calor disipado por el generador se requiere esta pérdida de calor para servir la carga térmica, el costo marginal del generador se reduce por el valor de la energía térmica que produce (que es igual al costo marginal de la energía térmica del calentador). Si se asigna un costo a las emisiones de carbono, el costo marginal del generador se incrementa de acuerdo con éste.
- El costo fijo del banco de baterías es cero y su costo marginal es igual al costo de usar la batería.
- El costo fijo de la red también es cero y su costo marginal es igual al precio de la potencia consumida de la red.

Cuando se ingresan las características de cada fuente de despacho al simulador, HOMER busca la combinación de fuentes de generación que satisfagan la demanda primaria, reserva operativa requerida, y carga térmica al menor costo.

Puede tenerse en cuenta la variable demanda crítica L_d para evitar descargar demasiado el banco de batería, de esta manera se protege el equipo más costoso del sistema híbrido en cuestión. L_d es el valor de la demanda de energía sobre, el cual, el costo de generar energía con el aerogenerador es

menor que el costo de extraer energía de las baterías. El aerogenerador inicia operación para cubrir la carga siempre que la demanda esté sobre L_d . Esta opción puede estar o no activa.

Cuando la demanda de energía es igual a la demanda crítica, L_d El costo de generar energía con el aerogenerador y el costo de extraer energía de las baterías son iguales:

$$L_d = \frac{n_{inv} \cdot (B \cdot P_{Naero} \cdot P_{rcons} + C_{O\&Maero} + C_{rep_aero_h})}{C_{ciclo_bat} - n_{inv} \cdot A \cdot P_{rcons}}, \quad (2.1)$$

donde,

n_{inv} : Es la eficiencia del inversor. Las constantes A y B dependen del costo de los consumibles del aerogenerador:

$$C_{cons} = P_{rcons} \cdot (B \cdot P_{Naero} + A \cdot P_{aero}), \quad (2.2)$$

$C_{O\&Maero}$: Es el costo de operación y mantenimiento del aerogenerador (4% del costo de compra),

P_{rcons} : Es el costo de consumibles,

$C_{rep_aero_h}$: Es el costo por hora del reemplazamiento del equipo:

$$C_{rep_aero_h} = \frac{C_{aero}}{Vida_{aero}}, \quad (2.3)$$

C_{ciclo_bat} : Es el costo del ciclo de carga y descarga de las baterías:

$$C_{ciclo_bat} = \frac{C_{bat}}{C_N \cdot N_{bat_p} \cdot U_{DC} \cdot N_{ciclos_eq} / 1000}, \quad (2.4)$$

C_{bat} : Es el costo de adquisición más los costos de operación y mantenimiento durante su vida útil,

C_N : es la capacidad nominal del banco de baterías, dada en Ah,

N_{bat_p} : Es el número de baterías en paralelo,

N_{ciclos_eq} : Es el número de ciclos completos equivalentes durante la vida útil de las baterías.

El número de ciclos durante su vida útil depende de la profundidad de la descarga. Pero es casi constante si no evita que el estado de carga de las baterías (SOC) sea inferior al 20%.

Tabla 2.2 Número de ciclos durante la vida útil de las baterías.

No de ciclos	DOD	EFC
5200	x10%	=520

2800	x20%	=560
1000	x50%	=500
700	x80%	=560
	EFCprom	535

La Tabla 2.2 muestra el número de ciclos en la vida útil de la batería, en dependencia de la profundidad de la descarga (DOD). EFC es el número de ciclos completos equivalentes.

Ciclo de Carga

Bajo la **estrategia ciclo de carga (CC)**, mientras las baterías puedan suministrar la demanda no cubierta por las fuentes renovables, el sistema de respaldo permanecerá apagado (o fuera de línea). Cuando las baterías no pueden suministrar la energía no cubierta por las fuentes renovables, el sistema de respaldo funciona a la potencia nominal, supliendo el faltante de la demanda y cargando las baterías con el resto de energía. Los excesos de energía son dirigidos hacia los objetivos de menor prioridad, en el siguiente orden de prioridad decreciente: carga diferible o secundaria, cargar el banco de baterías, y finalmente electrolizador si es que el sistema cuenta con uno.

En esta estrategia, se puede establecer un punto de ajuste (SP) entre 0 y 100% para el SOC, de tal forma que, si las baterías están por debajo del mismo y el sistema de respaldo ha estado funcionando la hora anterior, éste cargará las baterías hasta que alcancen el SP.

La estrategia de ciclos de carga es una estrategia de despacho de energía por la cual cada vez que un generador requiera operar para cubrir la carga primaria, este opera a su máxima potencia. El exceso de energía eléctrica producida se dirige hacia el objetivo de menor prioridad, en orden de prioridad decreciente: carga diferible, cargar banco de baterías, y servir el electrolizador.

En ausencia de energía solar, si las baterías no pueden cubrir la demanda energética entra en operación el aerogenerador y carga la batería con la energía excedente. Si se aplica un SP al SOC, el aerogenerador operará hasta alcanzar el SP.

Nota: Un generador no produce energía adicional para desperdiciarla como exceso de electricidad. Debe haber algún uso para este exceso de energía para que HOMER opere cerca del nivel que permita cubrir la demanda energética.

Cuando se usa la estrategia de ciclos de carga, HOMER despacha las fuentes de potencia controlable (generadores, banco de baterías, red) cada hora de simulación es un proceso de 2 pasos. Primero, HOMER selecciona la combinación óptima de las fuentes de generación para suplir la carga primaria y la carga térmica de acuerdo con la estrategia de seguimiento de la demanda. Posteriormente HOMER ajusta la salida de cada generador en esa combinación óptima a su capacidad nominal, o tan cerca como sea posible sin causar exceso de electricidad.

Si se aplica un SP de estado de carga a la estrategia de ciclos de carga, entonces cuando el estado de carga de la batería es menor que el SP y la batería no se descargó en la hora previa, HOMER evita descargar la batería en la hora actual. Un generador debe estar disponible para cubrir la carga primaria y producir exceso de electricidad para cargar el banco de baterías. De esta manera cuando el sistema empiece a cargar el banco de baterías, seguirá cargando hasta que alcance el SP del estado de carga.

Estrategia Combinada

Si la demanda energética es menor que la carga crítica L_c (W) se aplica la estrategia CC. Si la demanda energética es mayor que la carga crítica se aplica la estrategia de SD.

La carga crítica L_c es el valor de la demanda energética donde el costo de generar energía con el aerogenerador por hora es el mismo que el costo de suplir la carga por hora con las baterías previamente cargadas por el aerogenerador.

$$L_c = \frac{n_{ch} \cdot n_{bat} \cdot n_{inv} \cdot (B \cdot P_{Naero} \cdot P_{rcons} + C_{O\&Maero} + C_{rep_aero_h})}{n_{ch} \cdot n_{bat} \cdot C_{ciclo_bat} + (1 - n_{ch} \cdot n_{bat} \cdot n_{inv}) \cdot A \cdot P_{rcons}} \quad (2.5)$$

Para controlar el sistema propuesto se pretende emplear las estrategias LF, CC y combinada, con el fin de proteger el banco de baterías. Los elementos podrán ser controlados, aunque la estrategia de control hace las veces del control maestro, mientras los controladores del panel y el aerogenerador serían los lazos esclavos.

Estrategias de control en HOGA

El software HOGA aplica las estrategias que se encuentran en HOMER, adicionando una nueva estrategia desarrollada por los autores Dufo-López y Bernal-Agustín en el 2007 [88], basada en algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos

Esta estrategia fue desarrollada con el fin de incluir otras opciones de sistemas de almacenamiento, además del banco de baterías, tales como un electrolizador y una pila de combustible. Esta estrategia es ampliamente aplicable en sistemas que pueden tener entre otros componentes, baterías, generador AC (diésel/biomasa), electrolizador, tanque de hidrógeno, y pila de combustible; ya que cuando existen estos elementos todas las variables de control consideradas tienen sentido. Si no existe alguno de estos componentes, entonces algunas de estas variables no se tienen en cuenta. Por lo tanto, se va a suponer que el sistema dispone de todos los componentes mencionados para poder definir todas las variables de control.

Como regla de control básica, la energía producida por las fuentes renovables se usa preferencialmente para alimentar la demanda energética. Si las fuentes producen más energía que la demanda instantánea (para cada hora), la potencia sobrante, puede ser usada para cargar las baterías o para producir hidrógeno en el electrolizador. Este proceso se denomina CARGA. La energía sobrante se utilizará de la manera más ventajosa en términos económicos. La decisión de si esta energía es usada para cargar las baterías, o para producir hidrógeno en el electrolizador, depende del valor de la potencia de carga.

Si, por el contrario, las fuentes renovables son incapaces de suministrar toda la demanda instantánea de energía, la energía faltante debería ser obtenida de las baterías, del generador de AC, o de la pila de combustible. A este proceso se le denomina DESCARGA. La decisión de qué elemento suministrará dicha potencia dependerá de los costos de suministrar esta energía desde cada elemento, seleccionándose el que tenga el menor costo.

En el primer algoritmo se lleva a cabo el dimensionado de los equipos, y en un segundo algoritmo se lleva a cabo la selección de la estrategia de control óptima para el SHGE diseñado.

“Si se ajustan adecuadamente los parámetros que controlan el funcionamiento del Algoritmo Genético, éste es capaz de encontrar la solución óptima global o una solución muy cercana a la óptima evaluando un porcentaje muy bajo de todas las posibles combinaciones, consumiendo así tiempos de cálculo razonables” [88]. Esto indica que se tiene un problema de valor inicial, donde la elección inadecuada de estos valores de inicio puede llevar a soluciones erróneas o diferentes a la solución óptima que se pretende obtener.

“... en una gran cantidad de trabajos que se pueden consultar en las revistas técnicas especializadas, así como en algunas tesis doctorales, estos algoritmos son muy adecuados para ser aplicados en la resolución de problemas donde los algoritmos clásicos fallan o no realizan la búsqueda de soluciones eficientemente, y en los que utilizar un método enumerativo daría lugar a tiempos de cálculo inadmisibles” [88].

Estrategias empleadas por otros autores

- **Control Predictivo:** Estrategia en la que la carga de las baterías depende de la predicción del consumo y de la energía que se espera generar por medio de las fuentes renovables. Con esta estrategia tiende a reducirse la pérdida de energía procedente de las fuentes renovables debido a que las baterías no admiten toda la energía generada. Esta estrategia requiere del conocimiento exacto de las condiciones futuras, pero en un sistema real esa información siempre tendrá una determinada incertidumbre [95].
- **Redes neuronales:** Conocida la demanda energética y la irradiación solar, mediante programación dinámica se optimiza el funcionamiento del generador a diésel minimizando los costos del combustible. Para ello se aplica una estrategia inteligente adaptativa a las condiciones reales. Se comparan los resultados obtenidos con dos tipos de redes neuronales distintas.

La estrategia de control es uno de los parámetros que debe tenerse en cuenta al momento de diseñar un SHGE.

2.1.5 Dimensionado de sistemas híbridos.

El problema del dimensionado óptimo de sistemas de generación de electricidad a partir de diferentes fuentes renovables [96] pertenece a la categoría de problemas de optimización combinatorial (no lineal) ya que los tamaños de los componentes del sistema que constituyen las variables de entrada solamente pueden tomar valores específicos. Para la solución de este problema, han sido propuestos varios métodos. El método más directo es el método de enumeración completa. Esta aproximación es usada por el software HOMER [94] y asegura que obtiene la mejor solución, pero se puede demostrar que consume mucho tiempo. En [97] utilizan técnicas de programación lineal para optimizar el diseño de un sistema EE/FV y en [98] para un sistema FV/Microhidráulico. Los métodos heurísticos también han sido aplicados como se establece en [99].

En años recientes, se han desarrollado un sinnúmero de nuevos métodos para resolver diferentes tipos de problemas complejos, particularmente los de naturaleza combinatorial. Estos métodos son llamados metaheurísticos e incluyen a los algoritmos genéticos (GA), simulación anidada (recocido simulado, SA [100]), búsqueda tabú (TS), y optimización por enjambre de partículas (PSO). Los métodos metaheurísticos combinan las características de procedimientos de búsqueda local y estrategias de alto nivel de búsqueda para crear un proceso capaz de obtener un óptimo local y desempeñar una búsqueda robusta de la solución en el espacio [101]. Del área metaheurística se han propuesto TS [96], PSO [102,103], GA [104-106], para la solución del dimensionado óptimo de SHGE. Además, el software HOGA [88] usa un GA para minimizar el costo presente neto de un sistema híbrido de generación de energía.

El trabajo de Ghofrani en 2016 [107], presenta los algoritmos de optimización y su clasificación. Los algoritmos son formas de calcular valores máximos o mínimos de funciones matemáticas. Pueden ser considerados diferentes objetivos cuando se optimiza el diseño de un sistema. La maximización de la eficiencia del sistema o la minimización de los costos de producción son ejemplos de este tipo de objetivos. Los métodos y técnicas de optimización pueden ayudar a resolver problemas complejos. Cuando se hace el dimensionado de un SHGE, tenemos que considerar el desempeño de sus componentes. El objetivo principal es obtener el mejor desempeño con costos reducidos. Estos objetivos pueden ser alcanzados a través del modelado óptimo del sistema [108]. Las tres técnicas más usadas de modelado y optimización de sistemas híbridos son los algoritmos clásicos, los métodos metaheurísticos y el híbrido de dos o más técnicas de optimización.

2.1.5.1 Técnicas clásicas

Los algoritmos de optimización clásicos usan el cálculo diferencial para encontrar las soluciones óptimas para funciones continuas y diferenciables. Los métodos clásicos tienen capacidades limitadas para aplicaciones cuyas funciones objetivo son no diferenciables y/o discontinuas. Varios métodos de optimización convencional han sido usados para los sistemas híbridos. El modelo de programación lineal (LPM), la programación dinámica (DP), y la programación no lineal (NLP) son ejemplos de algoritmos clásicos ampliamente usados para la optimización de SHGE.

El LPM estudia los casos en los cuales la función objetivo es lineal y el espacio de la variable de diseño se especifica usando solo ecuaciones e inecuaciones lineales.

Este modelo ha sido usado en varios estudios para la optimización de SHGE [109-114]. Estos estudios aprovechan la capacidad del modelo LPM para realizar un análisis estocástico de confiabilidad y economía. Sin embargo, la capacidad de entregar energía del sistema en general se ve afectada negativamente por la falla cuando el funcionamiento de alguna de las fuentes renovables de generación no es el adecuado [108].

Los modelos de NLP estudian los casos generales en los que la función objetivo o las restricciones o ambos contienen partes no lineales. Este modelo ha sido empleado en algunos estudios [115, 116]. El modelo permite resolver algunos problemas complejos por medio de simples operaciones. Sin embargo, el alto número de iteraciones para los métodos numéricos del tipo del NLP incrementan la carga del tiempo computacional del problema [108].

La DP estudia los casos en que la estrategia de optimización está basada en dividir el problema en subproblemas más pequeños. Este método ayuda resolviendo problemas secuenciales o multietapa en los cuales las etapas están interrelacionadas. Una ventaja del DP es la habilidad de optimizar cada etapa. Por lo tanto, puede adicionarse complejidad para sistemas de mayor tamaño. Sin embargo, un alto número de funciones recursivas para el DP hace que la implementación del código sea compleja y confusa. Das & Swapan [117] proveen un ejemplo de estudios que usan DP para la optimización de SHGE.

2.1.5.2 Técnicas metaheurísticas

Las técnicas de búsqueda metaheurística han sido extensivamente usadas para la optimización de sistemas complejos como los SHGE, debido a las capacidades que tienen de dar soluciones eficientes, precisas y óptimas. Estos algoritmos están inspirados en la naturaleza, así como sus desarrollos están basados en el comportamiento natural. Los ejemplos de optimización metaheurística en el uso para SHGE incluyen algoritmos genéticos (GA), optimización por enjambre de partículas (PSO), recocido simulado (SA) y algoritmo de colonia de hormigas (AC).

Los algoritmos genéticos (GA) es un algoritmo basado en una población evolucionaria que incluye varias operaciones tales como la inicialización, mutación, entrecruzamiento y selección para asegurar que se encuentra la solución óptima a un problema dado. Diversos estudios usan GA para optimizar el diseño y la operación de los SHGE [96], [104], [118-123]). El GA puede dar como resultado un óptimo local si éste no es inicializado o diseñado correctamente.

La PSO simula el comportamiento social del movimiento de las avispas para encontrar comida en un área específica. Es un algoritmo iterativo cuya finalidad es encontrar una solución para una función objetivo en un espacio dado. La aplicación del PSO para la optimización de SHGE ha sido investigada en varios estudios [102, 42, 124-127]. El PSO es eficiente resolviendo problemas de dispersión y optimización. Sin embargo, este requiere de varias modificaciones debido a su complejidad y naturaleza conflictiva.

El SA se basa en el proceso de recocimiento de los metales. Los metales se funden a muy altas temperaturas y luego son enfriados hasta solidificarse en estado cristalino con una mínima cantidad de energía. Como resultado, el metal desarrolla cristales de gran tamaño con mínima cantidad de defectos en su estructura metálica. El SA ha sido usado para el dimensionado de sistemas híbridos en diversos estudios [100, 128].

El algoritmo de colonia de hormigas (ACH) se basa en el comportamiento de las hormigas al usar una feromona específica que marca el camino para las otras hormigas. Más feromonas son dejadas cada vez que una hormiga sigue la misma trayectoria. De otro lado, si el camino no es usado, entonces el rastro de la última feromona desaparecerá. Las hormigas son más atraídas a los caminos con más aroma de feromonas y esto usualmente las lleva a lugares con mayor cantidad de alimentos. Siguiendo este método, las hormigas marcan el camino más corto hacia la comida. El ACH simula el comportamiento para encontrar la solución óptima para una función objetivo dada [129]. Este algoritmo ha sido usado para el dimensionado óptimo de sistemas híbridos [130]. Los algoritmos ACH tienen alta velocidad de convergencia, pero requieren de espacio en la memoria de largo plazo.

2.1.5.3 Técnicas híbridas

La combinación de dos o más técnicas de optimización puede superar las limitaciones de las técnicas individuales mencionadas anteriormente, para proveer soluciones para los SHGE que sean más efectivas y confiables. Esta combinación se refiere a las técnicas híbridas.

Ejemplos de este tipo de técnicas son SA-TS; Simulación de Monte Carlo (MCS)/PSO; Iterativa híbrida/GA; diseño de optimización multiobjetivo (MODO)/GA; Sistema de interface artificial neural difusa (ANFIS); Redes neuronales analíticas (ANN)/GA/MCS; PSO/evolución diferencial; algoritmos evolutivos y simulación de optimización-MCS que ha sido usado en varios estudios para la optimización de SHGE [131-140]. Aunque las técnicas híbridas mejoran el desempeño general de la optimización, pueden sufrir de algunas limitaciones.

Ejemplos de este tipo de limitaciones son:

- la optimización parcial del método híbrido MCS-PSO [133],
- las soluciones subóptimas de la iteración híbrida/GA en [134],
- el compromiso de costo/dimensionado de los métodos híbridos en [135, 136],
- la complejidad del método híbrido ANN/GA/MCS en [137],
- el ajuste aleatorio de la inercia de pesos del algoritmo evolutivo en [139] y la complejidad del codificar la optimización MCS en [140].

Tabla 2.3 Cuadro comparativo de los métodos de diseño de sistemas híbridos.

Método	Abrev	Tipo de técnica	Descripción	Ventaja	Desventaja	Ref princ
Enumeración completa	CEM	Enumerativa	No es en sí una técnica de optimización. Es un método directo que realiza corridas con todas las combinaciones de valores posibles.	Prueba y evalúa todas las posibles combinaciones de configuración.	Requiere de altísimos tiempos de cálculo según las posibles combinaciones que se requiera probar.	Lambert, 2006
Modelo de programación lineal	LPM	Clásica	Casos de función objetivo lineal y el espacio de la variable está definido por ecuaciones o inecuaciones lineales.	Capacidad para realizar análisis estocástico económico y de confiabilidad	El modelo falla cuando una de las fuentes renovables opera inadecuadamente	Ghofrani, 2016
Programación dinámica	DP	Clásica	Casos generales donde la función objetivo o sus restricciones tienen partes no lineales.	Permite resolver problemas complejos con operaciones simples	El alto número de iteraciones incrementa el tiempo computacional.	Ghofrani, 2016
Programación no lineal	NLP	Clásica	La estrategia de optimización está en dividir el problema en varios subproblemas más sencillos.	Resuelve problemas secuenciales o de multietapas relacionadas.	El alto número de funciones recursivas hace compleja la y confusa su implementación.	Ghofrani, 2016
Downhill Simplex	DS	Lineal	Método de naturaleza geométrica.	Método robusto que no recae en derivadas para proveer la función de minimización.	Velocidad de convergencia limitada debido al número de funciones que se ejecutan.	Lagrose, 2009
Algoritmos genéticos	GA	Metaheurística	Operaciones de inicialización, mutación, cruzamiento, selección.	Encuentra el óptimo global a un problema, pero requiere de un alto número de generaciones para la convergencia completa.	Puede dar como resultado un punto óptimo local si no es inicializado o diseñado correctamente.	Katsigniannis, 2010
Optimización por enjambre de partículas	PSO	Metaheurística	Simula el movimiento de las avispas para encontrar comida.	Eficiente resolviendo problemas de dispersión y optimización.	Compleja y de naturaleza conflictiva	Sanchez, 2013
Recocido simulado	SA	Metaheurística	Se basa en la solidificación rápida de metales fundidos	Si se itera por tiempo infinito se asegura la obtención del óptimo.	Para que el proceso sea eficiente se deben limitar las exploraciones.	Erken 2010
Colonia de hormigas	ACH	Metaheurística	Simula el comportamiento de las hormigas al usar feromonas para marcar los caminos.	Alta velocidad de convergencia.	Requiere de espacio en la memoria de largo plazo.	Siddaiah, 2016
Búsqueda tabú	TS	Metaheurística	Inicia con una función factible que busca una mejor solución de mayor a menor (descendiente)	Habilidad de escapar de los valores óptimos locales.	No converge en un óptimo local, lo hace al introducir elementos estocásticos.	Katsigniannis, 2008

En la Tabla 2.3 se resumieron los diferentes métodos de diseño de sistemas híbridos, así como sus ventajas y desventajas que permitirán llevar a cabo la selección del método más apropiado para este caso.

Además, se presenta la Tabla 2.4 con los estudios más recientes sobre el diseño de sistemas híbridos, donde se observa la amplia utilización del software HOMER, dando reconocimiento a la metodología de enumeración completa que utiliza esta aplicación.

Tabla 2.4 Diseño de sistemas híbridos con enfoque monocriterio o mono-objetivo.

ENFOQUE MONOCRITERIO		
AUTOR	SISTEMA	OBSERVACIONES
Urbano, 2015	EE/FV	Maximizar eficiencia → Estrategias de control. Simulaciones en HOMER
Zahboune, 2016	EE/FV	Maximizar eficiencia → Cascada eléctrica modificada, MatLab, HOMER Pro .
Ramli, 2018	EE/FV	Minimizar costo de producción → HOMER y MatLab.
Guzmán Acuña, 2017	EE/FV	Maximizar la fracción de energía renovable → Nuevo indicador de confiabilidad.
Sinha y Chandel, 2017	EE/FV	Maximizar producción energética → Fotovoltaico-minieólico bajas velocidades de viento.

2.1.5.4 Metodología del mes peor

Existen diversos métodos para el cálculo y dimensionado de las instalaciones fotovoltaicas, dentro de todos estos se utilizará el denominado método del peor mes o del mes más desfavorable por ser, el que ofrece resultados suficientemente precisos, con una metodología intuitiva y fácilmente entendible [141]. Este método consiste en dimensionar el sistema para satisfacer las demandas de energía eléctrica en el mes más desfavorable, en el entendido que, en el resto del año, el sistema podrá suministrar de manera sobrada la energía eléctrica demandada.

Podría pensarse a primera vista que el peor mes corresponderá a algunos de los meses de invierno, por ser estos en los que menos radiación solar se recibe [142].

Aunque esto puede ser frecuentemente correcto, se debe tener en cuenta también la aplicación para la cual se utilizará el sistema FV, teniendo en cuenta el uso que se le dará a este cada mes. Debe, por consiguiente, evaluarse el cociente entre la energía demandada y la energía solar incidente para

cada mes para el que el valor obtenido es mayor. Los pasos que deben seguirse para aplicar el método del peor mes son los siguientes:

1. Determinación de la demanda eléctrica (Eelec),
2. Determinación del promedio de irradiación diaria disponible en el lugar de ubicación de los módulos FV, para cada mes (Hs).
3. Cálculo del cociente mensual entre los dos valores anteriores $Y = Eelec / Hs$,
4. Determinación del peor mes o del mes más desfavorable, es el mes al que corresponda el valor Ymax (valor máximo de Y), elección del tipo de módulos FV, y en especial la potencia pico del panel Pmod, expresada en Wp (watts-pico).
5. Cálculo del número de módulos FV necesarios (N,mod) y de la potencia total instalada en el sistema de captación. Cálculo del número de paneles conectados en serie (Ns,mod) y del número de módulos conectados en paralelo (Np,mod).
6. Determinación del promedio de la energía eléctrica diaria El primer paso para el dimensionado, es calcular la energía del consumo eléctrico según los requerimientos del lugar donde se implementará el sistema, el valor de consumo será un promedio, y serán las potencias consumidas por el tiempo que sean utilizadas, donde la energía total (E) de cada consumidor de energía está dada por la ecuación:

$$E = N \cdot P \cdot hr \text{ (Wh)} \quad (2.6)$$

Y el consumo total diario está dado por:

$$Ecc = \sum ei \quad (2.7)$$

donde Ecc, es la energía total de consumo diario en corriente directa.

7. El siguiente paso consiste en estimar, para cada mes el promedio de la irradiación solar que incide durante un día, sobre un metro cuadrado de una superficie situada en el lugar donde se utilizaran los mismos. La estimación puede realizarse mediante datos estadísticos del lugar o con el uso de instrumentos de medición, para fines de esta investigación se utilizarán datos estadísticos del lugar, para cada uno de los meses del año, se calcula el cociente entre el consumo medio total de energía eléctrica, Eelec y el promedio de la radiación diaria disponible en el lugar de uso de los módulos FVs. Este cálculo dará como resultado la superficie total requerida para cumplir con la demanda de potencia, el cálculo se realizará mediante la ecuación:

$$Y = Eelec / Hs. \quad (2.8)$$

8. El sistema fotovoltaico se dimensiona para cubrir las necesidades del mes más desfavorable del año en el lugar de uso de los módulos FVs, es decir, el mes en que el cociente entre el consumo total diario y el promedio de la radiación correspondiente al valor de Y sea máximo. Llegando este punto ya debe de estar determinado el panel FV a utilizar, para calcular la energía pico producida por un único panel FV, de la potencia pico escogida, P_{mod} (Wp), durante un día cualquiera.

Debe tenerse en cuenta que la potencia pico de un panel es la potencia que produce en condiciones estándar que suponen una radiación incidente de 1 kW/m^2 . Según lo anterior, la energía producida durante una hora por un panel de potencia pico P_{mod} (Wp) sobre el que incide una radiación solar de intensidad de 1 kW/m^2 , incide sobre el panel durante HPS horas (horas pico de sol), la energía solar producida por el panel será igual a:

$$H_s (\text{kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}) \cdot P_{mod} (\text{Wp}) \quad (2.9)$$

El cálculo del número de módulos vendrá dado por las ecuaciones:

$$N_{mod} = ST_{,mod} / S_{mod} \quad N_{mod} = 1.1 \cdot ST_{,mod} / S_{mod} \quad (2.10)$$

9. En esta fase del dimensionado, debe estar definida la tensión del subsistema de acumulación VT, si la tensión del módulo es V_{cel} , entonces el número de módulos FVs que deberán conectarse en serie vendrá dado por la ecuación:

$$N_{s,mod} = V_{T,acu} / V_{cel} \quad (2.11)$$

El número de módulos conectados en paralelo, $N_{p,mod}$ viene dado por la ecuación;

$$N_{p,mod} = N_{mod} / N_{s,mod} \quad (2.12)$$

10. Por último, el número total de celdas solares, N_{mod} , es dado por la ecuación:

$$N_{mod} = N_{s,mod} \cdot N_{p,mod} \quad (2.13)$$

Otro ejemplo de aplicación de la metodología del mes peor, en instalaciones autónomas, la inclinación óptima de los módulos en España es de unos 15 o 20° más que la latitud en el caso de que la instalación se utilice de una forma uniforme durante todo el año (maximizando así la captación en el mes peor, que es diciembre). Para España pueden tomarse unos 60° . Si el uso de la instalación se lleva a cabo principalmente entre junio y agosto, entonces es interesante modificar el ángulo de los paneles, de forma que en verano se tengan unos 15° y en invierno unos 60° . En sistemas por ejemplo como los de riego, en los que el consumo se produce prácticamente solo entre abril y septiembre, interesaría un ángulo entre 15 y 30° , dependiendo de cuál es el mes peor. En algunos casos, con el fin de mejorar los rendimientos del sistema de captación, se les puede dotar de movimiento a los soportes, denominándose a este tipo de sistemas de soporte como sistemas con

seguimiento solar. El seguimiento puede llevarse a cabo en el eje horizontal, en el eje vertical o en ambos ejes [88].

2.1.5.5 Metodologías de diseño multiobjetivo

Cuando los problemas de optimización tienen varios objetivos por cumplir o varios criterios de comparación entre diferentes opciones, se aplican metodologías de toma de decisiones multiobjetivo o de toma de decisiones multicriterio MCDM. En la sección 2.6 se aborda el tema multicriterio, ya que, a partir de la revisión bibliográfica presentada en antecedentes, se encontró que las metodologías MCDM se emplean con mayor frecuencia que las metodologías MODM. En cuanto a las metodologías de optimización para la toma de decisiones multiobjetivo (MODM, multiobjective decision making), existen una gran cantidad de propuestas básicas y otras mejoradas al adicional elemento como lógica difusa, número aleatorios o metodologías grises [143].

Dentro del conjunto de las metodologías MODM encontradas, se enumeran:

- DEA, data envelopment analysis
- GA, Genetic algorithms
- MILP, mixed integer linear programming
- COPRAS, complex proportional assessment
- SFLA, frogg lapping
- MOGLP, multi-objective gray linear programming
- CSA, Cuckoo search algorithm,
- NSGA, non-sorting genetic algorithm
- MIQP, mixed integer quadratic programming
- MOEA, multi-objective evolutionary algorithm
- REMM, rational exergy management model

Las anteriores metodologías MODM han sido empleadas en diferentes investigaciones relacionadas con la planeación y diseño de sistemas de generación de RE, teniendo en cuenta múltiples variables u objetivos a optimizar [144].

2.2 Criterios e indicadores de sustentabilidad energética. Fundamentos teóricos.

Es importante hacer claridad en la diferencia entre criterios e indicadores de sustentabilidad. De acuerdo con la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), un indicador

puede definirse como un parámetro o valor, derivado de parámetros generales, que señala o provee información o describe el estado de un fenómeno dado del ambiente o de un área específica- con un significado que trasciende el valor específico del parámetro. Este indicador conlleva dos funciones básicas: reducir el número de mediciones y parámetros que normalmente se requieren para reflejar una situación dada y simplificar el proceso de comunicación con el usuario [49]. Los indicadores de sostenibilidad ambiental permiten cuantificar el grado de compromiso de las empresas con el medio ambiente y con la sociedad. Posibilitan cuantificar el nivel de responsabilidad y sostenibilidad ambiental tanto de una persona, como de una organización o comunidad. Objetivos de los indicadores de sustentabilidad: Medir la distancia y el sentido de la variación de un sistema ambiental entre: el estado inicial del sistema (dato de la realidad) y el estado de transición del sistema hacia un escenario sustentable de desempeño de la sociedad [145].

Los criterios de sustentabilidad se entienden como el conjunto de temas que permiten organizar la información, y que a su vez son descritos por indicadores. Refiere a una categoría de condiciones o procesos por los cuales se puede evaluar que el uso y aprovechamiento de los recursos naturales, se realiza para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras [146].

Según lo anterior, los criterios son una clasificación de los temas que existen en torno a la sustentabilidad, mientras que los indicadores son parámetros concretos y valores que pueden ser comparados con otros o con estos mismos al darse un cambio en el sistema que se está analizando. Es necesario establecer criterios de sustentabilidad para la selección de sistemas híbridos óptimos y equilibrados. Este es un tema vigente porque uno de los objetivos de desarrollo sostenible de la VISIÓN 2050 es “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos” (Consejo mundial de negocios para el desarrollo sustentable).

La experiencia de México como país participante en la elaboración de la AGENDA 21 que contiene el Programa de Acción para el Desarrollo Sustentable suscrito durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, sienta un precedente para desarrollar los indicadores de sustentabilidad que podrían aplicar al entorno de un país en vías de desarrollo y que no han sido considerados por otros estudios desarrollados en países del llamado “Primer Mundo”.

A continuación, se realiza una breve descripción de los criterios de sustentabilidad según su clasificación.

2.2.1 Criterios técnicos

Los criterios de sustentabilidad se refieren a aquellos aspectos que miden y comparan el nivel tecnológico, la innovación del capital. Se refiere a la medida en la que un caso en particular podría transferirse técnicamente para su uso en un entorno diferente. Buscan que los tomadores de decisiones identifiquen los obstáculos técnicos que podría enfrentar la transferibilidad (por ejemplo, desafíos técnicos o problemas operativos), y oportunidades técnicas potenciales (por ejemplo, tecnología o sistemas operativos compartidos, tamaño potencial del mercado, bajos costos) (Xu, 2016). Otros criterios técnicos, están directamente relacionados con las características físicas, tales como peso, volumen, área efectiva que ocupan; o por otros aspectos ligados directamente al tipo de tecnología y a los materiales de construcción de los equipos tales como la vida útil, facilidad y frecuencia de mantenimiento, operatividad y madurez tecnológica.

Potencial total de generación de energía

Un criterio crítico y ampliamente empleado en MCDM de ER es el potencial de generación de energía de los diferentes sistemas considerados [43]. En algunos estudios este se expresa como la cantidad total de combustibles convencionales que reemplazarían la generación de energía del sistema renovable, [147-150]. Se debe considerar cuanta energía podría potencialmente entregar un sistema a escala nacional por año (en unidades de TWh/año) en lugar de cuanto está entregando actualmente. Estimar el potencial futuro de generación de energía no es sencillo y está inherentemente asociado con incertidumbres.

Madurez Tecnológica

Este criterio esencialmente refleja el estado del arte de la tecnología aplicada y es evaluada en este caso en una escala de 1 a 5, donde 1 indica el nivel más bajo de madurez (por ejemplo, si la tecnología solo se ha probado en escala de laboratorio) y 5 indica un alto nivel de madurez, (por ejemplo, si la tecnología es comercialmente madura con un mercado sólidamente posicionado). Otros tantos estudios de MCDA tienen similares escalas cuantitativas para valorar la madurez tecnológica [147-149,151]. La energía eólica en tierra, la hidroeléctrica y la energía solar son consideradas como las tecnologías con mayor nivel de madurez, mientras que las tecnologías marinas son consideradas de menor nivel de madurez. Comparando con varios de los otros criterios, las puntuaciones de la madurez se consideran menos inciertas y tienen por lo tanto un rango más angosto de incertidumbre.

2.2.2 Criterios económicos

Los objetivos económicos buscan propiciar el crecimiento económico, para satisfacer las necesidades básicas humanas, aumentando la calidad de vida y confort a través del uso eficiente de bienes y servicios, disminuyendo los impactos ambientales y la generación de residuos; del mismo modo, aminorar la pobreza, lograr la equidad en la distribución de los costos y beneficios [152].

Las economías modernas dependen de un suministro de energía seguro y adecuado, y los países en desarrollo necesitan tenerlo garantizado como condición sine qua non para su industrialización. Todos los sectores de la economía – residencial, comercial, transporte, servicios y agricultura – exigen servicios de energía modernos. A su vez, 21 estos servicios, fomentan el desarrollo económico y social a nivel local, elevando la productividad y promoviendo la generación local de ingresos. El suministro de energía afecta a los puestos de trabajo, productividad y desarrollo. La electricidad es la forma dominante de energía para las comunicaciones, la tecnología de información, las manufacturas y servicios. Los indicadores económicos se subdividen en dos temas: patrones de uso y producción y seguridad. El primero contiene los subtemas de uso global, productividad global, eficiencia del suministro, producción, uso final, diversificación (combinación de combustibles) y precios. El segundo, los subtemas de importaciones y reservas estratégicas de combustibles [153].

Modelo económico de HOMER

En el proceso de optimización, HOMER simula una variedad de diferentes configuraciones en busca de un sistema que satisfaga las restricciones técnicas al menor costo del ciclo de vida. En el proceso de análisis de sensibilidad, HOMER realiza múltiples optimizaciones bajo un rango de suposiciones de entrada para estimar los efectos de la incertidumbre o los cambios de las entradas en el modelo. La optimización determina el valor de las variables sobre las cuales el diseñador del sistema tiene control tales como la mezcla de componentes que constituyen el sistema, sus dimensiones y cantidad. El análisis de sensibilidad ayuda a evaluar los efectos de la incertidumbre o los cambios en las variables sobre las cuales el diseñador no tiene control, tales como la velocidad del viento promedio o el precio futuro de los combustibles.

Modelo económico

HOMER usa el NPC (costo neto presente) para representar el costo de vida del sistema. El NPC total condensa todos los costos e ingresos que ocurren durante el tiempo de vida del proyecto dentro de una suma global en dólares de hoy, con descuentos de flujo de caja futuros hacia el presente usando una tasa de descuento. El modelador especifica la tasa de descuento y el tiempo de vida del proyecto.

El NPC incluye los costos de construcción inicial, reemplazo de componentes, mantenimiento, combustibles, más el costo de comprar la energía a la red y costos misceláneos tales como penalidades resultantes de emisiones contaminantes. Los ingresos incluyen entradas por concepto de ventas de energía a la red, más el cualquier valor de rescate que ocurra al final de la vida del proyecto. Para el cálculo del NPC, los gastos son positivos y los ingresos negativos. Este es el opuesto del valor presente neto. Como resultado, el costo presente neto es diferente del valor presente neto solo en el signo [154].

HOMER suma los costos anualizados de cada componente, junto con los costos misceláneos y demás para encontrar el costo anualizado del sistema. Este valor es importante porque se usa para calcular las dos Figuras principales de mérito para el sistema: El NPC y el COE (Costo de la Energía).

HOMER usa la siguiente ecuación para calcular el NPC:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (2.14)$$

Donde $C_{ann,tot}$ es el costo total anualizado, i es la tasa de interés anual (tasa de descuento), R_{proj} es el tiempo de vida del proyecto, y CRF es el factor de recuperación de capital dado por la siguiente ecuación:

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{i(1+i)^N}{i(1+i)^N - 1} \quad (2.15)$$

Donde i es la tasa de interés real y N es el número de años.

HOMER usa la siguiente ecuación para calcular el COE:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (2.16)$$

Donde E_{prim} y E_{def} son las cantidades totales de carga primaria y postergable (o diferible), respectivamente, y que el sistema entrega por año, y $E_{grid,sales}$ es la cantidad de energía vendida a la red por año. El denominador de la ecuación anterior es una expresión de la cantidad total de energía útil que el sistema produce al año. El COE es por lo tanto el costo promedio por kWh de energía eléctrica producida por el sistema [94].

Aunque el COE es frecuentemente un parámetro métrico más conveniente con el cual comparar los costos de diferentes sistemas, HOMER usa el NPC en el lugar de primera Figura de mérito. Por ejemplo, en su proceso de optimización HOMER ordena las configuraciones del sistema de acuerdo

con el NPC mejor que el COE. Esto se debe a que la definición del COE está en discusión mientras que la de NPC no lo está. En el desarrollo de la fórmula que HOMER usa para calcular el COE, se divide entre la cantidad de demanda eléctrica que el sistema realmente entrega en lugar de la energía eléctrica total requerida por la demanda, que podría ser diferente si el usuario permite una cantidad de energía no cubierta. También se omitió la energía térmica, pero se incluyeron las ventas a la red como energía útil producida, fueron decisiones un poco arbitrarias, haciendo la definición de COE un poco arbitraria también [94].

2.2.3 Dimensión social

Los criterios sociales están encaminados a medir y comparar la participación ciudadana mediante la movilidad general que favorezca la cohesión social para formar o conservar la diversidad cultural y estabilidad comunitaria; respetar a las instituciones sociales y los derechos de los pueblos, para alcanzar la justicia social que garantice la satisfacción de las demandas de las generaciones futuras [152].

La disponibilidad de energía tiene una repercusión directa sobre la pobreza, las oportunidades de empleo, la educación, la transición demográfica, la contaminación en ambientes cerrados y la salud, y posee implicaciones relacionadas con el género y la edad. En los países ricos, con sólo pulsar un interruptor se dispone de energía para la iluminación, la calefacción y la preparación de comida. La energía es limpia, segura, fiable y asequible. En los países pobres, se requieren hasta seis horas al día para recoger leña y estiércol destinados a preparar la comida y calentarse y, usualmente, esa tarea recae sobre las mujeres, que podrían, de no ser así, dedicarse a tareas más productivas. En las zonas en donde se puede encontrar en el comercio carbón, carbón vegetal y/o parafina, esos combustibles absorben una parte importante de los ingresos mensuales del hogar. Un equipamiento y una ventilación inadecuados suponen que esos combustibles, quemados dentro de la casa, pueden originar un alto nivel de enfermedades y muertes, debido a la contaminación atmosférica y los incendios. Este ejemplo sirve para ilustrar los dos temas de la dimensión social: equidad y salud. La equidad social es uno de los pilares fundamentales en los que se apoya el desarrollo sostenible, que abarca, a su vez, la imparcialidad y universalidad con las que se distribuyen los recursos energéticos, se facilita el acceso a los sistemas de energía y se formulan los regímenes de precios para garantizar la asequibilidad. La energía debería ser un bien al alcance de todos, a un precio justo [153].

Costo nivelado de la electricidad

También llamado costo nivelado de la energía (LEC). Cuando se evalúan o planean diferentes tecnologías de RE, los costos asociados con la energía son obviamente decisivos y es considerado

como un criterio clave en muchos estudios publicados de MCDM. El criterio de costos considerado en estudios previos usualmente incluye uno o varios de los siguientes aspectos: costo de inversión, costos de operación y mantenimiento (O&M), costos de combustible, y costo de la electricidad producida.

En el presente estudio, el LEC es usado como un criterio económico individual, que expresa el **costo actual de la unidad producida o ahorrada de energía**. El LEC es una medida ampliamente utilizada del costo de generación de energía de los sistemas y también ha sido usado previamente en otros estudios de MCDA [147,47,155]. El LEC incluye todos los costos a lo largo del tiempo de vida de los sistemas: Inversión inicial, O&M, combustibles y costo capital. También está influenciado por las características típicas de la tecnología, tales como la eficiencia, la producción anual, la vida de servicio, por la naturaleza de la fuente utilizada, y por el costo monetario. Esencialmente, este es el precio del punto de equilibrio económico al cual la energía tiene que ser generada de una fuente específica.

La hidroeléctrica y la energía eólica en tierra tienen los menores valores de LEC, mientras que las tecnologías de energía solar y marítima tienen los LEC más altos. Para la mayoría de las tecnologías de ER, es el costo capital quien contribuye principalmente al LEC, mientras que los costos asociados a la O&M y combustibles son generalmente más bajos o despreciables. Sin embargo, para la biomasa y las bombas de calor, los costos de combustibles y O&M contribuyen significativamente al LEC global.

Se encuentra que Los valores de LEC reportados varían ampliamente y dependen, entre otras cosas, del tamaño de la instalación, las características de la tecnología, variaciones regionales en costo y desempeño, y de las tasas de descuento asumidas. Los estimados basados en el futuro también tienden a reducirse, especialmente para las tecnologías menos maduras.

Contribución a la economía

Este criterio estima los impactos sociales y económicos totales que están asociados con las iniciativas en ER, tales como: la generación de nuevos empleos y las oportunidades de negocio.

Para muchos gobernantes y políticas de mercado la creación de trabajos es una motivación central para desarrollar y explotar tecnologías de ER, y su impacto potencial en el empleo y la economía es frecuentemente incluido como un criterio en los MCDA de los esquemas de ER [147, 148, 156-160].

La tarea de la estimación de los impactos económicos y de creación de trabajos totales asociados con los esquemas de ER es bastante difícil. El impacto económico no está solamente relacionado a la creación de empleos directos por el proyecto en sí mismo, por ejemplo, manufactura, instalación, operación y mantenimiento; pero también depende de los efectos en los trabajos indirectos, como son los empleos de insumos y conocimiento de la industria o proyecto de ER; así como los llamados impactos inducidos, que se refieren a los trabajos creados cuando la riqueza generada por medio de la industria de la energía renovable se gasta en otras ramas de la economía y del comercio estimulando la demanda en otras industrias no relacionadas [161,162]. En la mayoría de los estudios sobre la creación de empleos a partir de proyectos de ER se consideran solamente los efectos directos [163,164]. Sin embargo, varios estudios sugieren que el nivel combinado de empleos indirectos e inducidos derivados de un proyecto de energía es probable que se incrementen tanto como los empleos directos en sí mismos [161,165]. Otro asunto complicado es el hecho que muchos proyectos de sistemas renovables están financiados a través de programas de gasto público, algo que es frecuentemente ignorado cuando se evalúa la creación potencial de empleos para un sistema específico de energía renovable. Sin embargo, estos programas de financiamiento implican que el gobierno debe recortar los gastos de otro rubro, incrementar los impuestos, o incrementar la deuda, que puede llevar a la pérdida de empleos en otros sectores. Por lo tanto, a pesar de las grandes cifras brutas se encuentran en términos de empleo y valor añadido [162], las Figuras de red son significativamente menores (o incluso negativas) debido al reemplazo de investigaciones en, por ejemplo, tecnologías de energías convencionales, así como debido a los efectos de amortiguamiento de los altos costos de las ER comparados con las alternativas convencionales [161,166].

Por lo general, las evaluaciones del impacto en el empleo hacen distinción entre los trabajos creados para la construcción, instalación y manufactura (CIM) de una nueva planta, y los trabajos creados para la operación y mantenimiento de esta. La duración de los CIM es relativamente corta y los trabajos asociados serán, por lo tanto, en principio a corto plazo, mientras que los trabajos de O&M pueden darse a lo largo de la vida de la planta. Además, mientras la instalación y O&M son llevados a cabo localmente, la manufactura puede tener lugar en el exterior, en cuyo caso se generan beneficios con la creación de empleos no locales [161]. Es probable que la mayor cantidad de empleos se generen en los países donde se manufacturan, despliegan y exportan tecnologías en ER; pero los países sin industrias locales o exportadoras también disfrutarán de los beneficios del empleo, en el desarrollo e instalación de estas tecnologías, así como de las labores de operación y mantenimiento de las instalaciones, equipos y demás componentes [162].

De manera similar al trabajo de Tsoutsos [148], la contribución a la economía local es evaluada usando una escala ordinal de 5 puntos donde se designa el 1 al impacto negativo en la economía local y 5 indicando un impacto alto y sostenido en la economía local.

2.2.4 Criterios ambientales

Criterios ambientales son aquellos que están dirigidos a medir y comparar la conservación de la integridad de los ecosistemas considerando el cuidado de la diversidad biológica manteniendo las condiciones ambientales en un estado satisfactorio para la vida humana y otras formas de vida; prevenir y reducir la degradación de todos los componentes del medio ambiente e impulsar el ordenamiento en la explotación de los recursos naturales [152].

La producción, distribución y consumo de energía dan lugar a presiones sobre el medio ambiente en el hogar, el lugar de trabajo y la ciudad y a nivel nacional, regional y mundial. Los impactos ambientales dependen en gran medida de la forma en que se produce y se utiliza la energía, de la combinación de combustibles, la estructura de los sistemas energéticos y las medidas de reglamentación conexas en materia de energía y de estructura de los precios. Las emisiones de gases procedentes de la quema de combustibles fósiles contaminan la atmósfera. Las grandes presas hidroeléctricas causan el encenagamiento de las aguas. Los dos ciclos de combustible, basados respectivamente en el carbón y en la energía nuclear, emiten algún tipo de radiación y generan desechos. Las turbinas eólicas pueden desfigurar un hermoso paisaje y la recogida de leña, acarrear la deforestación y la desertificación. Los indicadores ambientales se clasifican en tres temas: atmósfera, agua y tierra. Los subtemas de la atmósfera son el cambio climático y la calidad del aire. Entre los problemas prioritarios figura la acidificación, la formación de ozono troposférico y las emisiones de otros contaminantes que afectan a la calidad del aire en las ciudades. Las emisiones de GEI constituyen un elemento clave en el debate para determinar si la actividad humana está cambiando el clima a peor. Entre los contaminantes de la atmósfera que mayor preocupación suscitan, hay que citar los óxidos de azufre y de nitrógeno, el monóxido de carbono y los sólidos suspendidos (estos dos últimos revisten una trascendencia especial en la contaminación de espacios cerrados). Esos contaminantes pueden dañar la salud humana y provocar problemas respiratorios, cáncer, etc. [153].

Emisiones de gases de efecto invernadero

Este criterio se refiere a las emisiones totales de GEI de un SHGE dado y es uno de los criterios que se ha usado ampliamente para evaluar la sustentabilidad de las fuentes renovables. Algunos estudios

consideran que las emisiones evitadas de GEI cuando se usan ER en comparación con las tecnologías no renovables que estas reemplazan, expresados bien sea dado en kgCO₂eq/año o en kgCO₂eq por unidad de energía ahorrada o generada. En este estudio se realizará el estimado de emisiones de GEI por ciclo de vida de las diferentes tecnologías renovables, medidas en emisiones equivalentes de CO₂ por unidad de energía producida (kgCO₂eq/kWh). En la evaluación de las emisiones en un ciclo de vida, todas o parte de las etapas de la vida de los sistemas de producción de energía que se consideran generalmente son: (i) combustible producido y transporte a la planta, (ii) facilidad de construcción, (iii) facilidad de operación y mantenimiento, y (iv) desmantelamiento [167].

Los estimados de las emisiones de GEI de un ciclo de vida de una tecnología considerada han sido tomados de una revisión bibliográfica reciente [168]. La energía eólica en tierra y en mar, la hidroeléctrica y las energías marinas se encuentra que tienen las menores emisiones de GEI durante su ciclo de vida, mientras que la biomasa y las bombas de calor están asociadas con altas emisiones. La proporción de emisiones de GEI de las diferentes etapas del ciclo de vida de las plantas difiere según la tecnología empleada. Para la mayoría de las tecnologías aquí consideradas, la componente de infraestructura (puesta en marcha y desmantelamiento) representan la principal contribución al total de emisiones de GEI, mientras que las etapas de provisión de combustible representan la mayor contribución para la biomasa dedicada. Para las bombas de calor, la mayoría de las emisiones están asociadas con la etapa de operación de la planta. La etapa de operación también se identificó como gran contribuyente al aporte de carbono para los sistemas de barreras en las mareas.

Las emisiones de GEI reportadas varían ampliamente para cada una de las tecnologías individualmente. Las emisiones de GEI estimadas por ciclo de vida dependen de varios factores, incluyendo:

- (i) Las suposiciones adoptadas dentro del ciclo de vida respecto a, por ejemplo, reglas de contabilidad y los límites de los sistemas, así como el tiempo de vida de la tecnología y el factor de capacidad.
- (ii) Diferencias regionales o nacionales, por ejemplo, en la red eléctrica mixta usada durante la manufactura y operación de una tecnología determinada, y la cantidad potencial de energía entregada por una tecnología. Por ejemplo, los FV pueden generar mayor electricidad en regiones soleadas y entonces las emisiones de CO₂ serán menores por kW entregado en esas regiones.

- (iii) El tamaño del sistema de ER considerado. Las plantas o sistemas de ER de grandes dimensiones usualmente tienen menores emisiones por unidad de energía producida que los sistemas pequeños.
- (iv) Diferencias tecnológicas, por ejemplo, las emisiones de las tecnologías bioenergéticas dependerán en gran medida de la fuente y suministro de biomasa en términos de, por ejemplo, tipo de almacenamiento y distancias de transporte, así como de la tecnología que se emplea para la generación de energía: Incineración, digestión anaerobia, pirólisis, gasificación, etc. Mientras que las emisiones de la energía FV dependerán si se consideran sistemas de sílice amorfa, policristalina, monocristalina o de cinta, o de película delgada de telurio de cadmio.

Para el criterio ambiental [44] seleccionó 4 subcriterios: emisiones de CO₂, emisiones de lluvia ácida (SO₂), emisiones de eutrofización (NO_x) y uso de tierras. Estos subcriterios pueden generar información acerca del desempeño de cuatro formas diferentes de suministrar energía. Las emisiones equivalentes de CO₂ indican la intensidad de los gases GEI responsables del calentamiento global; las emisiones de SO₂ indican el nivel de polución ambiental que puede ocurrir a nivel regional, afectando la vegetación, el suelo, la vida salvaje y los recursos acuíferos. El nitrógeno y el fósforo son nutrientes para la regulación de los ecosistemas. El enriquecimiento (eutrofización) del agua y el suelo con estos nutrientes puede causar cambios indeseables en la composición de las especies dentro de los ecosistemas. Finalmente, la ocupación de tierras o terrenos es una medida directa o indirecta de la huella ecológica en relación con el área ocupada. En efecto es una medida de la cantidad de área de tierra que se requiere para operar una tecnología.

Impactos a la calidad de vida

Este criterio tiene en cuenta otros impactos ambientales asociados con las tecnologías renovables tales como el impacto visual, el ruido, molestias al olfato, así como el riesgo potencial a los ecosistemas y al paisaje. Una buena revisión del potencial impacto ambiental negativo de varias ER es prevista por IPCC [169]. Los impactos al bienestar son evaluados usando una escala de 5 puntos similar a la adoptada por Beccali [147], desde 1 que indica impactos muy altos hasta 5 que indica impactos muy bajos o sin impactos.

Criterios similares se han incluido en MCDA, por ejemplo, a través de la evaluación de otros impactos de sustentabilidad [147, 149] o los efectos y presiones en el ambiente natural [151, 155, 170].

Carvalho y Ciruolo [149] consideran los impactos visuales, el ruido y los impactos a los ecosistemas como tres criterios separados en la evaluación de diferentes plantas de energía eólica. Otros incluyen impactos ambientales como el ruido y los olores como parte de los criterios de aceptación social [170]. Varios estudios de LCA y MCDA para SHGE consideran impactos por separado, como la eutrofización (debida a las emisiones de fosfatos equivalentes PO_4eq) y la acidificación (debida a las emisiones de sulfatos equivalentes SO_2eq) separadamente [44, 172-174].

Las bombas de calor y la energía solar son consideradas como de menores impactos, mientras que la bioenergía, la hidroeléctrica y la eólica en tierra son consideradas las menos favorecidas en términos de estos impactos. Estos puntajes han sido determinados basados en estimados de estudios previos de MCDM [46, 149, 151, 155].

Requerimientos de área

El requerimiento de uso de tierra es un criterio importante para considerar ya que los desarrollos de sistemas de ER frecuentemente compiten por la tierra con otros propósitos como la agricultura, el esparcimiento y la conservación. Ubicar el desarrollo de las ER en una tierra que pudiera ser usada para otros propósitos puede, por lo tanto, resultar en pérdidas económicas proporcionales al valor del sitio. De manera similar al estudio de MCDM desarrollado por Beccali [147], el área de terreno requerido para cada una de las tecnologías consideradas es evaluada y expresada en términos de m^2/kW instalado de energía.

Los valores para los requerimientos de área por tecnología han sido compilados de numerosos estudios encontrados en la literatura [147, 158, 159, 172, 175-178]. Los cultivos dedicados para biomasa son, por mucho, la tecnología que requiere mayor cantidad de tierra. La energía a partir de desperdicios (efW) se asume que tiene bajos requerimientos de tierra. Sin embargo, las tecnologías fuera de costa no requieren tierra cuando están en operación, pero pueden competir con otros usos para el área específica como puede ser la pesca, rutas de transporte de carga, navegación, actividades recreacionales, y extracción de materias primas como aceites, gas y sedimentos. Entonces, para la energía eólica en mar se asume que tiene los mismos requerimientos de terrenos que la eólica en tierra. Mientras que los requerimientos de tierra para las tecnologías marinas se han estimado tomando como base su capacidad de generación de energía por unidad de área de fondo marino [179].

Los valores para requerimientos de terrenos se encuentran que son inciertos generalmente. Por ejemplo, Beccali [147], reporta que se requiere de 10 m²/kW para aerogeneradores conectados a la red, mientras que Evrendilek y Ertekin [177] reportan un valor de 1200 m²/kW para eólica. Los estimados de requerimientos de tierras dependen del sitio específico, de las condiciones geográficas y del tamaño del sistema de ER que se investiga, pero también en si se toma el ciclo de vida completo del sistema o solo durante la etapa de operación. Los estimados de ocupación de tierras también dependerán de las oportunidades de uso dual, por ejemplo, un aerogenerador se puede instalar en terrenos dedicados a la agricultura; lo cual reduce el área de tierra requerida para esa tecnología en particular [159].

2.2.5 Criterios institucionales

Las instituciones se han convertido en parte esencial para el desarrollo sustentable debido a su papel indispensable en la implementación de objetivos sociales, económicos y ambientales, pero se les ha negado un papel como dimensión por derecho propio. Con esta visión, aunque se enfatiza correctamente el carácter de servicio (en un entorno coevolutivo, donde cada dimensión sirve a todas las demás de manera permanente), faltan objetivos institucionales independientes y las características específicas del sistema institucional (como, su dinámica de desarrollo y liderazgo en ciencias) ya que éstos han sido descuidados. Recientemente, se han incluido las cuestiones institucionales en el discurso de la "gobernanza para la sostenibilidad", ya que las instituciones y la gobernanza son temas que se superponen en parte. Además, en varios casos de investigación la tendencia ha sido reconocer que la estructura y la dinámica deben analizarse de manera conjunta. Los aspectos culturales o de valores de las comunidades, se pasan por alto con mayor frecuencia en el análisis de la gobernanza, a pesar de su papel clave para modificar los mecanismos y reestructurar las organizaciones en aras del desarrollo sostenible [180].

Después de realizar una extensa revisión bibliográfica referente a los indicadores de sustentabilidad se puede observar que en los estudios de optimización MCDM, se tienen en cuenta el mismo tipo de indicadores en la mayoría de los casos. Los valores encontrados para la generación de energía eólica y solar serán de gran utilidad para el desarrollo de este estudio.

Además de los indicadores señalados por los autores de los estudios de optimización de sistemas renovables se pueden tener en cuenta otros indicadores que aplican para los países en vías de desarrollo pero que no son tenidos en cuenta en otros estudios ya que fueron desarrollados para países del primer mundo.

Es importante resaltar el aporte socioeconómico y la nueva perspectiva que este tema me ha abierto como investigadora, ya que son gran cantidad de criterios fuera de los comúnmente utilizados que son primordiales y que no son analizados ni tenidos en cuenta. A futuro, y teniendo en cuenta el enfoque de sustentabilidad, los proyectos deben pensarse como proyectos de desarrollo integrales que no solo impliquen llevar electricidad a las comunidades que aún no tienen acceso a este servicio básico, sino también involucrar a los pobladores a nuevas actividades que permitan aprovechar al máximo este nuevo recurso y a mejorar todos los indicadores de sustentabilidad que pueden cambiarse gracias a la adquisición de este servicio, en referencia a la educación, los hábitos de consumo y las actividades económicas y de protección ambiental.

Los criterios institucionales y normativos se encuentran en diferentes publicaciones [57, 181-183], en algunas de las cuales se presenta la forma de estimarlos para cada caso en particular. En los últimos años se ha hecho más evidente la importancia de los apoyos gubernamentales e institucionales para la perdurabilidad de los sistemas renovables de generación de energía, tal como se resaltó en la sección 1.3.

2.3 Metodologías de análisis multicriterio. Fundamentos teóricos.

El análisis multicriterio para la toma de decisiones, en adelante MCDA o MCDM es una valiosa herramienta para resolver situaciones caracterizadas por depender de múltiples actores, criterios y objetivos. Generalmente, comprenden cinco componentes que son: la meta, las preferencias del diseñador, las alternativas, los criterios y los respectivos resultados. Diferentes técnicas multicriterio han sido aplicadas en el campo de las ER. Los modelos son desarrollados por la perspectiva del diseñador. Pueden ser aproximaciones directas o indirectas [79]. En una aproximación directa la asignación de prioridades o pesos está hecha porque son asignadas como entradas por el beneficiario, la sociedad o un acuerdo basado en encuestas. En un método indirecto, todos los posibles criterios están separados en componentes y pesos asignados de manera analógica a problemas similares previos, juicio o basados en la experiencia de quien toma las decisiones, etc. Los MCDM siempre son complejos debido a que involucran factores incluyendo aspectos técnicos, institucionales, estándares, sociales, economía e interesados. Por lo tanto, estos requieren un nivel de análisis de ingeniería y gerencial. Además, este procedimiento mantiene el carácter controversial y objetivo que puede llevar a diferentes soluciones en diferentes tiempos basados en las prioridades asignadas por quienes toman las decisiones o demás personas involucradas en el procedimiento. Además, un problema particular puede ser aproximado por diferentes métodos basados en las funciones que se definen. Cada método o modelo tiene sus propios inconvenientes y restricciones.

Los siguientes métodos son considerados en el estudio de la referencia [79]:

- ✓ Modelo del producto de los pesos por Bridgman 1922
- ✓ ELECTRE por Benayoun et al. 1966
- ✓ Modelo de suma de pesos por Fishburn 1967
- ✓ AHP por Saaty 1980
- ✓ TOPSIS por Hwang y Yoon 1981
- ✓ MAUT por Edwards y Newman 1982
- ✓ PROMETHEE por Brans y Vincke 1985
- ✓ VIKOR por Opricovic 1998

2.3.1 Método de la Suma de los Pesos

El área de aplicación es la optimización estructural en la planeación de proyectos energéticos.

Los pasos por seguir son:

$$J_{SumaDePesos} = w_1J_1 + w_2J_2 + \dots + w_mJ_m \quad (2.17)$$

Donde $w_i (i = 1, 2, \dots, m)$, es el factor de peso de la i ésima función objetivo y J es una función del vector designado. La mejor alternativa es el $\max (J_{SumaDePesos})$.

Las fortalezas que presenta este método son por un lado la facilidad de implementación matemática, y por otro lado es adecuado para problemas de una sola dimensión.

Las debilidades detectadas son que arroja una sola estimación básica de la inclinación de la función. De otro lado, falla al integrar múltiples preferencias.

2.3.2 Método del Producto de los Pesos

El área de aplicación es la división del trabajo en un proceso basado en varios elementos y estrategias de decisión.

Los pasos para seguir son:

$$P_i = \prod_{j=1}^M [(m_{ij})_{normal}]^w \quad (2.18)$$

Donde P_i , es el puntaje global de la alternativa y m_{ij} es el valor normalizado del atributo.

Las fortalezas que presenta este método son que por un lado es reconocido para resolver problemas de decisión con criterios del mismo tipo. Por otro lado, utiliza valores relativos de esta manera elimina el problema de la homogeneidad.

La debilidad detectada es que lleva a resultados indeseables ya que prioriza o desprioriza las alternativas que están lejos del valor promedio.

2.3.3 AHP

El Proceso de Jerarquía Analítica AHP (*Analytic Hierarchy Process*), es un método cuyas áreas de aplicación son la administración de recursos, política corporativa y estrategias, política pública, planeación de proyectos energéticos, y la ingeniería de logística de transportación.

Los pasos por seguir son:

1. Definir el objetivo dentro de un modelo jerárquico,
2. Determinar el peso de cada criterio,
3. Calcular el puntaje de cada alternativa considerando los criterios,
4. Calcular el puntaje global de cada alternativa.

Las fortalezas que presenta este método son que es adaptable, no involucra procesos matemáticos complejos y que está basado en una estructura jerárquica y así cada criterio puede ser mejor enfocado y evaluado de manera objetiva.

Las debilidades detectadas son la interdependencia entre los objetivos y las alternativas que lleva a resultados arriesgados, involucrar a varios decisores, puede complicar más el problema durante la asignación de los pesos. Implica la recolección de datos basados en la experiencia.

2.3.4 ELECTRE

Eliminación y elección traducida a la realidad ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*), es una metodología que se ha aplicado en diferentes tipos de problema tales como la administración de la energía, la administración financiera, la administración de negocios, tecnologías de la información y la comunicación, y la ingeniería de logística de transportación.

Los pasos por seguir son:

1. Está basada en tres pilares:
 - a. La determinación de la función límite.
 - b. Los índices de concordancia y discordancia.

c. Grado de superación.

2. Asignación de la jerarquización según los cálculos anteriores.

Las principales ventajas encontradas son que permite tanto características cualitativas como cuantitativas para los criterios, los resultados finales son validados por medio del razonamiento y además permite escalas heterogéneas.

Las desventajas encontradas son que es un método poco versátil y que demanda un buen entendimiento de los objetivos especialmente cuando se está operando con características cuantitativas.

2.3.5 TOPSIS

La Técnica para el orden de preferencia mediante soluciones similares a la ideal TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), es una metodología que ha sido empleada para la resolución de diferentes problemas en áreas como la logística, la administración de recursos hídricos, la administración de la energía, y la ingeniería química.

Los pasos que involucra esta metodología son:

1. Cálculo de las matrices,
2. Normalización y decisión,
3. Cálculo de las soluciones ideales positivas y negativas,
4. Cálculo de separación y relativa cercanía.

Las principales ventajas encontradas al aplicar esta metodología son que trabaja con rangos fundamentales, hace uso completo de toda la información concentrada, la información no necesariamente tiene que ser independiente.

Las desventajas detectadas al aplicar esta metodología son que básicamente opera en base a la distancia Euclidiana y por esto no encuentra diferencia alguna entre los valores positivos y negativos, los valores de los atributos deben ser monótonamente crecientes o decrecientes.

2.3.6 VIKOR

El método del Criterio de Optimización y Solución de Compromiso VIKOR (*Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Serbian)*), ha sido empleado en diferentes áreas tales como la ingeniería mecánica, la ingeniería de manufactura, la política energética, la administración de negocios y en medicina y salud.

Los pasos por seguir son:

1. Determinación de los mejores y peores valores
2. Cálculo de los valores de S_j y R_j , donde S_j es la distancia Manhattan pesada y normalizada, y R_j es la distancia Chebyshev pesada y normalizada
3. Cálculo de Q_j basado en los cálculos anteriores
4. Ranquin de las alternativas organizadas por los valores de S, R y Q llevando la información de tres listas
5. Una solución compromiso de la lista final de las 3 mejores alternativas.

Una de las principales ventajas de la metodología VIKOR es que es una actualización de la metodología TOPSIS. Otra ventaja es que calcula la relación entre las soluciones ideales positivas y negativas eliminando el impacto.

Las desventajas identificadas son la dificultad cuando aparecen situaciones de conflicto y la necesidad de modificaciones al tratar con algunos datos concisos, dificulta el modelado en tiempo real.

2.3.7 PROMETHE

Método de Organización de Clasificación de Preferencias para la Evaluación de Enriquecimiento PROMETHE (*Preference Ranquin Organization Method for Enrichment Evaluations*) ha sido empleado en diferentes áreas para la solución de problemas de toma de decisiones, tales como el análisis de riesgo, análisis estructural e ingeniería minera.

Los pasos por seguir son:

1. Encontrar una matriz de evaluación y compararla por parejas considerando cada uno de los criterios.
2. Asignación de la función de preferencia con valores de 0 a 1 dependiendo de la diferencia entre los pares.
3. Cálculo de la matriz global y determinación del rango adicionando columnas que expresen la supremacía de una alternativa sobre las otras.

Las principales ventajas encontradas en la aplicación de esta metodología son que involucra el nivel de decisión de grupo, permite información cuantitativa y cualitativa, y además incorpora incertidumbre e información difusa.

Las desventajas detectadas en la aplicación de esta metodología son que no estructura el objetivo propiamente, la asignación de pesos depende del ente decisor, y finalmente, su implementación es complicada y por tanto los usuarios se limitan a niveles de expertos.

2.3.8 MAUT

La metodología de la Teoría de Utilidad Multiatributo MAUT o MAVT (*Multi-attribute Value/Utility Theory*), ha sido empleada en la resolución de problemas relacionados con planeación de ciudades, política económica, y política de gobierno.

Los pasos para su implementación son:

1. Identificar las dimensiones de cada objetivo y asignar un peso a cada uno.
2. Calcular el porcentaje de peso y actualizar los valores basados en el peso asignado a las opciones de cada dimensión,
3. Multiplicar los valores de peso actualizados y los valores previamente obtenidos.
4. Sumar el producto de cada dimensión para obtener una suma final de cada opción y de este modo determinar la decisión.

Las ventajas encontradas al aplicar esta metodología son que tiene en cuenta cualquier diferencia para cualquier criterio, calcula simultáneamente el orden de preferencia para todas las alternativas, y finalmente actualiza de manera dinámica los cambios debidos a cualquier impacto.

Las desventajas de este método son la dificultad de entradas precisas para el decisor, y que además los resultados de los criterios de decisión son inciertos.

2.4 Paquetes de software comerciales para el diseño de sistemas híbridos.

2.4.1 HOMER

La principal desventaja que se observa del HOMER es que toma altos tiempos de cálculo. Sin embargo, los avances en computación y tecnología de procesadores han permitido reducir estos tiempos a valores más manejables y tolerables, haciendo de esta metodología y de este software en particular, la herramienta más versátil y amigable con el usuario para desarrollar la presente investigación.

A continuación, se explica la metodología de enumeración completa seleccionada como método de diseño para el sistema híbrido durante esta investigación. En el capítulo 15 “Modelado de microsistemas de energía con HOMER” del libro “Integración de recursos alternativos de energía”,

Lambert [94] desarrolla una descripción del método de optimización empleado en el software HOMER.

Mientras que el proceso de simulación modela el comportamiento de una configuración particular del sistema de estudio, el proceso de optimización determina la mejor configuración posible del sistema. El objetivo del proceso de optimización es determinar el valor óptimo de cada variable de decisión que sea de interés del usuario. Una variable de decisión es una variable sobre la cual el diseñador del sistema tiene el control y por lo tanto HOMER puede considerar múltiples valores posibles en su proceso de optimización.

El usuario puede ingresar cualquier número de valores para cada variable de decisión. HOMER modela el comportamiento del sistema para cada combinación de parámetros, calcula en orden descendente el valor del NPC del sistema y de esta manera obtiene el mínimo valor del costo del sistema, que se traduce en la configuración óptima que cubre la demanda energética bajo las restricciones indicadas, al menor costo.

HOMER realiza tres actividades fundamentales: simulación, optimización y análisis de sensibilidad. En el proceso de simulación, modela el funcionamiento de una configuración de sistema en particular cada hora del año, para determinar su viabilidad técnica y su costo en la vida útil. En el proceso de optimización, simula muchas configuraciones diferentes en la búsqueda de aquella que satisfaga las restricciones técnicas al menor costo. En el proceso de análisis de sensibilidad, realiza múltiples optimizaciones bajo un rango de supuestos cambios en variables de entrada (costos, demanda promedio, velocidad media del viento, setpoint SOC, tasas de interés, tiempo de vida del proyecto o de componentes, altura del hub del aerogenerador, entre otras), para medir los efectos que dichos cambios provocan en el funcionamiento del sistema.

La optimización determina los valores óptimos de las variables sobre las cuales el diseñador del sistema tiene control, tales como la combinación de componentes que conforman el sistema y el tamaño o la cantidad de cada uno. En cambio, el análisis de sensibilidad ayuda a evaluar los efectos de las incertidumbres o cambios en las variables sobre las que el diseñador no tiene control, como las mencionadas anteriormente [94].

La Figura 2.7 ilustra las relaciones entre cada uno de los procesos. El ovalo de optimización encierra el ovalo de simulación, para representar el hecho de que una optimización consiste en múltiples

simulaciones. Similarmente, el ovalo de análisis de sensibilidad encierra el ovalo de optimización porque la primera consiste en múltiples optimizaciones.

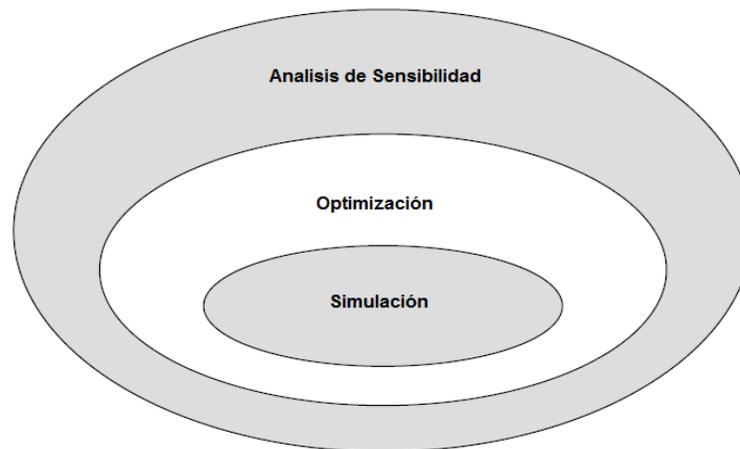


Figura 2.7 Relación conceptual entre simulación, optimización y análisis de sensibilidad. [94].

Finalmente, algunas debilidades señaladas al HOMER en [94]:

- La optimización se realiza mediante el método enumerativo. Por lo tanto, se evalúan todas las posibles combinaciones de componentes y de estrategias. Debido a esta característica el número de posibles combinaciones no puede ser muy elevado ya que en otro caso los tiempos de cálculo serían excesivamente elevados (meses o años).
- Las estrategias de control son muy limitadas. Las estrategias utilizadas tienen poca precisión y poca capacidad de adaptarse a cada sistema concreto.
- No define la forma de priorizar la energía sobrante en el caso de que existan baterías y electrolizador. Tampoco define, cuando existen generador AC, baterías y pila de combustible, la forma de priorizar qué elemento cederá la energía que falta.
- La vida de las baterías se modela según el número de ciclos completos equivalentes, aproximación que puede dar lugar a errores importantes.
- El inversor se modela con eficiencia constante y no dependiente de la potencia de salida, aproximación que en muchos casos puede influir en los resultados que se alcancen.
- El electrolizador se define con eficiencia fija e independiente del caudal de hidrógeno generado, siendo muy distinta esta aproximación a la realidad.
- El consumo de la pila de combustible se aproxima de forma lineal frente a la potencia de salida (no teniendo en cuenta que para potencias cercanas a la nominal la eficiencia disminuye).

A pesar de las debilidades presentadas anteriormente, el software HOMER ha sido empleado en diferentes trabajos de tesis a nivel de maestría [59] y de doctorado [52, 78] a lo largo y ancho del globo; por su versatilidad y por la facilidad de tratamiento de los datos de salida de las simulaciones y análisis de sensibilidad.

2.4.2 HYBRID2

HYBRID2, que viene siendo desarrollado desde 1994 por NREL (Laboratorio nacional de energías renovables) y la Universidad de Massachussets, es un programa de simulación del funcionamiento de sistemas híbridos definidos por el usuario (el programa no optimiza el sistema). (http://www.ceere.org/rerl/rerl_hybridpower.html). Algunos componentes, como por ejemplo las pilas de combustible o electrolizadores, pueden modelarse, pero con bastante dificultad, ya que el programa no fue desarrollado inicialmente para incluirlos. La simulación es más precisa que la que realiza HOMER. Por ejemplo, la vida útil de las baterías se modela según el conteo de ciclos "Rainflow". El programa tiene más de 200 parámetros de entrada, y los intervalos de tiempo de cálculo son configurables entre 10 minutos y 1 hora. Las posibilidades en cuanto a las estrategias de control son mucho mayores que en el caso del HOMER. NREL recomienda optimizar el sistema con HOMER y posteriormente, una vez obtenido el sistema óptimo, mejorar el diseño mediante el uso de HYBRID2.

2.4.3 TRNSYS

TRNSYS (Programa de simulación de sistemas de energía transitorios) es un programa de simulación de sistemas energéticos, desarrollado en Fortran desde 1975 por las Universidades de Wisconsin y Colorado (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>). En principio fue desarrollado para simular sistemas térmicos, pero con el tiempo se ha convertido también en un simulador de sistemas híbridos, incluyendo sistemas FV, solares térmicos y otros. La simulación se realiza con gran precisión y además permite visualizar gráficos con gran detalle y precisión. Sin embargo, no permite llevar a cabo optimizaciones.

2.4.4 HYDROGems

HYDROGEMS (<http://www.hydrogems.no/>) no es un programa, sino que es un conjunto de librerías desarrolladas en el Instituto de tecnología energética (IFE, Noruega). Las librerías son utilizadas por el programa TRNSYS y por el programa Solucionador de ecuaciones de ingeniería (EES, programa de termodinámica, para simular el comportamiento térmico de las pilas de combustible). Las librerías desarrolladas por HYDROGEMS modelan los siguientes componentes: generador FV, aerogenerador,

generador diésel, pilas de combustible poliméricas y alcalinas, electrolizador, tanque de hidrógeno, baterías plomo-ácido y convertidores DC/AC. Es posible llevar a cabo una rudimentaria optimización económica si se utiliza junto con el programa GenOpt (<http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>), utilizando para ello el método de optimización lineal simplex [183].

2.4.5 INSEL

El software INSEL (<http://www.insel.eu/>) fue desarrollado en la Universidad de Oldenburg, y permite simular sistemas de ER. El usuario selecciona bloques de la biblioteca y los interconecta para definir la disposición del sistema. El análisis de la operación del sistema se puede realizar con un paso de tiempo especificado por el usuario. La flexibilidad para crear los modelos y las configuraciones del sistema es una característica muy interesante. Es un programa de simulación, pero no de optimización. Además, componentes tales como el generador diésel o los inversores no poseen ningún modelo por defecto y el usuario debe crearlos.

2.4.6 ARES

ARES es un programa desarrollado en la universidad de Cardiff, mejorado en su versión II, que simula de forma bastante precisa sistemas FV-EE con almacenamiento en baterías. Las baterías son modeladas según el estado de la tensión (SOV) en lugar de utilizar el SOC, añadiéndose el efecto de la temperatura. También se han modelado de forma precisa los controladores de tensión de las baterías y se han incluido ecualizaciones periódicas en las mismas. El tamaño de las baterías se determina por la tasa de la descarga requerida durante la operación de sistema. La técnica de la simulación ha sido validada comparando los resultados con datos experimentales. Sin embargo, el envejecimiento de las baterías y su efecto sobre el funcionamiento del sistema no se han tenido en cuenta.

2.4.7 RAPSIM

RAPSIM (<http://wwwcomm.murdoch.edu.au/synergy/9803/rapsim.html>) (Simulador de suministro energético para un área remota) fue creado en la universidad de Murdoch en Perth, Australia. Este software sirve para seleccionar sistemas híbridos FV-EE-Diésel. El usuario selecciona un sistema FV y/o EE y/o Diésel y el programa simula dicho sistema, calculando los costos totales a lo largo de la vida útil. El usuario puede ir modificando los componentes para ver el efecto en el costo total. Es un programa básicamente de simulación (aunque obtiene el costo del sistema a lo largo de la vida útil). No utiliza ningún método que tenga en cuenta el envejecimiento de las baterías.

2.4.8 SOMES

SOMES (<http://www.chem.uu.nl/nws/www/research/e&e/somes/somesinf.htm>) es un software desarrollado en Turbo Pascal para el análisis de funcionamiento de sistemas híbridos FV-EE-Diésel. Ha sido desarrollado en la universidad de Utrecht en Holanda. Los intervalos de tiempo de la simulación son de una hora y el funcionamiento del sistema se evalúa técnica y económicamente, determinando el sistema de costo más bajo y optimizando los componentes entre varias opciones. Los criterios para arrancar y parar del generador diésel son proporcionados por el usuario y el software no proporciona estrategias de funcionamiento óptimas.

2.4.9 SOLSIM

SOLSIM (<http://www.fh-konstanz.de>) se ha desarrollado en Fachhochschule Konstanz (Alemania). Tiene modelos para los paneles FV, el aerogenerador, los generadores diésel y las baterías. Existe la posibilidad de incluir generadores que funcionen con biogás y con biomasa para generar electricidad y calor. Simula el funcionamiento del sistema y realiza un análisis económico. Las opciones de control son muy limitadas, optimizando únicamente los ángulos de inclinación de *los paneles*.

2.4.10 RETScreen

RETScreen (<https://retscreen.software.informer.com/4.0/>) es un software de gestión de energía limpia para la eficiencia energética, la energía renovable y el análisis de viabilidad del proyecto de cogeneración, así como el análisis del rendimiento energético en curso. Al descargar y ejecutar RETScreen Software Suite en el ordenador va a instalar dos programas separados, RETScreen 4 y RETScreen Plus, que se describen a continuación. RETScreen 4 es un software de análisis de proyectos de energía limpia basada en Excel que ayuda a los tomadores de decisiones de forma rápida y poco costosa a determinar la viabilidad técnica y económica del potencial de las ER, la eficiencia energética y proyectos de cogeneración. RETScreen Plus es un software de gestión de la energía basada en Windows que permite a los propietarios de los proyectos para verificar fácilmente el rendimiento energético permanente de sus instalaciones.

2.4.11 HOGA

Optimización híbrida por algoritmos genéticos HOGA (*Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*) es un programa desarrollado en C++ para optimización de SHGE para la generación de energía eléctrica (DC y/o AC) y/o Hidrógeno. El programa tiene la opción de realizar tanto la optimización mono-objetivo como la multiobjetivo, donde no sólo se busca la minimización de costos, sino también la minimización de otra variable (las emisiones de CO₂ o la energía no servida, lo cual es decidido por el usuario). Dado que ambos objetivos (el costo y las emisiones o la energía no servida) son en

muchos casos contradictorios, cuando el sistema realiza la optimización multi-objetivo no llega a una única solución, sino que da un amplio abanico de soluciones, unas con mejor comportamiento en cuanto a emisiones o energía no servida, otras con mejor comportamiento en cuanto a costos [185]. Los elementos que pueden componer el sistema híbrido son: paneles FVs, aerogeneradores, turbina hidráulica, pila de combustible, tanque de H₂ y electrolizador, además de baterías, regulador de carga de las baterías, inversor (convertor DC/AC), rectificador (convertor AC/DC) y generador AC (que en general será una fuente no renovable si el combustible no lo es). Aunque sea posible la combinación de todos ellos, en muchos casos interesará que el sistema híbrido sólo conste de algunos de ellos (Figura 2.8).

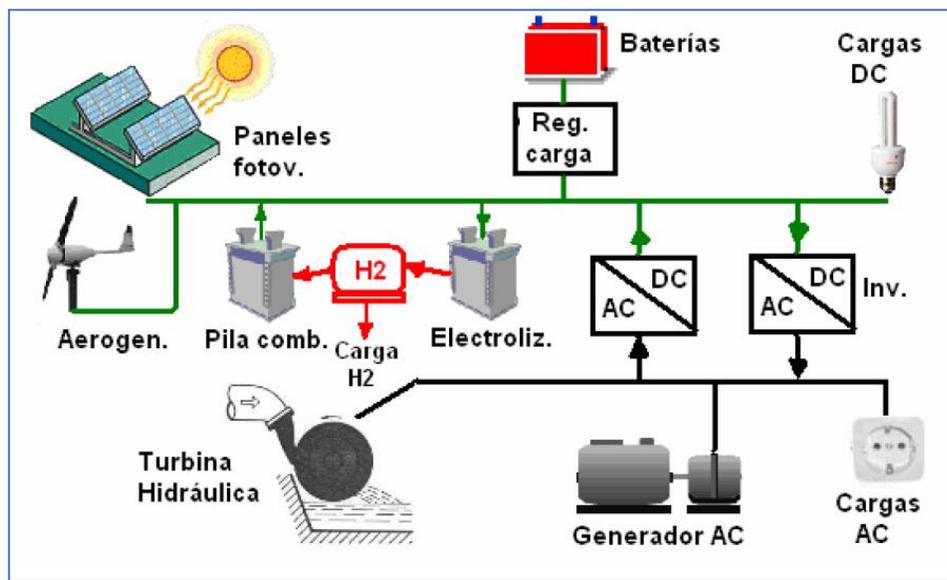


Figura 2.8 Esquema con los elementos que pueden componer el sistema a optimizar por HOGA.

HOGA utiliza GA para realizar la optimización, tanto de los componentes del sistema (algoritmo genético principal), como la de la estrategia de control (algoritmo genético secundario). Tiene la posibilidad de evaluar todas las posibles combinaciones, tanto de componentes como de variables de control de la estrategia, es decir, optimización según el método enumerativo o “fuerza bruta”, sin algoritmos genéticos.

En resumen, HOGA es una herramienta informática para el dimensionado óptimo de instalaciones híbridas, contemplando la posibilidad de la inclusión de ER tanto solar como eólica e hidráulica, junto con sistemas de apoyo basados en acumuladores (baterías), en grupo electrógeno (generador AC), y en celdas de combustible. Para ello emplea algoritmos genéticos, los cuales hacen un estudio del costo y de las emisiones de contaminantes hasta llegar a una óptima relación del número y tipo de

paneles, el número y tipo de aerogeneradores, el tipo de turbina hidráulica, el número y tipo de baterías, el tipo de generador AC, el tipo de electrolizador, el tipo de pila de combustible, el tanque de H₂, el tipo de inversor, la potencia del rectificador, la corriente del regulador de carga de las baterías y la estrategia de operación de la instalación. Esto sería para el caso más general, donde todos los elementos están presentes. No obstante, el usuario puede seleccionar que algunos componentes no aparezcan [185].

Los puntos débiles del *HOGA* son los siguientes:

- 1 No incluye la optimización del acoplamiento entre el recurso eólico del lugar de la instalación y la curva de potencia del aerogenerador a instalar.
- 2 No visualiza los índices de producción estimados de energía del aerogenerador antes de realizar la optimización global del sistema, lo que permitiría al modelador seleccionar moldeos de turbinas eólicas más adecuadas.
- 3 El cálculo de emisiones contaminantes es realizado para la vida útil de los componentes del sistema, careciendo de un análisis de ciclo de vida, que podría dar una mejor evaluación de la dimensión ambiental del sistema.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la manera como se plantearon las diferentes metodologías para desarrollar los objetivos propuestos en este trabajo de investigación. En primera instancia, se explica la metodología para identificar las perspectivas en el dimensionado de sistemas híbridos; en segunda instancia, se presenta la metodología para la selección de los criterios de sustentabilidad que permitirán la comparación y evaluación de las diferentes alternativas generadas a partir del dimensionado de un sistema energético en específico. En tercera instancia, se presenta la metodología empleada para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio que permitirá la aplicación de tres herramientas diferentes para comparar los resultados obtenidos y elegir entre las alternativas que más puntuación alcancen, con el fin de guiar los procesos de toma de decisiones en los proyectos de aprovechamiento de ER. Finalmente, se presenta la metodología global para resolver un caso de estudio con la herramienta anteriormente mencionada, en la cual se expone paso a paso el camino a seguir para llevar a cabo el diseño, comparación y evaluación para obtener el sistema más cercano al ideal para el aprovechamiento óptimo y sustentable de los recursos energéticos renovables en un emplazamiento determinado.

3.1 Metodología para identificar las perspectivas en el dimensionado de sistemas híbridos de generación de energía.

Para la búsqueda, revisión y análisis de la bibliografía relacionada con el tema se utilizó la siguiente metodología, obtenida del aprendizaje de la herramienta TOS en cursos, videotutoriales y bibliografía recomendada por los autores de la plataforma.

El “árbol de la ciencia” (TOS) brinda una clasificación en forma de árbol que resulta de las interacciones entre las citas bibliográficas y las referencias obtenidas al ingresar las palabras claves de búsqueda. TOS, es una herramienta desarrollada por un grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia [186], debido a la necesidad de sustentar las bases teóricas de un tema de investigación determinado. La idea surgió a partir de una búsqueda inicial de un tema X, para el que obtuvieron 214 artículos y, siguiendo el procedimiento propuesto por Robledo-Giraldo en 2013 [186], obtuvieron 1,476 artículos y 4,212 citas. En la parte inferior de la Figura 3.1 se puede observar el árbol. Los artículos “raíz” fueron catalogados como la base de la teoría.

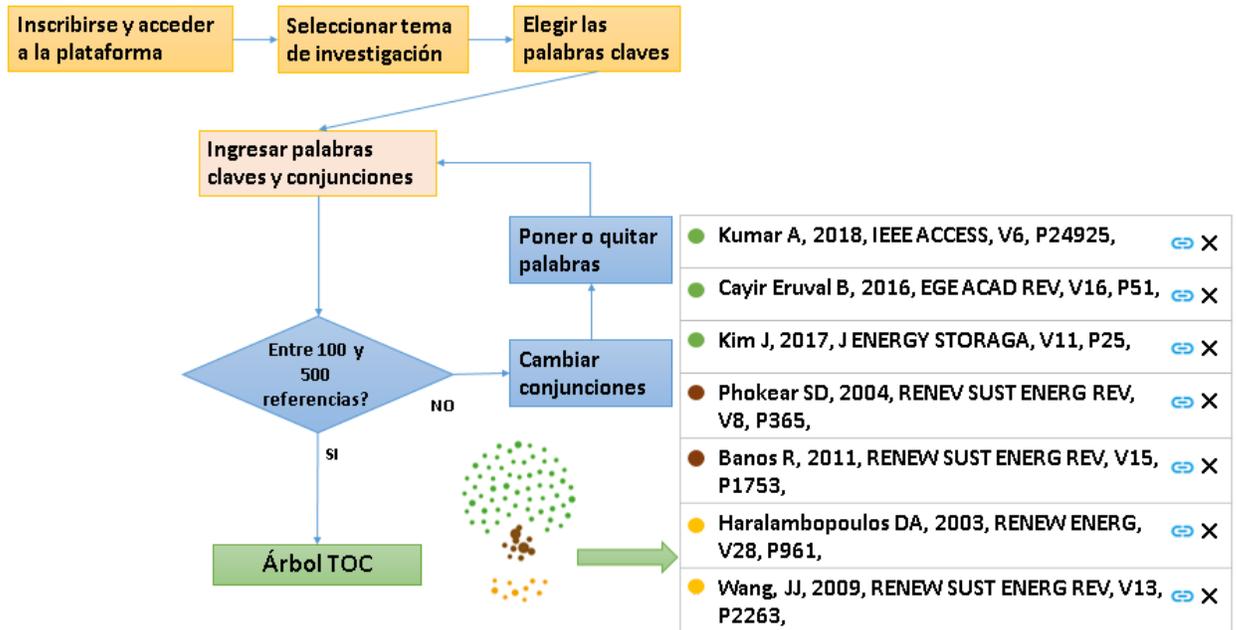


Figura 3.1 Metodología para revisión bibliográfica empleando la herramienta TOS.

A continuación, se presenta una guía simplificada para usar TOS en investigaciones bibliográficas, que abrirán un amplio panorama sobre el tema de interés conformado por las palabras claves de búsqueda en WOS (Red de la ciencia).

- a. Seleccionar un tema, las palabras claves e inscribirse en TOS.

El tema seleccionado es *“Hybrid renewable energy systems multicriteria optimization”* el cual es empleado textualmente como palabras clave para la búsqueda.

La inscripción gratuita en TOS se realiza en la página de la herramienta: <http://tos.manizales.unal.edu.co>. En el buscador WOS, se ingresaron las palabras claves, con lo cual se obtuvieron solamente 11 referencias, insuficientes para obtener un árbol. Para obtener 100 referencias o más, se suprimió la palabra hybrid. Se obtuvo un árbol con 113 referencias.

- b. Obtener entre 100 y 500 referencias.
 - (1) Si las publicaciones superan las 500 referencias: refinar la búsqueda usando las conjunciones (y, o, sin) y adicionar palabras para volver al punto c.
 - (2) Si las publicaciones no superan las 100 referencias: volver al punto c para incluir más palabras claves y conjunciones.
 - (3) Si se obtienen entre 100 y 500 referencias. Continuar al punto e.
- c. Obtención del Árbol TOS

Se cargó el archivo exportado del WOS al TOS y se obtuvo el árbol de la Figura 3.1.

d. Lectura de las referencias obtenidas

Las referencias que tienen el símbolo de enlace en color azul llevan a la página del artículo. El tamaño de los puntos representa el índice de citación.

Según las interacciones entre las citas de las investigaciones, como se explicó brevemente al final de la sección 1, la herramienta TOS determina un árbol con 80 referencias: 10 (raíces), 10 (tronco) y 60 (hojas).

Se recomienda empezar la lectura por las raíces, después el tronco y finalmente las hojas; para comprender mejor el tema. Las referencias obtenidas se encuentran en bases de datos tales como Elsevier, Springer, Taylor & Francis, IIE, IEEE, entre otras.

3.2 Metodología para la selección adecuada de los criterios de sustentabilidad.

Para la selección de los criterios de sustentabilidad, se parte de la información recopilada en la revisión bibliográfica. De este análisis, se pudieron identificar diferentes criterios de sustentabilidad, algunos descritos de manera breve, con sus respectivos valores cualitativos o cuantitativos, los métodos empleados para su ponderación, y en otros casos estos criterios simplemente son mencionados sin dar más información al respecto. Por lo anterior, se realizó un listado partiendo de las investigaciones que contienen la información más completa con el fin de obtener un compendio de criterios de sustentabilidad relacionados con las diferentes fuentes de energía renovable, los diferentes sistemas y tecnologías de almacenamiento energético, los sistemas de respaldo debido a la intermitencia de las fuentes renovables, la percepción de los interesados respecto a los diferentes equipos necesarios para la generación, adecuación y administración de la energía, la interacción de los mismos con el medio ambiente y los incentivos, apoyos, o impuestos que las administraciones locales proponen o imponen a este tipo de proyectos.

La mayoría de las investigaciones analizadas fueron realizadas en países desarrollados, entonces, para tener en cuenta el entorno de los países en vías de desarrollo se incluyeron en la lista otros indicadores que pueden ser tomados como criterios sustentables, para complementar el primer listado. La Figura 3.2 presenta el diagrama de bloques que ilustra lo anteriormente descrito:

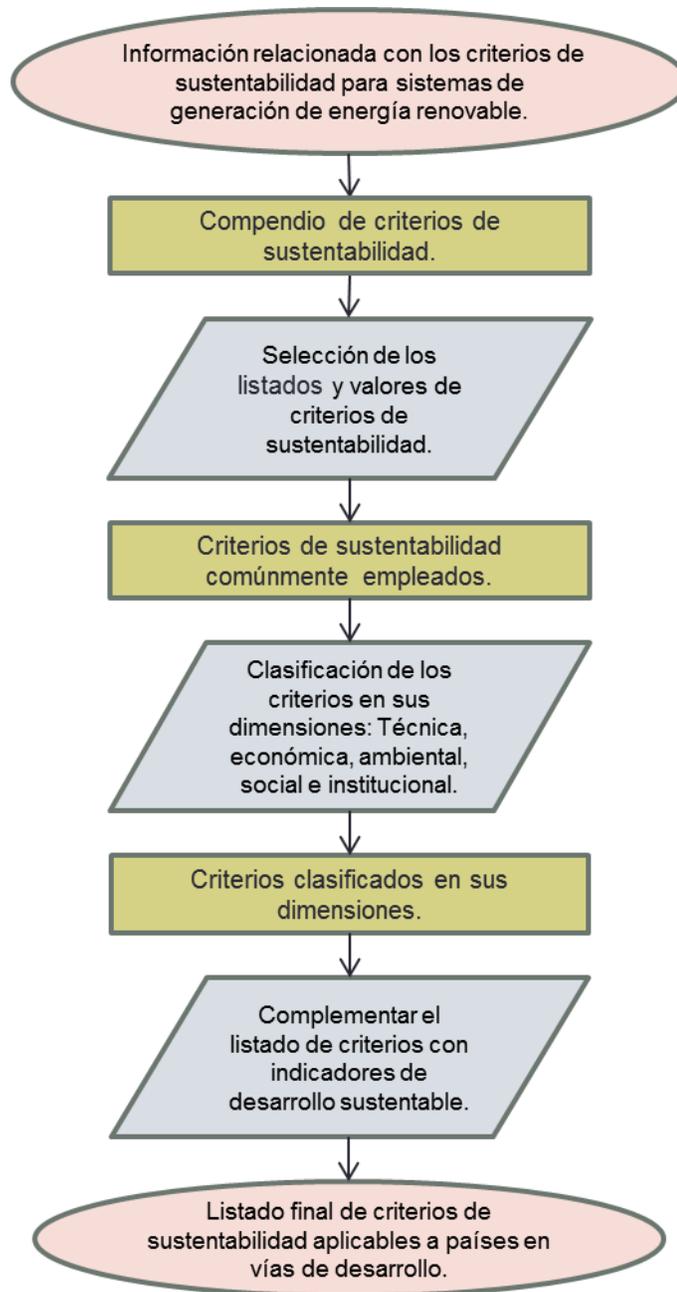


Figura 3.2 Metodología para la obtención del listado guía de criterios de sustentabilidad.

Al momento de seleccionar los criterios de sustentabilidad se puede optar por dos caminos. El primero sería emplear los criterios y valores utilizados en un caso de estudio similar, y, el segundo, sería seleccionar de la lista los criterios que se desea emplear y verificar uno por uno si se cuenta con la información suficiente para su estimación o alguna fuente de la cual tomar el valor puntual. En ambos casos, es importante que el criterio seleccionado tenga un valor diferente para las alternativas a comparar, ya que, si el valor es el mismo, no tiene sentido incluirlo. Otro aspecto importante para tener en cuenta es la independencia entre los criterios, de tal manera que, si hay una relación directa

y proporcional entre dos criterios, que uno pueda calcularse o inferirse a partir de otro, lo conveniente sería trabajar con uno de los dos para simplificar la aplicación de la metodología manteniendo la relación de preferencia en el criterio elegido. El objetivo en la selección de los indicadores siempre es el mismo, y es el concepto del desarrollo sustentable [187].

Una vez obtenidas las alternativas en orden del NCP, se analizan las demás variables calculadas por el software utilizado, por ejemplo, en el caso de HOMER, éste también arroja valores importantes para analizar la sustentabilidad de una configuración determinada, tales como la fracción renovable, el costo nivelado de la electricidad y las emisiones evitadas, entre otros. Estos criterios y sus valores pueden ser seleccionados y tomados de manera directa de la Tabla de resultados arrojada por el programa. A continuación, se complementa esta lista con otros criterios físicos tales como el requerimiento de área para la instalación de los equipos requeridos en cada configuración, la cantidad de combustible o de otros consumibles (agua, aceite) aproximada requerida en determinado tiempo, el peso y factores de seguridad propios de cada tecnología. Posteriormente se pueden incluir otros criterios relacionados con el proceso de fabricación e instalación de los componentes, tales como la madurez tecnológica, la huella por el proceso de fabricación del equipo, la accidentalidad durante la instalación, el tiempo de vida útil. Finalmente se puede realizar la estimación de otros criterios para cada alternativa, por medio de expresiones encontradas en la revisión bibliográfica, siempre y cuando se tengan los valores de entrada para dichas expresiones.

La inclusión o exclusión de criterios de sustentabilidad de este listado, depende de los interesados en el proyecto, agrupación que generalmente se compone de un líder de proyecto, el usuario final, los habitantes alrededor del emplazamiento, patrocinadores del proyecto, además de los proveedores y los expertos, quienes pueden apoyar con su experiencia en el proceso de selección y estimación de los criterios de sustentabilidad, así como en el proceso general de la toma de decisiones. Este proceso anteriormente descrito, se puede representar con la siguiente matriz:

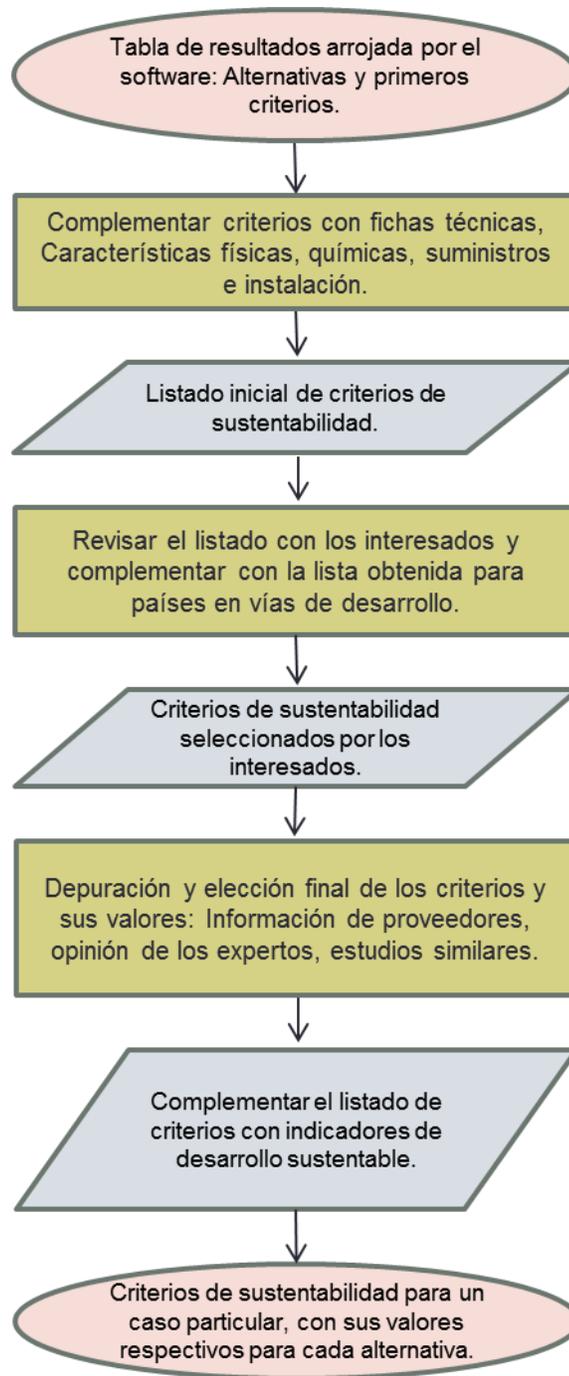


Figura 3.3 Proceso de selección de los criterios de sustentabilidad.

Hasta este punto se tienen los criterios de sustentabilidad para cada una de las alternativas generadas por el software empleado para el diseño del sistema. A continuación, se presenta la metodología para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio.

3.3 Metodología para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio.

Las diferentes herramientas multicriterio son analizadas más adelante en el capítulo 4, ya que es uno de los objetivos planteados en esta investigación. Según la revisión bibliográfica llevada a cabo, se encuentra de manera recurrente una sugerencia de los autores, al respecto de la utilización de dos o más herramientas de análisis multicriterio de manera paralela (en sus formas básicas) o en serie (modificaciones o propuestas de las fórmulas básicas). Para esta investigación se optó por elegir las tres herramientas de análisis multicriterio más comúnmente empleadas para el diseño de sistemas híbridos de generación de energía. Según esta tendencia, se eligen tres herramientas, cada una se estudia de manera independiente en su filosofía y procedimientos matemáticos. En primera instancia se realiza la programación de cada una de ellas en Microsoft Excel, plataforma ampliamente utilizada y con licencia en la mayoría de las entidades e instituciones; y posteriormente fue migrada diseñando el código de programación para el software Scilab.

Uno de los criterios para seleccionar la plataforma de programación del software es el carácter gratuito de la misma, para que la herramienta pueda ser utilizada solo descargando un software de uso libre. De esta manera, los cálculos realizados por las rutinas diseñadas y programadas en Scilab, fueron corroborados con ejemplos prácticos desarrollados por otros autores en Excel para validar los resultados obtenidos. A continuación, se presenta en la Figura 3.4 el diagrama de la metodología empleada para el desarrollo de la herramienta de software:

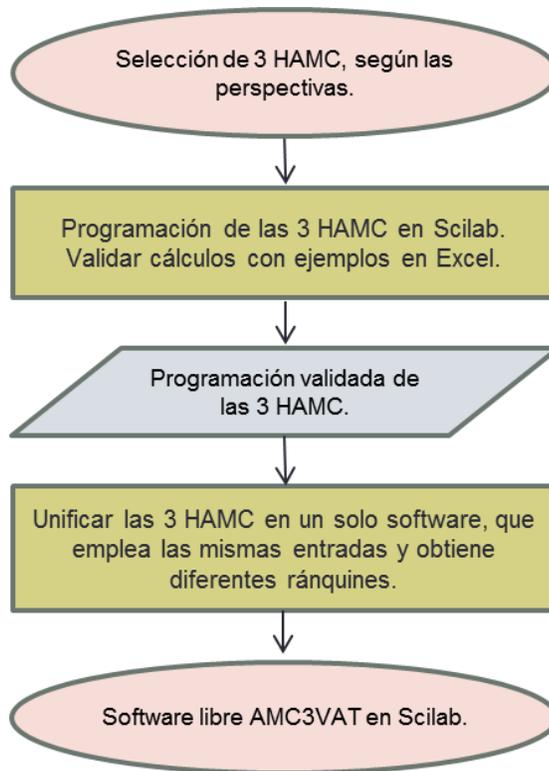


Figura 3.4 Metodología para desarrollar la herramienta de optimización multicriterio.

*AMC: Análisis multicriterio MCDA o MCDM

Posteriormente se realizaron trabajos de mejora en el software como el diseño de la interface de interacción humano-máquina (HMI), para facilitar el ingreso de los datos de entrada, así como la interpretación de los cálculos y resultados obtenidos por la herramienta. De otro lado se implementó una herramienta auxiliar para la estimación de criterios de sustentabilidad, así como una librería de valores comúnmente empleados para algunos de los criterios más comúnmente empleados en este tipo de aplicaciones.

3.4 Metodología propuesta para resolver un caso de estudio utilizando la herramienta desarrollada.

La metodología empleada para abordar un caso de estudio se puede resumir en el siguiente esquema de bloques:

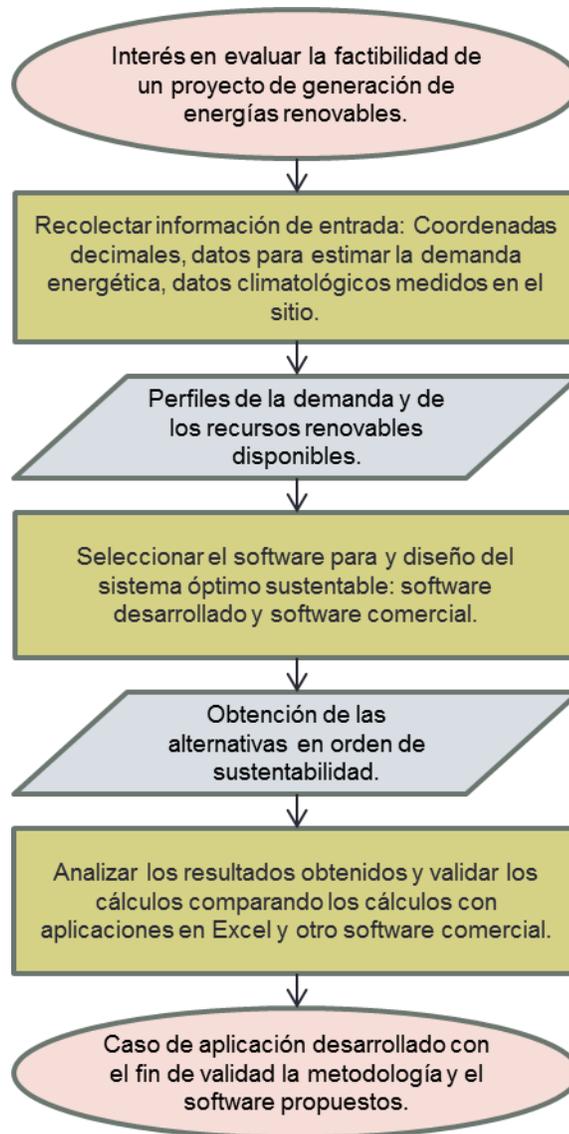


Figura 3.5 Metodología para resolver un caso de estudio.

3.4.1 Selección y ubicación de la comunidad caso de estudio.

Los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables tienen la cualidad de poderse instalar en cualquier sitio donde los recursos disponibles sean suficientes para que dicho sistema sea rentable al plazo que se proyecta en la etapa de diseño. Son diversos los tipos de casos existentes o que se pueden construir para realizar el diseño hipotético de un sistema híbrido renovable. Las diferencias radican en el tipo de demanda o carga que se pretende suministrar, si esta es residencial, industrial, educativa; con las variantes de configuración en modo aislado o conectado a la red, como se explicó en mayor detalle en la sección 2.1. Otra variante recae en la fuente de las bases de datos

meteorológicas de las cuales se toma la irradiancia para estimar la generación de energía solar fotovoltaica, y la velocidad y dirección del viento a una o varias alturas.

Para seleccionar un caso de estudio se atiende a criterios tales como: interés en invertir en la implementación sistemas de aprovechamiento de ER, necesidad de electrificar un emplazamiento o comunidad, cooperación de la comunidad para formar parte activa del proyecto, y disponibilidad de recursos renovables, entre otros.

Para explicar y aplicar de manera práctica la metodología y el software desarrollados se eligió el caso de estudio de una casa de familia mediana en la agencia municipal Mariano Oviedo Juárez, en el municipio de San Mateo del Mar, Oaxaca; el cual aún no tiene acceso a la red nacional. El sitio seleccionado se encuentra ubicado en el istmo de Tehuantepec, lugar reconocido a nivel internacional por la abundancia y calidad del recurso eólico, donde la radiación solar también es abundante durante la mayor parte del año, especialmente en épocas de bajas velocidades del viento. Por lo tanto, un sistema híbrido sería conveniente ya que ambas fuentes renovables pueden complementarse.

3.4.2 Bases de datos utilizadas en el caso de estudio.

Las bases de datos empleadas para la simulación de los recursos, eólico y solar, y el consiguiente dimensionado del SHGE, se encuentran disponibles en línea y son adquiridos directamente por el software HOMER. A modo de comparación y validación, se realizará el análisis de los datos recabados por la estación anemométrica ubicada en las inmediaciones de la universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

3.4.3 Software utilizado.

Con el fin de verificar los cálculos realizados por la herramienta, se programaron paso a paso tres casos de ejemplo desarrollados por otros autores que aplicaron dichas herramientas, en Excel y de manera paralela en Scilab, con los cuales se obtuvieron los mismos resultados. Posteriormente se resolvió el mismo caso por las dos herramientas restantes, y así sucesivamente; obteniéndose una terna de respuestas para elegir la opción más cercana a la ideal, según las herramientas elegidas como las más utilizadas para el diseño de sistemas de generación de energía (AHP, VIKOR y TOPSIS). Para la validación de la herramienta se emplea un software de diseño multiobjetivo (iHOGA, última versión del software HOGA), con el fin de comparar los resultados obtenidos y analizar los posibles motivos de las diferencias que probablemente se presentarán en los resultados obtenidos por los tres medios.

3.4.4 Parámetros utilizados en la validación.

Para llevar a cabo el proceso de validación de la herramienta propuesta, se tuvieron en cuenta parámetros tales como el error absoluto y la desviación media de los resultados. Los cálculos se realizan por medio de dos herramientas, la primera de ellas es Microsoft Excel donde los cálculos son exactos con un error de $1e-14$, de tal manera que el decimal número 15 es aproximado al siguiente entero si es mayor o igual a 5, o al entero anterior si su valor es menor que 5. En el caso de Scilab, éste emplea 16 cifras decimales. Sin embargo, el error absoluto obtenido para el cálculo por medio de ambas plataformas de las mismas expresiones matemáticas ha arrojado errores de entre $1.5e-5$ y $3.4e-8$. El error absoluto se calculó empleando la siguiente expresión:

$$error = |valorC1 - valorC2| \quad (3.1)$$

En cuanto a la validación de la herramienta con otros paquetes de software comerciales, se realizó una comparación de los parámetros similares tales como el costo capital de proyecto del sistema más cercano al ideal, así como otras variables comúnmente calculadas tales como el costo de la operación y mantenimiento de los sistemas, y el costo nivelado de la energía.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis comparativo de los métodos de dimensionado de sistemas híbridos. Perspectivas.

A partir de una revisión bibliográfica preliminar, se encontró que las herramientas multicriterio más frecuentemente empleadas para el diseño de sistemas energéticos sustentables son: ELECTRE III, VIKOR y AHP. Estas herramientas fueron contrastadas con una nueva y amplia revisión bibliográfica en el desarrollo de la investigación, y durante la cual se analizaron sus ventajas y desventajas, respecto a las demás herramientas. Se pretende elegir tres herramientas de toma de decisiones multicriterio para el diseño de un sistema energético sustentable, ya que la aplicación de tres opciones permite comparar y contrastar los resultados y tener mayor soporte al momento de tomar decisiones, o sea, al momento de obtener el sistema más cercano al ideal sustentable.

El 77% de las publicaciones consideran la energía eólica y fotovoltaica como un conjunto sinérgico y significativo dentro de las fuentes renovables. También se puede observar que esas investigaciones involucran diferentes tipos de metodologías MCDM (TOPSIS, AHP, PROMETHEE II y VIKOR), y MODM (CSA, MOGLP, SFLA). El 56% aplicó las metodologías MCDM, más frecuentemente TOPSIS.

Tabla 4.1 Herramientas MCDM y MODM más empleadas en proyectos que involucran ER.

MCDM		MODM	
AHP	13	DEA	1
ANP	2	GA	3
VIKOR	3	MILP	2
GP	1	COPRAS	1
PROMETHEE	2	SFLA	1
ELECTRE	2	MOGLP	1
TOPSIS	8	CSA	1
MAUT	1	NSGA	2
CODAS	1	MIQP	1
DEMANTEL	1	MOEA	1
MABAC	1	REMM	1
SIR	1	-	-
SDSS	1	-	-
TOTAL	37	TOTAL	15

*Significado de las herramientas MCDM y MODM en la Tabla de acrónimos y siglas.

Los resultados presentados anteriormente en la Tabla 4.1 coinciden con la frecuencia de aplicación de esta metodología, debido a que la metodología TOPSIS es una de las herramientas más utilizadas en el campo de investigación de proyectos de sistemas de ER.

Cada metodología tiene sus propias ventajas y desventajas, que se resumen más adelante en la Tabla 4.2.

Las metodologías analizadas anteriormente se aplicaron en su estructura original, por estar aún vigentes, como se observa en el año de la publicación. La compleja implementación de las metodologías MCDM es un factor negativo, pues existen otras opciones más simples que pueden arrojar resultados similares, con una implementación más sencilla, menos requisitos y un tiempo de cálculo más corto. Además, como sugirieron algunos autores (Connolly et al., 2010 [188]), los resultados que arroja una metodología deben ser corroborados utilizando otra metodología MCDM que coincida, y si no, una tercera para definir con dos de los tres resultados. En algunas ocasiones las tres herramientas pueden dar lugar a diferencias en los primeros lugares, sin embargo, el uso de tres herramientas permite acotar la solución hacia la alternativa que se encuentre en los primeros lugares, y descartar las alternativas que aparezcan en los últimos lugares en alguna de las soluciones. A continuación, se presentan los algoritmos de cálculo de las metodologías seleccionadas para los cálculos a realizar en la presente investigación. Las tres metodologías requieren como entradas las alternativas que se van a comparar por medio del análisis multicriterio, y los múltiples criterios de comparación, previamente ponderados y normalizados. Con lo anterior se construyen la matriz decisional, el vector de pesos y el vector de conveniencia, que son las tres entradas para cualquiera de las tres metodologías. La matriz decisional tiene dimensiones $m \times n$, no tiene que ser cuadrada, y en el caso que lo sea, no hay inconveniente. El vector de pesos es de dimensiones $1 \times n$, y de igual manera para el vector de conveniencia o beneficio. Para este último, los elementos solo pueden tomar los valores de 1 y -1 según si el criterio es beneficioso con su incremento o no beneficioso.

Tabla 4.2 Ventajas y desventajas de las MCDM más populares en el diseño de sistemas híbridos.

MCDM	Ventajas	Desventajas	Elegido porque:
PROMETHEE II [57]	Involucra todos los niveles de toma de decisiones	No estructura el objetivo de manera adecuada	Toma en cuenta las preferencias de los decisores
	Puede tomar en cuenta indicadores cualitativos y cuantitativos	Es complejo, los usuarios deben ser expertos	Define la mejor solución entre las alternativas
	Incorpora información sobre incertidumbre y difusividad	La ponderación de los pesos depende de los decisores	
VIKOR [56]	Es una versión mejorada de TOPSIS	En situaciones de conflicto se presentan dificultades	Toma en cuenta las preferencias de los principales decisores
	Calcula la relación de las respuestas positivas y negativas, reduciendo el sesgo.	Requiere modificaciones cuando los datos son similares, presenta dificultades para modelado en tiempo real	
TOPSIS [69]	Establece el orden fundamental	Principios de distancias Euclidianas que no diferencian entre valores positivos y negativos	Permite la implementación de 13 criterios de sustentabilidad
	Utiliza toda la información disponible	Los valores de los atributos pueden ser monótonamente crecientes o decrecientes	Permite la construcción de matrices extensas
	La información requerida no es independiente		
AHP [74]	Adaptable	La independencia entre los resultados y las alternativas puede derivar en resultados riesgosos	Es la herramienta más popular en el campo de las RE
	No requiere matemáticas complejas	Cuando se involucran muchos actores, la ponderación de los pesos es un proceso complejo	Es el modelo más popular en la administración de investigaciones científicas y sus aplicaciones
	Estructura jerárquica donde los criterios están bien enfocados y se manejan de manera transparente	Requiere recolección de datos basados en la experiencia	

4.1.1 Algoritmo de la metodología AHP

El AHP fue postulado por Tomas Saaty en 1980 [189]. En una publicación de Mastrocinque de 2020 [190], plantean que el método AHP es una técnica MCDM ampliamente empleada por su facilidad de implementación. Recientemente se ha aplicado para resolver problemas complejos de toma de decisiones. La metodología consiste en estructurar el problema de decisión en diferentes niveles de jerarquía como la meta principal, las principales dimensiones, los subcriterios y alternativas, seguido por la comparación por pares a cada nivel. Una vez definida la estructura, los expertos o interesados, comparan cada dimensión contra las demás usando la escala de nueve puntos de Saaty [189], como se expresa en la Tabla 4.3. El mismo procedimiento se repite para los subcriterios que se comparan con respecto a la dimensión principal. Finalmente, las alternativas se comparan con respecto a cada subcriterio [190].

Tabla 4.3 Escala de nueve puntos para comparación pareada de importancia entre criterios.

Nombre corto	Intensidad	Definición	Explicación
IGUAL	1	Igual importancia	Las dos características contribuyen de igual manera al objetivo
MODERADA	3	Importancia moderada sobre los demás	La experiencia y el juicio están a favor de uno más que del otro
FUERTE	5	Importancia fuerte o esencial	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de uno más que del otro
MUY FUERTE	7	Importancia muy fuerte	Un criterio es fuertemente favorecido y su dominancia puede ser demostrada en la práctica
EXTREMA	9	Extrema importancia	Uno de los criterios es fuertemente favorecido sobre otro, en orden alto de afirmación
ADYACENTES	2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se requiera su aplicación

Los valores intermedios (2, 4, 6, 8) se emplean para juicios intermedios entre los números de la Tabla 4.3.

Para comparar el conjunto de criterios por pares, de acuerdo con los pesos de importancia relativa, se emplea la matriz de comparación por pares de acuerdo con la siguiente estructura:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & - & \vdots & - & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & - & \vdots & - & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1, a_{ij} = 1/a_{ij}, a_{ij} \neq 0 \quad (4.1)$$

Donde los criterios se denotan por a_1, a_2, \dots, a_n . La importancia relativa de dos criterios se califica con los dígitos 1, 3, 5, 7 y 9, según la Tabla 4.3. Los pesos comparativos se derivan para encontrar el eigenvalor (o valor propio) w con respecto a λ_{max} que satisface $Aw = \lambda_{max}w$, donde λ_{max} es el mayor vector propio de la matriz A . Aquí, el vector propio con respecto a λ_{max} se encuentra con la condición $(A - \lambda_{max}I)w = 0$. Se procede como exponen Dong y Saaty (2014, [191]):

Paso 1: Agregación del grupo AHP con la media geométrica ponderada. Por simplicidad, se usa $N=\{1,2, \dots,n\}$, $M=\{1,2, \dots,m\}$ para denotar los conjuntos de elementos. Para un conjunto finito de alternativas $X=\{x_1,x_2, \dots,x_n\}$, con un vector de prioridad que se denota por $w=(w_1,w_2, \dots,w_n)^T$, donde $w_i \geq 0$, y $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Entonces la información de los juicios se representa como una matriz de comparación por pares $n \times n$ (MCP) $A = (a_{ij} = w_i/w_j)_{n \times n}$, donde $a_{ij} = 1/a_{ji}$, y a_{ij} pertenece a la escala de 9 puntos y representa la importancia relativa o dominancia de x_i sobre x_j . Se asume que existen m tomadores de decisiones DM_1, DM_2, \dots, DM_m cada uno de ellos propone una matriz de comparación pareada $A_k = (a_{ij(k)})_{n \times n}$, para $k \in M$, y con $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T$ el vector de pesos o vector de importancia para los decisores, donde $\rho_k \geq 0, \sum_{k=1}^m \rho_k = 1, \dots, m$. Entonces, por agregación con la media geométrica de los pesos, el grupo de MCP $G = (g_{ij})_{n \times n}$ puede calcularse como:

$$G_{ij} = \prod_{k=1}^m (a_{ij(k)})^{\rho_k} \quad i, j \in N \quad (4.2)$$

Paso 2: Consistencia individual y grupal de las MCP: La consistencia es un concepto definido que describe y refleja la calidad de una MCP, lo cual es un aspecto crítico en AHP. Como lo definió Saaty en 1977 [192], una MCP es consistente si

$$a_{hi} = a_{hj}a_{ji} \quad h, i, j \in N \quad (4.3)$$

Sin embargo, en una situación de decisión de la vida real, la consistencia es difícil de lograr porque un mínimo de inconsistencia refleja que las personas están tomando una decisión con nueva información que puede no entenderse completamente y no es consistente con lo que ya se conocía. Además, cuando un conjunto de comparaciones es demasiado inconsistente, también se podría haber utilizado entradas aleatorias y la información de las comparaciones no sería útil. Para proporcionar un equilibrio, Saaty [189] definió el índice de consistencia como:

$$CI_A = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (4.4)$$

Donde λ_{max} es el mayor o principal vector propio de la matriz A. Para medir la inconsistencia de A, se tiene la relación de consistencia

$$CR_A = \frac{CI_A}{RI_n} \quad (4.5)$$

RI_n es la consistencia aleatoria promedio y se deriva de la aleatoriedad promedio generada por una MCP $n \times n$, es determinada para las diferentes dimensiones de las matrices, y su valor es de 1.25 para una matriz de 6x6 (ver en Tabla 4.4 los valores para otras dimensiones). En general si CR_A es menor que 0.1, se puede decir que A es aceptablemente consistente.

Tabla 4.4 Índice de consistencia aleatoria [189].

n	RI
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.11
6	1.25
7	1.35
8	1.4
9	1.45
10	1.49

Una vez agregados los juicios individuales, se enfrentan a la inconsistencia de la MCP (Matriz de comparación pareada o por pares) grupal. Posterior a las investigaciones de otros autores, Grošelj and Zadnik Stirn (2012, [193]) concluyeron que si los índices de consistencia individuales son aceptables también lo será el índice de consistencia de la matriz G. De esta manera, asegurando la consistencia de cada MCP individual se asegura la consistencia de la matriz resultante G. A continuación, se siguen los pasos a partir de que se obtiene el consenso de grupo sobre la MCP.

Como se mencionó anteriormente, para conformar la MCP $n \times n$ para varios criterios, se tiene $G = P$, donde los valores P_{ij} , contienen las preferencias de los puntajes del criterio i respecto al criterio j. Donde para todos los elementos debe cumplirse que $P_{ij} \cdot P_{ji} = 1$ [194].

Paso 3: Establecer la matriz normalizada. La MCP normalizada se denota por \bar{m} , para la cual la suma de cada columna debe ser igual a 1. Esto se puede obtener usando la ecuación 4.6 por \bar{P}_{ij} para cada entrada de la matriz \bar{m} .

$$\overline{P}_{IJ} = \frac{P_{IJ}}{\sum_{l=1}^n P_{Ij}} \quad (4.6)$$

Paso 4: Vector de pesos ponderados: Se calcula el promedio para cada fila para obtener los pesos relativos, usando la ecuación 4.7. Para cada elemento, el peso relativo debe estar en el rango de 0 a 1; un peso mayor es evidencia de una mayor influencia del criterio para la toma de decisiones.

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \overline{P}_{Ij}}{n} \quad (4.7)$$

Paso 5: Priorización global y decisión final (PGDF): Para obtener finalmente, la lista de las alternativas en orden de prioridad se aplica la ecuación 4.8, se obtiene de la suma del producto de cada criterio (x_i) multiplicado por el correspondiente peso (w_i).

$$PGDF = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (4.8)$$

Los valores de PGDF calculados se enlistan en orden de mayor a menor y es así como se obtiene la clasificación de las alternativas en orden de puntuación, aplicando la metodología AHP.

4.1.2 Algoritmo de la metodología VIKOR

El método VIKOR es una herramienta efectiva en situaciones donde el responsable de la toma de decisiones no puede o no sabe expresar sus preferencias hacia las alternativas. La solución de compromiso obtenida podría ser aceptada por el tomador de decisiones porque proporciona una utilidad máxima de grupo (representado por la alternativa con el min S) y un arrepentimiento individual mínimo (representado por la alternativa con el min R) [195].

La aplicación de VIKOR implica que [196]:

- Una solución compromiso es aceptable para la resolución de conflictos.
- El responsable de la toma de decisiones está dispuesto a aprobar la solución más cercana al ideal.
- Existe una relación lineal entre cada función de criterio y la utilidad de un decisor.
- Los criterios son conflictivos y no conmensurables (unidades diferentes).
- Las alternativas se evalúan según todos los criterios establecidos (matriz de rendimiento).
- La preferencia del tomador de decisiones se expresa mediante pesos, dados o simulados.
- El método se puede iniciar sin la participación interactiva del tomador de decisiones, pero este es el encargado de aprobar la solución final y se debe incluir su preferencia.
- La solución de compromiso propuesta (uno o más) tiene una tasa de ventaja.

- Un análisis de estabilidad determina los intervalos de estabilidad de peso.

La lista de clasificación de compromiso para un v (veto: importancia relativa de la utilidad máxima de grupo frente al mínimo arrepentimiento individual) dado se obtiene clasificando las alternativas en función de las medidas de Q_j . La mejor alternativa, clasificada por Q_j , es la que tiene el valor mínimo de Q_j .

Se propone como una solución compromiso, a la alternativa mejor clasificada por la medida Q_j , si se cumplen la condición de ventaja aceptable y la condición de estabilidad aceptable en la toma de decisiones. Si alguna de estas condiciones no se satisface debe proponerse un conjunto de soluciones compromiso [196].

Para explicar este algoritmo remitirse a San Cristóbal (2011, [197]) en donde plantean que dentro del método VIKOR, las diferentes alternativas J se denotan como a_1, a_2, \dots, a_j . Para la alternativa a_j el puntaje del aspecto i -ésimo se denota por f_{ij} , por ejemplo, el elemento f_{ij} es el valor del i -ésimo criterio en función de la alternativa a_j y n es el número del criterio. El algoritmo VIKOR [198] de clasificación compromiso se desarrolla con los siguientes cuatro pasos:

Paso 1: Determinar los mejores valores f_i^* y los peores valores f_i^- para todos los criterios en función de las alternativas $i=1, 2, \dots, n$. Si la i -ésima función representa un beneficio entonces $f_i^* = \max f_{ij}$ y $f_i^- = \min f_{ij}$, mientras que, si la i -ésima función representa un costo $f_i^* = \min f_{ij}$ y $f_i^- = \max f_{ij}$. Por ejemplo, los atributos de potencia, horas de operación, vida útil y toneladas de emisiones evitadas, son atributos beneficiosos y los valores altos son deseables. La tasa de inversión, el periodo de implementación, y los costos de operación y mantenimiento son atributos no beneficiosos y por tanto son deseables los valores bajos.

Paso 2: Calcular los valores de S_j y R_j , para $j=1, 2, \dots, J$ empleando las expresiones:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (4.9)$$

$$R_j = \max_i [w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)] \quad (4.10)$$

Donde w_i son los pesos de los criterios, expresando las preferencias de los tomadores de decisiones como la importancia relativa de los criterios. Es recomendable verificar que la relación de consistencia sea menor que 0.1.

Paso 3: Calcular los valores de Q_j , empleando la siguiente expresión:

$$Q_j = v(S_j - S^*)/(S^- - S^*) + (1 - v)(R_j - R^*)/(R^- - R^*) \quad (4.11)$$

Donde,

$$S^* = \min_j S_j \quad R^* = \min_j R$$

$$S^- = \max_j S_j \quad R^- = \max_j R$$

Y v (el veto) se introduce como un peso para la estrategia de grupo de máxima utilidad, mientras que $(1 - v)$ es el peso individual de rechazo. El valor de v generalmente se toma como 0.5, sin embargo, v puede tomar cualquier valor entre 0 y 1.

Paso 4: Ordenar las alternativas, según los valores de S, R y Q en orden descendiente. Los resultados son tres listas de clasificación (o ranquin). La propuesta toma a $A^{(1)}$ como la solución compromiso, la cual es la mejor clasificada por el valor mínimo de Q, si las siguientes dos condiciones se cumplen:

- a. Ventaja aceptable. $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$, donde $DQ = 1/(J - 1)$ y $A^{(2)}$ es la alternativa en la segunda posición en el ranquin de la lista de Q;
- b. Estabilidad aceptable en la toma de decisión. La alternativa $A^{(1)}$ debe ser la mejor clasificada por S o R, o por ambas. Esta solución compromiso es estable dentro del proceso de decisión, el cual podría ser la estrategia del grupo de mayor utilidad (es necesario cuando $v > 0.5$), o “por consenso” ($v \approx 0.5$), o con veto cercano a cero ($v \approx 0.5$).

Si una de las condiciones no se cumple, entonces un conjunto de soluciones compromiso surge, el cual consiste en:

- c. Las alternativas $A^{(1)}$ y $A^{(2)}$ solo si la condición b no se cumple, o
- d. Las alternativas $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$ si la condición a no se cumple. $A^{(M)}$ se determina por la relación $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$ para el n máximo (las posiciones de estas alternativas están en “las cercanías”).

La clasificación de las alternativas por el método VIKOR no da, como solución compromiso y para todos los valores considerados de v , a la alternativa A_{12} .

4.1.3 Algoritmo de la metodología TOPSIS

Para explicar este algoritmo remitirse a Caliskan (2013, [199]) en donde plantean que el método TOPSIS se emplea para una solución, la cual es la más cercana a la solución ideal y la más lejana a la

solución no ideal o ideal negativa [200]. Este método requiere de información sobre la importancia relativa de las propiedades (criterios) que se consideran en el proceso de selección.

El método TOPSIS consiste en los siguientes 7 pasos:

- a. La normalización de la matriz de decisiones se realiza usando la siguiente ecuación:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \text{ con } j=1, 2, \dots, m \quad (4.12)$$

- b. Las columnas de la matriz de decisiones normalizada, se multiplica por el vector de pesos asociados, w_j , obtenidos como resultado de la ponderación de pesos. Y la matriz de decisiones normalizada y ponderada se obtiene por la siguiente ecuación;

$$V_{ij} = n_{ij}w_j \quad j=1,2, \dots,n \quad i=1,2, \dots,m \quad (4.13)$$

- c. La solución ideal y la no ideal se determinan usando las siguientes expresiones respectivamente:

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} = \{(\max_i V_{ij} | j \in K), (\min_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m \} \quad (4.14)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} = \{(\min_i V_{ij} | j \in K), (\max_i V_{ij} | j \in K') | i = 1, 2, \dots, m \} \quad (4.15)$$

Donde K es el conjunto de índices de beneficio de los criterios y K' es el conjunto del costo de los criterios.

- d. Medir las distancias a la solución ideal y a la solución anti-ideal. Las dos distancias Euclidianas para cada alternativa se calculan según las siguientes expresiones:

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0.5} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.16)$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0.5} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.17)$$

- e. La cercanía relativa a la solución ideal se calcula como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (4.18)$$

Los valores mayores de C_i indican un mejor lugar en la clasificación.

4.2 Criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo de sistemas híbridos de generación de energía.

Entre los criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo de sistemas híbridos de energía se encuentran diferentes características económicas, técnicas, ambientales, sociales e institucionales. Cada autor o grupo de investigación, plantea una lista diferente de criterios de sustentabilidad en dependencia de la información disponible, de cuales criterios aportan para hacer diferencia entre las alternativas, entre otros. La clasificación de estos criterios en sus diferentes dimensiones también es diferente entre una escuela y otra, por ejemplo, el ciclo de vida o tiempo de vida útil, que en ocasiones se clasifica en la dimensión técnica [201] y en otras ocasiones en la dimensión económica [202]. Las diferentes investigaciones relacionadas con el diseño de sistemas energéticos renovables que se analizaron emplean criterios de sustentabilidad económicos, técnicos [203] y ambientales [204]. En menor medida se encuentran estudios donde tienen en cuenta también los criterios sociales [205, 206]; y son muy pocos los estudios que involucran criterios institucionales, cuando se ha demostrado la importancia del apoyo de las normativas e instituciones para el éxito de los sistemas de generación a partir de ER [207]. Otros autores toman en cuenta otras dimensiones tales como el riesgo [202] y los recursos [201].

Aplicando el primer paso de la metodología desarrollada en la sección 3.2, a partir de una amplia revisión bibliográfica se encontró un listado de diversos tipos de proyectos relacionados con la aplicación de las metodologías multicriterio a las ER, de los cuales 50 de 62 mencionan los criterios de sustentabilidad aplicados en el estudio. Para cada una de las publicaciones se reportó la dimensión de los criterios empleados y se encontró que 47 tomaron en cuenta criterios económicos, 48 los criterios ambientales, 45 los criterios técnicos, 32 los criterios sociales, solamente 2 los criterios institucionales y 2 otras dimensiones; cómo se puede visualizar en la Figura 4.1.

Continuando al segundo paso, se seleccionaron los documentos donde se encuentran reportados los valores para los diferentes criterios de sustentabilidad, entre los cuales Figuran los trabajos desarrollados por Troldborg [43], Rojas [44], Purwanto [48]. Por su parte, Wang [42] realizó una revisión muy completa en la cual obtuvo una lista de 25 criterios entre económicos, técnicos, ambientales y sociales, de los cuales reporta las fuentes donde se amplía la información para cada uno; esta referencia es de gran utilidad para ampliar la información sobre algún criterio que se desee emplear en estudio en particular.

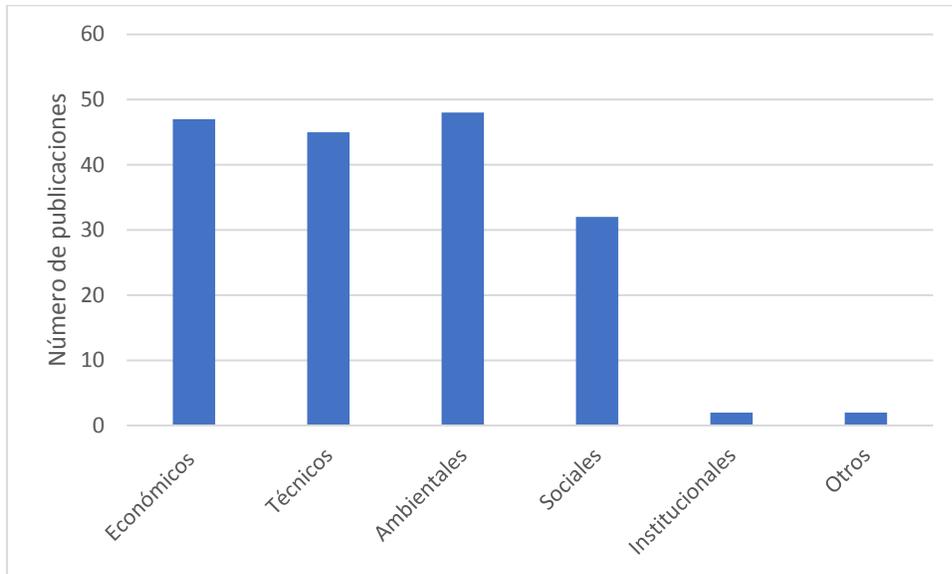


Figura 4.1 Dimensiones de la sustentabilidad presentes en los estudios de los sistemas renovables.

De la misma revisión bibliográfica, también se obtuvo la distribución geográfica por continentes de las publicaciones que emplearon criterios de sustentabilidad para el desarrollado de los estudios en ER. En la Figura 4.2 se puede observar esta distribución.

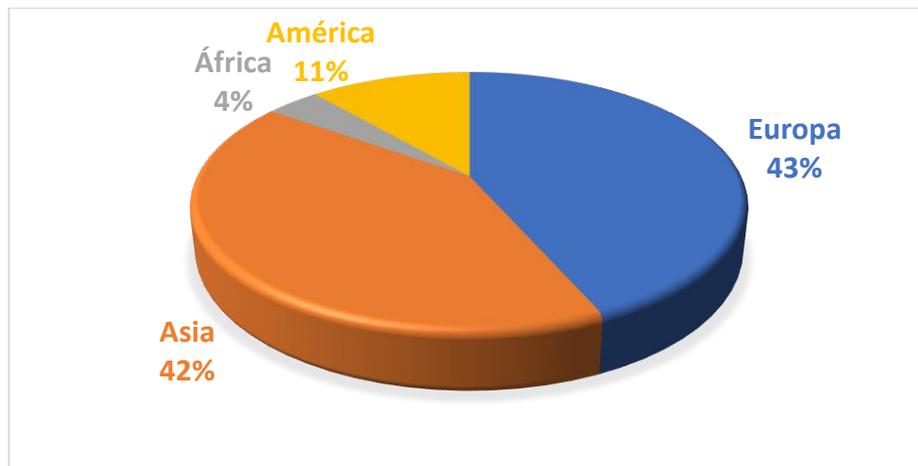


Figura 4.2 Distribución geográfica de estudios de sustentabilidad en sistemas energéticos renovables.

El 43% de los estudios han sido desarrollados en Europa, continente conformado por países considerados de primer y segundo mundo. En segundo lugar, con el 40% de las publicaciones, se encuentra Asia, que es un continente donde la mayoría de sus países son de segundo mundo y algunos de tercer mundo. América aportó el 11% de las publicaciones analizadas, y cuenta con países

considerados de primer (USA) y tercer mundo (México, Cuba, Chile, Colombia, Venezuela). Y solo el 4% fue aportado por África, continente conformado por países considerados como de tercer mundo. Es importante resaltar que las ER han mostrado ser un camino para mejorar las condiciones de vida y salud, en las regiones remotas, característica que permitiría mejorar los índices de desarrollo humano en los países en vías de desarrollo.

4.2.1 Criterios de sustentabilidad para sistemas energéticos renovables

Aplicando los pasos 3 y 4 de la metodología, se identificaron 19 indicadores comúnmente empleados en los proyectos que se llevaron a cabo en países desarrollados como el caso de España, Escocia y otros países europeos. A continuación, se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Criterios de sustentabilidad empleados en países desarrollados.

No	Criterio	Abrev	Tipo	Unidades
1	Costo nivelado de la energía	LEC	Económico	\$/kWh
2	Costo presente neto	NPC	Económico	\$
3	Costo variable de operación y mantenimiento	VCOM	Económico	\$/año
4	Potencial de generación de energía	PGE	Técnico	Wh/año
5	Madurez tecnológica	MT	Técnico	Adimensional
6	Confiabilidad en el suministro de energía	CSE	Técnico	Adimensional
7	Energía no servida	ENS	Técnico	Wh/año
8	Coeficiente de eficiencia de conversión de energía	CE	Técnico	%
9	Disponibilidad de energía para suplir la demanda primaria	APES	Técnico	%
10	Emisiones de GEI	GEI	Ambiental	g CO ₂ eq/kWh
11	Emisiones de CO ₂	ECO2	Ambiental	Tons/año
12	Emisiones de lluvia ácida (SO ₂)	ESO2	Ambiental	kg/año
13	Emisiones de Eutrofización (NO _x)	ENOX	Ambiental	kg/año
14	Impacto a la calidad de vida	IOA	Ambiental	Adimensional
15	Requerimiento de área/uso de tierras	AR	Ambiental	m ² /kW
16	Creación de empleos	CI	Social	empleos/año
17	Índice de desarrollo humano	HDI	Social	Adimensional
18	Contribución a la economía	CAE	Social	Adimensional
19	Aceptación social	SAP	Social	Adimensional

Se pueden visualizar los 19 criterios mencionados, así como su abreviatura, clasificación por dimensiones y unidades. De la misma manera, se obtuvo un listado de los criterios de sustentabilidad más empleados en estudios realizados en países en vías de desarrollo, y su clasificación, el cual se presenta en la Tabla 4.6, con las mismas columnas que la Tabla 4.5:

Tabla 4.6 Criterios de sustentabilidad empleados en países en vías de desarrollo.

No	Criterio	Abrev	Tipo	Unidades
1	Capital de inversión	ECI01	Económico	\$/kWh
2	Costos de operación y mantenimiento	ECI02	Económico	\$/kWh
3	Costo del combustible	ECI03	Económico	\$/kWh
4	Rentabilidad	ECD1	Económico	%
5	Repartición de beneficios destinados a la reinversión	ECD2	Económico	%
6	Tarifas retrasadas	ECD3	Económico	%
7	Parte de electricidad consumida por negocios	ECD4	Económico	%
8	Proporción de hogares electrificados que usan electricidad para actividades generadoras de ingresos	ECD5	Económico	%
9	Desarrollo de negocios	ECD6	Económico	Cantidad
10	Factor de capacidad	TND1	Técnico	%
11	Compatibilidad con la red a futuro	TND2	Técnico	si/no
12	Operación diaria del servicio	TND3	Técnico	H
13	Disponibilidad de servicios	TND4	Técnico	%
14	Energía disponible	TEI01	Técnico	Wh/kW/año
15	Eficiencia en la conversión de la energía	TEI02	Técnico	%
16	Confiabilidad del sistema	TEI03	Técnico	Adimensional
17	Emissiones de GEI	EN01	Ambiental	g CO ₂ eq/kWh
18	Uso de tierra	EN02	Ambiental	m ² /kW
19	Proporción de energía renovable en la producción	END1	Ambiental	%
20	Proporción de hogares electrificados donde la electricidad ha sustituido a otra fuente de energía para la iluminación	END3	Ambiental	%
21	Proporción de hogares electrificados donde la electricidad ha sustituido a otras fuentes de energía para cocinar comidas principales	END4	Ambiental	%
22	Cualquier impacto ambiental serio identificado	END5	Ambiental	si/no
23	Condiciones meteorológicas extremas	END6	Ambiental	Veces
24	Proporción de centros de salud y escuelas con electricidad	SOD1	Social	%

25	Número de farolas en la zona	SOD2	Social	farolas
26	Posibilidades de microcrédito disponibles para la conexión de servicios de electricidad	SOD3	Social	%
27	Porcentaje de población con educación primaria	SOD4	Social	%
28	Porcentaje de la población con acceso a la electricidad	SOD5	Social	%
29	Subvenciones para servicios de electricidad	SOD6	Social	%
30	Participación de los niños económicamente activos	SOD7	Social	%
31	Generación de empleo local	SO01	Social	Personal/MW instalado
32	Compatibilidad de la tecnología con los usuarios	SO02	Social	Adimensional
33	Capacidad requerida para la operación y administración	INI01	Institucional	Adimensional
34	Rotación de personal en la organización	IND2	Institucional	%
35	Número de años en el negocio	IND3	Institucional	año
36	Participación de pérdidas no técnicas	IND4	Institucional	%
37	Nivel de satisfacción con los servicios energéticos	IND5	Institucional	%
38	Auditoría de los informes financieros anuales	IND6	Institucional	Frecuencia

Los estudios realizados en países en vías de desarrollo cuentan con la característica que requieren mayor cantidad de criterios de sustentabilidad, ya que frecuentemente existen carencias que en los países desarrollados se dan por hecho. Partiendo de una lista de 19 criterios se llega a una lista de 38. Al tenerse una gran cantidad de criterios se dificultan, tanto el análisis y como la aplicación de las metodologías de análisis multicriterio. Por lo anterior se procede, según los pasos 5 y 6 de la metodología; a unificar las Tablas 4.5 y 4.6 para obtener la Tabla 4.7, en la cual se enlistan los criterios de sustentabilidad, su clasificación por dimensiones, y la fuente de obtención de dicho elemento. Por ejemplo, algunos criterios se pueden calcular por medio de expresiones matemáticas, otros se pueden tomar directamente de la matriz de resultados que se obtiene con un software comercial como el HOMER; y otros que pueden ser tomados de estudios similares o estimados a partir de métodos planteados en las referencias sugeridas.

De esta manera se obtuvo un listado de 34 criterios de sustentabilidad que son la base para seleccionar aquellos que apliquen un caso de estudio en particular de análisis multicriterio de sistemas energéticos a partir de ER.

Tabla 4.7 Listado de criterios de sustentabilidad para el contexto de países en vías de desarrollo.

No	Criterio	Tipo	Fuente	Referencia
1	Inversión de capital	Económico	Calcular	Ray, 2018 P. 1333
2	Costos de operación y mantenimiento	Económico	Estudios	Vishnupriyan, 2018 P. 480 [208]
3	Costo del combustible	Económico	Real	Estimar real
4	Costo nivelado de energía	Económico	HOMER	Vishnupriyan, 2018 P. 480
5	Costo presente neto total	Económico	HOMER	Vishnupriyan, 2018 P. 480
6	Rentabilidad	Económico	Calcular	Purwanto, 2016 P. 318
7	Hogares electrificados que generan ingresos	Económico	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
8	Desarrollo de negocios	Económico	Estudios	Purwanto, 2016
9	Potencial energético disponible	Técnico	HOMER	Estimar real
10	Madurez tecnológica	Técnico	Estudios	Troldborg, 2014 P. 1177
11	Confiabilidad en el suministro de energía	Técnico	HOMER	Vishnupriyan, 2018 P. 480
12	Energía no servida	Técnico	HOMER	Rojas, 105 P. 568
13	Coefficiente de eficiencia de conversión de energía	Técnico	Calcular	Rojas, 105 P. 568
14	Disponibilidad de energía para suplir la demanda primaria	Técnico	HOMER	Rojas, 105 P. 568
15	Compatibilidad con la red a futuro	Técnico	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
16	Emisiones de GEI	Ambiental	HOMER	Troldborg, 2014 P. 1177
17	Impacto a la calidad de vida (ruido, impacto visual)	Ambiental	Estudios	Troldborg, 2014 P. 1177
18	Requerimientos de área/uso de tierras	Ambiental	Calcular	Troldborg, 2014 P. 1177
19	Fracción de energía renovable	Ambiental	HOMER	Vishnupriyan, 2018 P. 480
20	Hogares electrificados donde han sustituido la fuente para iluminación	Ambiental	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
21	Hogares electrificados donde han sustituido la fuente para cocinar	Ambiental	Estudios	Purwanto, 2016 P.315

22	Cualquier impacto en la flora y la fauna	Ambiental	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
23	Condiciones meteorológicas extremas	Ambiental	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
24	Centros de salud y escuelas con electricidad	Social	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
25	Número de farolas en la zona	Social	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
26	Porcentaje de la población con acceso a la electricidad	Social	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
27	Porcentaje de población con educación primaria	Social	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
28	Participación de los niños económicamente activos	Social	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
29	Creación de empleos	Social	Estudios	Rojas, 105 P. 567
30	Aceptación social	Social	Estudios	Troldborg, 2014 P. 1177
31	Capacidad requerida para la operación y administración del sistema	Institucional	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
32	Repartición de beneficios destinados a la reinversión	Institucional	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
33	Disponibilidad de microcréditos para acceder a servicios de electricidad	Institucional	Estudios	Purwanto, 2016 P.315
34	Subsidios para servicios de electricidad	Institucional	Estudios	Purwanto, 2016 P.315

Las referencias citadas pueden tener valores puntuales empleados en dicho estudio, definiciones, o fórmulas matemáticas para la estimación de estos. En algunas referencias presentan las MCP que pueden servir de guía para evaluar la importancia de un criterio sobre otro, en un estudio de características similares. A continuación, se analizan tres de las técnicas más empleadas para la ponderación de los criterios de sustentabilidad seleccionados, disponibles, ya calculados o estimados.

4.2.2 Ponderación de pesos de los criterios

Los criterios relevantes en un problema decisorial pueden tener diferente importancia para el centro decisor. Este hecho hace que en muchos problemas decisoriales resulte necesario obtener unos pesos o indicadores de las preferencias relativas del centro decisor por unos criterios con respecto a

otros. Conviene indicar que, así como la tarea de normalizar criterios requiere exclusivamente una información de tipo técnico, la estimación de las preferencias relativas conlleva una fuerte carga subjetiva lo que hace necesario que para estimar dichos pesos preferenciales se tenga que interactuar de una manera u otra con el centro decisor [209]. La determinación de los pesos ponderados puede realizarse aplicando diversos métodos. Tres de los métodos más frecuentemente usados son: Pesos iguales, comparación pareada y SIMOS [42, 210]. Sin embargo, existen otros métodos usados con menor frecuencia, pero que permiten mayor interacción entre los criterios para enfatizar la importancia de unos criterios sobre otros, y en diferente medida.

4.2.2.1 Orden de importancia

La forma más sencilla de abordar esta tarea consiste en pedir al centro decisor que clasifique los criterios por orden de importancia (ODI). Es decir, si se tienen n criterios se solicita al centro decisor que asigne el número 1 al criterio que considere más importante, el número 2 al criterio siguiente en importancia hasta asignar el número n al criterio que considera menos importante. Los pesos compatibles con dicha información pueden obtenerse a partir de alguna de estas dos expresiones:

$$W_j = \frac{1/r_j}{\sum_{i=1}^n 1/r_i} \quad (4.19)$$

$$W_j = \frac{(n-r_j+1)}{\sum_{i=1}^n (n-r_i+1)} \quad (4.20)$$

donde r_j es el lugar o posición que ocupa el criterio j -ésimo en la clasificación establecida por el centro decisor. Con el procedimiento expuesto la suma de los pesos preferenciales obtenidos es igual a uno. Esta propiedad es bastante útil tanto para interpretar el significado de los pesos como para facilitar su uso por parte del centro decisor. Con este enfoque se tiene en cuenta que el criterio i -ésimo es preferido al criterio j -ésimo, pero no se tiene en cuenta en absoluto, la intensidad con la que el criterio i -ésimo es preferido al j -ésimo. Por otra parte, ordenar simultáneamente los n criterios es una tarea complicada para cualquier centro decisor, cuando el número n de criterios es elevado.

4.2.2.2 Comparación pareada

También denominada comparación por pares (CPP). Este tipo de dificultades pueden superarse recurriendo a un procedimiento sugerido por Saaty [192, 211] que constituye la base de la metodología multicriterio conocida como AHP. Este procedimiento requiere que el centro decisor realice la comparación simultánea de sólo dos objetivos. Es decir, el centro decisor ha de realizar una comparación de valores subjetivos por «parejas». Los valores numéricos que propone aplicar Saaty son los siguientes: (1) cuando los criterios son de la misma importancia; (3) moderada importancia

de un criterio con respecto a otro; (5) fuerte importancia; (7) demostrada importancia; y (9) extrema importancia. Asimismo, el autor sugiere valores intermedios para juicios de valor contiguos. Por ejemplo, con la aplicación de esta escala el centro decisor proporciona los valores subjetivos que Figuran en la matriz de la Tabla 4.3.

De esta manera se construye la matriz de comparación por pares, a partir de la cual se obtiene el vector de pesos ponderados del estudio, aplicando diferentes técnicas matemáticas, siendo una de ellas, la media geométrica de los elementos de cada fila de la matriz, según se establece en la ecuación 4.16:

$$w_j = (a_{1j} \times a_{2j} \times \dots \times a_{nj})^{1/n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.21)$$

Por ejemplo, si se desea obtener los pesos ponderados para un conjunto de 3 criterios, la comparación por pares tendría la siguiente estructura:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Y las 3 expresiones para calcular los pesos ponderados son:

$$w_1 = (a_{11} \times a_{12} \times a_{13})^{1/3}$$

$$w_2 = (a_{21} \times a_{22} \times a_{23})^{1/3}$$

$$w_3 = (a_{31} \times a_{32} \times a_{33})^{1/3}$$

La sumatoria de los elementos del vector w_j debe ser igual a 1. Por lo tanto, se normaliza el vector de pesos por medio de la siguiente expresión (4.22):

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{n=1}^j w_j} \quad (4.22)$$

De esta manera se tiene listo el vector normalizado de pesos, por medio de la metodología CPP para la ponderación de pesos; y así, ser empleado en la herramienta de análisis multicriterio que se desee aplicar.

4.2.2.3 Asignación directa

La ponderación de los criterios también se puede establecer por medio de la asignación directa (AD), metodología en la cual, los pesos son asignados por la percepción del centro decisor, tomando como referencia la opinión de los expertos o los valores utilizados en estudios similares. Estos pesos se designan como $w_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, con n igual a la cantidad de criterios [212]. Después de establecer este vector se procede a su normalización, empleando la ecuación (4.22) presentada en

la anterior sección. Este es un método sencillo en el cual se permite reflejar la percepción del centro decisor y los expertos en cuanto a la importancia de un criterio sobre otro, así como la magnitud de esta importancia percibida. De esta manera se tiene listo el vector normalizado de pesos, por medio de la metodología de AD para la ponderación de pesos; para ser empleado en la herramienta de análisis multicriterio que se desee emplear.

4.3 Descripción de la metodología de optimización y del software desarrollado.

En esta sección se explicará de manera clara la metodología obtenida como resultado de la tercera fase de la investigación y como respuesta al tercer objetivo. Ésta se desarrolla en tres pasos generales: el primero, es la generación de alternativas empleando el software comercial HOMER; El segundo, es la construcción de la matriz decisional, la obtención del vector de pesos y del vector de conveniencia (o beneficio); y el tercero, es la aplicación del software desarrollado para obtener las alternativas clasificadas en orden de puntaje. El software AMC3VAT (análisis multicriterio por 3 metodologías: VIKOR, AHP y TOPSIS), permite realizar la ponderación de pesos por los tres métodos expuestos anteriormente, en la sección 4.2. Además, permite la obtención de la clasificación de las alternativas empleando las tres diferentes herramientas de análisis multicriterio (VIKOR, AHP, TOPSIS), explicadas en la sección 4.1.

4.3.1 Esquema de la metodología obtenida

Siguiendo los pasos que se exponen a continuación, se obtiene una lista de clasificación de las diferentes alternativas posibles, para ayuda en la toma de decisiones al elegir entre una y otra opción, con el fin de cubrir la demanda energética de un emplazamiento determinado; a partir de la ubicación y la cantidad de energía requerida.

1. Optimización económica mediante HOMER (Enumeración completa)

Las entradas para este primer paso consisten en la ubicación del emplazamiento y la demanda energética que se requiere suplir. A partir de la ubicación se obtienen los recursos renovables disponibles y, a partir de la demanda se realiza el dimensionado de los sistemas energéticos que pueden suplirla. Adicionalmente, se requiere de otros datos referentes a las tecnologías que se pretende emplear para la transformación energética, tales como el costo aproximado, la capacidad nominal, la vida útil y otras características que se encuentran en las fichas técnicas de los equipos. También se definen las restricciones del sistema, por ejemplo, energía no servida, mínima fracción renovable, tiempo de autonomía, penalidades por contaminación, entre otras. Para ampliar información sobre la metodología para la optimización monocriterio con HOMER Pro, remitirse al ANEXO B.

De esta manera se obtiene un conjunto de alternativas técnicamente factibles, ordenadas por el valor calculado del NPC, variable que determina HOMER como función objetivo a optimizar. Estas alternativas son numerosas, y por tanto el análisis se restringe a las primeras alternativas de la lista, truncamiento que se lleva a cabo como se muestra en el paso 2.

2. Reducción de soluciones por truncamiento

Existen diferentes maneras de truncar una lista. Por ejemplo, se podría **tomar un número arbitrario** de soluciones, por ejemplo, las primeras 16. Otra forma podía ser que la lista se trunque cuando el NPC del i -ésimo elemento tenga un valor menor o igual que **n veces el NPC** de la primera alternativa. También pueden descartarse alternativas que no cumplan con algunas **restricciones** obtenidas de los cálculos de la optimización. De esta manera, se obtiene la lista truncada de alternativas en orden de NPC.

3. Selección de los criterios de sustentabilidad

Las entradas a este paso de la metodología son los criterios en listados en la Tabla 4.7 de la sección 4.2. De aquí se pueden seleccionar la cantidad de criterios que se consideren necesarios, de los cuales se disponga la información o pueda estimarse su valor a través de la opinión de expertos, cálculos o estudios similares. Estos criterios deben tener valores diferentes para las alternativas con el fin de favorecer a una y otra en ciertos aspectos. El software desarrollado permite n cantidad de alternativas, por m cantidad de criterios. Las limitaciones vienen dadas por la complejidad en el manejo de la información y la construcción de las matrices de decisión, cuando esta es de grandes dimensiones.

4. Construcción de la matriz decisional

Las entradas para este paso son la lista truncada de alternativas y los criterios seleccionados. Las alternativas se enlistan como vector vertical, de esta manera la primera columna de la matriz decisional estará compuesta por el valor puntual del NPC para cada una de ellas. En las siguientes columnas se añaden uno a uno, los criterios con un valor respectivo para cada una de las alternativas. De esta manera las alternativas cambian de fila en fila, mientras que los criterios cambian de columna en columna. Esta es una de las entradas al software desarrollado en la presente investigación, la cual debe ingresarse en una sola fila, en la primera página o ventana de la interfase del software. En la misma página debe ingresarse el vector de conveniencia, el cual se obtiene analizando el carácter beneficioso (b) o no beneficioso (nb) del criterio a medida que su valor se incrementa. Por ejemplo, el costo es no beneficioso (-1) y las emisiones evitadas son beneficiosas (1). Ambos elementos se ingresan como filas, usando comas para separar los elementos de las columnas y punto y coma para

separar las filas. Por ejemplo: (1,2,3;4,5,6;7,8,9) y (-1,1,1). La matriz y el vector deben tener el mismo número de columnas, tantas como criterios se hayan elegido para el análisis.

5. Ponderación de pesos

Para realizar la ponderación de pesos, se tomaron las metodologías expuestas en la sección 4.2.2 (ODI, CPP, AD). Para la metodología de **comparación pareada**, el centro decisor realiza la construcción de la matriz de comparaciones (Matriz Pareada), la cual se ingresa como fila en la casilla denominada Matriz de comparación, y después de cargar la información, ésta se puede visualizar debajo del título “Matriz pareada”, con el fin de verificar que la matriz fue correctamente ingresada, o en el caso contrario, realizar las correcciones pertinentes y cargarla de nuevo. Si no se quiere hacer uso de este método de ponderación se debe ingresar una matriz de unos, con las dimensiones $n \times n$, siendo n el número de criterios, esto con el fin de no generar errores en los cálculos del software.

Para establecer el orden de importancia el centro decisor debe definir este orden y construir el vector $1 \times n$, siendo n el número de criterios. Este vector debe ingresarse como vector fila separando sus elementos con comas, en la casilla marcada con Orden de importancia. Al cargar esta entrada, se observan los datos ingresados, como un vector columna, debajo del título “Vector ODI”. Si no se quiere hacer uso de este método de ponderación se debe ingresar un vector unitario de n elementos, siendo n el número de criterios, esto con el fin de no generar errores en los cálculos del software.

Y de manera similar, para aplicar el método de asignación directa, el centro decisor debe asignar los valores a cada criterio y así, construir un vector $1 \times n$, siendo n el número de criterios. Este vector debe ingresarse como vector fila separando sus elementos con comas, en la casilla marcada con Asignación directa. Al cargar esta entrada, se observan los datos ingresados, como un vector columna, debajo del título “Vector AD”. Si no se quiere hacer uso de este método de ponderación se debe ingresar un vector unitario de n elementos, siendo n el número de criterios, esto con el fin de no generar errores en los cálculos del software.

Cuando se tienen diligenciados los tres espacios: Matriz de comparación, Orden de importancia y Asignación directa, se procede a cargar los datos con un clic en el botón cargar. De esta manera se puede verificar que los datos fueron correctamente ingresados y se puede proceder al cálculo de los PP (pesos ponderados) PP CPP, PP ODI y PP AD; dando clic en el botón Calcular w_i . De esta manera se han ingresado las entradas requeridas para el software diseñado.

6. Aplicación de las herramientas de análisis multicriterio

Las herramientas multicriterio VIKOR, AHP y TOSIS, expuestas en la sección 4.1 se encuentran disponibles para ser utilizadas en el software AMC3VAT. En este momento y gracias a la aplicación

desarrollada, solo basta dar clic en uno, dos o tres de los botones para obtener los ránquines o clasificaciones por puntaje (Obtener ranquin CPP, ODI, o AD), por las 3 herramientas y si se desea por uno, dos o 3 métodos de ponderación de pesos. En adelante estos resultados se toman para su análisis y el uso del software concluye en este punto.

7. Análisis comparativo de resultados

Habiéndose obtenido los ránquines de las alternativas se cuenta con 3, 6, o 9 resultados, los cuales serán la entrada para el análisis comparativo de los resultados obtenidos. Lo ideal en este paso de la metodología, sería que todas las columnas tuvieran, en el primer o en los primeros lugares, a la misma o a las mismas alternativas. Por lo que se optó por tres métodos de ponderación y tres herramientas MCDM, para corroborar los resultados de una con las otras dos, o para hallar coincidencias entre dos de estas. Si el primer lugar es ocupado con la misma alternativa en la mayoría de los resultados, se obtiene la solución más cercana al ideal y así **concluye el proceso** de selección. En el caso contrario de no hallar concenso, o que los resultados sean poco coincidentes, se procede a realizar un **análisis de sensibilidad** sobre los pesos ponderados.

8. Análisis de sensibilidad de pesos ponderados

El análisis de sensibilidad variando los pesos ponderados permite verificar que las metodologías de ponderación empleadas den resultados coherentes para los diferentes resultados. Verificar la consistencia de los pesos obtenidos también es de gran importancia, ya que su inconsistencia, puede llevar a resultados erróneos. Para resolver la inconsistencia se ajustan los valores asignados a los pesos, bien sea por asignación directa o por comparación pareada.

Teniendo los nuevos vectores de peso, se procede a obtener un nuevo ranquin de las alternativas, regresando al paso 5, y siguiendo el procedimiento hasta que se llegue a un consenso en el paso 7.

Los pasos anteriormente descritos se pueden resumir de manera general en el diagrama de bloques de la Figura 4.3.

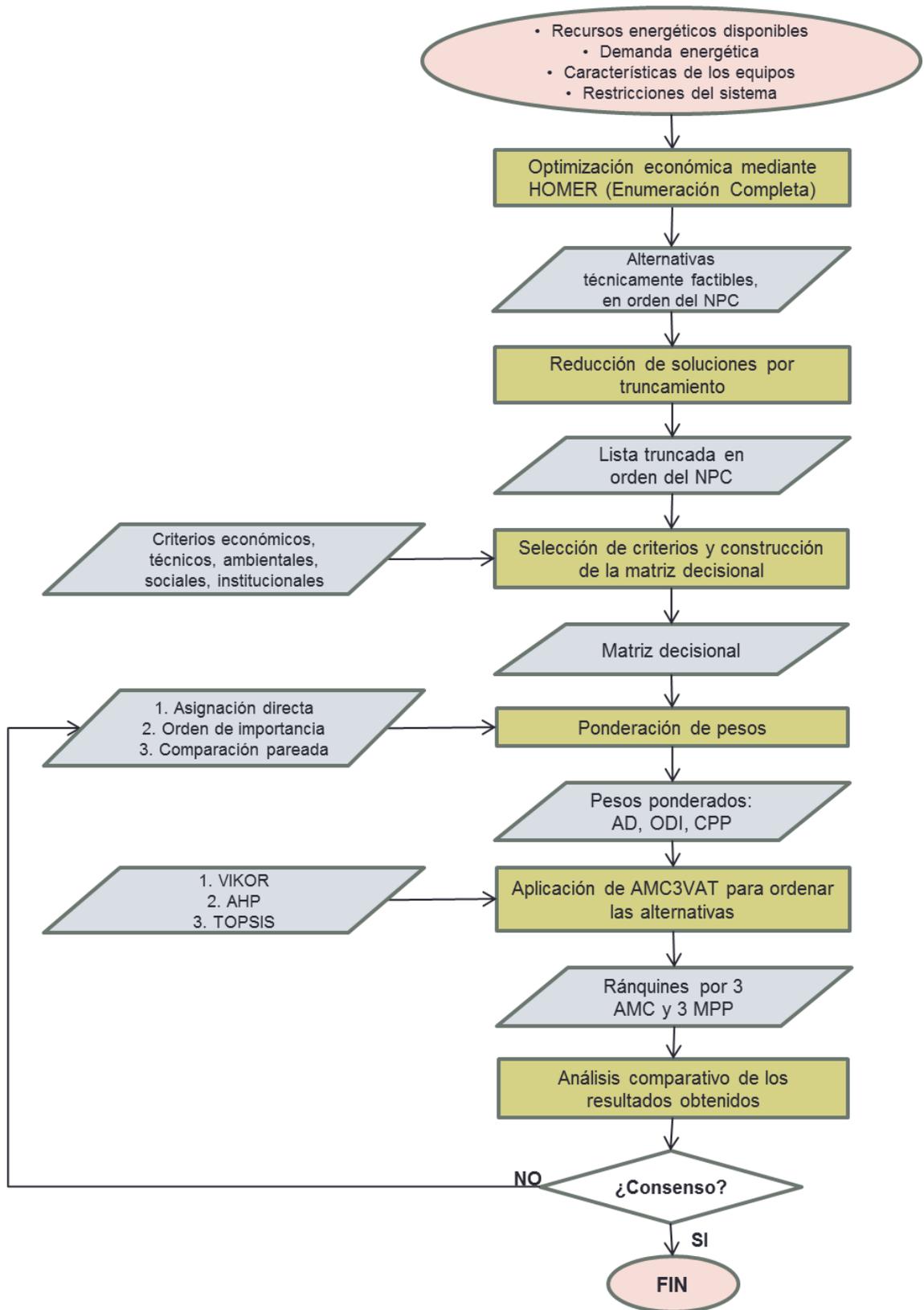


Figura 4.3 Diagrama de bloques para la aplicación de la metodología a un caso de estudio.

4.3.2 Esquema del desarrollo del software

Siguiendo los pasos que se exponen en la Figura 4.7, se realizó el diseño, programación y desarrollo del software propuesto (AMC3VAT), en la plataforma Scilab, con la correspondiente validación de los cálculos realizados, con el software Microsoft Excel. La plataforma Scilab fue seleccionada para el desarrollo de la herramienta, por las similitudes que tiene con MatLab con la ventaja de ser una plataforma de software de uso libre.

1. Preparación de algoritmos de las tres herramientas

Como resultado de la búsqueda bibliográfica, se identificaron diferentes referencias que presentan los modelos matemáticos con las expresiones requeridas para la construcción de los algoritmos de cálculo de las tres herramientas MCDM seleccionadas: VIKOR, AHP y TOPSIS. En la sección 4.1 se exponen dichos modelos.

2. Identificación de las entradas requeridas

A partir del análisis de los modelos y con el apoyo de las referencias que además de presentar los modelos, mostraban también una aplicación de los mismos, se identificaron las entradas requeridas para las tres herramientas, las cuales se componen de: Matriz de decisiones (de dimensiones $a \times c$, alternativas y criterios), vector de conveniencia ($1 \times c$, con “ c ” el número de criterios, valores permitidos 1 y -1) y las estimaciones para la ponderación de pesos, por una, dos o tres metodologías.

3. Metodologías para la ponderación de pesos

De manera complementaria, se realizó la búsqueda de diferentes metodologías de ponderación de pesos. Se seleccionaron CPP (comparación por pares, o pareada), ODI (orden de importancia) y AD (asignación directa) por su facilidad de implementación y uso intuitivo por parte del centro decisor.

4. Entradas para la ponderación de criterios

Se identificaron las entradas para cada una de las metodologías de ponderación de pesos de los criterios: CPP (matriz de comparación por pares, empleando la escala de nueve puntos de Saaty, que se reprodujo en la Tabla 4.3), ODI (vector de valores asignados según el orden de importancia de los criterios), AD (vector de valores asignados para cada criterio de manera arbitraria por el centro decisor).

5. Ingresar modelo completo y entradas en Excel

Para realizar el ingreso de los modelos en Excel se requiere de un ejemplo de aplicación, ya que las expresiones se construyen a partir de los datos ingresados en las casillas que se seleccionan como variables o parámetros de las ecuaciones. Por lo tanto, se seleccionaron tres publicaciones científicas

donde se desarrollaron ejemplos completos, aplicando las herramientas MCDM seleccionadas: VIKOR: (San Cristóbal, 2011, [197]), AHP: (Kumar, 2018 [204]) y TOPSIS: (Caliskan, 2013, [199]).

6. Diseño y programación en Scilab

Tomando en cuenta las expresiones y resultados obtenidos en Excel, se desarrollaron las rutinas correspondientes, adaptadas al modo de cálculo y generación de resultados de Scilab. Primero, se programaron las herramientas MCDM, y posteriormente las metodologías de ponderación de pesos. Se realizó en este orden para verificar el correcto funcionamiento de las herramientas, y posteriormente complementar los cálculos y opciones, con las metodologías de ponderación.

En este punto, se procede a comparar los resultados obtenidos para los ejemplos en Excel, Scilab y los reportados por los autores. Aplicando la ecuación 3.1 se obtiene el error absoluto de los cálculos. Si el error es mayor que $1e-7$ deben revisarse los cálculos realizados, regresando al paso 5. Si el error es menor o igual que $1e-7$ se considera como validado el cálculo realizado y se procede al paso 7.

7. Unificación de subrutinas y diseño de la interfaz

Con los cálculos validados, se procede a unificar las 6 rutinas (CPP, ODI, AD, VIKOR, AHP, TOPSIS) en una sola, con las mismas entradas. Posteriormente se realiza el diseño, programación y desarrollo de la interfaz para la interacción Humano Máquina (HMI, human machine interface), también sobre la plataforma Scilab. La interfaz se compone de tres pestañas o páginas, la primera de las cuales, tiene habilitadas las casillas para ingresar, cargar, verificar y corregir, la matriz de decisiones y el vector de conveniencia (como se muestra en la Figura 4.4).

La segunda página tiene habilitadas las casillas para ingresar las entradas requeridas para la ponderación de pesos, según si se desea usar una, dos o tres de estas, como se puede observar en la Figura 4.5. Para las que no se van a emplear, es necesario ingresar vectores o matrices con tantas filas como alternativas y tantas columnas como criterios; para evitar errores en los cálculos. Al cargar los vectores y matrices se puede verificar que los datos sean correctos. De lo contrario, se pueden corregir reingresando los conjuntos y cargando de nuevo.

La tercera página tiene disponibles tres botones para seleccionar la metodología de ponderación que se desea utilizar, como se puede observar en la Figura 4.6. Según los datos ingresados en la página 2, para una, dos o las tres metodologías de ponderación, se debe dar clic en el botón correspondiente a la que se desea utilizar. Con cualquiera de las tres opciones se obtiene el ranquin de criterios por las tres herramientas MCDM. El usuario elige si toma los resultados de una, dos o las tres metodologías, para analizar los resultados.

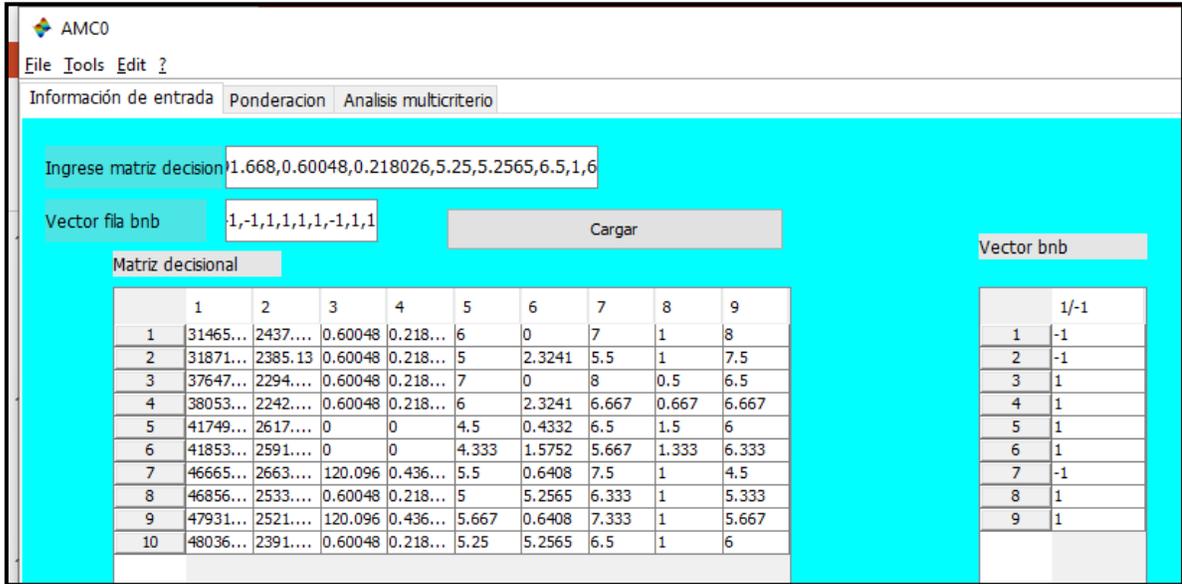


Figura 4.4 Primera página del software propuesto.

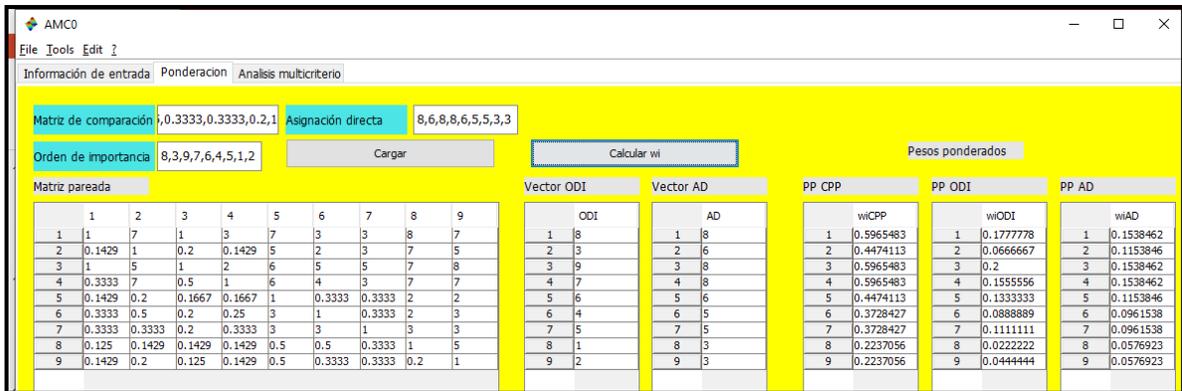


Figura 4.5 Segunda página del software propuesto.

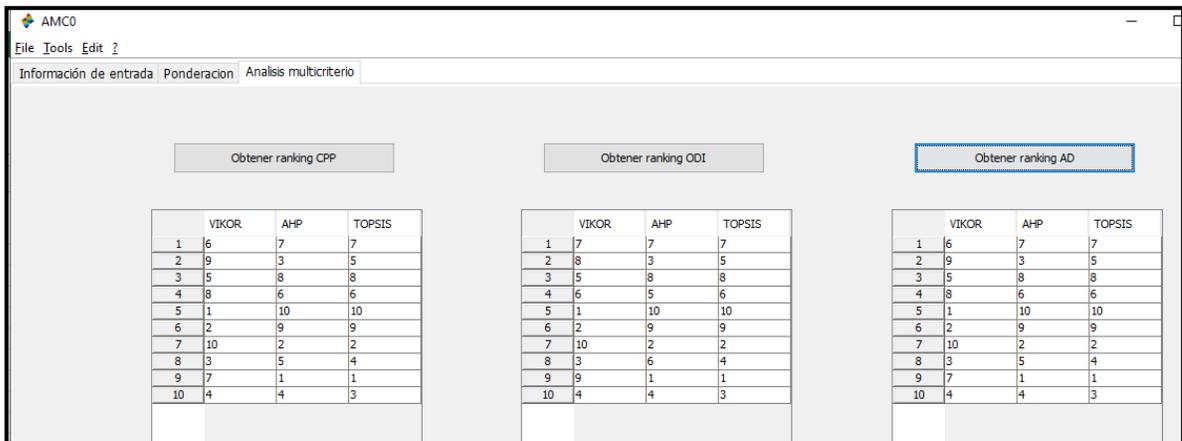


Figura 4.6 Tercera página del software propuesto.

8. Software propuesto AMC3VAT

El resultado de aplicar la metodología de desarrollo del software es una herramienta de análisis multicriterio compuesta por tres herramientas MCDM y tres metodologías de cálculo de ponderación de pesos. Esta variedad en las opciones de obtener la ponderación de pesos y el ranking o clasificación de las alternativas permite acotar el problema de la toma de decisiones, a las alternativas que figuren en los primeros lugares en la mayoría de los ránquines.

A la herramienta o software propuesto, se le ha denominado AMC3VAT, ya que es un software de análisis multicriterio (AMC, en español) compuesta por 3 herramientas y VAT por las iniciales de dichas herramientas (VIKOR, AHP y TOPSIS); la cual es de uso libre ya que la plataforma Scilab donde se desarrolló también lo es.

Los pasos anteriormente descritos se resumen de manera general en el diagrama de bloques de la Figura 4.7.

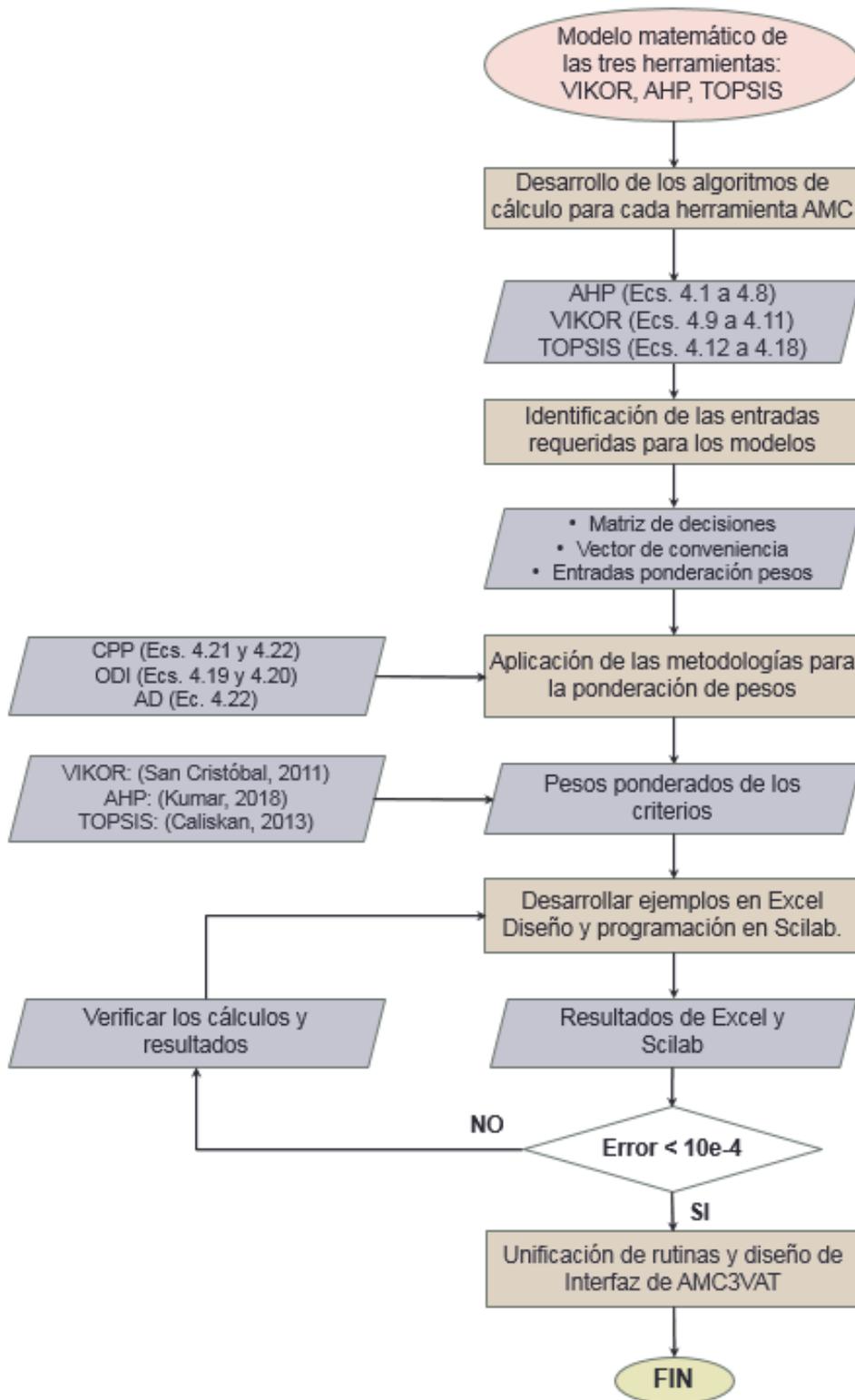


Figura 4.7 Diagrama de bloques del desarrollo del software.

4.4 Desarrollo de un caso de estudio y comparación con software comerciales.

En esta sección se desarrolla la aplicación de la metodología y el software propuesto para la obtención del diseño óptimo sustentable de un sistema de ER para suplir una demanda determinada. El caso seleccionado ha sido denominado “Electrificación de hogar rural en el istmo de Tehuantepec”.

La vivienda se ubica en las coordenadas $16^{\circ}12'16.0''N$ $94^{\circ}59'11.0''W$ (16.204444, -94.986389 grados decimales WGS 84, (287654.4, 1792577.6) UTM), en inmediaciones de la agencia Mariano Oviedo Juárez, del municipio de San Mateo del Mar, Oaxaca (Figura 4.8).

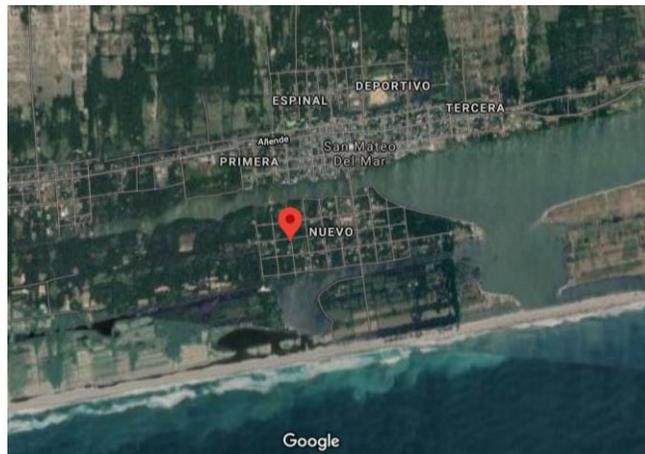


Figura 4.8 Mapa de ubicación del emplazamiento.

El emplazamiento no cuenta con conexión a la red de electrificación nacional, por lo tanto, se pretende emprender un estudio de factibilidad para la instalación de sistemas renovables que permitan llevar este servicio básico a la comunidad mencionada anteriormente, ya que se encuentra catalogado como un municipio con muy alto grado de marginación, y con muy alto grado de rezago social, según el catálogo de localidades de la SEDESOL [213]. El emplazamiento se encuentra en una región de abundante recurso eólico y solar (Istmo de Tehuantepec), donde los consumos energéticos suelen ser altos debido a las altas temperaturas locales ($27,6$ °C promedio anual). Para la determinación del perfil de la demanda energética, ya que actualmente no hay un perfil real, se tomaron como referencia los recibos de CFE (compendio en Tabla 4.8) de un hogar ubicado en el istmo de Tehuantepec, habitado por dos adultos y tres menores. El hogar cuenta con 7 focos, 8 tomas de corriente dobles y algunos electrodomésticos básicos (Televisor, celulares, licuadora, ventiladores). Para obtener la demanda diaria en kWh/día, basta con dividir el valor reportado por CFE en kWh/bimestre, entre 60 días que tiene el bimestre.

Tabla 4.8 Compendio de datos de recibos de CFE de una vivienda en Tehuantepec.

Bimestre	kWh/Bimestre	kWh/día
FEBRERO-MARZO	151	2.516667
ABRIL-MAYO	244	4.066667
JUNIO-JULIO	214	3.566667
AGOSTO-SEPTIEMBRE	265	4.416667
OCTUBRE-NOVIEMBRE	235	3.916667
DICIEMBRE-ENERO	110	1.833333
Promedio		3.386111

El perfil anual se obtuvo construyendo una matriz de meses y horas, para ser ingresada a los paquetes de software HOMER o iHOGA y de esta manera obtener una columna con los valores horarios de la demanda energética.

A continuación, se desarrolla el caso de estudio, por medio de la aplicación de la metodología y el software propuesto para la obtención del diseño óptimo sustentable de un sistema de ER para suplir la demanda energética y bajo las condiciones descritas anteriormente en la sección 4.4, siguiendo el procedimiento paso a paso presentado en la sección 4.3.1.

Paso 1. OPTIMIZACIÓN MONOCRITERIO EMPLEANDO HOMER Pro.

A partir de los datos anteriores, se inicia el asistente de configuración de HOMER y seguir los pasos descritos en la sección anterior.

1. Información general: Proyecto Mariano Oviedo.
2. Tasa de descuento 8%. Inflación, 4%.
3. Ubicación: San Mateo del Mar, Oaxaca (México).
4. Demanda energética: Demanda diaria promedio 3.39 kWh/d.
5. Mes de consumo pico: Septiembre.
6. Perfil: Residencial.
7. Red: Conectado a la red NO.
8. Precio (\$/kWh): NO aplica; Puede vender electricidad usando la medida neta mensual SI; tarifa para exceso neto NO aplica.
9. Generador: Costo del generador 500 (\$/kW); Costo del combustible 1 (\$/L).
10. Renovables: Fotovoltaica SI; Costo capital 3000 (\$/kW). Eólica SI; Tipo de aerogenerador Generic 1 kW; costo capital 7000 (\$/aero).

11. Almacenamiento: Baterías SI; Tipo de batería Generic 1 kWh Lead/Acid; Costo de la batería 300 (\$/kWh).
12. Resumen: Verificar la información OK; Incluir el análisis de sensibilidad SI

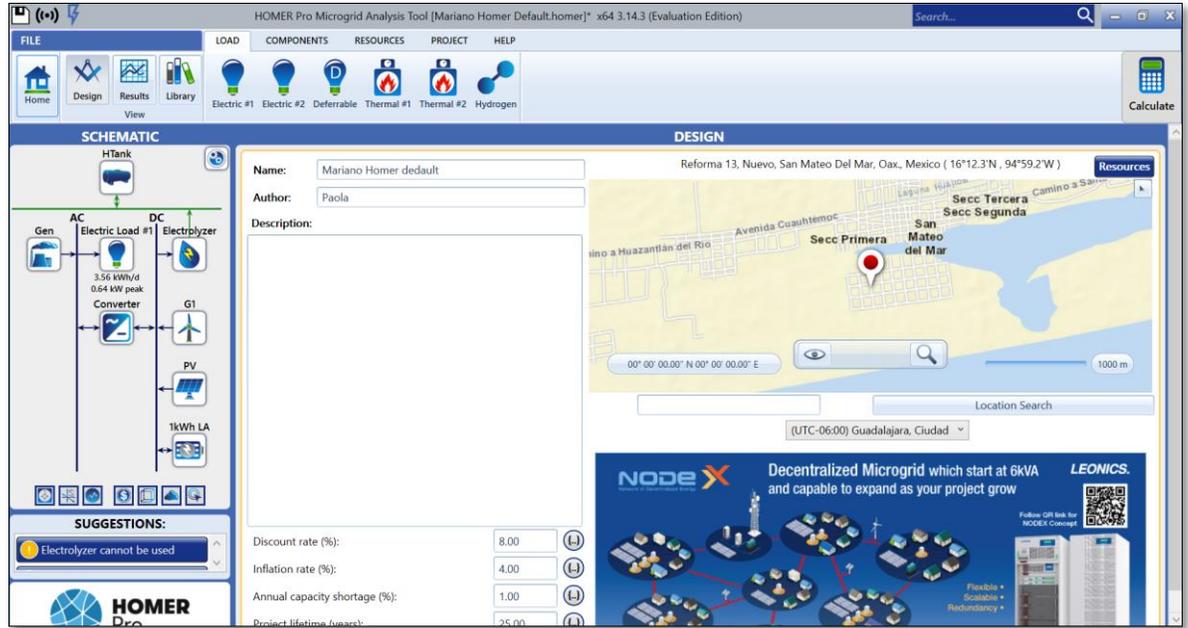


Figura 4.9 Interfaz de HOMER Pro con datos de entrada para los cálculos.

13. **CALCULAR.** Tiempo de cálculo aproximado: 23 min 48 seg.
14. Resultados: Los resultados obtenidos se presentan a continuación.
15. Realizar modificaciones: Se adicionan un electrolizador y un tanque de hidrógeno.

La Figura 4.9 muestra la interfaz de HOMER con la información de entrada, donde se pueden observar algunos de los datos ingresados, así como un esquema con todos los equipos que se tendrán en cuenta en el proceso de optimización.

RESULTADOS

16. El análisis de sensibilidad propuesto incluyó valores de combustible de 0.8 y 1.2 \$/L, y para la velocidad del viento de 4, 4.54 y 5 m/s. Se selecciona el caso base 1 \$/L y 4.54 m/s, por ser el más cercano a la realidad actual.

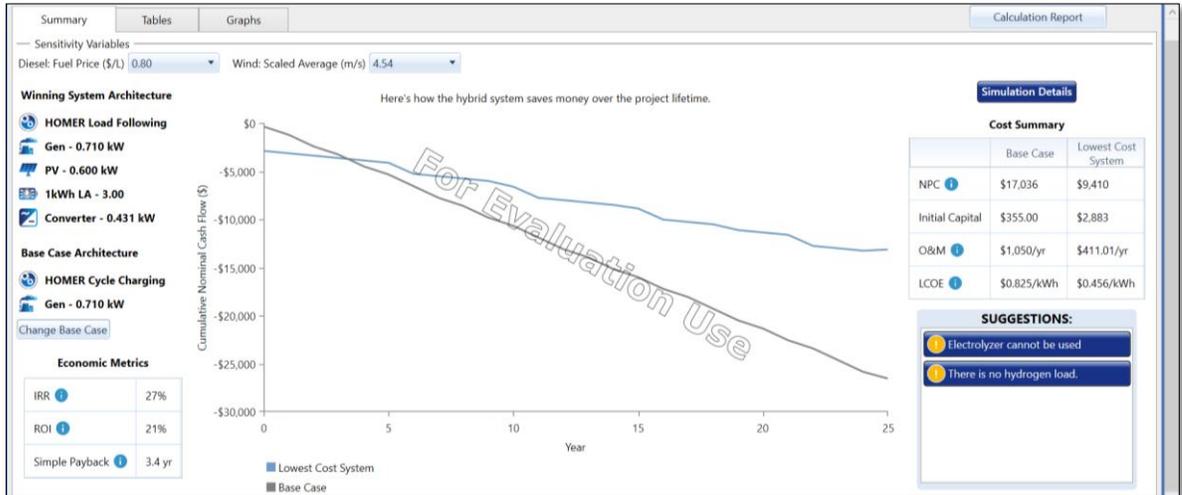


Figura 4.10 Resumen de los resultados. Mejor opción para HOMER.

La Figura 4.10 presenta el resumen del resultado óptimo para HOMER, o sea el que tiene el menor NPC. En la gráfica se observa la intersección de dos líneas, donde la línea representa el perfil del costo de la energía consumida a lo largo del proyecto, empleando fuentes convencionales y la línea que presenta picos, es el perfil del costo del sistema óptimo. El punto de corte indica el instante a partir del cual el sistema renovable es rentable.

La Tabla de optimización presentó 44 diferentes alternativas de configuración, 14 de las cuales se observan en la Figura 4.11.

Optimization Results															
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.															
Architecture										Cost			System		
		PV (kW)	G1	Gen (kW)	1kWh LA	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)
		0.362	1	0.710		100		0.472	CC	\$2.79M	\$135.03	\$120,639	\$872,402	0.602	523
				0.710		100		0.375	CC	\$2.79M	\$135.09	\$120,780	\$871,468	0	636
			9		53	100		0.696	CC	\$2.89M	\$141.25	\$122,666	\$943,109	100	0
		0.667		0.710	3	100	100	0.489	LF	\$2.92M	\$141.19	\$121,433	\$987,059	51.3	211
				0.710	1	100	100	0.167	CC	\$2.92M	\$141.24	\$121,643	\$984,705	0	470
		1.67			8	100	100	0.833	CC	\$2.92M	\$142.22	\$121,460	\$990,817	100	0
		0.417		0.710		100	100	0.167	LF	\$2.92M	\$141.45	\$121,868	\$985,447	0	666
				0.710		100	100	0.0125	CC	\$2.92M	\$141.56	\$122,081	\$984,359	0	835
			1	0.710	1	100	100	0.434	CC	\$2.92M	\$141.57	\$121,620	\$991,785	25.5	333
		0.500	1	0.710	4	100	100	0.542	LF	\$2.92M	\$141.57	\$121,487	\$993,968	63.9	156
		1.47	1		9	100	100	0.618	CC	\$2.93M	\$141.87	\$121,498	\$997,565	100	0
		0.362	1	0.710		100	100	0.472	CC	\$2.93M	\$141.76	\$121,839	\$992,402	0.602	523
			1	0.710		100	100	0.375	CC	\$2.93M	\$141.83	\$121,980	\$991,468	0	636
			9		53	100	100	0.688	CC	\$3.03M	\$148.04	\$123,866	\$1,06M	100	0

Figura 4.11 Alternativas de configuración de sistemas de generación de energía dada por HOMER.

17. Gráficos: En la Figura 4.12 se observa el análisis de sensibilidad que muestra la necesidad de contar siempre con el generador a diésel como sistema de respaldo energético del sistema

aislado, lo cual indica que los resultados para las 9 combinaciones diferentes no varían en una medida significativa.

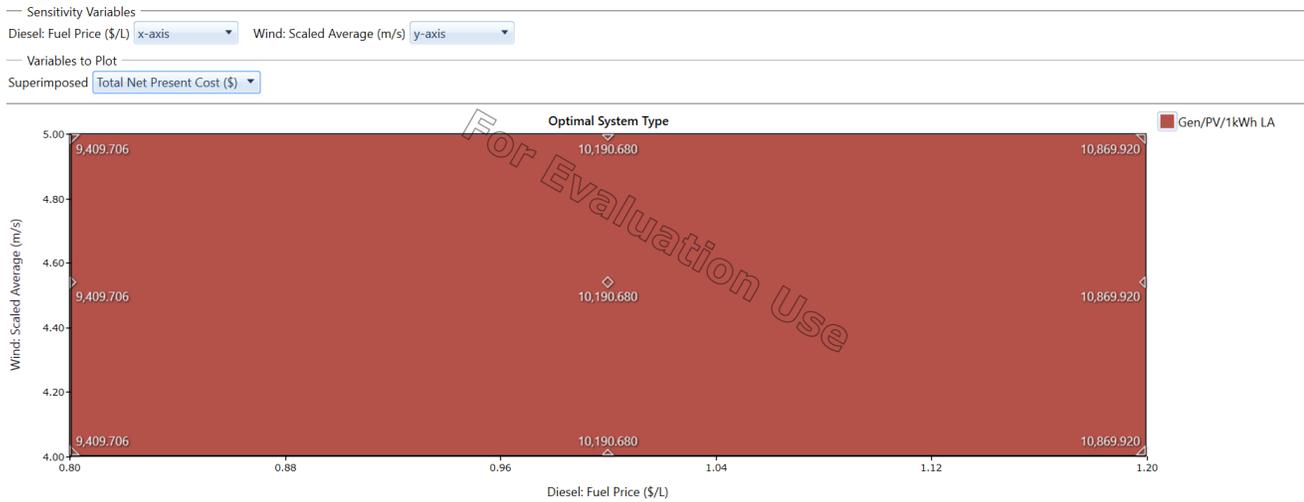


Figura 4.12 Resultado gráfico del análisis de sensibilidad.

18. Se presenta la alternativa que involucra todas las fuentes renovables, además del generador a diésel con el fin de visualizar los perfiles de conversión de energía de los diferentes equipos que se tuvieron en cuenta para el diseño del sistema (alternativa 40). Figuras 4.13 y 4.14.



Figura 4.13 Aporte de energía de los generadores al sistema y generación de hidrógeno.

En la Figura 4.13 se observa la energía generada por todos los componentes del sistema, identificando por colores cada aportante; en color café se representa la energía generada por el panel FV, en color amarillo la energía aportada por el generador a diésel, y en verde la energía aportada por el aerogenerador. En la parte inferior, el color verde representa la energía transformada por el electrolizador.

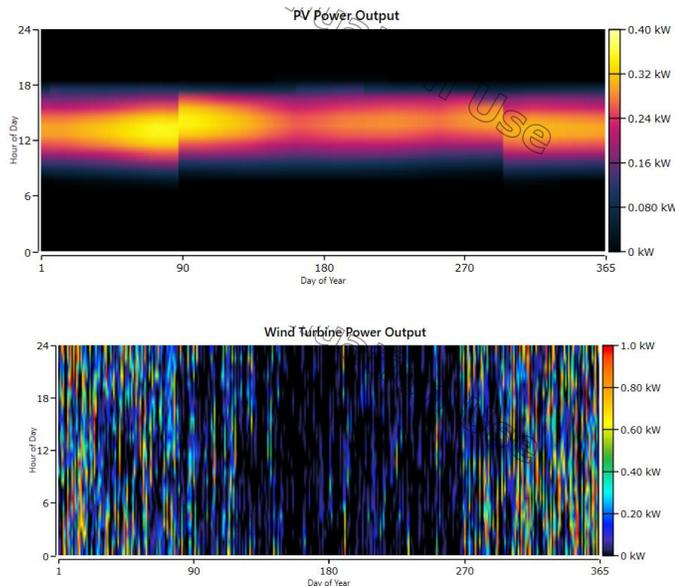


Figura 4.14 Generación de energía solar y eólica en el emplazamiento.

En la parte superior de la Figura 4.14, se presenta la generación de energía del panel FV donde los colores cálidos representan mayor cantidad de energía, por ejemplo, en las horas posteriores al medio día. En la parte inferior de la Figura 4.14, se presenta la generación de energía eólica, donde los colores cálidos representan las mayores magnitudes, los cuales se presentan en los primeros y últimos meses del año.

Hasta aquí se obtienen los resultados para el diseño de un sistema óptimo monocriterio.

19. ¿Las alternativas presentadas de manera categorizada (Categorized) son suficientes? SI.

¿Requiere hacer cálculos adicionales de análisis de sensibilidad? NO. FIN.

Al exportar los datos de las 44 alternativas a Excel se obtiene la Tabla de la Figura 4.15:

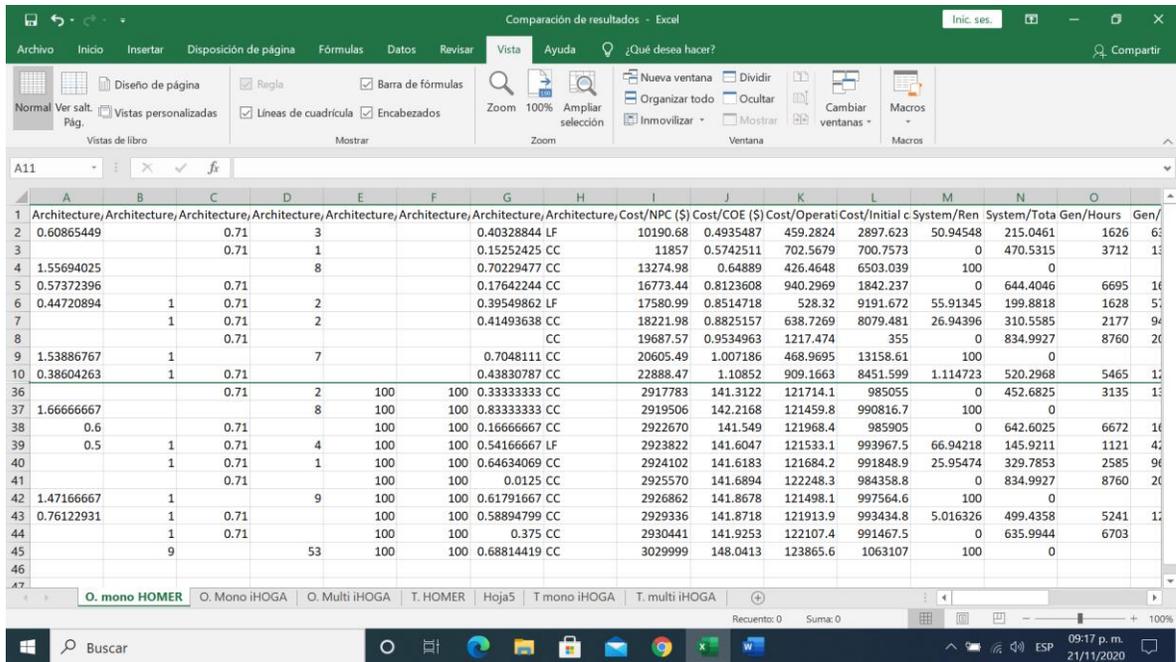


Figura 4.15 Listado de alternativas no truncadas.

Al filtrar seleccionar los parámetros de diseño y algunos resultados obtenidos que pueden ser de interés para la matriz decisional, los primeros 30 elementos de la matriz de alternativas se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Resultados de la optimización mono-criterio.

Configuración										Datos relevantes para la selección y estimación de criterios																		
No	PV	Aero	GEN	Bar	ELEC	Tank	INV	Estreat	NPC (\$)	Cost/COE (\$/yr)	Operating cost (\$/yr)	initial capital (\$)	Ren frac (%)	Total Fuel (t/yr)	Gen Hours	Gen/Produ ctos (kWh/yr)	Gen/O&M Cost (\$/yr)	Gen/Fuel Cost (\$/yr)	PV/Capit al Cost (\$)	PV/Producti on (kWh/yr)	G1/Produ ction (kWh/yr)	G1/O&M Cost (\$)	1kWh LA Autonom y (hr)	1kWh LA Annual Throughput (kWh/yr)	Comv/Rectif Mean Output (kWh)			
1	0.609	0.7	3				0.4	LF	10190.7	0.494	459.282	2897.62	50.9455	215.046	1626	637.8557	215	34.6338	215.0461	1521.64	892.58							
2		0.7	1				0.15	CC	11857	0.574	702.568	700.757	0	470.532	3712	1369.722	470.5	79.0656	470.5315									
3	1.55694025						0.7	CC	13275	0.649	426.465	6503.04	100	0	0	0	0	0	3892.35	2283.223								
4	0.57372396						0.18	CC	16773.4	0.812	940.297	1842.24	0	644.405	6695	1604.885	644.4	142.6035	644.4046	1434.31	841.355							
5	0.44720894	1	0.7	2			0.4	LF	17581	0.851	528.32	9191.67	55.9135	199.882	1628	573.2571	199.9	34.6764	199.8818	1118.02	655.8232	7000	1097.467	70	8.090759	310.6614	0.0012653	
6		1	0.7	2			0.41	CC	18222	0.883	638.727	8079.48	26.944	310.559	2177	949.9472	310.6	46.3701	310.5585			7000	1097.467	70	8.090759	256.6096	0.0184327	
7		0.7					0.7	CC	19887.6	0.953	1217.47	355	0	834.993	8760	2065.266	835	186.588	834.9927									
8	1.53886767	1	0.7	7			0.7	CC	20605.5	1.007	468.97	13158.6	100	0	0	0	0	0	3847.17	2256.719	7000	1097.467	70	28.31766	832.1332	0		
9	0.38604263	1	0.7	1			0.44	CC	22888.5	1.109	909.166	8451.6	1.11472	520.297	5465	1285.805	520.3	116.4045	520.2968	965.107	566.124	7000	1097.467	70	0	0	0	
10		1	0.7	1			0.39	CC	24564.9	1.19	1076.42	7472.11	0	635.733	6700	1567.295	635.7	142.71	635.7325			7000	1097.467	70	0	0	0	
11		10	0.41				0.67	CC	124509	6.084	2645.4	82501.7	100	0	0	0	0	0	0	0	7000	10974.67	700	165.8606	640.9348	0		
12	0.605	0.7	3	100			0.4	LF	189247	7.278	1660.02	122887	50.7758	215.924	1635	640.0621	215.9	34.8255	215.924	1511.87	886.8511							
13		0.7	1	100	0.15	CC	159912	7.309	1902.57	120701	0	470.534	3712	1369.732	470.5	79.0656	470.534											
14	1.563		8	100	0.68	CC	152339	7.444	1626.48	126512	100	0	0	0	0	0	0	3906.44	2291.485									
15	0.579	0.7	100	0.17	CC	155837	7.547	2140.18	121853	0	644.384	6693	1605.134	644.4	142.5609	644.3839	1447.16	848.8942										
16	0.442	1	0.7	2	100	0.4	LF	156629	7.586	1728.59	129180	56.1706	198.577	1615	569.9136	198.6	34.3995	198.5769	1104.29	647.7694	7000	1097.467	70	8.090759	316.5804	0.0014575		
17		1	0.7	2	100	0.54	CC	157241	7.615	1834.15	128116	27.7538	305.097	2102	939.4163	305.1	44.7726	305.0971			7000	1097.467	70	8.090759	264.6561	0.0187785		
18		0.7	100				0.7	CC	158743	7.688	2417.47	120355	0	834.993	8760	2065.266	835	186.588	834.9927									
19	1.539	1	7	100	0.7	CC	159661	7.804	1668.97	133159	100	0	0	0	0	0	0	3847.17	2256.719	7000	1097.467	70	28.31766	832.1332	0	0	0	
20	0.39	1	0.7	100	0.36	CC	161925	7.842	2108.89	128438	1.07819	520.528	5468	1286.28	520.5	116.4684	520.528	975.815	572.4055	7000	1097.467	70	0	0	0	0	0	
21		1	0.7	100	0.35	LF	163615	7.924	2276.9	127460	0	636.278	6706	1568.595	636.3	142.8378	636.2775											
22	10	0.41					0.67	CC	263562	12.88	3845.37	202501	100	0	0	0	0	0	0	0	7000	10974.67	700	165.8606	640.9348	0	0	0
23	0.667	0.7	3	100	0.46	LF	2777227	134.5	120293	867059	53.1278	207.08	1594	609.4788	207.1	33.9522	207.0799	1666.67	977.6537									
24		0.7	1	100	0.16	CC	2778692	134.6	120534	864703	0	470.15	3691	1371.635	470.1	78.6183	470.1497											
25	1.641		8	100	0.61	CC	2780287	135.5	120258	870685	100	0	0	0	0	0	0	4101.26	2405.768									
26	0.6	0.7	100	0.17	CC	2783615	134.8	120768	865995	0	642.603	6672	1601.117	642.6	142.1136	642.6025	1500	879.8884										
27	0.5	1	0.7	4	100	0.54	LF	2784767	134.9	120333	873968	66.9422	145.921	1121	429.8506	145.9	23.8773	145.9211	1250	733.2403	7000	1097.467	70	16.18152	452.0004	0.0016786		
28		1	0.7	1	100	0.44	CC	2785020	134.9	120487	871786	25.5179	332.396	2617	968.4901	332.4	55.7421	332.3956			7000	1097.467	70	4.04538	183.9233	0.013708	0.0081419	
29		0.7	100	0.01	CC	2786515	135	121048	864359	0	834.993	8760	2065.266	835	186.588	834.9927												
30	1.667	1	7	100	0.71	CC	2787761	136.1	120301	874749	100	0	0	0	0	0	0	4166.67	2444.134	7000	1097.467	70	28.31766	830.8517	0	0	0	

La Tabla 4.9, en las columnas de color gris, presenta la configuración de cada una de las 44 propuestas, así como las variables que pueden ser relevantes como criterios de comparación entre los resultados.

Según el panorama anterior, existe una gran diferencia económica entre las alternativas de la parte superior y las de la parte inferior. A continuación, se aplicará una clave de truncamiento para obtener las alternativas a considerar.

Paso 2. CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD Y APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS MCDM

Continuando con el paso número 2 de la metodología planteada en la Figura 4.1, se procede al truncamiento de la matriz.

La clave de truncamiento que se aplica en este caso será el valor de NPC que sea 10 veces mayor al primero de la lista ($N < 10 a_1$). Con esta clave se toman las primeras 10 alternativas como base para la construcción de la matriz de decisiones.

Tabla 4.10 Alternativas de entrada para el análisis multicriterio.

No	FV (kW)	Aero G1 (u)	Generador Diésel (kW)	Baterías	Inversores	Estrategia	Costo presente Neto NPC (\$)
1	0.6087	0	0.71	3	0.403	LF	10190.68
2	0	0	0.71	1	0.153	CC	11857
3	1.5569	0	0	8	0.702	CC	13274.98
4	0.5737	0	0.71	0	0.176	CC	16773.44
5	0.4472	1	0.71	2	0.395	LF	17580.99
6	0	1	0.71	2	0.415	CC	18221.98
7	0	0	0.71	0	0	CC	19687.57
8	1.5389	1	0	7	0.705	CC	20605.49
9	0.386	1	0.71	0	0.438	CC	22888.47
10	0	1	0.71	0	0.39	CC	24564.89

Hasta este punto, se tiene la numeración oficial de las alternativas y la configuración de los sistemas propuestos. En adelante se emplearán solo la primera (A1, ..., A14) y la última columna de la Tabla 4.10, como base para la construcción de la matriz decisional.

Paso 3. En la Tabla 4.9 así como en otros resultados de HOMER, se encuentran los valores de algunos parámetros que se pueden emplear como criterios de sustentabilidad. Por ejemplo, la fracción renovable (FR), el costo de operación y mantenimiento (O&M), la disponibilidad de la energía (DDE)

y las horas de autonomía (HDA); que, si tienen tendencias diferentes entre sí, permiten la comparación entre las alternativas. Por ejemplo, COE y el costo de la inversión inicial (CII) presentan la misma tendencia del NPC, pues son directamente proporcionales. Por lo tanto, uno de los tres puede representar a los otros dos parámetros.

De la Tabla 4.7 de criterios de sustentabilidad propuestos para el desarrollo de análisis multicriterio para países en vías de desarrollo, se pueden obtener otros criterios que sean diferentes para las alternativas ya establecidas, de los cuales se dispongan sus valores o la manera de estimarlos (Creación de empleos según los GWh producidos por una tecnología de generación, (iHOGA)). Los criterios seleccionados y se enlistan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Criterios de sustentabilidad para el caso de estudio.

No	Criterio	Tipo	Fuente	Utilidad
1	Costo presente neto total	Económico	HOMER	diferente
2	Costo del combustible	Económico	HOMER	diferente
3	Hogares electrificados que generan ingresos	Económico	CASO	igual
4	Desarrollo de negocios	Económico	CASO	igual
5	Confiabilidad en el suministro de energía	Técnico	HOMER	diferente
6	Fracción de energía renovable	Ambiental	HOMER	diferente
7	Emisiones de GEI	Ambiental	HOMER	diferente
8	Hogares electrificados donde han sustituido	Ambiental	CASO	igual
9	Impacto a la calidad de vida (ruido, impacto visual)	Ambiental	Estudios	diferente
10	Condiciones meteorológicas extremas	Ambiental	Estudios	diferente
10	Porcentaje de la población con acceso a la electricidad	Social	Estudios	igual
11	Número de farolas en la zona	Social	Estudios	igual
12	Aceptación social	Social	Estudios	diferente
13	Subsidios para servicios de electricidad	Institucional	Estudios	verificar
14	Disponibilidad de microcréditos para acceder a servicios de electricidad	Institucional	Estudios	verificar

Se descartan los ítems que, si cambian, pero que son iguales para todas las alternativas, como los numerales 3, 4, 8, 10 y 11. Para 13 y 14 se requiere de la verificación en la legislación actual, por

tanto, también se descartan. En la matriz de decisiones se presentarán los criterios elegidos y sus valores obtenidos para este caso de estudio.

Paso 4. En la Tabla 4.11 se encuentran los criterios tomados para este análisis, algunos de ellos son resultado de las simulaciones de HOMER y otros son tomados de estudios similares, o estimados. De esta manera queda **construida la matriz decisional** con 11 alternativas y 9 criterios, como se observa en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Matriz decisional caso de estudio electrificación rural istmo de Tehuantepec.

(b/nb)	nb	Nb	B	b	nb	nb	b	b	nb
Altr. No	NPC (\$)	Consumo de combustible (L/año)	Autonomía baterías (h)	FR (%)	Emissiones GEI (kg/año)	Impacto cal. vida	Resistencia a huracanes	Creación de empleos	Aceptación social
a1	10190.68	215.0461	12.13614	50.94548	581.22	8	7	0.000865844	6
a2	11857	470.5315	4.04538	0	1,250	6	5	0.000191761	2
a3	13274.98	0	32.36304	100	0	2	2	0.001986404	4
a4	16773.44	644.4046	0	0	1,750	8	7	0.000956663	6
a5	17580.99	199.8818	8.090759	55.91345	495.3227	13	10	0.000947138	9
a6	18221.98	310.5585	8.090759	26.94396	2,219	11	8	0.000429309	5
a7	19687.57	834.9927	0	0	893.1856	6	5	0.000289137	2
a8	20605.49	0	28.31766	100	0	7	5	0.002259662	7
a9	22888.47	520.2968	0	1.114723	1,400	13	10	0.000968857	9
a10	24564.89	635.7325	0	0	1,697	11	8	0.000515737	5

Paso 5. Se procede a calcular la ponderación de pesos de los criterios, aplicando los tres métodos propuestos. A partir de este momento se hace uso del software desarrollado en Scilab. El procedimiento de la sección 4.3.1, en el paso 5, indica abrir el software Scilab y la aplicación AMC3VAT, al cargar y correr el archivo principal se presenta una interfaz en la cual se ingresan la matriz de decisiones y el vector “bnb”, tal como se presenta en la Figura 4.16. Se cargan los datos y se verifica que estén correctos en cantidad, valores y estructura.

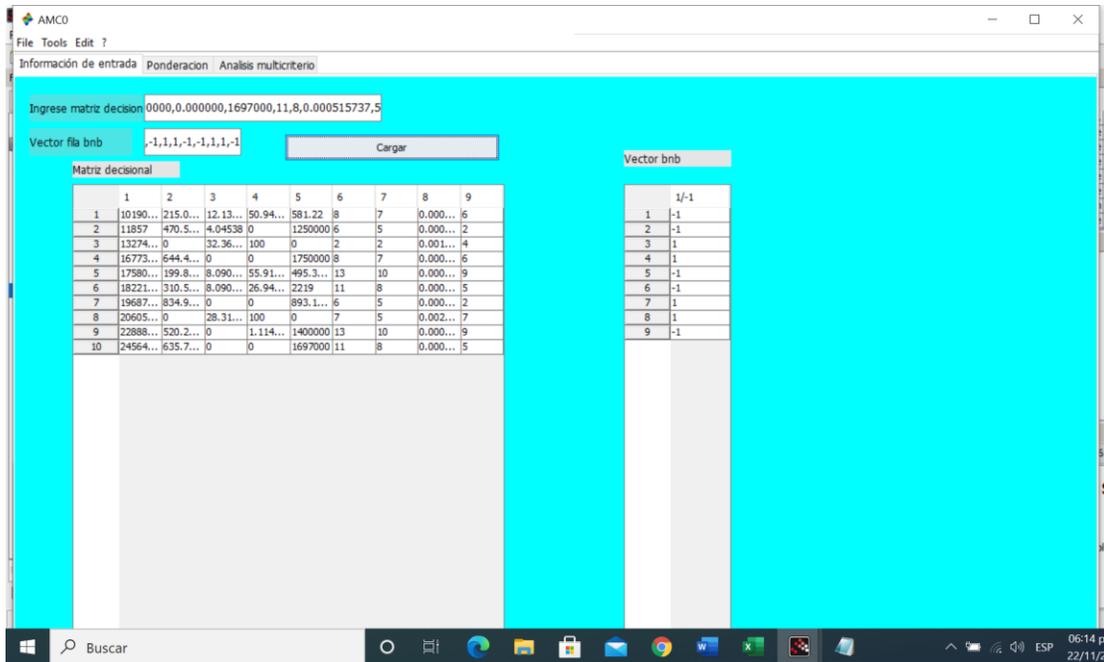


Figura 4.16 Matriz de decisiones y vector de beneficio “bnb” en ventana de AMC3VAT.

Antes de pasar a la página de ponderación se deben preparar: la matriz de comparación por pares (Tabla 4.13) y, los vectores “Asignación directa” y “orden de importancia” (Tabla 4.14). La Tabla de la escala de 9 puntos empleada para la ponderación de pesos usando la metodología de comparación pareada, se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.13 Matriz de comparación por pares (MCP) obtenida para el caso de estudio.

Criterios	NPC (\$)	Consumo de combustible (L/año)	Autonomía baterías (h)	FR (%)	Emissiones GEI (kg/año)	Impacto cal. Vida	Resistencia a huracanes	Creación de empleos	Aceptación social
NPC (\$)	1	3	4	5	5	4	4	2	4
Consumo de combustible (L/año)	0.3333	1	2	3	3	2	2	5	4
Autonomía baterías (h)	0.25	0.5	1	2	3	2	3	4	2
FR (%)	0.2	0.3333	0.5	1	0.5	0.3333	0.3333	1	0.25
Emissiones GEI (kg/año)	0.2	0.3333	0.3333	2	1	6	5	3	5
Impacto cal. Vida	0.25	0.5	0.5	3	0.1667	1	4	5	2
Resistencia a huracanes	0.25	0.5	0.3333	3	0.2	0.25	1	4	0.25
Creación de empleos	0.5	0.2	0.25	1	0.3333	0.2	0.25	1	4
Aceptación social	0.25	0.25	0.5	4	0.2	0.5	4	0.25	1

En este paso nuevamente se carga la información y se verifica que los datos sean correctos en cantidad, valores y estructura, como se muestra en la Figura 4.17. Al calcular “wi” se obtienen los tres vectores de pesos ponderados “PP CPP”, “PP ODI” Y “PP AD”.

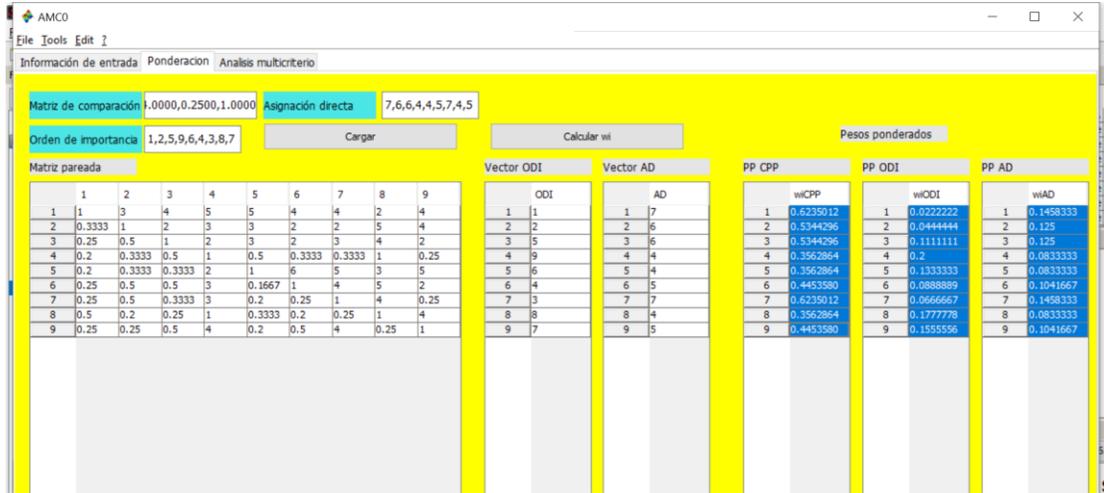


Figura 4.17 Matriz MCP, vector ODI, vector AD, y resultados, en la ventana 2 de AMC3VAT.

Los valores ingresados y resultantes se registran en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Valores de los pesos por medio de las tres metodologías de ponderación propuestas.

Criterios	Beneficioso/ No benef.	AD	PP AD	ODI	PP ODI	PP CPP
NPC (\$)	-1	7	0.1458	1	0.0222	0.146
Consumo de combustible (L/año)	-1	6	0.1250	2	0.0444	0.125
Autonomía baterías (h)	1	6	0.1250	5	0.1111	0.125
FR (%)	1	4	0.0833	9	0.2000	0.083
Emissiones GEI (kg/año)	-1	4	0.0833	6	0.1333	0.083
Impacto cal. Vida	-1	5	0.1042	4	0.0889	0.104
Resistencia a huracanes	1	7	0.1458	3	0.0667	0.146
Creación de empleos	1	4	0.0833	8	0.1778	0.083
Aceptación social	-1	5	0.1042	7	0.1556	0.104
Suma		48	1.0000	45	1.0000	1.0000

Paso 6. Para aplicar las tres herramientas de análisis multicriterio solo se requiere pasar a la página 3 (Análisis multicriterio) y dar “Obtener ranquin”, según si se desea emplear uno u otro método de ponderación, como se muestra en la Figura 4.18.

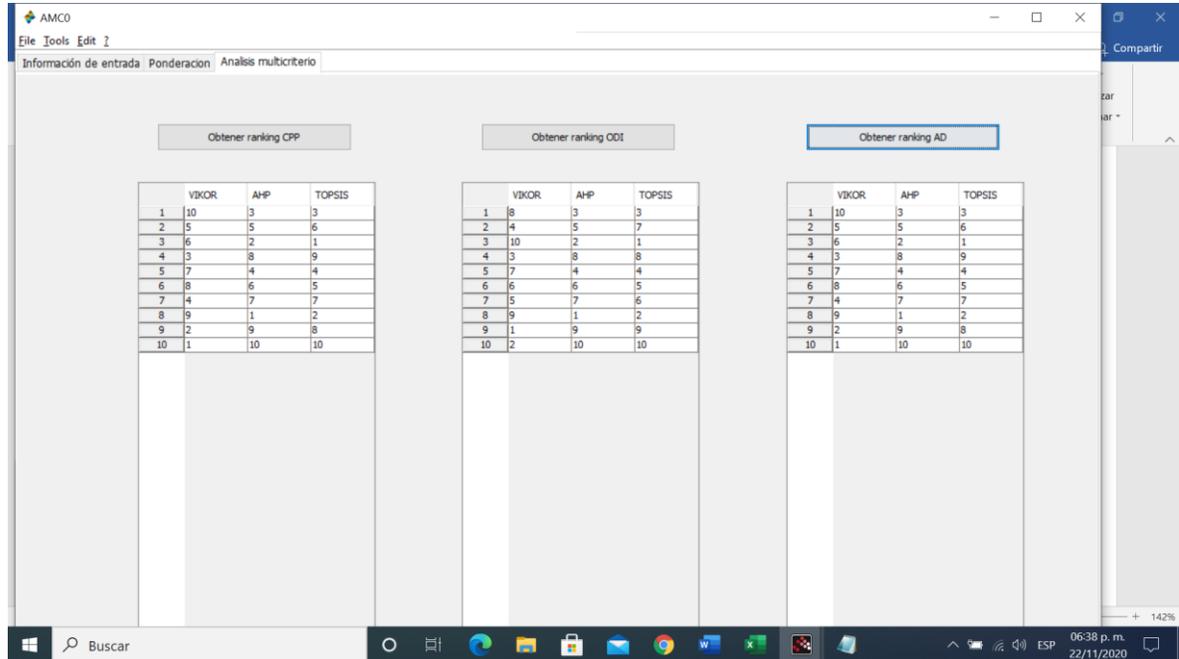


Figura 4.18 Ranquin aplicando tres metodologías de ponderación de criterios y tres herramientas de análisis multicriterio. Ventana 3 del software AMC3VAT.

Los resultados del software se pueden copiar y pegar en una Tabla de Excel, como se muestra en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Resultados del análisis multicriterio.

RAKNING CPP			RANQUIN ODI			RANQUIN AD		
VIKOR	AHP	TOPSIS	VIKOR	AHP	TOPSIS	VIKOR	AHP	TOPSIS
10	3	3	8	3	3	10	3	3
5	5	6	4	5	7	5	5	6
6	2	1	10	2	1	6	2	1
3	8	9	3	8	8	3	8	9
7	4	4	7	4	4	7	4	4
8	6	5	6	6	5	8	6	5
4	7	7	5	7	6	4	7	7
9	1	2	9	1	2	9	1	2
2	9	8	1	9	9	2	9	8
1	10	10	2	10	10	1	10	10

Como se puede observar en la Tabla 4.15, la alternativa 3 se encuentra en la parte superior de todos los ránquines o clasificaciones, lo cual permite concluir que es la opción ideal sustentable para brindar el suministro eléctrico a la vivienda del caso de estudio resuelto. La opción 3 es un sistema que incluye un arreglo FV de 1.57 kW, un banco de baterías de 8 elementos y un inversor 0.7 kW, con la estrategia de control del ciclo de carga de las baterías. En la Figura 4.19 tomada del software HOMER, se observa un esquema representativo de dicho sistema.

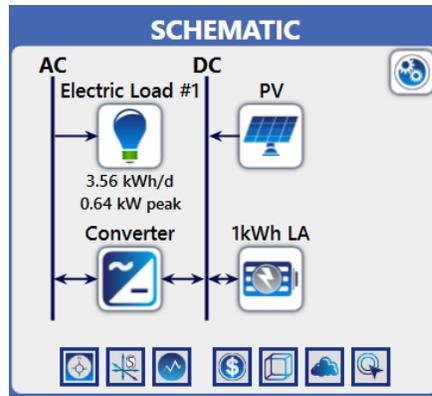


Figura 4.19 Sistema renovable sustentable. HOMER.

4.4.1 Caso de estudio desarrollado con software comercial

Para la comparación de la metodología y el software propuestos, contra un software comercial se eligió el software iHOGA (Figura 4.20), desarrollado por Dufo-López (Zaragoza, España), que en su versión libre permite el diseño de sistemas de hasta 10 kWh/día, además tiene inactivos varios módulos de cálculo, como por ejemplo la optimización multi-objetivo. Sin embargo, se pudo gestionar una licencia gratuita por tres meses, para realizar las simulaciones requeridas con fines académicos, gracias a la autorización expresa de su desarrollador el Dr. Rodolfo Dufo.

Para el iHOGA las entradas requeridas son:

- Ubicación en coordenadas decimales.
- Perfil de demanda energética (importado de HOMER).

Recursos renovables para tener en cuenta.

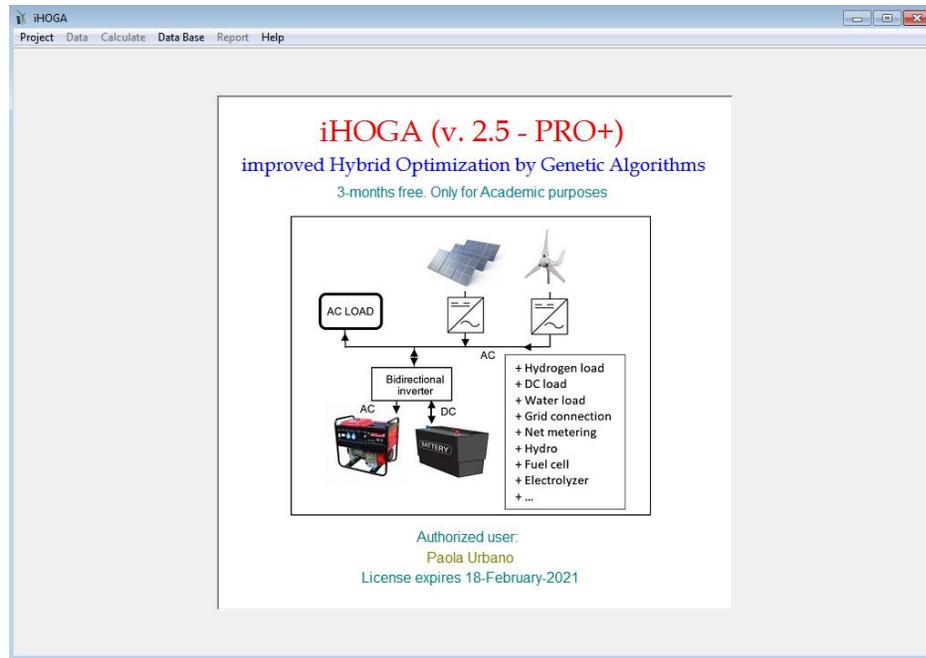


Figura 4.20 Interfaz de inicio del software iHOGA

A fin de tener una comparación lo más cercana posible, se emplearon los mismos valores en los diferentes parámetros de entrada para las simulaciones. Los resultados obtenidos para el caso de estudio se presentan en las Figuras 4.21 a 4.28:

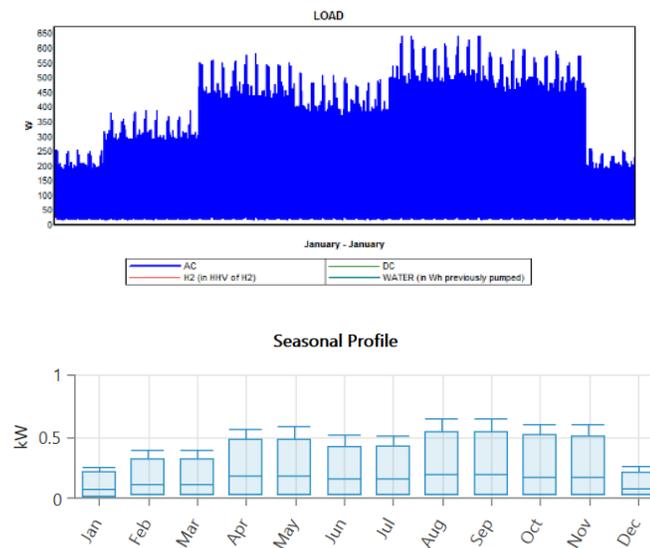


Figura 4.21 Perfil de demanda energética. Promedio anual de 3.56 kWh/d (HOMER 3.56 kWh/d)

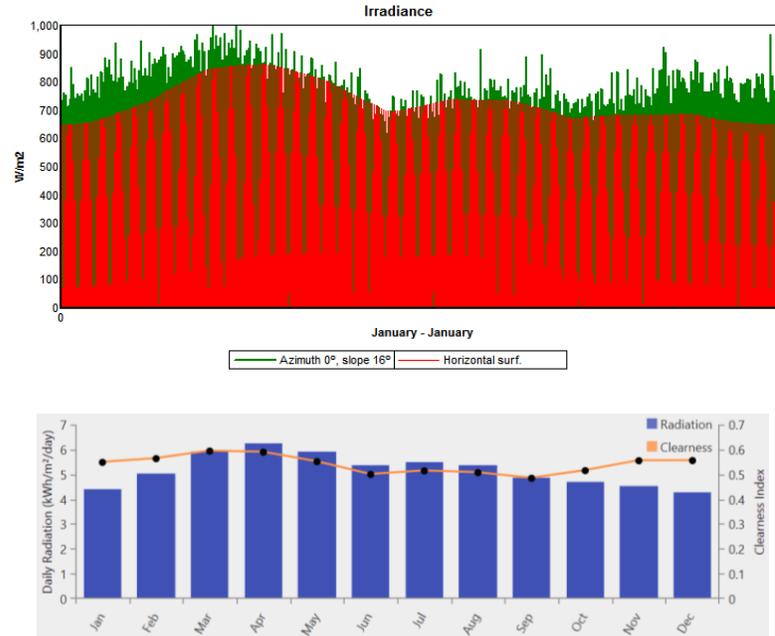


Figura 4.22 Perfil de recurso solar para un promedio anual de 5.17 kWh/m²/d (HOMER 5.18 kWh/m²/d).

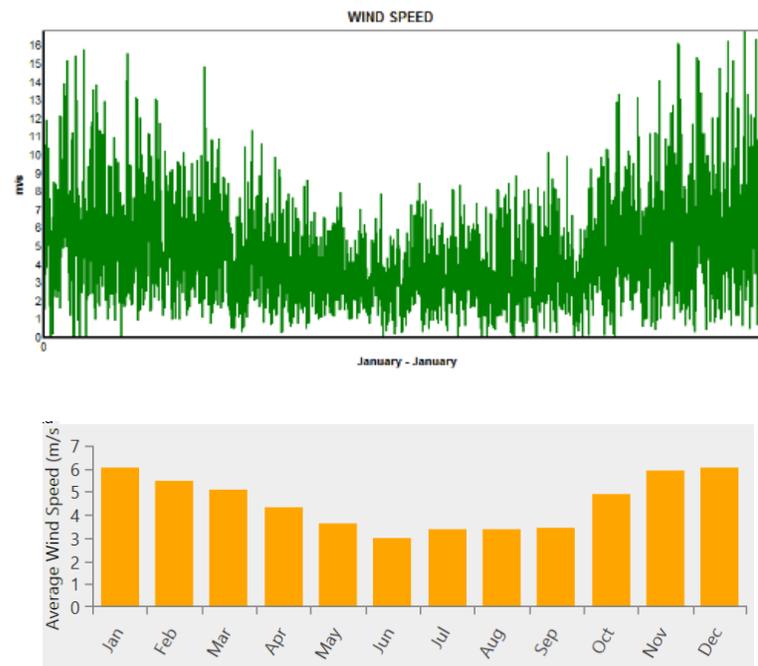


Figura 4.23 Perfil de recurso eólico para un promedio anual de 4.54 m/s (HOMER 4.54 m/s).

A continuación, se presentan los resultados de la optimización mono-objetivo del software iHOGA, que equivalen a los resultados de HOMER como simulador de optimización mono-criterio.

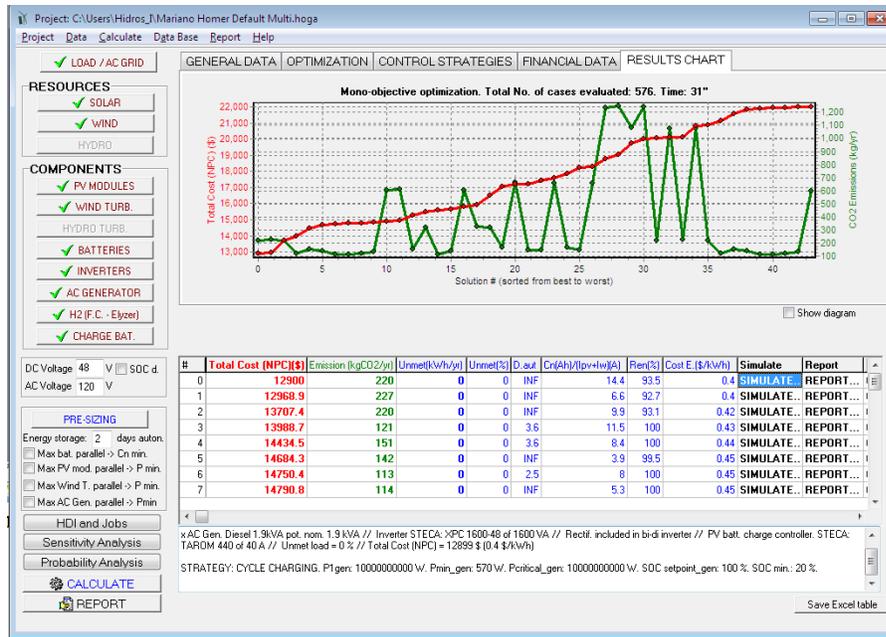


Figura 4.24 Interfaz de resultados mono-objetivo (iHOGA)

En la Figura 4.24, se observa la pantalla de resultados, donde en la parte superior, se presentan las tendencias del NPC y las emisiones de CO₂ de cada una de las alternativas evaluadas en su orden de enumeración. En la Tabla 4.16 se enlistan las alternativas enumeradas en orden de NPC y en la segunda columna se observan las emisiones generadas por cada una. Para visualizar los componentes de cada alternativa se exporta la Tabla de resultado a Excel para realizar el análisis. Un concentrado de dicha información se presenta en la Tabla 4.16. Los resultados de iHOGA se componen de 88 parámetros para cada alternativa, mientras que HOMER presenta 27.

Tabla 4.16 Alternativas generadas por iHOGA en el diseño mono-objetivo.

No.	NPC (\$)	Em.CO2 (kg/año)	Pot. FV (W)	Pot. Aero (W)	AC Gen (VA)	Cap. total. Bat. (Wh)	Inversor (W)	Estrategia	Días auton.	FR (%)	Gen. Empleo
0	12899.98	220.93	1600	0	1900	18720	1600	CC	Inf	93.45	0.0048
1	12968.94	227.49	1600	0	1900	8640	1600	CC	Inf	92.72	0.0048
2	13707.39	220.13	1600	0	1900	12960	1600	CC	Inf	93.08	0.0048
3	13988.67	121.2	2000	0	0	18720	1600	LF	3.56	100	0.006
4	14434.51	151.73	1600	925	0	18720	1600	LF	3.56	100	0.0051
5	14684.34	142.3	1600	925	1900	8640	1600	CC	Inf	99.52	0.0051
6	14750.44	113.06	2000	0	0	12960	1600	LF	2.46	100	0.006
7	14790.78	114.26	2000	0	1900	8640	1600	LF	Inf	100	0.006
8	14806.52	121.2	2000	0	1900	18720	1600	LF	Inf	100	0.006
9	14820.67	134.13	1600	925	0	12960	1600	LF	2.46	99.85	0.0051
10	14868.62	603.56	1200	0	1900	18720	1600	CC	Inf	70.71	0.0037

En la Tabla 4.16 se puede observar la configuración de las primeras 10 alternativas planteadas por la optimización mono-objetivo de iHOGA. Se encuentra que la alternativa con menor NPC (12,899.98) resulta ser un sistema FV con generador a diésel, inversor y banco de baterías, sistema que coincide con la alternativa de menor NCP (10,190.68) para HOMER, como se puede observar en la Tabla 4.10. Cabe resaltar que ambas simulaciones se llevan a cabo con los costos en dólares. Las diferencias se deben a que se emplearon equipos con características similares, más no totalmente iguales.

En la Figura 4.25 se presenta el comportamiento de las alternativas 0 (FV/Diésel/Bat/Conv) y 4 (EE/FV/Diésel/Bat/Conv), durante los primeros 30 días del año. (Conv: Conversor, inversor-rectificador)

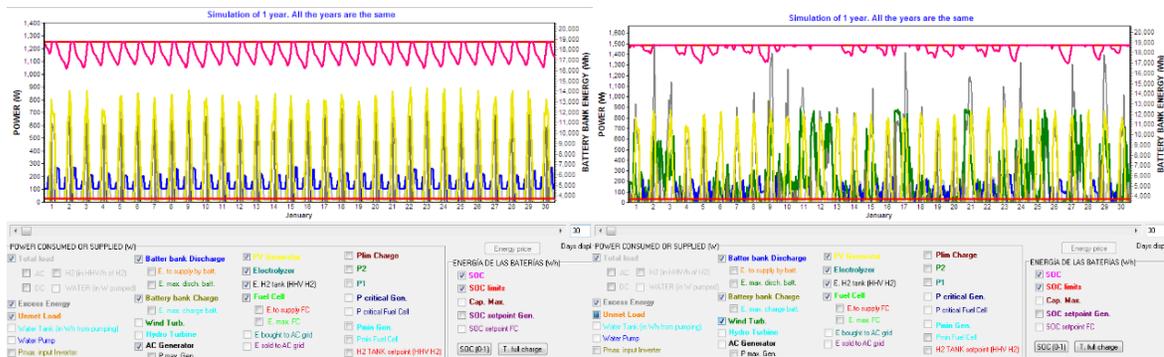


Figura 4.25 Comportamiento de la energía en las alternativas 0 y 4 de iHOGA mono-objetivo.

A continuación, se realiza la optimización multi-objetivo, como se puede observar en la Figura 4.26 de la interfaz de iHOGA. La interfaz de resultados se presenta en la Figura 4.27.

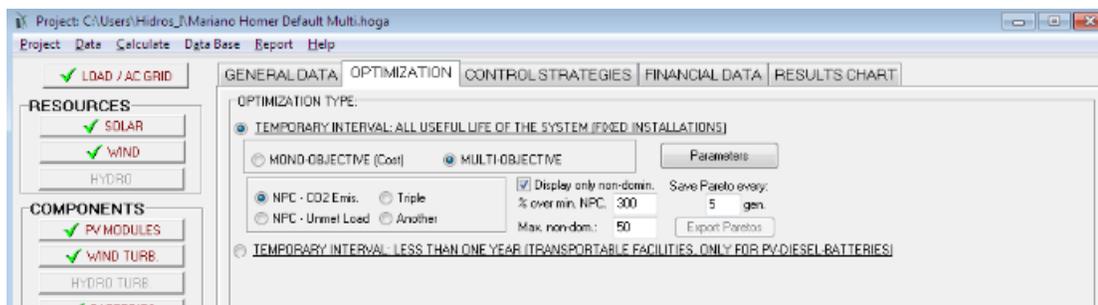


Figura 4.26 Interfaz de iHOGA para optimización multi-objetivo.

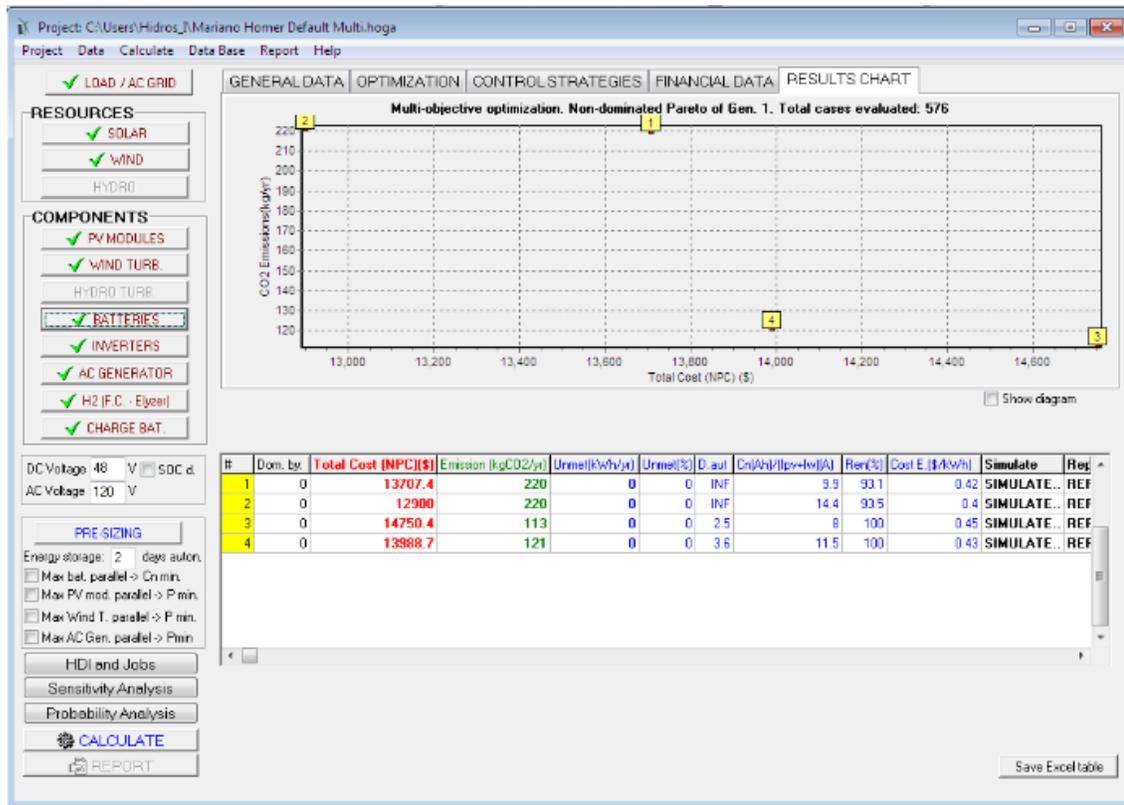


Figura 4.27 Interfaz de resultados de iHOGA multi-objetivo.

En esta ocasión, los resultados que se muestran en la Tabla de la Figura 4.27 son solamente de cuatro alternativas, debido a que se seleccionaron solo las alternativas no dominadas. Al incluirse también las soluciones dominadas se obtiene como respuesta 288 alternativas, donde las 4 primeras son las soluciones no dominadas, o independientes.

En la Figura 4.28 se presentan los gráficos del desempeño energético de las 4 alternativas resultantes de la optimización multi-objetivo de iHOGA.

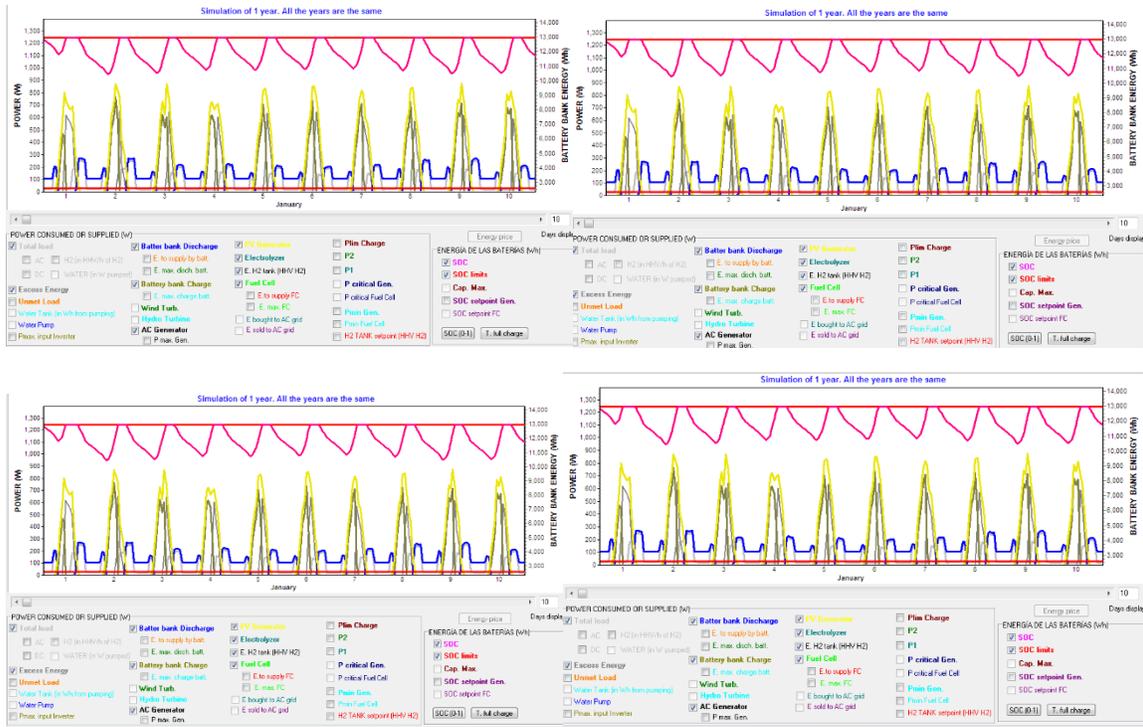


Figura 4.28 Del desempeño energético. Optimización multi-objetivo de iHOGA.

Como se puede observar, los sistemas resultantes presentan un desempeño energético similar. La Tabla 4.17 presenta los datos numéricos de los sistemas resultantes de la optimización multi-objetivo empleando iHOGA.

Tabla 4.17 Resultados de la optimización multi-objetivo empleando iHOGA.

No.	NPC (\$)	Pot. FV (W)	Pot. Aero (W)	AC Gen (VA)	Cap. total. Bat. (Wh)	Inversor (W)	Estrategia	Días auton.	FR (%)	Gen. Empleo
1	13707.39	100	0	1900	12960	1600	CC	inf	93.08	0.0048
2	12899.98	100	0	1900	18720	1600	CC	inf	93.45	0.0048
3	14750.44	100	0	0	12960	1600	LF	2.46	100	0.006
4	13988.67	100	0	0	18720	1600	LF	3.56	100	0.006

En la Tabla 4.17 se observan cuatro configuraciones de sistemas, todas con panel FV, banco de baterías e inversor. Solo dos de ellas incluyen un generador a diésel. El resultado presenta opciones para que el usuario decida cual elegir.

4.4.2 Comparación de resultados y análisis

Las alternativas con mejores puntajes, obtenidas empleando la combinación de HOMER y AMC3VAT, son comparables con los resultados obtenidos por el software iHOGA en su versión V2.5-Pro+, ya

que en ambos casos las alternativas que ocuparon los primeros lugares incluyen sistemas de generación de ER con una alta fracción renovable. En el caso de la optimización multicriterio el sistema obtenido se compone de un arreglo FV, un inversor y un banco de baterías. En el caso de la optimización multiobjetivo se presentan dos configuraciones de sistema, la primera coincide con la obtenida con AMC3VAT, y la segunda incluye, además, un generador a diésel; por tanto, la respuesta es ambigua, dejando a juicio del usuario la elección entre ambos sistemas.

En la Tabla 4.18 se observa que la alternativa con menor NPC (12,899.98) resulta ser un sistema FV con generador a diésel, inversor y banco de baterías, sistema que coincide con la alternativa de menor NCP (10,190.68) para HOMER, como se puede observar en la Tabla 4.12. Cabe resaltar que ambas simulaciones se llevan a cabo con los costos en dólares. Las diferencias se deben a que se emplearon equipos con características similares, más no totalmente iguales.

Comparando de manera general, es más corto el tiempo de simulación con iHOGA que con HOMER, al cual se le debe adicional el tiempo de emplear AMC3VAT como herramienta complementaria para la inclusión de múltiples criterios en la elección de un sistema sustentable y no solamente el aspecto económico. Por otro lado, la interpretación de los resultados resulta más amigable en el software HOMER y en AMC3VAT. Aunque iHOGA entrega más parámetros de cálculo para el análisis, HOMER arroja menos parámetros, con una menor dependencia entre sí.

La metodología propuesta y la de comparación, arrojaron resultados similares. La metodología y el software desarrollados en esta tesis permiten obtener resultados comparables con el software comercial que se eligió.

La propuesta permite una mayor interacción y participación de los interesados en el proceso de formulación de los valores de las entradas, lo cual permite llegar al objetivo principal de las herramientas de análisis multicriterio, que es ser guía y auxiliar para lograr el conceso en un proceso de toma de decisiones grupal.

Aunque el recurso eólico en la zona es catalogado como abundante, no se incluye un aerogenerador en ninguno de los sistemas sustentables obtenido por ambas metodologías. Esto puede deberse en parte, a que el recurso eólico no justifica la adquisición de un aerogenerador, debido a su alto costo con respecto a la demanda del caso de estudio que es baja. En el caso que se considerara una demanda energética para dos o más viviendas, es probable que el sistema óptimo si incluya un aerogenerador.

4.5 Desarrollo de casos de estudio adicionales y comparación de resultados

Con el fin de obtener un abanico de opciones para elegir un caso de estudio que permitiera la aplicación la metodología desarrollada, se tomaron en cuenta ocho casos de estudio en diferentes emplazamientos en los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, y de diferentes características (residencias de demanda media y baja, escuela kínder, hospedaje, comunidad), con el fin de seleccionar los casos más representativos.

1. Representa una residencia con demanda media-baja, ubicada en Chiapa de Corzo (Chiapas).
2. Residencia con demanda media-alta en Salina Cruz (Oaxaca).
3. Residencia con demanda promedio media-baja, a excepción del bimestre julio-agosto (alta), ubicada en Salina Cruz (Oaxaca).
4. Demanda energética de una escuela preescolar ubicada en Salina Cruz (Oaxaca).
5. Residencia con demanda media-baja en Tehuantepec (Oaxaca).
6. Hospedaje, ubicado en Salina Cruz (Oaxaca).
7. Construido a partir de la demanda del caso cinco ubicando la residencia de bajo consumo en la agencia municipal Mariano Oviedo de San Mateo del Mar (Oaxaca), ya que sus habitantes no cuentan con energía eléctrica y están catalogados con alto grado de marginación a 2010, a pesar de ser un sitio privilegiado en recurso eólico y solar (<http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=202480001>).
8. Caso de estudio desarrollado en una investigación de maestría de la UPCH (Universidad Popular de la Chontalpa, Cárdenas-Tabasco) quienes suministraron parte de la información de entrada requerida. Este último caso corresponde a una comunidad de 41 casas, ubicadas la agencia municipal playa El Bosque en el municipio de Centla (Tabasco).

La estimación de la demanda energética de los primeros cinco casos (y del caso siete), se realizó a partir de los recibos de la comisión nacional de electricidad (CFE).

A continuación, se presenta la Tabla 4.18 donde se resume la información procesada de dicha fuente de información:

Tabla 4.18 Demanda energética bimestral para los casos de estudio 1 a 5.

Demanda anual (kWh)	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
FEBRERO	511	1491	435	505	151
ABRIL	699	1689	575	438	244
JUNIO	734	1889	923	482	214
AGOSTO	688	1146	2436	653	265
OCTUBRE	656	1134	395	507	235
DICIEMBRE	720	1854	1311	654	110
Promedio	668	1533.83	1012.5	539.83	203.167

En la Tabla 4.18 se observa que el caso dos es el mayor consumidor y el caso cinco es el menor consumidor. Los casos 1, 4 y 5 cuentan con una demanda energética inferior a 1 MWh por bimestre. Los casos **2 y 3** podrían ser de mayor relevancia para esta investigación ya que el costo del kWh en el nivel de consumo excedente cuesta casi el triple que en consumos bajo e intermedio. Por ejemplo, en horario de invierno, la tarifa básica (0.802 a abril de 2019) aplica para los primeros 150 kWh consumidos; la tarifa intermedia (0.968 a abril de 2019) aplica para los siguientes 200 kWh consumidos; y la tarifa excedente (2.835 a abril de 2019) aplica a partir de los primeros 350 kWh. De manera similar para el horario de verano, la tarifa básica (0.718 a agosto de 2019) aplica para los primeros 300 kWh consumidos; la tarifa intermedia1 (0.843 a agosto de 2019) aplica para los siguientes 300 kWh consumidos; la tarifa intermedia2 (1.078 a agosto de 2019) aplica para los siguientes 300 kWh consumidos; y la tarifa excedente (2.879 a agosto de 2019) aplica a partir de los primeros 900 kWh.

En la Figura 4.29 se presentan los perfiles anuales con variaciones bimestrales de los primeros cinco casos:

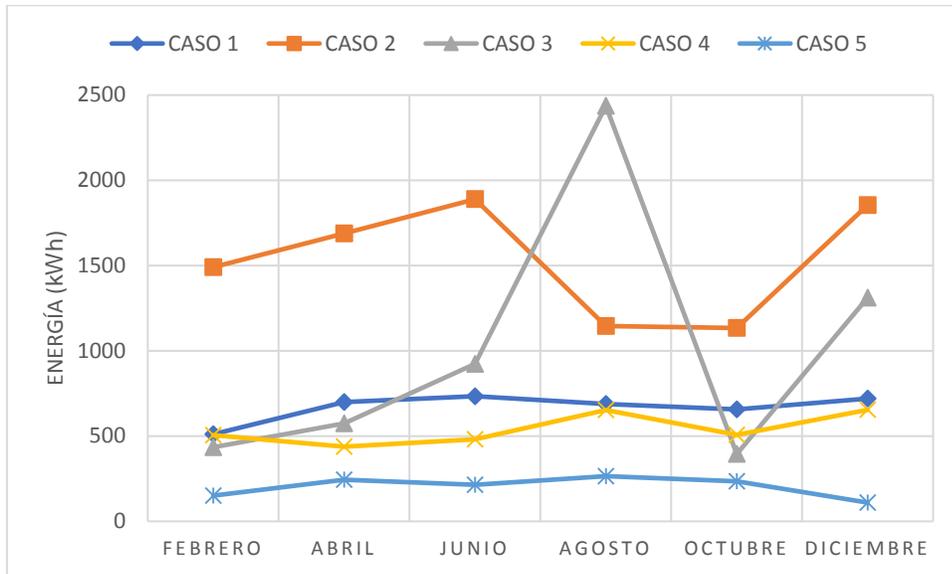


Figura 4.29 Perfil anual de demanda para casos de estudio 1 a 5.

Se observa que los casos 1, 4 y 5 nunca superan 1 MWh de consumo bimestral. Mientras que los casos 2 y 3 presentaron picos de 1,889 y 2,436 MWh, respectivamente. Al momento de diseñar un sistema, esta demanda energética bimestral, debe convertirse en demanda horaria. Para lo cual, se divide la demanda bimestral entre 60 días que tiene el bimestre, y posteriormente este resultado se divide entre 24 horas que tiene un día. Los perfiles anuales para estos dos casos se obtienen con algún software especializado para el diseño y simulación de SHGE (HOMER, iHOGA). De aquí se toma el caso **dos**, para quienes puede ser rentable invertir en un sistema renovable, que será retribuido a mediano plazo; y se construye el caso **siete**, el cual podría ser de interés para entidades de desarrollo social al llevar electrificación sustentable a un sitio carente de este servicio básico.

Para el caso seis, la demanda energética fue estimada a partir del consumo de los aparatos eléctricos (electrodomésticos, iluminación, bombas) que se encuentran instalados en unos departamentos de renta, más los que podrían conectar los huéspedes (celulares, computadoras, etc.). El emplazamiento se encuentra ubicado en San Antonio Monterrey (Oaxaca), donde los consumos energéticos suelen ser altos debido al uso prolongado de aire acondicionado por las altas temperaturas locales (27,6 °C promedio anual). Según el inventario de elementos existentes y que los usuarios podrían emplear en las instalaciones, se construye la Tabla 4.19:

Tabla 4.19 Datos de inventario del caso de estudio Departamentos.

ENERGÍA ELÉCTRICA CFE	CAPACIDAD (Wh)	DEPA 1	DEPA 2	DEPA 3	AREAS COMUNES	TOTAL	Horas prom	Total (kWh)	Pico (kWh)
FOCOS	11	9	6	9	10	34	9	3366	4488
VENTILADOR	70	1	0	1	0	2	4.5	630	1120
CLIMA	935	1	1	1	0	3	9	25245	33660
AFEITADORA/CEPILLO	15	1	1	1	0	3	0.5	22.5	45
ESTUFA INDUCCION	1400	1	0	1	0	2	1	2800	5600
MICROONDAS	1520	1	0	1	0	2	0.5	1520	3040
CAFETERA	700	1	0	1	0	2	1	1400	2800
LICUADORA	450	1	0	1	0	2	0.5	450	900
FRIGOBAR	190	1	0	1	0	2	24	9120	9120
CELULARES	5	2	2	2	1	7	8.5	297.5	420
LAPTOP	35	2	2	2	0	6	5	1050	1680
TELEVISIÓN	45	1	1	1	0	3	4	540	810
BATERIA PORTATIL	5	2	2	2	0	6	3.5	105	210
BOMBA ALBERCA 1.5 HP	800	0	0	0	1	1	7	5600	6400
BOMBA ALGIBE 2 HP	1000	0	0	0	1	1	0.5	500	1000
ROUTER	10.12	0	0	0	3	3	24	728.64	728.64
REFLECTOR	32	0	0	0	1	1	12	384	384
CAMARAS VIGILANCIA	6.5	0	0	0	4	4	24	624	624
CERCO ELECTRICO	8.4	0	0	0	1	1	24	201.6	201.6
TELEFONO	25	0	0	0	1	1	24	600	600
DESKTOP	150	0	0	0	1	1	10	1500	1800
IMPRESORA	3.5	0	0	0	1	1	10	35	42
LAVADORA	950	0	0	0	1	1	2.5	2375	3800
SECADORA	2000	0	0	0	1	1	2.5	5000	8000
PLANCHA	1000	1	1	1	1	4	0.5	2000	4000
							TOTAL	66094.24	91473.24

kWh/d	66.1	91.4
Energía	Prom	Pico

OTRAS ENERGÍAS

CALENTADOR SOLAR	1
REFLECTORES SOLARES	4

Los valores aproximados fueron tomados de la página: <https://www.electrocalculator.com>. Según la Tabla 4.19 la energía consumida sería en promedio de 66.1 kWh/d y el consumo máximo sería de unos 91.4 kWh/d. Este caso es también relevante, ya que se contará con un consumo energético alto, y se podrían aprovechar los recursos renovables disponibles con una retribución de la inversión a mediano plazo. En el lugar ya se han instalado luminarias fotovoltaicas, así como un calentador de agua solar, lo cual es muestra de la intención de aprovechar las ER por parte de la administración.

Finalmente, para el caso ocho, la demanda energética fue estimada siguiendo el patrón de consumo de una comunidad rural típica, con variación horaria, según se presenta en la Tabla 4.20:

Tabla 4.20 Perfil típico de una residencia (HOMER).

Horas	Consumo (kWh)	Horas	Consumo (kWh)
0	3.12	12	12.48
1	3.12	13	12.48
2	3.12	14	13
3	3.12	15	13.26
4	3.12	16	14.04
5	4.68	17	15.6
6	7.8	18	17.55
7	10.92	19	18.72
8	12.48	20	18.72
9	12.48	21	17.55
10	12.48	22	14.04
11	12.48	23	7.8

Este caso también es relevante porque, al igual que el caso siete, sería de interés para entidades de desarrollo social, con el fin de fortalecer el sector rural en términos de electrificación. Según lo expuesto anteriormente, los casos 2 (casa Porfirio), 6 (casa Oviedo), 7 (departamentos) y 8 (Playa el Bosque) serán desarrollados aplicando la metodología planteada. En la Tabla 4.21, se resumen los datos de entrada de tres de los casos de estudio para la posterior comparación de resultados.

Tabla 4.21 Otros casos de estudio para aplicar la metodología desarrollada y comparar.

Nombre	Características	Ubicación (DMS/DD)	Demanda	Demanda media (kWh)	Demanda diaria (kWh/d)	V (m/s)
Casa Porfirio	Alto consumo con buena disponibilidad de recursos renovables.	16°12'49"N 95°11'53"W 16.2137, -95.1983	Demanda promedio bimestral 1533.83 kWh (CFE), variaciones horarias estimadas.	1.0652	25.5648	4.83
Casa Oviedo	Zona remota con alta disponibilidad de recursos renovables.	16°12'16"N 94°59'11"W 16.2044, -94.9863	Demanda promedio bimestral 203.16667 kWh (CFE), perfil típico de casa rural escalado.	0.1411	3.3864	4.85
Departamentos	Alto consumo con buena disponibilidad de recursos renovables.	16°14'38"N 95°11'40"W 16.2441, -95.1945	Demanda promedio diaria 66.1 kWh, Suma de cargas estimadas.	2.7542	66.1008	4.83
Playa el Bosque	Zona de playa sin electrificación con buena disponibilidad de recursos renovables.	18°36'55"N 92°41'08"W 18.6148, -92.6853	Demanda promedio diaria 264.16 kWh, perfil típico de casa rural.	11.01	264.16	4.32

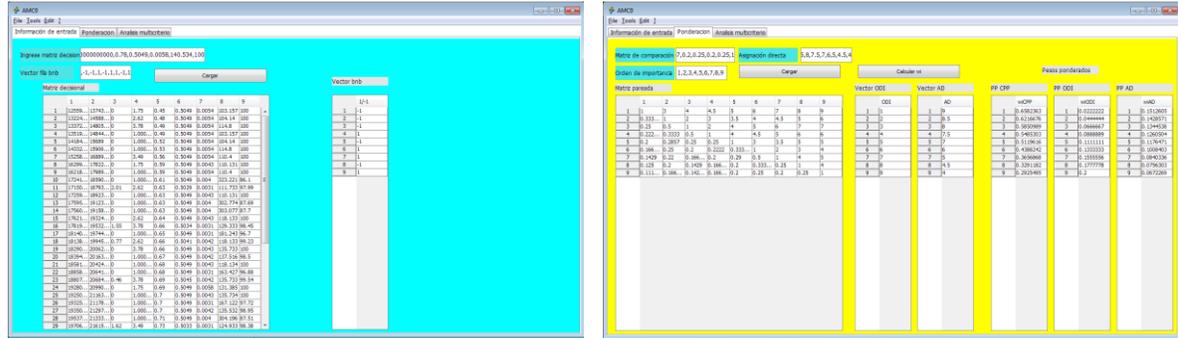
Los datos de entrada para la estimación de los recursos eólico y solar se obtienen de las bases de datos de la NASA (tomados directamente por el software de diseño).

4.5.1 Resultados de los casos adicionales desarrollados

Aplicando la metodología desarrollada y descrita paso a paso en la sección 4.4, se obtienen las Tablas 4.22 y 4.23 donde se comparan los resultados obtenidos para los casos de estudio analizados aplicando la metodología multicriterio y el software desarrollado para tal fin (AMC3VAT).

Las impresiones de pantalla de los resultados obtenidos con el software AMC3VAT se presentan a continuación para cada uno de los cuatro casos, en las Figuras 4.28 a 4.31.

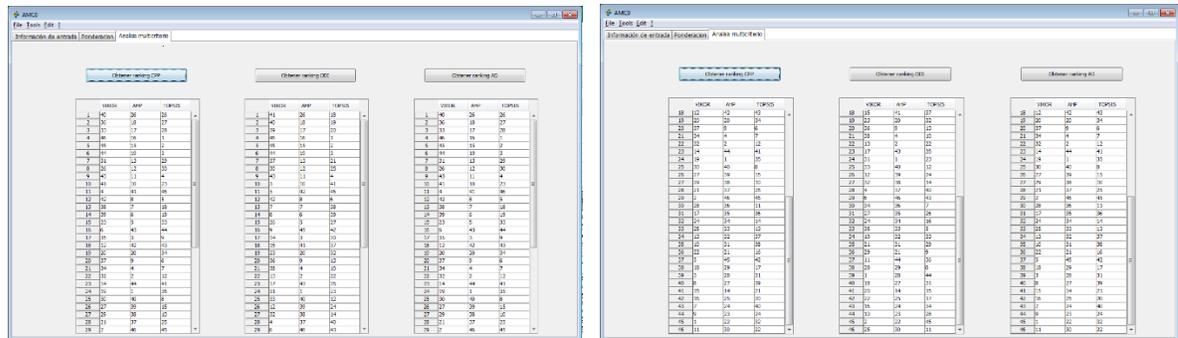
Casa Oviedo:



(a)

(b)

Figura 4.30 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Oviedo.



(c)

(d)

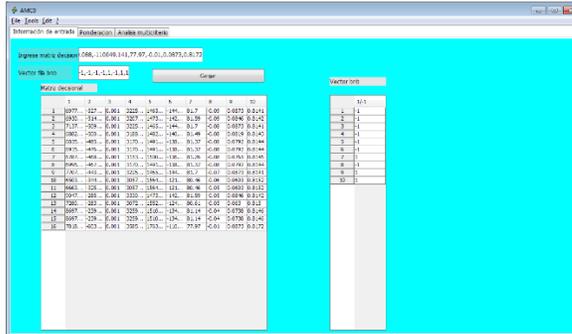
Figura 4.30 (c) y (d) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Oviedo.

Estos resultados se pueden copiar y se pegan en una hoja de Excel con el fin de encontrar la alternativa que se encuentra con mayor frecuencia en los puntajes altos, y con mejor frecuencia en los puntajes bajos, como se muestra a continuación en la Figura 4.30 (e).

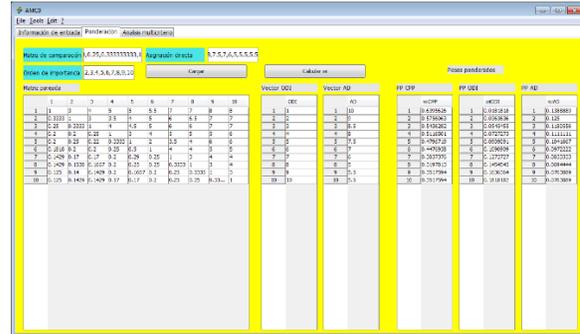
	CPP			ODI			AD			FREC+	FREC-
1	40	26	26	41	26	18	40	26	26	3	3
2	36	18	27	40	18	19	36	18	27	3	1
3	33	17	28	39	17	20	33	17	28	3	2
4	46	16	1	46	16	1	46	16	1	0	0
5	45	15	2	45	15	2	45	15	2	0	2
6	44	19	3	44	19	3	44	19	3	0	0
7	31	13	29	37	13	21	31	13	29	0	2
8	26	12	30	30	12	25	26	12	30	0	3
9	43	11	4	43	11	4	43	11	4	0	3
10	41	10	23	3	10	41	41	10	23	0	1
11	4	41	46	5	42	46	4	41	46	0	4
12	42	8	5	42	8	6	42	8	5	0	0
13	38	7	18	7	7	38	38	7	18	0	0
14	39	6	19	8	6	39	39	6	19	0	3
15	23	5	33	26	5	27	23	5	33	3	3
16	6	43	44	9	45	42	6	43	44	3	5
17	35	3	9	14	3	30	35	3	9	3	3
18	12	42	43	15	41	37	12	42	43	4	3
19	20	20	34	23	20	32	20	20	34	4	0
20	37	9	6	36	9	13	37	9	6	1	3
21	34	4	7	38	4	10	34	4	7	0	5
22	32	2	12	13	2	22	32	2	12	0	8
23	14	44	41	17	43	35	14	44	41	0	3
24	19	1	35	31	1	23	19	1	35	0	5
25	30	40	8	33	40	12	30	40	8	0	4
26	27	39	15	12	39	24	27	39	15	5	0
27	29	38	10	32	38	14	29	38	10	2	3
28	21	37	25	4	37	40	21	37	25	2	5
29	2	46	45	6	46	43	2	46	45	0	4
30	28	36	11	34	36	7	28	36	11	0	3
31	17	35	36	27	35	26	17	35	36	0	3
32	24	34	14	24	34	16	24	34	14	0	2
33	25	33	13	35	33	5	25	33	13	2	0
34	13	32	37	19	32	33	13	32	37	0	1
35	10	31	38	21	31	29	10	31	38	0	0
36	22	21	16	29	21	9	22	21	16	2	1
37	5	45	42	11	44	36	5	45	42	0	0
38	18	29	17	28	29	8	18	29	17	0	0
39	3	28	31	1	28	44	3	28	31	1	2
40	8	27	39	18	27	31	8	27	39	3	2
41	15	14	21	20	14	15	15	14	21	1	0
42	16	25	20	22	25	17	16	25	20	0	2
43	7	24	40	16	24	34	7	24	40	0	0
44	9	23	24	10	23	28	9	23	24	3	2
45	1	22	32	2	22	45	1	22	32	3	3
46	11	30	22	25	30	11	11	30	22	3	0

Figura 4.30 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Casa Oviedo.

Departamentos:



(a)



(b)

Figura 4.31 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

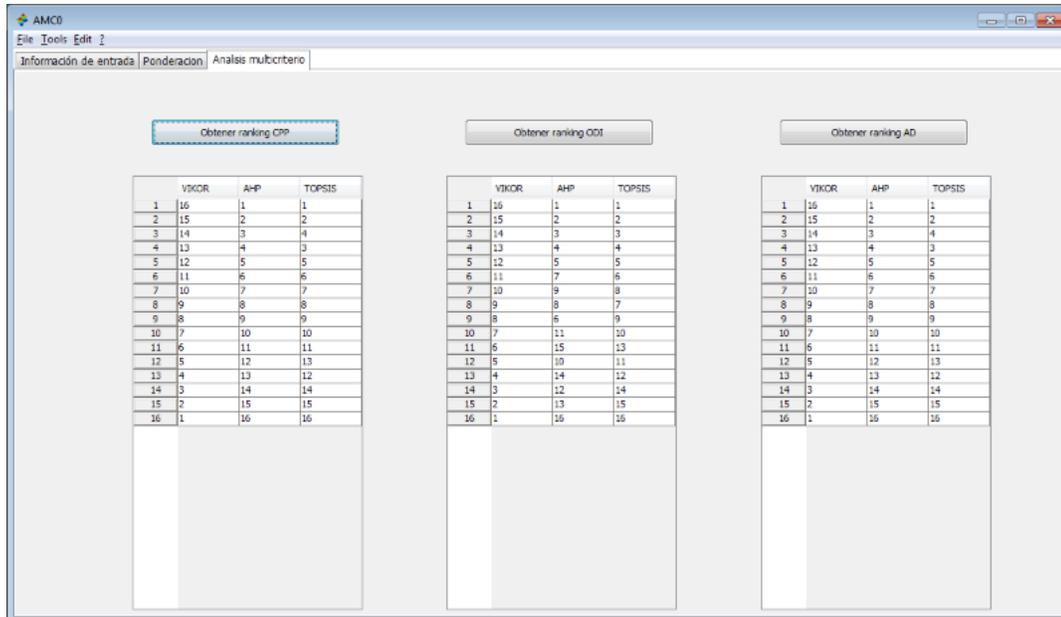
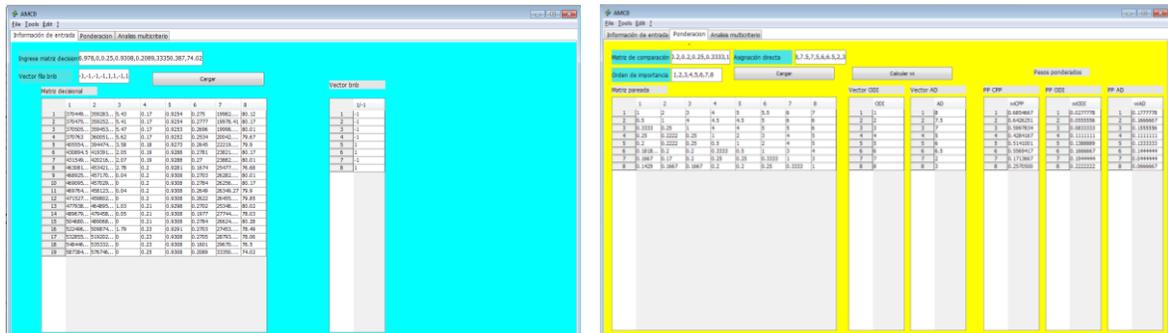


Figura 4.31 (c) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

	CPP			ODI			AD			FREC+	FREC-
1	16	1	1	16	1	1	16	1	1	6	3
2	15	2	2	15	2	2	15	2	2	6	3
3	14	3	4	14	3	3	14	3	4	6	3
4	13	4	3	13	4	4	13	4	3	6	3
5	12	5	5	12	5	5	12	5	5	6	0
6	11	6	6	11	7	6	11	6	6	0	0
7	10	7	7	10	9	8	10	7	7	0	0
8	9	8	8	9	8	7	9	8	8	0	0
9	8	9	9	8	6	9	8	9	9	0	0
10	7	10	10	7	11	10	7	10	10	0	0
11	6	11	11	6	15	13	6	11	11	0	0
12	5	12	13	5	10	11	5	12	13	3	4
13	4	13	12	4	14	12	4	13	12	3	3
14	3	14	14	3	12	14	3	14	14	3	6
15	2	15	15	2	13	15	2	15	15	3	5
16	1	16	16	1	16	16	1	16	16	3	6

Figura 4.31 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Departamentos.

Playa el Bosque:



(a)

(b)

Figura 4.32 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Playa el Bosque.

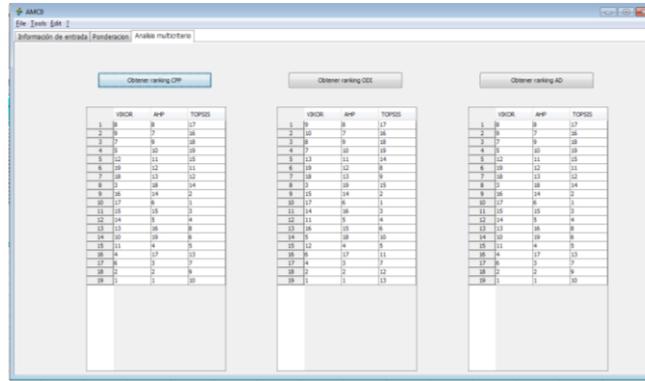
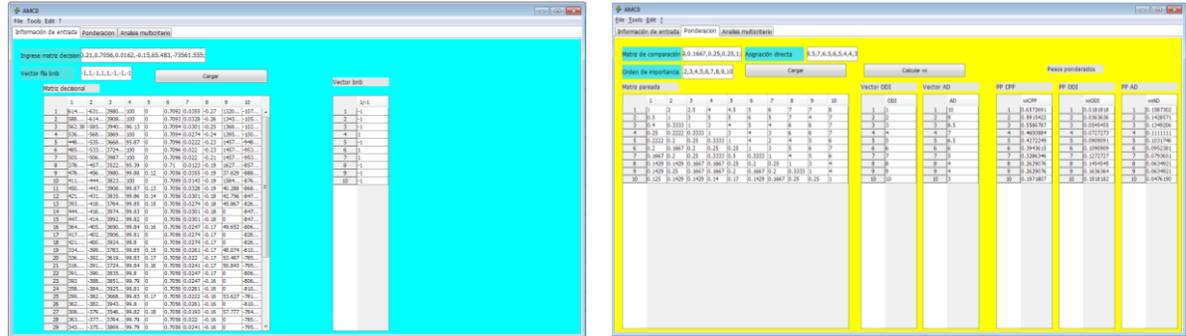


Figura 4.32 (c) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Departamentos.

	CPP			ODI			AD			FREC+	FREC-
1	8	8	17	9	8	17	8	8	17	0	6
2	9	7	16	10	7	16	9	7	16	0	6
3	7	9	18	8	9	18	7	9	18	0	3
4	5	10	19	7	10	19	5	10	19	0	6
5	12	11	15	13	11	14	12	11	15	2	4
6	19	12	11	19	12	8	19	12	11	0	5
7	18	13	12	18	13	9	18	13	12	6	3
8	3	18	14	3	19	15	3	18	14	6	0
9	16	14	2	15	14	2	16	14	2	6	2
10	17	6	1	17	6	1	17	6	1	4	5
11	15	15	3	14	16	3	15	15	3	3	3
12	14	5	4	11	5	4	14	5	4	2	2
13	13	16	8	16	15	6	13	16	8	1	3
14	10	19	6	5	18	10	10	19	6	1	0
15	11	4	5	12	4	5	11	4	5	2	0
16	4	17	13	6	17	11	4	17	13	3	0
17	6	3	7	4	3	7	6	3	7	3	3
18	2	2	9	2	2	12	2	2	9	3	1
19	1	1	10	1	1	13	1	1	10	3	2

Figura 4.32 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Playa El Bosque.

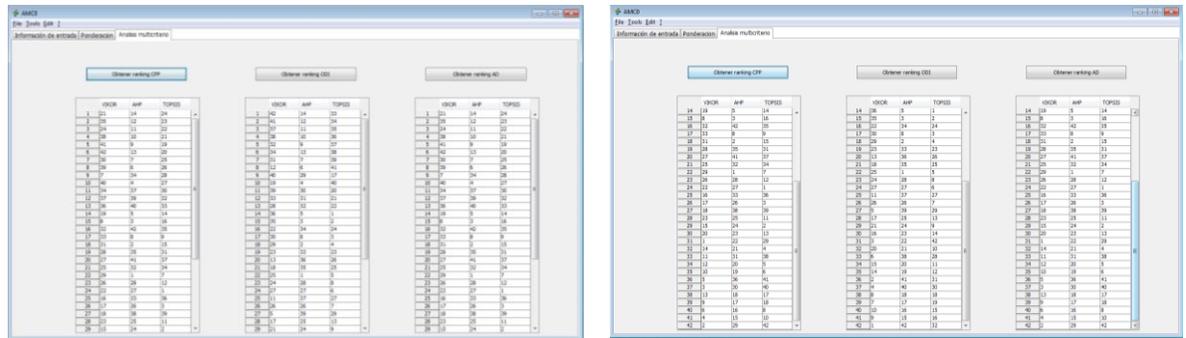
Casa Porfirio:



(a)

(b)

Figura 4.33 (a) y (b) Entradas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Porfirio.



(c)

(d)

Figura 4.33 (c) y (d) Salidas para el análisis multicriterio AMC3VAT – Casa Porfirio.

En las Figuras 4.30 a 4.33 (a) se muestran las matrices decisionales para cada uno de los casos y el vector de conveniencia BNB (Beneficiosos 1, no beneficioso -1). En las Figuras 4.30 a 4.33 (b) se muestran las MCP para cada caso y los valores de entrada para calcular la ponderación de los criterios por las metodologías adicionales ODI y AD. Se muestran los datos cargados al software y también los resultados de los pesos ponderados calculados aplicando las tres metodologías de ponderación. Posteriormente, en las Figuras 4.30 a 4.33 (c) y (d) se presentan los resultados de aplicar las tres herramientas de MCDM bajo los tres conjuntos de ponderación de criterios, obteniéndose nueve columnas con las alternativas en orden de conveniencia. Para elegir la alternativa seleccionada por el software, se dividen las columnas en tres secciones (de manera arbitraria y según el número de alternativas) donde las de la parte superior son las mejores, las de la parte inferior son las peores, quedando en la parte media las intermedias. La alternativa que esté con más frecuencia en el grupo superior y con menos frecuencia en el grupo inferior, será la alternativa ganadora. Finalmente, en las Figuras 4.30 a 4.33 (e) se indican las Tablas en Excel con la frecuencia de las alternativas en los

mejores puntajes y en los peores puntajes. La alternativa ganadora es la que se encuentra con mayor frecuencia entre los puntajes altos y con menor frecuencia entre los puntajes bajos.

Altern	CPP			ODI			AD			FREC+	FREC-
1	21	14	24	42	14	33	21	14	24	0	1
2	35	12	23	41	12	34	35	12	23	0	3
3	24	11	22	37	11	35	24	11	22	0	2
4	38	10	21	38	10	36	38	10	21	0	3
5	41	9	19	32	9	37	41	9	19	0	4
6	42	13	20	34	13	38	42	13	20	0	5
7	30	7	25	31	7	39	30	7	25	0	1
8	39	6	26	12	6	41	39	6	26	0	3
9	7	34	28	40	29	17	7	34	28	3	3
10	40	4	27	19	4	40	40	4	27	3	5
11	34	37	30	39	30	20	34	37	30	3	3
12	37	39	32	33	31	21	37	39	32	3	3
13	36	40	33	28	32	22	36	40	33	0	2
14	19	5	14	36	5	1	19	5	14	3	1
15	8	3	16	35	3	2	8	3	16	0	5
16	32	42	35	22	34	24	32	42	35	0	4
17	33	8	9	30	8	3	33	8	9	0	5
18	31	2	15	29	2	4	31	2	15	0	6
19	28	35	31	23	33	23	28	35	31	2	4
20	27	41	37	13	36	26	27	41	37	0	3
21	25	32	34	18	35	25	25	32	34	4	0
22	29	1	7	25	1	5	29	1	7	2	0
23	26	28	12	24	28	8	26	28	12	2	0
24	22	27	1	27	27	6	22	27	1	4	0
25	16	33	36	11	37	27	16	33	36	0	0
26	17	26	3	26	26	7	17	26	3	0	0
27	18	38	39	5	39	29	18	38	39	0	0
28	23	25	11	17	25	13	23	25	11	0	1
29	15	24	2	21	24	9	15	24	2	0	2
30	20	23	13	16	23	14	20	23	13	0	3
31	1	22	29	3	22	42	1	22	29	0	3
32	14	21	4	20	21	10	14	21	4	1	1
33	11	31	38	6	38	28	11	31	38	1	0
34	12	20	5	15	20	11	12	20	5	1	0
35	10	19	6	14	19	12	10	19	6	3	0
36	5	36	41	2	41	31	5	36	41	1	2
37	3	30	40	4	40	30	3	30	40	2	0
38	13	18	17	8	18	18	13	18	17	3	3
39	9	17	18	7	17	19	9	17	18	0	0
40	6	16	8	10	16	15	6	16	8	0	3
41	4	15	10	9	15	16	4	15	10	3	3
42	2	29	42	1	42	32	2	29	42	1	3

Figura 4.33 (e) Alternativa más frecuente en alto puntaje y menos frecuente en bajo puntaje – Casa Porfirio.

En las Figuras 4.30 a 4.33 (a) se muestran las matrices decisionales para cada uno de los casos y el vector de conveniencia BNB (Beneficiosos 1, no beneficioso -1). En las Figuras 4.30 a 4.33 (b) se muestran las MCP para cada caso y los valores de entrada para calcular la ponderación de los criterios por las metodologías adicionales ODI y AD. Se muestran los datos cargados al software y también los resultados de los pesos ponderados calculados aplicando las tres metodologías de ponderación. Posteriormente, en las Figuras 4.30 a 4.33 (c) y (d) se presentan los resultados de aplicar las tres herramientas de MCDM bajo los tres conjuntos de ponderación de criterios, obteniéndose nueve columnas con las alternativas en orden de conveniencia. Para elegir la alternativa seleccionada por el software, se dividen las columnas en tres secciones (de manera arbitraria y según el número de alternativas) donde las de la parte superior son las mejores, las de la parte inferior son las peores, quedando en la parte media las intermedias. La alternativa que esté con más frecuencia en el grupo superior y con menos frecuencia en el grupo inferior, será la alternativa ganadora. Finalmente, en las Figuras 4.30 a 4.33 (e) se indican las Tablas en Excel con la frecuencia de las alternativas en los mejores puntajes y en los peores puntajes. La alternativa ganadora es la que se encuentra con mayor frecuencia entre los puntajes altos y con menor frecuencia entre los puntajes bajos.

Cabe resaltar que en esta etapa de la investigación ya no se contaba con la licencia de HOMER, por lo cual fue necesario realizar las simulaciones monocriterio con el software iHOGA, el cual también genera diferentes alternativas independientes ordenadas según el valor menor del NPC. Dicho software, cuenta con un segundo modo de optimización denominado multiobjetivo, cuyo resultado se indica en la Tabla 4.22, en la segunda columna, segunda fila de cada caso (1, 9, 2 y 36), mientras que los resultados de AMC3VAT (Figuras 4.30 a 4.33) se registraron en la Tabla 4.22, segunda columna, primera fila de cada caso (26, 5, 8, 21). La metodología empleada para obtener las alternativas con iHOGA queda consignada en el ANEXO C.

En la Tabla 4.22 Se presentan las diferentes configuraciones obtenidas para los cuatro casos de estudio analizados. Para cada uno de los casos se analizaron diferentes alternativas, tantas como la cantidad de soluciones independientes obtenidas en la primera etapa de diseño monocriterio. Por ejemplo, para el caso de Playa el Bosque, se obtuvieron y analizaron 19 alternativas diferentes, dando como el óptimo multicriterio la alternativa número 8 y como el óptimo multiobjetivo la número 2. En la Tabla 4.23 se enlistan los criterios empleados para la comparación entre las diferentes alternativas, con lo cual se puede entender el por qué fue seleccionada una alternativa MCDM diferente a la MODM.

Tabla 4.22 Resultados del desarrollo de otros casos de estudio – Configuración.

Caso Alternativas	MCDM MODM	FV (SXP)	Aero	Gen. AC	Baterías (SXP)	Inversor	Rectificador	Est. control	Entradas
Casa Oviedo	26	2X1 450 EGE	1x962 RTO 1kW	1900	24x1 390 Hawker TVS5	1600	960.31	CC	2d 6%
46	1	2x2 450 EGE	0	0	24x1 180 Hawker TLS3	1600	0	LF	12h 0%
Departamentos	5	2X29 450 EGE	1x962 RTO 1kW	0	24x1 3360 LM3000	12000	116.74	CC	2d 3%
16	9	2X32 450 EGE	1x962 RTO 1kW	20000	24x1 3360 LM3000	12000	116.74	CC	2d 6% ACG
Playa el Bosque	8	2x83 330 AMER	1x962 RTO 1kW	6x1900	24x1 3360 LM3000	30000	1992	LF	3d 6%
19	2	2x102 450 EGE	1x962 RTO 1kW	4x1900	24x1 3360 LM3000	30000	1992	LF	3d 6%
Casa Porfirio	21	2x12 330 AMER	1x962 RTO 1kW	0	1x1 213.3 B-Box Pro10	5000	3360	LF	2d 10%
42	8	2x6 330 AMER	1x962 RTO 1kW	4000	1x1 213.3 B-Box Pro10	5000	3360	LF	2d 0% ACG

Tabla 4.23 Resultados del desarrollo de otros casos de estudio – Criterios.

Caso Alternativa	NPC €	Em.CO2 kg/año	Días auto	Fracción renov.	LCE	HDI	Empleos	Vida de bat	C. Cap. Inic	Costo energía comprada	Costo energía vendida
Casa Oviedo	21178.869	167.122	1E+10	97.72	0.7	0.5049	0.0031	18	19325.8	NA	NA
46	13743.903	103.157	1.75	100	0.45	0.5049	0.0054	10.4	12559.5	NA	NA
Departamentos	-48534.273	3170.835	1E+10	81.37	-0.08	0.8144	0.0792	18	68352.8	14915.166	-138651
16	-44367.047	3225.567	1E+10	81.7	-0.07	0.8141	0.0873	18	77075.7	14652.658	-144183
Playa el Bosque	463081.062	25477.408	2.78	76.68	0.2	0.9281	0.1674	18	453421.5	NA	NA
19	370475.469	19978.41	5.41	80.17	0.17	0.9254	0.2777	18	359253	NA	NA
Casa Porfirio	-39128.289	316.979	0.16	99.84	-0.17	0.7056	0.0241	10	37249.8	50.843	-79580.8
42	-45720.723	378.831	1E+10	95.39	-0.19	0.71	0.0123	10	35223.28	1627.366	-85729

Estas diferencias se presentan debido a la posibilidad que tienen las herramientas multicriterio de priorizar uno de los pilares de la sustentabilidad por encima de los demás, según las preferencias del centro decisor o de los interesados.

La propuesta de sistema para **Casa Oviedo** tiene como objetivo cubrir la demanda energética de un hogar mediano (2 adultos 3 jóvenes) para la cual se da mayor peso o importancia a los criterios relacionados con el aspecto económico, en segundo lugar, al aspecto social, y en última instancia, al aspecto ambiental. Lo anterior se refleja en la Tabla 4.24 en la cual se registraron los valores asignados para las metodologías de ponderación ODI y AD y en la Tabla 4.25 que muestra la MCP para este caso; Donde los criterios económicos tienen mayor valor o prioridad y los ambientales la menor.

Tabla 4.24 Asignación de pesos ODI y AD para Casa Oviedo.

	C. Cap. Inicial	NPC	No cubierta	Auton.	LCE	HDI	Empleos	Em. CO2	Fracción renovable
BNB	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
Valor ODI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor AD	9	8.5	8	7.5	7	6	5	4.5	4

Tabla 4.25 Matriz de comparación pareada (MCP) para Casa Oviedo.

MCP	C. Cap. Inicial	NPC	No cubierta	Auton.	LCE	HDI	Empleos	Em. CO2	Fracción renovable
C. Cap. Inicial	1	3	4	4.5	5	6	7	8	9
NPC	0.3333	1	2	3	3.5	4	4.5	5	6
No cubierta	0.25	0.5	1	2	4	5	6	7	7
Auton.	0.2222	0.3333	0.5	1	4	4.5	5	6	6
LCE	0.2	0.2857	0.25	0.25	1	3	3.5	5	5
HDI	0.1667	0.25	0.2	0.2222	0.3333	1	2	3	4
Empleos	0.1429	0.2222	0.1667	0.2	0.2857	0.5	1	4	5
Em. CO2	0.125	0.2	0.1429	0.1667	0.2	0.3333	0.25	1	4
Fracción renovable	0.1111	0.1667	0.1429	0.1667	0.2	0.25	0.2	0.25	1

Para Casa Oviedo, la alternativa óptima desde el punto de vista multicriterio es la número 26 (Tabla. 4.22) y desde el punto de vista multiobjetivo es la número 1, entre 46 opciones analizadas.

De otro lado, en la propuesta para los **departamentos** se toman como prioritarios los criterios económicos, en segundo lugar, los ambientales y en tercer lugar los sociales; ya que se trata de un consumidor interesado en la economía y en ofrecer hospedaje amigable con el ambiente, como se puede observar en las Tablas 4.26 y 4.27 empleadas para la ponderación de criterios por los métodos AD, ODI y CPP.

Tabla 4.26 Asignación de pesos ODI y AD para Departamentos.

	C. Cap. Inicial	NPC	No cubierta	Em. CO2	C. E. comprada	C. E. vendida	Fracción renovable	LCE	Empleos	HDI
BNB	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
Valor ODI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor AD	10	9	8.5	8	7.5	7	6	5	5.5	5.5

Tabla 4.27 Matriz de comparación pareada (MCP) para Departamentos.

MCP	C. Cap. Inicial	NPC	No cubierta	Em. CO2	C. E. comprada	C. E. vendida	Fracción renovable	LCE	Empleos	HDI
C. Cap. Inicial	1	3	4	5	5	5.5	7	7	8	8
NPC	0.3333	1	3	3.5	4	5	6	6.5	7	7
No cubierta	0.25	0.333	1	4	4.5	5	6	6	7	7
Em. CO2	0.2	0.2	0.25	1	3	4	5	5	5	6
C. E. comprada	0.2	0.25	0.2222	0.3333	1	2	3.5	4	6	6
C. E. vendida	0.1818	0.2	0.2	0.25	0.5	1	4	4	5	5
Fracción renovable	0.1429	0.167	0.1667	0.2	0.2857	0.25	1	3	4	4
LCE	0.1429	0.154	0.1667	0.2	0.25	0.25	0.3333	1	3	4
Empleos	0.125	0.143	0.1429	0.2	0.1667	0.2	0.25	0.333	1	3
HDI	0.125	0.143	0.1429	0.1667	0.1667	0.2	0.25	0.25	0.3333	1

Para los departamentos, la alternativa óptima desde el punto de vista multicriterio es la número 5 (Tabla. 4.22) y desde el punto de vista multiobjetivo es la número 9, entre 16 opciones analizadas.

El tercer caso, **Playa el Bosque**, busca un sistema energético que supla las necesidades de la comunidad a bajo costo inicial y de mantenimiento, para que las cuotas mensuales sean económicas. Por lo tanto, se priorizan los aspectos económicos y sociales, dejando en tercer lugar los criterios ambientales. Lo anterior se ve reflejado en las Tablas 4.28 y 4.29 de las cuales se toman los valores para la ponderación de los criterios con el software desarrollado AMC3VAT.

Tabla 4.28 Asignación de pesos ODI y AD para Playa el Bosque.

	NPC	C. Cap. Inicial	No cubierta	LCE	HDI	Empleos	Em. CO2	Fracción renovable
Signo	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
Valor ODI	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor AD	8	7.5	7	5	6	6.5	2	3

Tabla 4.29 Matriz de comparación pareada (MCP) para Playa el Bosque.

MCP	NPC	C. Cap. Inicial	No cubierta	LCE	HDI	Empleos	Em. CO2	Fracción renovable
NPC	1	2	3	4	5	5.5	6	7
C. Cap. Inicial	0.5	1	4	4.5	4.5	5	6	6
No cubierta	0.3333	0.25	1	4	4	5	5	6
LCE	0.25	0.2222	0.25	1	2	3	4	5
HDI	0.2	0.2222	0.25	0.5	1	2	4	5
Empleos	0.182	0.2	0.2	0.3333	0.5	1	3	4
Em. CO2	0.1667	0.17	0.2	0.25	0.25	0.3333	1	3
Fracción renovable	0.1429	0.1667	0.1667	0.2	0.2	0.25	0.3333	1

El caso de estudio Playa el Bosque se obtuvo que la alternativa óptima desde el punto de vista multicriterio es la número 8 (Tabla. 4.22) y desde el punto de vista multiobjetivo es la número 2, entre 19 opciones analizadas.

Finalmente, **Casa Porfirio**, pretende suplir gran parte de su demanda energética a partir de fuentes renovables disponibles, por medio de un sistema sustentable, priorizando los aspectos ambientales y económicos, en menor medida los aspectos sociales, y los económicos que representan ganancias extra, como por ejemplo la venta de la energía que se genera en exceso en este tipo de sistemas. Lo anterior se ve reflejado en las Tablas 4.30 y 4.31 de las cuales se toman los valores para la ponderación de los criterios con el software desarrollado AMC3VAT.

Tabla 4.30 Asignación de pesos ODI y AD para Casa Porfirio.

	Em. CO2	NPC	C. Cap. Inicial	Fracción renovable	No cubierta	HDI	Empleos	LCE	C. E. comprada	C. E. vendida
Signo	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1
Valor AD	10	9	8.5	7	6.5	6	5	4	4	3
Valor ODI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 4.31 Matriz de comparación pareada (MCP) para Casa Porfirio.

MCP	Em. CO2	NPC	C. Cap. Inicial	Fracción renovable	No cubierta	HDI	Empleos	LCE	C. E. comprada	C. E. vendida
Em. CO2	1	2	2.5	4	4.5	5	6	7	7	8
NPC	0.5	1	3	5	5	6	5	7	4	7
C. Cap. Inicial	0.4	0.3333	1	3	4	5	4	6	6	7
Fracción renovable	0.25	0.2222	0.3333	1	3	4	3	6	6	7
No cubierta	0.2222	0.2	0.25	0.3333	1	4	2	4	5	6
HDI	0.2	0.1667	0.2	0.25	0.25	1	3	5	6	7
Empleos	0.1667	0.20	0.25	0.3333	0.50	0.3333	1	4	5	6
LCE	0.1429	0.1429	0.1667	0.1667	0.25	0.2	0.25	1	3	4
C. E. comprada	0.1429	0.25	0.1667	0.1667	0.2	0.1667	0.2	0.3333	1	4
C. E. vendida	0.125	0.1429	0.1429	0.14	0.17	0.1429	0.1667	0.25	0.25	1

Para el caso de estudio Casa Porfirio se obtuvo que la alternativa óptima desde el punto de vista multicriterio es la número 21 (Tabla. 4.22) y desde el punto de vista multiobjetivo es la número 36, entre 42 opciones analizadas.

4.5.2 Análisis de resultados de otros casos desarrollados

De manera general, se puede decir que la aplicación de la metodología desarrollada, empleando el software diseñado y programado, permitieron realizar propuestas de electrificación sustentables para cuatro casos diferentes de demanda energética. Los resultados muestran que, para cada caso en particular, surgen diferentes cantidades de alternativas independientes entre las cuales seleccionar un sistema óptimo sustentable desde el punto de vista multicriterio. Estos resultados fueron comparados con la metodología multiobjetivo empleada en el software iHOGA, obteniéndose una diferencia en las alternativas elegidas como óptimas entre ambos métodos. Lo anterior debido a que las metodologías multiobjetivo, buscan un sistema que cumpla con todos los objetivos de sustentabilidad de manera similar; mientras que las metodologías o herramientas multicriterio seleccionan la alternativa óptima según las preferencias de los interesados y decisores, quienes intervienen en el proceso de cálculo al asignar los valores de los pesos de entrada para las ponderaciones de criterios AD, ODI y CPP.

Para ilustrar lo expuesto anteriormente, se analizaron los resultados obtenidos para cada caso, empezando por **Casa Oviedo** el cual es un sistema con demanda de baja potencia aislado de la red.

El análisis multicriterio arrojó un sistema compuesto por dos módulos FV de 450 W, un aerogenerador de 1 kW, un generador eléctrico de 1900 W, un banco de baterías de 24 en serie de 390 Ah, un inversor de 1600 W y un rectificador de 960.31 W; según el esquema que se muestra en la Figura 4.34 (a). De otro lado, el análisis multiobjetivo dio como resultado un sistema (Figura 4.34 (b)) compuesto por 4 módulos FV de 450 W conectados 2 en serie y dos en paralelo, un banco de baterías de 24 en serie de 180 Ah, y de igual manera, un inversor de 1600 W.

La opción MCDM resulta casi el doble del NPC (21,179 y 13,744 €), pero por otro lado brinda una mayor autonomía al sistema (más de 2, 1.75) y la vida útil de las baterías es casi del doble de tiempo (18 años vs 10.4 años).

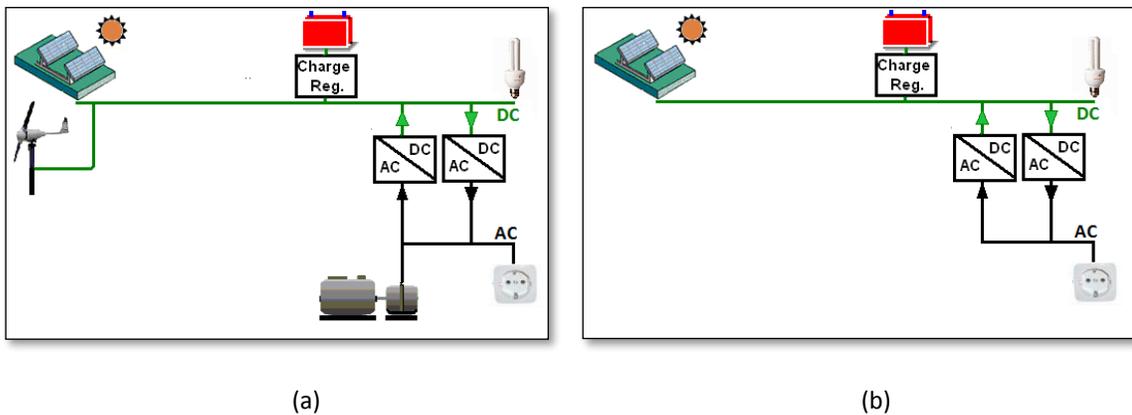


Figura 4.34 Sistemas óptimos para Casa Oviedo alternativa 26 (a) y alternativa 1 (b).

El resultado multicriterio corresponde a lo expresado en el objetivo de selección, donde se sobrepone los aspectos económicos y sociales por encima de los ambientales.

Pasando al caso de los **departamentos** el cual es un sistema de demanda media e interconectado a la red, el análisis multicriterio arrojó un sistema compuesto por dos filas de 29 módulos FV de 450 W conectados en paralelo, un aerogenerador de 1 kW, un banco de 24 baterías en serie de 3,360 Ah, un inversor de 12,000 W y un rectificador de 116.74 W; según el esquema que se muestra en la Figura 4.35 (a). De otro lado, el análisis multiobjetivo dio como resultado un sistema (Figura 4.35 (b)) compuesto por dos filas de 32 módulos FV de 450 W conectados en paralelo, un generador eléctrico de 20,000 W, de igual manera un banco de 24 baterías en serie de 3,360 Ah, y un inversor de 12 kW.

Ambas alternativas tienen un valor similar del NPC (-48,534 y 44,367 €). La alternativa seleccionada por la MCDM (5) cuenta con emisiones menores que la alternativa seleccionada por la MODM (9),

en un 1.73%, además, al no tener generador eléctrico a gasolina se evitan las emisiones que este podría generar.

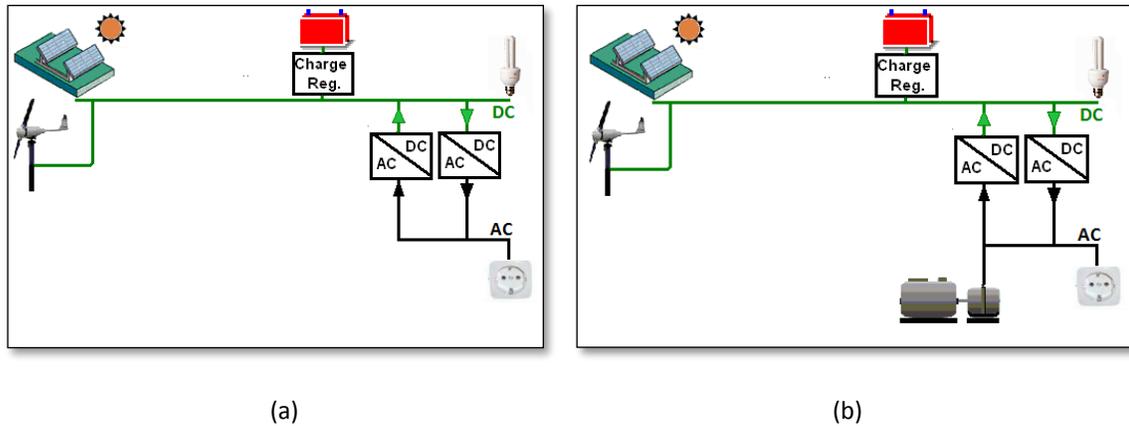


Figura 4.35 Sistemas óptimos para Departamentos alternativa 5 (a) y alternativa 9 (b).

De esta manera se obtiene el resultado esperado por los interesados y decisores del proyecto, donde se considera el aspecto ambiental un poco por encima del aspecto económico, en la medida que los interesados lo expresaron por medio de la asignación de valores de ODI, AD y MCP para la ponderación de pesos.

Al aplicar la metodología y software desarrollado en el caso **Playa el Bosque**, sistema de demanda media y aislado de la red, el análisis multicriterio arrojó un sistema (8) compuesto por dos filas de 83 módulos FV de 330 W conectados en paralelo, un aerogenerador de 1 kW, 6 generadores eléctricos de 1,900 W, un banco de 24 baterías en serie de 3,360 Ah, un inversor de 30,000 W y un rectificador de 1,992 W. De otro lado, el análisis multiobjetivo dio como resultado un sistema (2) compuesto por dos filas de 102 módulos FV de 450 W conectados en paralelo, un aerogenerador de 1 kW, 4 generadores eléctricos de 1,900 W, y de igual manera, un banco de 24 baterías en serie de 3,360 Ah, un inversor de 30,000 W y un rectificador de 1,992 W. Ambas propuestas pueden ser representadas por el esquema de la Figura 4.36. Aunque la alternativa seleccionada por la MCDM (8) tiene un NPC mayor que la alternativa seleccionada por la MODM (2) en un 25% y genera 27.5% más emisiones de CO₂; la demanda no servida es la mitad, siendo este criterio uno de los prioritarios en este caso de estudio.

El resultado multicriterio se enfocó en la alternativa que brinda una mejor cobertura del servicio de electricidad a la población, por encima de los criterios económicos y ambientales, como lo expresaron por medio de la asignación de valores de peso por parte de los interesados en el mismo.

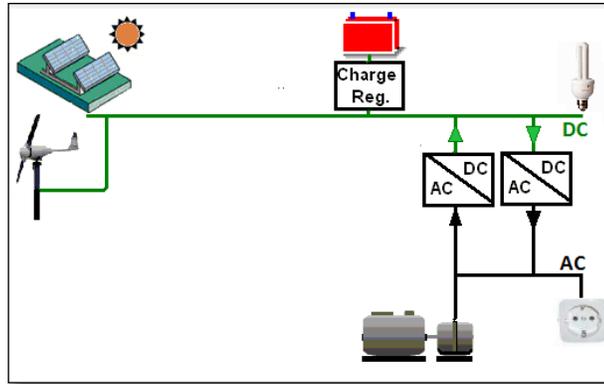


Figura 4.36 Esquema del sistema óptimo para Playa el Bosque alternativas 8 y 2.

Finalmente, en el caso **Casa Porfirio**, sistema de demanda media-baja interconectado a la red, el análisis multicriterio arrojó como óptimo el sistema 21, compuesto por 2 filas de 12 módulos FV de 330 W conectados en paralelo, un aerogenerador de 1 kW, una batería de 213.3 Ah, un inversor de 5 kW y un rectificador de 3,360 W, sistema que se esquematiza en la Figura 4.37 (a). De otro lado, en la Figura 4.37 (b) se presenta la alternativa seleccionada por la MODM (8), la cual está compuesta por 2 filas de 6 módulos FV de 330 W conectados en paralelo, un aerogenerador de 1 kW, y de igual manera, una batería de 213.3 Ah, un inversor de 5 kW y un rectificador de 3,360 W.

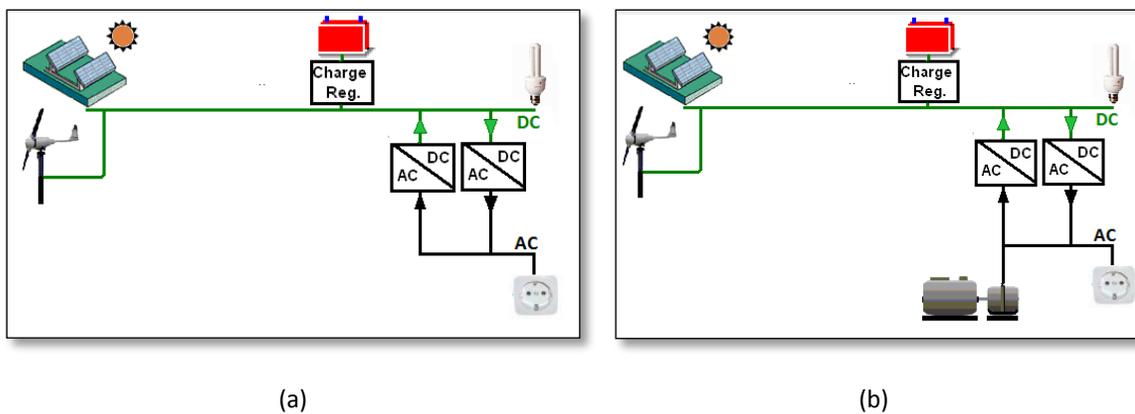


Figura 4.37 Esquemas de los sistemas óptimos para Casa Porfirio alternativas (a) 21 y (b) 8.

Según lo expresado por los interesados en el caso de Casa Porfirio por medio de los valores asignados para priorizar los criterios, el resultado multicriterio se enfocó en la alternativa cuyas emisiones son 16.3% menores que las de la alternativa multiobjetivo. A pesar de tener un NPC 14.4% mayor, su fracción renovable es 4.7% mayor, y genera 95% más empleo. El capital inicial es solo 5.7% mayor pero el balance de compra y venta de energía a la red es 5.4% más favorable para el sistema óptimo multicriterio. Las prioridades ambientales han sido respetadas por encima de las económicas.

CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación se da el cumplimiento del objetivo general planteado en un principio, ya que se obtuvo una metodología y un software para la optimización multicriterio de sistemas híbridos renovables. A continuación, se ilustra el cumplimiento de los objetivos específicos:

Se realizó un análisis comparativo entre los métodos de dimensionado de sistemas híbridos, teniendo como resultado que para el diseño monocriterio o mono-objetivo, es más frecuente encontrar estudios, metodologías y software que emplean el método enumerativo, así como los paquetes de software empleados en este estudio, HOMER y iHOGA; aunque iHOGA tiene la opción de realizar la optimización multiobjetivo aplicando algoritmos genéticos. En los casos de optimización para sistemas sustentables, al tener que considerarse varios criterios u objetivos, se encontraron diversos autores que emplean metodologías multi-objetivo (MODM), y en mayor cantidad, las herramientas de análisis multicriterio (MCDM). Dentro de las MCDM más empleadas para el diseño de sistemas híbridos sustentables, se encontraron VIKOR, AHP y TOPSIS.

A partir de una investigación documental, se establecieron los criterios de sustentabilidad aplicables al desarrollo de sistemas híbridos de energía, que incluye algunos criterios específicos para países en vías de desarrollo. Se obtuvo un listado de 34 criterios como base para la selección de los criterios para algún caso en particular, teniendo en cuenta la información disponible, las interrelaciones entre los criterios (que no sean directamente proporcionales para simplificar el proceso) y la relevancia para dicho caso. Estos criterios pueden provenir de cálculos realizados por el software que genera las alternativas, pueden obtenerse de estudios similares, pueden calcularse, o bien pueden ser asignados por los interesados o a juicio de un grupo de expertos.

Se desarrolló una metodología y un software para la optimización multicriterio de sistemas híbridos de energía bajo un enfoque de sustentabilidad, que permiten tener en cuenta diversos criterios y participación de los interesados, con el fin de que los mismos respalden las decisiones tomadas y que éstas a su vez se tomen teniendo en cuenta sus opiniones. La metodología permite obtener una única respuesta que facilita el consenso; aunque si no hay consenso, se puede realizar un análisis de sensibilidad en los pesos asignados, para obtener una nueva alternativa a considerar como sistema elegido.

Los resultados de la metodología y el software obtenidos son comparables con los resultados de las simulaciones realizadas con un software comercial. Se observó que ambas metodologías obtienen resultados coherentes con los criterios u objetivos de sustentabilidad planteados. Sin embargo, la propuesta permite mayor interacción por parte de los interesados o el centro decisor, con el fin de ayudar a obtener un consenso. En ese caso, aunque el sistema no sea el más cercano al sustentable, será el que reciba el respaldo de los usuarios e interesados, lo cual asegura la perdurabilidad de los sistemas a lo largo de su vida útil, siendo esta una de las principales causas del fracaso de los sistemas híbridos, ya que estos son desmantelados mucho antes de cumplir su ciclo por diferentes motivos.

Al realizar las simulaciones y los cálculos de los casos adicionales, se pudo comprobar la versatilidad de la metodología y del software AMC3VAT desarrollados en esta investigación, al ser empleados para realizar propuestas de electrificación sustentables en cuatro diferentes emplazamientos, para cuatro tipos diferentes de perfiles de demanda, generando una variedad en la cantidad de alternativas y criterios, donde la aplicación no tuvo inconvenientes en los cálculos, pudiéndose a firmar que ésta puede ser empleada para escenarios con múltiples criterios y múltiples alternativas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda un rediseño del software por parte de especialistas en sistemas, que permita un entorno más amigable con el usuario, facilitando el ingreso de los datos de entrada y la interpretación de los datos de salida, así como su exportación a archivos de texto plano. También se recomienda añadir el cálculo de los índices de consistencia para la ponderación de criterios con la metodología MCP, con el fin de corroborar la consistencia de los valores asignados en la matriz CPP. Finalmente, se puede incluir un paso adicional en el que se calcule la frecuencia de las alternativas en las posiciones de mejor puntuación y de peor puntuación, seleccionando el grupo de mejores y peores, como un porcentaje de la cantidad total de alternativas analizadas, y así los pasos finales de decisión serían realizados también por AMC3VAT en lugar de tener que regresar a Excel.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wang, T. (2020) Global electricity consumption 1980-2017. Statista, March 2020.
<https://www.statista.com/study/74593/electricity-worldwide/>
- [2] IPCC (2014) Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- [3] Dudley, B. (2019) BP Statistical Review of World Energy 2019, 68A edition. June, 2019.
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [4] SENER (2015) Balance nacional de energía, México 2015.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248570/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015__2_.pdf
- [5] SENER (2016) Balance nacional de energía, México 2016.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf
- [6] SENER (2017) Balance nacional de energía, México 2017.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf
- [7] SENER (2018) Balance nacional de energía, México 2018.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf
- [8] IEA (2019) International Energy Agency, “Key world energy statistics 2019,” [Online]. Available:
<https://www.iea.org/statistics/>. Accessed Oct 06, 2019.
- [9] Charabi, Y., Gastli, A. (2011) PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. Volume 36, Issue 9, September 2011, Pages 2554-2561. doi:10.1016/j.renene.2010.10.037
- [10] Brundtland, G.H. (1987). Our common future. Oxford University Press, CMMAD. U.K.
<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [11] Porras, J. (2009) Evaluación del desarrollo sustentable en México. Tiempo Económico, Núm. 13, vol. IV. Tercer cuatrimestre de 2009. <http://tiempoeconomico.azc.uam.mx/wp-content/uploads/2017/07/13te3.pdf>
- [12] Camacho, M. (2012) El trilema energético. Papeles de cuadernos de energía. Club español de la energía. 2012. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Trilema-Energ%C3%A9tico-2012-Espanol.pdf>
- [13] Liu, G. (2018) General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. Energy Conversion and Management. Volume 156, 15 January 2018, Pages 416-426.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.054>
- [14] Martin, J. (2020) 2019 año récord para las energías renovables en México.
https://elpais.com/economia/2020/02/26/actualidad/1582694040_481642.html
- [15] Estrada, J. (2019) Visión de largo plazo en la política energética; principios orientadores. Energía a debate. Nov, 2019. <https://www.energiaadebate.com/petroleo/vision-de-largo-plazo-en-la-politica-energetica-principios-orientadores/>
- [16] Energías renovables, el periodismo de las energías limpias, (2020). México, Argentina y Brasil. Líderes en nueva capacidad eólica en 2019 en Latinoamérica. Renewable energy Magazine, Feb. 2020.
<https://www.energias-renovables.com/eolica/lideres-en-nueva-capacidad-eolica-en-2019-20200205/>
- [17] Ocampo, I. (2018) Energías limpias y renovables en México ¿Dónde se generan? Agosto de 2018.
<https://www.alcaldesdemexico.com/notas-principales/energias-limpias-y-renovables-en-mexico-donde-se-generan/>
- [18] Cacho, Y. (2018) Estado de la Energía Geotérmica en México. 4 diciembre, 2018 en Ecología, Edición 96: Noviembre - diciembre 2018. <https://petroquimex.com/PDF/NovDic18/Geotermia.pdf>

- [19] IRENA (2020). Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf
- [20] Sopian, K., Ibrahim, M. Z., Wan Dauda, W. R., Othmana, M. Y., Yatim, B., Amin, N. (2009) Performance of a PV–wind hybrid system for hydrogen production. *Renewable energy*, vol 34, 2009, Pp. 1973-1978.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.010>
- [21] Lawan, S. M., Zainal-Abidin W. A. (2020) Chapter: Review of Hybrid Renewable Energy Systems Based on Wind and Solar Energy: Modeling, Design and Optimization. *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. IntechOpen. 2020 DOI: 10.5772/intechopen.85838
- [22] Ferdous, R. M., Reza, A. W., Siddiqui, M.F. (2016) Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;58: 1114-1128.
- [23] Agredano, J. (2000) Sistemas híbridos: Lecciones aprendidas. Instituto de investigaciones eléctricas. Segundo curso-taller internacional sobre sistemas híbridos solar-eólico para la generación de electricidad. San Miguel Regla. Hidalgo. Noviembre del 2000. <https://slideplayer.es/slide/132331/> [accessed 23.10.20]
- [24] Flores, J., Lazcano, P. (2012) Sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico para casa habitación con tarifa DAC. Tesis de licenciatura.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2971/tesis.pdf?sequence=1>
- [25] Brambila R., A (2010) UN ESTUDIO SOBRE LA ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO: APLICACIÓN DE INNOVACIONES TECNOLÓGICAS POSIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. Tesis de maestría en POLÍTICA Y GESTIÓN DEL CAMBIO TECNOLÓGICO. IPN, México.
<https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/6421/1/ESTUDIO%20ENERGIA%20EOLICA%20MEXICO%20II.pdf>
- [26] Rodriguez, C. (2010). Ciudad Franboyanes. Microm electrónica.
https://www2.ineel.mx/proyectofotovoltaico/DESCARGAS/3ER_COLOQUIO_PONENCIAS/06_Avances_Tecnologicos/03_Ing._Carlos_Rodriguez-SPVir-EOLICO-PVDE65KW.pdf
- [27] Chávez, G. (2013) Avanza primer proyecto híbrido de energía solar y eólica en México. *El financiero*, diciembre 16, 2013. <https://www.elfinanciero.com.mx/archivo/avanza-primer-proyecto-hibrido-de-energia-solar-y-eolica-en-mexico>
- [28] Huerta, E., Domínguez. R. (2017) Diseñan sistema híbrido de energías renovables. Augusto León Castillo, Servicio y Mantenimiento S.A. de C.V. <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/energia/12431-diseñan-sistema-hibrido-de-energias-renovables>
- [29] Bornay © (2017) ENERGÍA MINIEÓLICA EN CANCÚN, MÉXICO. <https://www.bornay.com/es/cms/energia-minieolica-en-cancun-mexico>
- [30] Mainali, B., Silveira, S. (2015) Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 1351–1365.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.018>
- [31] Zarco J. (2019) Sistemas Híbridos y de Energía Renovable. *PV Magazine*, 2019, <https://www.PV-magazine-mexico.com/2019/08/07/sistemas-hibridos-y-de-energia-renovable/> <consultada 28.07.20>
- [32] Denis, L. (2015) Photovoltaic hybrid systems. *PV Resources*.
<https://www.PVresources.com/en/PVpowerplants/PVhybrid.php> <Consultada el 30.07.2021>
- [33] SMA (2003). Kythnos Island. 20 years experience of system technology for renewable energies.
<https://web.archive.org/web/20110816062616/http://files.sma.de/dl/1376/Kythnos.pdf>
- [34] IRENA (2016). A Path to prosperity: Renewable energy for Islands. <https://www.irena.org/publications/2016/Nov/A-Path-to-Prosperity-Renewable-Energy-for-Islands-3rd-Edition>

- [35] Gude, V. G. (2018) *Renewable Energy Powered Desalination Handbook: Application and Thermodynamics*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, USA.
<https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=4mpQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Renewable+Energy+Powered+Desalination+Handbook:+Application+and+Thermodynamics+DOI&ots=wFwhYFbdQk&sig=fXyz5jnoeposokdsi9x1susIMVg#v=onepage&q=Renewable%20Energy%20Powered%20Desalination%20Handbook%3A%20Application%20and%20Thermodynamics%20DOI&f=false>
- [36] Birnbaum, L. (2013) Island of Pellworm points the way to the energy supply system of the future. SEI, Alemania. <https://www.smart-energy.com/regional-news/europe-uk/island-of-pellworm-points-the-way-to-the-energy-supply-system-of-the-future/>
- [37] Miyakojima City (2016) *Island-Type Smart Community Demonstration in Miyakojima City*. Copyright Miyakojima City. <https://www.nedo.go.jp/content/100788811.pdf>
- [38] Kaya, M. (2021) *Small Wind Electric Systems, A Hawaii Consumer's Guide*. Kamuela, HA (USA). <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42033.pdf>
- [39] Cipollina, A., Eftihia, T., Vicente, S., Michael, P., Koschikowski, J. (2014). *Renewable Energy Desalination: Performance analysis and operating data of existing RES-desalination plants*. *Desalination and Water Treatment*. DOI:10.1080/19443994.2014.959734
- [40] NREDCAP (2021). *New & Renewable Energy Development Corporation of Andhra Pradesh Ltd*. <https://nredcap.in/Default.aspx>
- [41] Parkinson, G. (2020). *South Australia's biggest wind solar hybrid project gets financial green light*. <https://reneweconomy.com.au/south-australias-biggest-wind-solar-hybrid-project-gets-financial-green-light-58154/>
- [42] Wang J. J., Jing Y. Y., Zhang C. F., Zhao J. H. (2009) *Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making*. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2009; 13 (9): 2263–78. doi:10.1016/j.rser.2009.06.021
- [43] Trolldborg, M., Heslop, S., Hough, R. L. (2014) *Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 1173–1184.
- [44] Rojas-Zerpa J. C., Yusta J. M. (2015) *Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015) 557–571. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.139>
- [45] Rojas-Zerpa J. C., Yusta J. M. (2014) *Methodologies, technologies, and applications for electric supply planning in rural remotes areas*. *Energy Sustain Dev* 2014; 20:66–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.03.003>
- [46] Rojas-Zerpa J. C., Yusta J. M. (2012) *Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones*. D. thesis]. Spain: Universidad de Zaragoza; 2012 Aailable in (<http://personal.unizar.es/jmyusta/wp-content/uploads/2014/09/Tesis-Juan-Rojas.pdf>).
- [47] Keeney, R., Raiffa, H. (2013) *Decision with multiple objectives: preferences and value trade-off*. 3rd edition. Cambridge, GB: Cambridge University Press; 2013. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=1oEa-BiARWUC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Decision+with+multiple+objectives:+preferences+and+value+trade-off&ots=cDBNR3znYw&sig=CsBNuGBnViWpCnytpOPsBGZHMvw#v=onepage&q=Decision%20with%20multiple%20objectives%3A%20preferences%20and%20value%20trade-off&f=false>
- [48] Purwanto, W. W., Afifah, H. (2016) *Assessing the impact of techno socioeconomic factors on sustainability indicators of microhydro power projects in Indonesia: A comparative study*. *Renewable Energy* 93 (2016) 312-322.

- [49] INEGI (2000). Indicadores de desarrollo sustentable en México. Instituto Nacional de Ecología-INEGI. http://centro.paot.org.mx/documentos/inegi/indicadores_desarrollo_sustentable.pdf <Consultada 28.07.20>
- [50] Zolfani, S. H., Saparuskas, J. (2013) New Application of SWARA Method in Prioritizing Sustainability Assessment Indicators of Energy System. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 2013, 24(5), 408-414. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.24.5.4526>
- [51] Cucchiella, F., Adamo, I., Gastaldia, M., Kohb, S.C. L., Rosac, P. (2017) A comparison of environmental and energetic performance of European countries: A sustainability index. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78 (2017) 401–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.077>
- [52] Hernández-Galvez, G. (2011) “Dimensionado de sistemas integrados de energía Eólica/Hidrógeno/Celdas de Combustibles”. Tesis doctoral en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptb2011/noviembre/0674737/Index.html>
- [53] Robledo-Giraldo, S., Osorio-Zuluaga, G. A., López-Espinosa, C. (2014), "Networking en pequeña empresa: una revisión bibliográfica utilizando la teoría de grafos", *Revista Vínculos*, vol. 11, num. 2, pp. 6-16, DOI <<http://dx.doi.org/10.14483/2322939X.9664>>
- [54] Strantzali, E., Aravossisa, K., Livanos, G. A. (2017), "Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 775-787, DOI <<http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>>
- [55] Ray, A., Jana, K., Assadi, M., De, S. (2018), "Distributed polygeneration using local resources for an Indian village: multiobjective optimization using metaheuristic algorithm", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 20, pp.1323-1341, DOI <<http://dx.doi.org/10.1007/s10098-018-1562-y>>
- [56] Hernández-Gálvez, G., Dorrego, J. R., Núñez, A., Lastres, O., Ixtlilco, L., Juantorena, A., Sarracino, O., Sebastian, P. J. (2014) Selection of hybrid systems with hydrogen storage based on multiple criteria: application to autonomous systems and connected to the electrical grid. *Int. J. Energy Res.* 2014; 38: 702–713. DOI: 10.1002/er.3074
- [57] Alsayed, M., Cacciato, M., Scarcella, G., Scelba, G. (2014), "Design of hybrid power generation systems based on multi criteria decision analysis", *Solar Energy*, vol. 105, pp. 548-560, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.011>>
- [58] Theodosiou, G., Stylos, N., Koroneos, C. (2015), "Integration of the environmental management aspect in the optimization of the design and planning of energy systems", *Journal of Cleaner Production*, vol. 106, pp. 576-593, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.096>>
- [59] Urbano Arcila, P. A., “Estrategias de control para sistemas de generación de baja potencia”. Tesis de Maestría en ciencias en energía eólica. Universidad del Istmo. México 2015. Disponible en físico, biblioteca UNISTMO Tehuantepec.
- [60] Zahboune, H., Zouggar, S., Krajacic, G., Varbanov, P. S., Elhafyani, M., Ziani, E. (2016). Optimal Hybrid Renewable Energy Design in Autonomous System Using Modified Electric System Cascade Analysis and Homer Software. *Energy Conversion and Management* 126 (2016) 909-922. DOI: 10.1016/j.encoman.2016.08.061
- [61] Ramli, M. A. M., Bouchekara, H.R.E.H., Alghamdi, A. S. (2018) Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy* 121 (2018) 400-411. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.058>
- [62] Guzmán-Acuña, L., Vasquez-Padilla, R., Santander-Mercado, A. (2017). Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator. *Renewable Energy* 106 (2017) 68-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.089>
- [63] Sinha, S., Chandel, S. S. (2017). Improving the reliability of photovoltaic-based hybrid power system with battery storage in low wind locations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 19 (2017) 146–159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.008>

- [64] Tiberiu, C., Virgone, J., Blanco, E. (2010). Multi-criteria decision analysis of multi-source systems and renewable energy integration. *Scientific Bulletin. Series. Mathematical Modeling in Civil Engineering*. 4. Disponible en: https://www.academia.edu/46963537/Multi_Criteria_Decision_Analysis_of_Multi_Source_Systems_and_Renewable_Energy_Integration
- [65] Tiberiu, C., Virgone, J., Blanco, E. (2011) Multi-source energy systems analysis using a multi-criteria decision aid methodology. *Renewable Energy* 36 (2011) 2245-2252. doi:10.1016/j.renene.2011.01.011
- [66] Taha, R. A., Daim, T. (2013) *Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology*, Springer-Verlag London 2013. DOI: 10.1007/978-1-4471-5097-8_2
- [67] Perera, A. T. D., Madusanka, N., Attalage, R. A., Perera, K. K. C. K. (2015), "A multi criterion analysis for renewable energy integration process of a standalone hybrid energy system with internal combustion generator", *Journal of Renewable and Sustainable. Energy*, vol. 7, 043128, DOI <<http://dx.doi.org/10.1063/1.4928684>>
- [68] Bakhtiari, H., Karimi, M., Reza zadeh, S. (2016) Modeling, analysis and multi-objective optimization of twist extrusion process using predictive models and meta-heuristic approaches, based on finite element results. *J Intell Manuf* (2016) 27:463–473. DOI 10.1007/s10845-014-0879-6
- [69] Ifaei, P., Farid, A., Yoo, C. (2018), "An optimal renewable energy management strategy with and without hydropower using a factor weighted multi-criteria decision making analysis and nation-wide big data - Case study in Iran", *Energy*, vol. 158, pp. 357-372. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.043>
- [70] Malekpoor, H., Chalvatzis, K., Mishra, N., Kumar, M., Zafirakis, D., Song, M. (2017) Integrated grey relational analysis and multi objective grey linear programming for sustainable electricity generation planning. *Ann Oper Res* (2018) 269:475–503. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2566-4>
- [71] Soni, A., Stagner, J. A., Ting, D. S. K. (2017), "Adaptable wind/solar powered hybrid system for household wastewater treatment", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 24, pp. 8-18, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.015>>
- [72] McKenna, R., Bertsch, V., Mainzer, K., Fichtner, W. (2018), "Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities", *European Journal of Operational Research*, vol. 268, pp. 1092-1110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.036>
- [73] Trutnevte, E. (2013), "EXPANSE methodology for evaluating the economic potential of renewable energy from an energy mix perspective", *Applied Energy*, vol. 111, pp. 593-601, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.083>>
- [74] Kim, J., Suharto, Y., Daim, T. U. (2017), "Evaluation of Electrical Energy Storage (EES) technologies for renewable energy: A case from the US Pacific Northwest", *Journal of Energy Storage*, vol. 11, pp. 25-54, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2017.01.003>>
- [75] Hung Chen, H., Kang, H., Lee, A. (2010) "Strategic Selection of Suitable Projects for Hybrid Solar-Wind Power Generation Systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2010. Pp. 413-421. doi:10.1016/j.rser.2009.08.004
- [76] García, J., (2013) "Estudio del control de inversores por PWM". Tesis de Maestría. Universidad del Istmo, 2013. General indicator for techno-economic assessment of renewable energy. Disponible en físico, biblioteca UNISTMO Tehuantepec.
- [77] Nehrir, M. H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., Miao, Z., Salameh, Z. (2011) A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: ConFigurations, Control, and Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, VOL. 2, NO. 4, OCTOBER 2011. DOI: 10.1109/TSTE.2011.2157540
- [78] Lastres D. O., (2007) "Simulación de sistemas eólicos autónomos con almacenamiento de hidrógeno". PhD Tesis. CIE-UNAM. México 2007. <http://132.248.9.195/pd2007/0617731/0617731.pdf>

- [79] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., Bansal, R.C. (2017) "A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017) 596–609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- [80] AMSC (2020). American Superconductor. Turbine Designs. Boston, Massachusetts with operations in Asia, Australia, Europe and North America. <https://www.amsc.com/windtec/turbine-designs/>
- [81] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2010) "Wind Energy Explained-Theory, design and application". Editorial John Wiley and Sons, Ltd. Chicester, England. DOI:10.1002/9781119994367
- [82] Cortina-Marrero J. H., Martínez-Alonso C., Hechavarría-Difur L., Hu, H. (2013) "Photovoltaic performance improvement in planar P3HT/CdS solar cells induced by structural, optical and electrical property modification in thermal annealed P3HT thin films". *The European Physical Journal Applied Physics*, Volume 63, Issue 1, 2013, id.10201, 7 pp. DOI: 10.1051/epjap/2013120361
- [83] Hechavarría, L., Mendoza, N., Rincón, M. E., Campos, J., & Hu, H. (2012). Photoelectrochromic performance of tungsten oxide-based devices with PEG–titanium complex as solvent-free electrolytes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 100, 27–32. doi:10.1016/j.solmat.2011.05.004
- [84] Fernández-García, L. G., Cervantes, A. Proyecto de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C. POSGRADO, 2017. <https://1library.co/document/yd72jl6y-proyecto-implementacion-fotovoltaico-interconexion-electrica-universidad-tecnologica-altamira.html>
- [85] ENERSAVE (2014). Energía Solar-Energía Solar Fotovoltaica. Ingeniería de Ahorro Energético © <http://enersave.es/medicion-neta/energia-solar>
- [86] Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, G., Gila, C., Alcayde, A., Gomez, J. (2011), "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753–1766, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>>
- [87] Coto, J. E., Maldonado, J. J., Botero, J. J., Murillo, J. V. (2007) IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA GENERAR ELECTRICIDAD A PARTIR DE BIOGÁS EN LA FINCA PECUARIA INTEGRADA DE EARTH. *Tierra Tropical* (2007) 3 (2): 129-138. https://www.researchgate.net/publication/267565384_IMPLEMENTACION_DE_UN_SISTEMA_PARA_GENERAR_ELECTRICIDAD_A_PARTIR_DE_BIOGAS_EN_LA_FINCA_PECUARIA_INTEGRADA_DE_EARTH
- [88] Dufo L. R. (2007). Dimensionado y control óptimos de sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos. Ph.D. Tesis. Universidad de Zaragoza. Disponible en línea en: <http://www.unizar.es/rdufo/Tesis.htm>.
- [89] Bartela, L. (2020) A hybrid energy storage system using compressed air and hydrogen as the energy carrier. *Energy* Volume 196, 1 April 2020, 117088. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117088>
- [90] Dunn, S. (2002) Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International journal of Hydrogen Energy*, Volume 27, Issue 3, March 2002, pages 235-264. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8)
- [91] Ding, K., & Zhi, J. (2016). Wind Power Peak-Valley Regulation and Frequency Control Technology. *Large-Scale Wind Power Grid Integration*, 211–232. doi:10.1016/b978-0-12-849895-8.00006-3
- [92] Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., Sedlaříková, M. (2018) Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*, Volume 17, June 2018, Pages 224-227. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.012>.
- [93] Johnson, S. C., Davidson, F. T., Rhodes, J. D., Coleman, J. L., Bragg-Sitton, S. M., Dufek, E. J., Webber, M. E. (2019) Chapter Five - Selecting Favorable Energy Storage Technologies for Nuclear Power, Storage and Hybridization of Nuclear Energy, Academic press, 2019, Pages 119-175, ISBN 9780128139752, DOI 10.1016/B978-0-12-813975-2.00005-3.
- [94] Lambert, T., Gilman, P., and Lilienthal, P. (2005) MICROPOWER SYSTEM MODELING WITH HOMER. CHAPTER 15. Integration of Alternative Sources of Energy, by Felix A. Farret and M. Godoy Simões. Copyright # 2006 John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471755621.ch15>
- [95] Skarstein, O., Ulhen, K. (1989) Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants. *Wind Eng* 1989;13(2):72–87. <https://www.jstor.org/stable/43749369>

- [96] Katsigiannis, Y. A., Georgilakis, P. S., Karapidakis, E. S. (2010) Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewable. IEEE 2010. Available online in: <http://users.ntua.gr/pgeorgil/Files/J44.pdf>.
- [97] Chedid, R., Rahman, S. (1997) Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Systems. IEEE Trans. Energy Conv. 12(1), 79–85. DOI: 10.1109/60.577284
- [98] Santarelli, M., Pellegrino, D. (2005). Mathematical optimization of a RES-H2 plant using a black box algorithm. Renewable Energy 30 (2005) 493–510. doi:10.1016/j.renene.2004.07.008
- [99] Gavanidou, E., Bakirtzis, A. (1992) Design of a Stand-Alone System with Renewable Energy Sources using Trade off Methods. IEEE Trans. Energy Conv. 7, 42–48 (1992). DOI: 10.1109/60.124540
- [100] Ekren, O., Ekren, B. Y. (2010) Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. Applied Energy 87 (2010) 592–598. doi:10.1016/j.apenergy.2009.05.022
- [101] Glover, F., Kochenberger, G. A. (2003) Handbook of metaheuristics, Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/b101874>
- [102] Hakimi, S.M., Moghaddas-Tafreshi, S.M. (2009) Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran. Renewable Energy, Volume 34 (7), pp. 1855-1862. doi:10.1016/j.renene.2008.11.022
- [103] Sánchez, V., Chan, F. I., Torres M. E., Acosta, R., Ramírez A. Juan M. (2013) Diseño de un Sistema de Generación Basado en Fuentes Renovables e Hidrógeno. RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, Vol. 11 No. 1, DICIEMBRE 2013. <https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/vol11/vol11-articulo2.pdf>
- [104] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis A. and Kalaitzakis, K. (2006). Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. Solar Energy, Volume 80 (9), pp. 1072–1088. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.002>
- [105] Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N., Funabashi, T. (2007) Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. Ren. Energy 32, 1917–1933 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.09.003>
- [106] Lagorse, J., Paire, D., Miraoui, A. (2009). Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery. Renewable Energy 34 (2009) 683–691. doi:10.1016/j.renene.2008.05.030
- [107] Ghofrani, M., Hosseini, N. N. (2016) Optimizing Hybrid Renewable Energy Systems: A Review. Chapter 8. <http://dx.doi.org/10.5772/65971>
- [108] Siddaiah, R., Saini, R. P. (2016) A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 58(2016)376–396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>
- [109] Ramakumar, R., Abouzahr M., Ashenay, K. (1992) A knowledge-based approach to the design of integrated renewable energy systems. IEEE Transactions on Energy Conversion 1992; 7(4): 648–659. DOI: 10.1109/60.182647
- [110] Akella, A. K., Sharma, M. P., Saini, R. P. (2007) Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 11, Issue 5, June 2007, Pages 894-908. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.006>
- [111] Hennes, J.C., Samarakou, M.T. (1986) Optimization of a combined wind and solar power plant. Energy Research 1986; 10(2): 181–188. <https://doi.org/10.1002/er.4440100208>
- [112] Gupta, A., Saini, R.P., Sharma, M.P. (2006) Optimized application of hybrid renewable energy system in rural electrification. In: Proceedings of India International Conference on Power Electronics. IEEE, Chennai, India, 2006. DOI: 10.1109/IICPE.2006.4685393
- [113] Kanase-Patil, A.B., Saini, R.P., Sharma, M.P. (2010) Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area. Renewable Energy 2010; 35(6): 1342–1349. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.005>

- [114] Nagabhushana, A.C., Rohini, R., Raju, A.B. (2011) Economic analysis and comparison of proposed SHGE for stand-alone applications at various places in Karnataka state. In: Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, Kerala, India; 2011. DOI: 10.1109/ISET-India.2011.6145346
- [115] Ashok, S. (2007). Optimized model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy*, 32(7), 1155–1164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.008>
- [116] El-Zeftawy, A.A., Abou El-Ela, A.A. (1991) Optimal planning of wind-diesel generation units in an isolated area. *Electric Power Systems Research* 1991; 22(1): 27–33. *172 Sustainable Energy - Technological Issues, Applications and Case Studies*. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(91\)90076-Y](https://doi.org/10.1016/0378-7796(91)90076-Y)
- [117] Das T.K., Chakraborty D., Swapan S. (1990) Energy consumption and prospects for renewable energy technologies in an Indian village. *Energy* 1990; 15(5): 445–449. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(90\)90041-Y](https://doi.org/10.1016/0360-5442(90)90041-Y)
- [118] Seeling-Hochmuth, G.C.S. (1997) A combined optimization concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems. *Solar Energy* 1997; 61(2): 77–87. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00028-5)
- [119] Zhao, B., Zhang, X., Chen, J., Wang, C. (2013) Operation optimization of stand-alone micro-grids considering life time characteristics of battery energy storage system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2013; 4(4): 934–943. DOI: 10.1109/TSTE.2013.2248400
- [120] Liao, G.C. (2012) Solve environmental economic dispatch of smart microgrid containing distributed generation system—using chaotic quantum genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 2012; 43(1): 779–787. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.040>
- [121] Abbes, D., Martinez, A., Champenois G. (2012) Eco-design optimisation of an autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage. *IET Renewable Power Generation*. Volumen 6, Número 5, Páginas 358-371. doi: 10.1049/iet-rpg.2011.0204
- [122] Koutroulis, E., Blaabjerg, F. (2011) "Design optimization of grid-connected PV inverters," 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011, pp. 691-698, doi: 10.1109/APEC.2011.5744671.
- [123] Zeng, J., Li, M., Liu, J.F., Wu, J., Ngan, H.W. (2010) Operational optimization of a stand-alone hybrid renewable energy generation system based on an improved genetic algorithm. *Proceedings of IEEE Conference, 2010*. DOI: 10.1109/PES.2010.5589885
- [124] Lee, T.Y., Chen, C.L. (2009) Wind-photovoltaic capacity coordination for a time-of-use rate industrial user. *IET Renewable Power Generation* 2009; 3(2): 152–167. DOI: 10.1049/iet-rpg:20070068
- [125] Ardakani, F. J., Riahy, G., Abedi, M. (2010) "Design of an optimum hybrid renewable energy system considering reliability indices," 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2010, pp. 842-847, doi: 10.1109/IRANIANCEE.2010.5506958.
- [126] Amer, M., Namaane, A., M'Sirdi, N. K. (2013) Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems (SHGE) Using PSO for Cost Reduction. *Energy Procedia*. Volume 42, 2013, Pages 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.032>
- [127] Askarzadesh, A., Leandro dos, S.C. (2015) A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran, *Solar Energy*, Vol. 112, No. 1, pp.383–396. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.013>
- [128] Fung, C.C., Hoand, S.C.Y., Nayar, C.V. (1993) Optimisation of a hybrid energy system using simulated annealing technique. *IEEE TENCON* 1993; 5: 235–238. DOI: 10.1109/TENCON.1993.320626
- [129] Wu Y., Lee C., Liu L., Tsai S. (2010) Study of reconFiguration for the distribution system with distributed generators. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2010; 25(3): 1678–1685. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2046339
- [130] Fetanat, A., Ehsan, K. (2015) Size optimization for hybrid photovoltaic-wind energy system using ant colony optimization for continuous domains, based integer programming. *Applied Soft Computing* 2015; 31: 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.047>

- [131] Sinha, S., Chandel, S.S. (2015) Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic wind-based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 50: 775–769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.040>
- [132] Katsigiannis, Y.A., Georgilakis, P.S., Karapidakis, E.S. (2012) Hybrid simulated annealing Tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewable. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2012; 3(3): 330–338. DOI: 10.1109/TSTE.2012.2184840
- [133] Bashir, M., Sadeh, J. (2012) Optimal sizing of hybrid wind/photovoltaic/battery considering the uncertainty of wind and photovoltaic power using Monte Carlo simulation. In: *Proceedings of IEEE international conference*. doi:10.1109/eeeic.2012.6221541
- [134] Khatib, T., Mohameda, A., Sopian, K. (2012) Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: case study of Kuala Terengganu, Malaysia. *Energy and Buildings* 2012; 47: 321–333. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.006>
- [135] Abbes, D., Martinez, A., Champenois G., Robyns, B. (2014) Real time supervision for a hybrid renewable power system emulator. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 42, March 2014, Pages 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.12.003>.
- [136] Rajkumar, R.K., Ramchandaramurthy, V.K., Yong, B.L., Chia, D.B. (2011) Techno-economical optimization of hybrid PV/wind/battery system using neuro-fuzzy. *Energy* 2011; 36(8): 5148–5153. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.017>
- [137] Lujano-Rojas, J.M., Dufo-Lopez, R., José L., Agustin, B. (2013) Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems. *Energy* 2013; 63: 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.003>
- [138] Sánchez, V. M., Chavez-Ramirez, A.U., Duron-Torres, S. M., Hernandez, J., Arriaga, L.G., Ramirez, J. M. (2014) Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 39, Issue 29, 2014, Pages 16646-16655, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.034>.
- [139] Maleki, A., Pourfayaz, F. (2015) Optimal sizing of autonomous hybrids photovoltaic/wind/ battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy* 2015; 115: 471–483. 174. *Sustainable Energy - Technological Issues, Applications and case Studies*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.004>
- [140] Chang K., Lin G. (2015) Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2015; 52: 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.002>
- [141] Suárez Velázquez, P. (2010). *Impacto de la Generación Eólica y Solar en el Sistema Eléctrico de Baja California Norte*, Tesis para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Eléctrica, México, D.F. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10151/141.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [142] Ponce Corral, C., García Villalba, L. A., Ñeco Caberta, R., Valenzuela, R. A (2014) *Diseño de un sistema Híbrido eólico solar para suministro de energía eléctrica a zona rural en el estado de Chihuahua*. CULCyT//Septiembre-diciembre, 2014. Año 11, No 54 Especial No 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7296149>
- [143] Atabaki, M. S., Aryanpur, V. (2018), "Multi-objective optimization for sustainable development of the power sector: An economic, environmental, and social analysis of Iran", *Energy*, vol. 161, pp. 493-507, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.149>>
- [144] URBANO-ARCILA, P. A, LASTRES-DANGUILLECOURT, O., HERNÁNDEZ-GALVEZ, G., IBÁÑEZ-DUHARTE, G. R (2020) Use of the multicriteria analysis methods to optimize sustainable energy systems based on renewable sources. *Journal-Urban-Rural and Regional Economy*. December 2020 Vol.4 No.7 15-29. DOI: 10.35429/JURRE.2020.7.4.15.29

- [145] Achkar, M., Canton, V., Cayssials, R., Domínguez, A., Fernández, G., Pesce, F. (2005) Comisión Sectorial de Educación Permanente. DIRAC, Facultad de Ciencias. Montevideo. 104pp.
http://www.ucipfg.com/Repositorio/MLGA/MLGA-03/semana2/Indicadores_de_sostenibilidad.pdf
- [146] Eadic (2015) Los indicadores de sostenibilidad ambiental. Equipo de comunicación. Madrid, agosto de 2015.
<https://www.eadic.com/los-indicadores-de-sostenibilidad-ambiental/>
- [147] Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M. (2003) Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy* 28 (2003) 2063–2087. doi:10.1016/S0960-1481(03)00102-2
- [148] Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., Kiosses, I. (2009), "Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1587-1600, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.011>>
- [149] Cavallaro, F., Ciraolo, L. (2005) A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy* 33 (2005) 235–244. doi:10.1016/S0301-4215(03)00228-3
- [150] Georgopoulou, E., Sarafidis, Y., Diakoulaki, D. (1998), "Design and implementation of a group DSS for sustaining renewable energies exploitation", *European Journal of Operational Research*, vol. 109, pp. 483-500, DOI <[http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00072-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00072-1)>
- [151] Doukas, H. C., Andreas, B. M., Psarras, J. E. (2007) Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. *Eur J Oper Res* 2007;182(2):844–55.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.037>
- [152] FLORES-TORRES, X. F., BUÑAY-CANTOS, J. P., OÑATE-GUADALUPE, J. A. (2017) Análisis del efecto redistributivo en el Ecuador: La recaudación tributaria y el gasto social. *Polo del Conocimiento*, [S.l.], v. 2, n. 5, p. 17-59, mayo 2017. <http://dx.doi.org/10.23857/pc.v2i5.62>.
- [153] OIEA Organización internacional de la energía atómica (2008). Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías. Impreso por el OIEA en Austria, Julio de 2008. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1222s_web.pdf
- [154] Sen, R., Bhattacharyya, S. C (2014). Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy* 62 (2014) 388-398.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028>
- [155] Burton, J., Hubacek, K. (2007) Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. *Energy Policy*. 2007; 35: 6402-6412.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.002>
- [156] Streimikiene, D., Balezentis, T., Krisciukaiene, I., Balezentis, A. (2012) Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2012; 16 (5): 3302–11.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.067>
- [157] Shyu, C.W. (2015) Ensuring access to electricity and minimum basic electricity needs as a goal for the post-MDG development agenda after 2015. *Energy Sustain. Dev.* 19 (2014) 29-38.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.005>
- [158] Chatzimouratidis, A. I., Pilavachi, P. A. (2008) Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, Volume 36, Issue 3, March 2008, Pages 1074-1089. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>
- [159] La Rovere, E. L., Soares, J. B., Oliveira, L. B., Lauria, T. (2010) Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2010; 14 (1): 422–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.033>
- [160] Afgan, N. H., Veziroglu, A., Carvalho, M. G. (2007) Multi-criteria evaluation of hydrogen system options. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 15, October 2007, Pages 3183-3193.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.045>

- [161] Bacon, R., Masami, K. (2011) Issues in Estimating the Employment Generated by Energy Sector Activities. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16969> License: CC BY 3.0 IGO.”
- [162] IRENA (2011) Renewable energy jobs. Status, prospects & policies. International Renewable Energy Agency, IRENA working paper; 2011. <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RenewableEnergyJobs.pdf>
- [163] Rutovitz, J., Usher, J. (2010) Methodology for calculating energy sector jobs. Sydney: Prepared for Greenpeace International by the Institute for Sustainable Futures. University of Technology. <https://opus.cloud.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/35044/1/rutovitzusher2010jobsmethodology.pdf>
- [164] Rutovitz, J., Atherton, A.M. (2009) Energy sector jobs to 2030: a global analysis, [prepared for Greenpeace International], Institute for Sustainable Futures, UTS, Sydney, Australia. <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/20458/1/rutovitzatherton2009greenjobs.pdf>
- [165] Wei, M., Patadia, S., Kammen, D.M. (2010) Putting renewables and energy efficiency to work: how many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy* 2010; 38 (2): 919–31. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
- [166] Ragwitz, M., Schade, W., Breitschopf, B., Walz, R., Helfrich, N., Rathmann, M., et al. (2009) Employ RES: the impact of renewable energy policy on economic growth and employment in the European Union. European Commission; 2009 (TREN/D1/474/ 2006). https://www.vsetkoobiopalivach.sk/files/2009_employ_res_report.pdf
- [167] Mann, M. K., Spath, P. L. (2001) A lifecycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant. *Clean Prod Processes* 2001; 3 (2): 81–91. <https://doi.org/10.1007/s100980100109>
- [168] Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., LloydHough, R. (2014) Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 39, November 2014, Pages 461-475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
- [169] IPCC (2011) Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático (SRREN). Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Matschoss, Susanne Kadner, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schloemer, Christoph von Stechow (eds.). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report.pdf
- [170] Haralambopoulos, D. A., Polatidis, H. (2003), "Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework", *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 961-973, DOI <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00072-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00072-1)>
- [171] Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J. (2009) Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1082–1088. doi:10.1016/j.rser.2008.03.008
- [172] Gagnon, L., Belanger, C., Uchiyama, Y. (2002) Life-cycle assessment of electricity generation options: the status of research in year 2001. *Energy Policy* 2002; 30(14): 1267–78. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00088-5)
- [173] Greening, B., Azapagic, A. (2012) Domestic Heat pumps: lifecycle environmental impacts and potential implications for the UK. *Energy* 2012; 39(1): 205–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.028>
- [174] Pehnt, M. (2006) Dynamic lifecycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 2006; 31(1): 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.002>
- [175] Afgan, N. H., Carvalho, M. G. (2002) Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, Volume 27, Issue 8, August 2002, Pages 739-755. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00019-1)
- [176] Bertani, R. (2005) World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics* 2005; 34(6): 651-90. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.005>
- [177] Evrendilek, F., Ertekin, C. (2003) Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy* 2003; 28(15): 2303-15. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00138-1)

- [178] Onat, N., Bayar, H. (2010) The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 3108–3115. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.022
- [179] Mac Kay, D. J. C. (2009) *Sustainable energy—without the hot air*. Cambridge, UK: UIT Cambridge Ltd; 2009. <https://doi.org/10.1119/1.3273852>
- [180] Spangenberg, J. H. (2005) Economic sustainability of the economy: concepts and indicators. *International Journal of Sustainable Development* 2005 Vol.8 No.1/2 2005. Doi: 10.1504/IJSD.2005.007374
- [181] Tegou, L. I., Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A. (2012), "A Multi-Criteria Framework for an Isolated Electricity System Design with Renewable Energy Sources in the Context of Distributed Generation: The Case Study of Lesvos Island, Greece", *International Journal of Green Energy*, vol. 9, pp. 256-279, DOI <<http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2011.621484>>
- [182] Cannemi, M., García-Melón, M., Aragonés-Beltrán, P., Gómez-Navarro, T. (2014), "Modeling decision making as a support tool for policy making on renewable energy development", *Energy Policy*, vol. 67, pp. 127-137, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.011>>
- [183] Kazak, J., Van Hoof, J., Szewranski, S. (2017), "Challenges in the wind turbines location process in Central Europe - The use of spatial decision support systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 425-433, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.039>>
- [184] Manfren, M., Caputo, P., Costa, G. (2011), "Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models", *Applied Energy*, vol. 88, pp. 1032-1048, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.018>>
- [185] HOGA (2021) Hybrid Optimization by Genetic Algorithms, <http://www.unizar.es/rdufo/hoga-eng.htm>
- [186] Robledo-Giraldo, S., Duque-Méndez, N. D., Zuluaga-Giraldo, J. I. (2013), "Difusión de productos a través de redes sociales: una revisión bibliográfica utilizando la teoría de grafos", *Revista Respuestas*, vol. 18, num. 2, pp. 27-41, DOI <<http://dx.doi.org/10.22463/0122820X.361>>
- [187] Sahabmanesh, A., Saboohi, Y. (2017), "Model of sustainable development of energy system, case of Hamedan", *Energy Policy*, vol. 104, pp. 66-79, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.039>>
- [188] Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., Leahy, M. (2010), "A review of computer tools for analyzing the integration of renewable energy into various energy systems", *Applied Energy*, vol. 87, pp. 1059-1082, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>>
- [189] Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- [190] Mastrocinque, E., Ramírez, F. J., Honrubia-Escribano, A., Pham, D. T. (2020) An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. *Expert Systems With Applications*, 0 0 0 (2020) 113321. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113321>
- [191] Dong, Q., Saaty, T. L. (2014), "An analytic hierarchy process model of group consensus", *Journal of Systems Science and System Engineering*, vol. 23, num. 3, pp. 362-374, DOI <<http://dx.doi.org/10.1007/s11518-014-5247-8>>
- [192] Saaty, T. L., (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3): 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- [193] Grošelj, P., Stirn, L. Z. (2012) Acceptable consistency of aggregated comparison matrices in analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. Volume 223, Issue 2, 1 December 2012, Pages 417-420. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.016>
- [194] Al Garni, H. Z., Awasthi, A. (2017) Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy* 206 (2017) 1225–1240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- [195] Bernal-Romero, S., Niño-Sanabria, D. F. (2018) MODELO MULTICRITERIO APLICADO A LA TOMA DE DECISIONES REPRESENTABLES EN DIAGRAMAS DE ISHIKAWA. Trabajo de grado ingeniería industrial, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13894/BernalRomeroSergio2018.pdf?sequence=1>

- [196] Opricovic, S., Tzeng, G. H. (2007) Extended VIKOR method in comparison with outranquin methods. *European Journal of Operational Research*, Volume 178, Issue 2, Pages 514-529, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>.
- [197] San Cristóbal, J. R. (2011) Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in spain: The Vikor method. *Renewable Energy* 36 (2011) 498-502. doi:10.1016/j.renene.2010.07.031
- [198] Opricovic, S., Tzeng, G. H. (2004) Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur J Oper Res* 2004; 156: 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- [199] Caliskan, H., Kursuncu, B., Kurbanoglu, C., Yilmaz Güven, S. (2013) Material selection for the tool holder working under hard milling conditions using different multi criteria decision making methods. *Materials and Design* 45 (2013) 473–479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.042>
- [200] Ercole, R. A, Alberto, C. L., Carognano, C. E. (2010) TOPSIS EN ACCIONES CON VARIABLES LINGUISTICAS. XXXIII CONGRESO ARGENTINO DE PROFESORES UNIVERSITARIOS DE COSTOS. MAR DEL PLATA. Octubre 2010. http://www.iapuco.org.ar/trabajos/2010/TRABAJO_023.pdf
- [201] Ghenai, C., Albawab, M., Bettayeb, M. (2020) Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. Volume 146, February 2020, Pages 580-597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.157>
- [202] Algarín, C. R. (2017) An analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2017, 7(4), 38-47. <https://www.zbw.eu/econis-archiv/bitstream/11159/1258/1/1005149348.pdf>
- [203] Bakhtiari, H., Naghizadeh, R. A. (2018), "Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method", *Renewable Power Generation*, vol. 12, num. 8, pp. 883-892, DOI <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0211642>>
- [204] Kumar, A., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., Bansal, R. C. (2018), "A Novel Methodological Framework for the Design of Sustainable Rural Microgrid for Developing Nations", *IEEE Access*, vol. 6, DOI <<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2832460>>
- [205] Diemuodeke, E. O., Hamilton, S., Addo, A. (2016), "Multi-criteria assessment of hybrid renewable energy systems for Nigeria's coastline communities", *Energy, Sustainability and Society*, vol. 6, num. 26, DOI <<http://dx.doi.org/10.1186/s13705-016-0092-x>>
- [206] Kumar, A., Deng, Y., He, X., Kumar, P. (2016) A Multi Criteria Decision Based Rural Electrification System. Pages: 4025-4030. Regular Track Renewable Energy Systems. IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793640
- [207] Florin, N. and Dominish, E. (2017) Sustainability evaluation of energy storage technologies. Report prepared by the Institute of Sustainable Futures for the Australian Council of Learned Academies (ACLA). <https://acola.org/wp-content/uploads/2018/08/wp3-sustainability-evaluation-energy-storage-full-report.pdf> [consultada 28.07.20]
- [208] Vishnupriyan, J., Manoharan, P. S. (2018), "Multi-criteria decision analysis for renewable energy integration: Asouthern India focus", *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 474-488, DOI <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.008>>
- [209] Romero, C. (1996). Análisis de las decisiones multicriterio. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid. 115 p. <https://www.rinconingenieril.com/2016/08/analisis-de-las-decisiones.html>
- [210] Siskos, E., Tsotsolas, N. (2015) Elicitation of criteria importance weights through the Simos method: A robustness concern. *European Journal of Operational Research*. Volume 246, Issue 2, 16 October 2015, Pages 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.037>
- [211] Saaty, T. L. (1994a). *Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, Pittsburgh. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=wct10TlbbiUC&oi=fnd&pg=PT1&dq=Fundamentals+of+decision+making+and+priority+theory+with+the+Analytic+Hierarchy+Process&ots=_D1wSQJAF&sig=smoG

I_qSbflzhGqMzoiAbB1o6c0#v=onepage&q=Fundamentals%20of%20decision%20making%20and%20priority%20theory%20with%20the%20Analytic%20Hierarchy%20Process&f=false

- [212] Muñoz-Medina, C. A., Pérez-Cortez, F. I., Murieta-Velásquez, M. J., Vela-Coral, S. F. (2019) “Análisis de costos y beneficios para el despliegue de un sistema de medición inteligente en Lima Metropolitana”. Tesis de maestría en Gestión de la Energía. ESAN, Perú.
https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/1738/2019_MAGE_17-1_02_T.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- [213] SEDESOL (2020) Catálogo de localidades.
<http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/Default.aspx?tipo=clave&campo=mun&valor=20>

ANEXOS

ANEXO A. Indicadores de Sustentabilidad de la AGENDA 21

Tabla A1 Indicadores sociales de la AGENDA 21.

INDICADORES SOCIALES				
No	Capítulo en la Agenda 21	PER	Indicador	
1	Capítulo 3: Combate a la pobreza	P	Tasa de desempleo	
2		E	Índice general de pobreza	
3		E	Índice del grado de pobreza	
4		E	Índice del grado de pobreza al cuadrado	
5		E	Índice de GINI sobre desigualdad del ingreso	
6		E	Relación entre los salarios medios de los hombres y las mujeres	
7	Capítulo 5: Dinámica demográfica y sustentabilidad	P	Tasa de crecimiento de la población	
8		P	Tasa de migración neta por lugar de residencia	
9		P	Tasa de fecundidad total	
10		E	Densidad de población sustentabilidad	
11	Capítulo 36: Promoción de la educación, la concientización pública y la capacitación	P	Tasa de cambio de la población en edad escolar	
12		P	Tasa bruta de matrícula escolar en primaria	
13		P	Tasa neta de matrícula escolar en primaria	
14		P	Tasa bruta de matrícula escolar en secundaria	
15		P	Tasa neta de matrícula escolar en secundaria	
16		P	Tasa de alfabetización de adultos	
17		E	Niños que alcanzan el quinto grado de educación primaria	
18		E	Esperanza de vida escolar	
19		E	Diferencia entre matrícula escolar masculina y femenina	
20		E	Mujeres por cada 100 hombres en la fuerza de trabajo	
21		R	Porcentaje del PIB destinado a educación	
22	Capítulo 6: Protección y promoción de la salud humana	E	Saneamiento básico: Porcentaje de la población que dispone de instalaciones adecuadas para la eliminación de excreta	
23		E	Acceso seguro al agua potable	
24		E	Esperanza de vida al nacer	
25		E	Peso suficiente al nacer	
26		E	Tasa de mortalidad infantil (TMI)	
27		E	Tasa de mortalidad materna (TMM)	
28		E	Estado nutricional de los niños respecto a los niveles nacionales	
29		R		Porcentaje de la población infantil que ha sido inmunizada
				acorde con las políticas nacionales de vacunación

30		R	Tasa de utilización de métodos anticonceptivos
31		R	Proporción de químicos potencialmente peligrosos monitoreados en los alimentos
32		R	Gasto nacional en servicios locales de salud
33		R	Gasto total en salud respecto al PIB
34	Capítulo 7: Promoción del desarrollo de asentamientos humanos sustentables	P	Tasa de crecimiento de la población urbana
35		P	Consumo de combustible fósil por habitante, en vehículos de motor
36		P	Pérdidas humanas y económicas debidas a desastres naturales
37		E	Porcentaje de población que vive en zonas urbanas
38		E	Área y población de asentamientos urbanos formales e informales
39		E	Área habitable por persona
40		E	Precio de vivienda en proporción al ingreso
41		R	Gasto en infraestructura por habitante

Tabla A2 Indicadores económicos de la AGENDA 21.

INDICADORES ECONÓMICOS			
No	Capítulo en la Agenda 21	PER	Indicador
1	Capítulo 2: Cooperación internacional para acelerar el desarrollo sustentable en los países y en sus políticas internas	P	PIB por habitante
2		P	Participación de la inversión neta en el PIB
3		P	Suma de exportaciones e importaciones en proporción al PIB
4		E	Producto interno neto ajustado ambientalmente por habitante
5		E	Participación de las manufacturas en la exportación total de mercancías
6	Capítulo 4: Cambio de patrones de consumo	P	Consumo anual de energía por habitante
7		P	Participación de las industrias intensivas en recursos naturales no renovables en el valor agregado manufacturero
8		E	Reservas minerales probadas
9		E	Reservas probadas de fuentes energéticas fósiles
10		E	Duración de las reservas probadas de energía
11		E	Intensidad de uso de materiales
12		E	Participación del valor agregado manufacturero en el PIB
13		E	Participación del consumo de recursos energéticos renovables
14	Capítulo 33: Mecanismos y recursos financieros	P	Transferencia neta de recursos /PIB
15		E	Total de la asistencia oficial para el desarrollo (AOD) dada o recibida como porcentaje del PIB
16		E	Deuda/PIB
17		E	Servicio de la deuda externa respecto a las exportaciones
18		R	Gasto en protección ambiental como proporción del PIB

19		R	Cantidad de financiamiento nuevo o adicional, para el desarrollo sustentable
20	Capítulo 34: Transferencia de tecnología	P	Importación de bienes de capital
21		P	Inversión extranjera directa
22		E	Participación de los bienes de capital ambientalmente limpios en la importación total de bienes de capital
23		R	Ayuda a la cooperación técnica

Tabla A3 Indicadores ambientales de la AGENDA 21.

INDICADORES AMBIENTALES			
No	Capítulo en la Agenda 21	PER	Indicador
1	Capítulo 18: Recursos de agua dulce	P	Extracción anual de agua subterránea y superficial
2		P	Consumo doméstico de agua por habitante
3		E	reservas de aguas subterráneas
4		E	Concentración de coliformes fecales en agua dulce
5		E	DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) en cuerpos de agua
6		R	Tratamiento de aguas residuales
7		R	Densidad de las redes hidrológicas
8		P	Crecimiento de población en áreas costeras
9	Capítulo 17: Protección de océanos, todo tipo de mares y zonas costeras	P	Descargas de petróleo en aguas costeras
10		P	Descargas de nitrógeno y fósforo en aguas costeras
11		E	Rendimiento máximo sustentable en las pesquerías
12		E	Índice de algas
13	Capítulo 10: Enfoque integrado para la planeación y administración de recursos del suelo	P	Cambios en el uso del suelo
14		E	Cambios en la condición de las tierras
15		R	Administración descentralizada de los recursos naturales a nivel local
16	Capítulo 12: Manejo de ecosistemas frágiles: Combate a la desertificación y la sequía	P	Población que vive por debajo de la línea de pobreza en tierras áridas
17		E	Índice nacional de precipitación mensual
18		E	Índice de vegetación obtenido de imágenes de satélite
19		E	Tierras afectadas por la desertificación
20	Capítulo 13: Capítulo 12: Manejo de ecosistemas frágiles: Desarrollo sustentable en áreas montañosas	P	Cambio de la población en áreas montañosas
21		E	Uso sustentable de los recursos naturales en las áreas montañosas
22		E	Bienestar de poblaciones en áreas montañosas
23	Capítulo 14: Promoción de la agricultura sustentable y el desarrollo rural	P	Uso de pesticidas agrícolas
24		P	Uso de fertilizantes
25		P	Tierra de regadío como porcentaje de tierras cultivables
26		P	Uso de la energía en la agricultura
27		E	Tierra cultivable por habitante
28		E	Superficie de tierra habitada por salinización y anegamiento
29		R	Educación agrícola

30		P	Intensidad de la producción de madera
31		E	Variación de la superficie de bosques
32	Capítulo 11: Combate a la deforestación	R	Proporción de la superficie forestal administrada
33		R	Proporción de la superficie forestal protegida respecto de la superficie forestal total
34	Capítulo 15: Conservación de la diversidad biológica	E	Especies amenazadas respecto al total de especies nativas
35		R	Superficie protegida como porcentaje de la superficie total
36	Capítulo 16: Manejo ambientalmente limpio de la biotecnología	R	Gasto en investigación y desarrollo en biotecnología
37		R	Existencia de regulación o lineamientos de bioseguridad
38	Capítulo 9: Protección da la atmósfera	P	Emisiones de gases de efecto invernadero
39		P	Emisiones de óxidos de azufre
40		P	Emisiones de óxidos de nitrógeno
41		P	Consumo de sustancias que agotan la capa de ozono
42		E	Concentración de contaminantes en zonas urbanas
43		R	Gasto sobre abatimiento de la contaminación atmosférica
44	Capítulo 21: Manejo ambientalmente limpio de desechos sólidos y aspectos relacionados con aguas servidas	P	Generación de desechos sólidos industriales y municipales
45		P	Eliminación de desechos domésticos por habitante
46		R	Gasto en manejo de desechos
47		R	Reciclado y reutilización de desechos
48		R	Eliminación de desechos municipales
49	Capítulo 19: Manejo ambientalmente limpio de sustancias químicas tóxicas	E	Intoxicaciones agudas por productos químicos
50		R	Productos químicos prohibidos severamente restringidos
51	Capítulo 20: Manejo ambientalmente limpio de desechos peligrosos	P	Generación de desechos peligrosos
52		P	Importación y exportación de desechos peligrosos
53		E	Superficie de suelos contaminados
54		R	Gasto en tratamiento de desechos peligrosos
55	Capítulo 22: Manejo seguro y ambientalmente limpio de desechos radioactivos	P	Generación de desechos radioactivos

Tabla A4 Indicadores institucionales de la AGENDA 21.

INDICADORES INSTITUCIONALES			
No	Capítulo en la Agenda 21	PER	Indicador
29	Capítulo 8: Integración del medio ambiente y el desarrollo en la toma de decisiones	R	Estrategias de desarrollo sustentable
30		R	Programa de cuentas económicas y ecológicas integradas
31		R	Evaluación por mandato legal del impacto ambiental
32		R	Consejos nacionales para el desarrollo sustentable
33		E	Potencial de científicos e ingenieros por millón de habitantes

34	Capítulo 35: Ciencia para el desarrollo sustentable	R	Científicos e ingenieros empleados en investigación y desarrollo experimental por millón de habitantes
35		R	Gasto en investigación y desarrollo experimental en proporción el PIB
36	Capítulo 39: Instrumentos y mecanismos legales internacionales	R	Ratificación de acuerdos globales
37		R	Instrumentación de los acuerdos globales ratificados
38	Capítulo 40: Información para la adopción de decisiones	E	Líneas telefónicas principales por cada 100 habitantes
39		E	Acceso a la información
40		R	Programa nacional de estadísticas ambientales
41	Capítulo 23-32: Fortalecimiento del papel de los grupos principales	R	Representación de los grupos principales en los consejos nacionales para el desarrollo sustentable
42		R	Representación de minorías étnicas y poblaciones indígenas en los consejos nacionales para el desarrollo sustentable
43		R	Contribución de las organizaciones no gubernamentales al desarrollo sostenible

ANEXO B. Optimización Monocriterio de un Sistema Híbrido Usando Homer.

Para desarrollar el diseño monocriterio de un sistema híbrido puede emplearse la versión demo de HOMER Pro (Microgrid Analysis Tool x64 3.13.7 Evaluation Edition), la cual se puede descargar en la página de HOMER Energy (<https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>) y permite una licencia de prueba gratuita por 21 días. Por tanto, se recomienda tener a mano toda la información necesaria para realizar las simulaciones y aprovechar la herramienta hasta obtener los resultados deseados, antes de dicho plazo. A continuación, se presenta la metodología paso a paso para el diseño mencionado:

1. Abrir el software HOMER Pro x64.
2. Abrir el Setup Assistant, el cual es una guía para la configuración de las características del proyecto o asistente de configuración.
3. Se abre una ventana con varias páginas, la primera de las cuales es *Project*. Escribir el título del proyecto, por ejemplo: Proyecto Salina Cruz, OAX.
4. Ingresar la tasa de descuento, 6% por defecto.
5. Presionar el botón *Set Location* para establecer la ubicación del emplazamiento.
6. Se abre una ventana para seleccionar la ubicación en el mapa mundial, o de manera rápida, se puede utilizar la línea de buscador en la parte superior del mapa donde se digita el nombre de la ciudad y la abreviatura del estado y se da clic en el botón *Search*, por ejemplo, Salina Cruz, OAX. Ampliar la imagen hasta dar clic sobre la ubicación exacta, dar clic en el botón OK, y si está de acuerdo con la información ingresada, dar clic en el botón *Next*.
7. Segunda página, *Loads*. Seleccionar uno de los perfiles para el tipo de demanda que se desea suplir. Las opciones son Residencial, Comercial, Comunitaria e Industrial. Seleccione la que más se asemeje al caso de análisis, mediante el menú desplegable. Ingrese el valor de la demanda diaria promedio en kWh/día. Cada perfil presenta un valor diferente de este promedio por defecto. También se puede seleccionar el mes de mayor demanda, donde las opciones son: Enero, Julio o ninguno. Dar clic en el botón *Next*.
8. Tercera página, *Grid*. Si el sistema es aislado se prosigue a la siguiente página por medio del botón *Next*. Si el sistema se analiza con interconexión a la red, seleccionar la casilla *I am connected to the Grid*, donde se activan para elegir una de 4 opciones: (1) No se puede vender electricidad hacia la red, (2) Se puede vender electricidad con una tarifa de entrada, (3) Se puede vender electricidad usando el balance mensual medido, (4) Se puede vender electricidad usando el balance anual medido. Esto dependerá de las condiciones del contrato con la compañía proveedora del servicio eléctrico.
9. Cuarta página, *Generator*. HOMER considera sistemas con y sin generador, para el cual se puede establecer un costo capital en (\$/kW) y el costo del combustible (\$/L), o dejar los valores por defecto, y dar clic en *Next*.
10. Quinta página, *Renewables*. En este espacio se puede seleccionar si el diseño considerará módulos fotovoltaicos y turbinas eólicas. Permite el ingreso del costo capital de un equipo por tecnología en (\$/kW) para fotovoltaica o en (\$/turbina) para eólica. También permite seleccionar un tipo de aerogenerador entre los existentes en la librería. Si el equipo de interés no está, se puede ingresar más adelante, al terminar la configuración general del proyecto. Siguiendo a la siguiente página.
11. Sexta página, *Storage*. Seleccionar si el sistema considera almacenamiento de energía en baterías, para las que se puede especificar un tipo de batería de entre las listadas en la librería del software; si el equipo de interés no está, se puede ingresar más adelante, al

terminar la configuración general del proyecto. También se puede ingresar el costo de la batería en (\$/kW.h). Seguir a la última página.

12. Página de resumen, Summary. En esta página se presenta la información conFigurada anteriormente. Adicionalmente, puede seleccionar si requiere incluir el análisis de sensibilidad para el modelo. De esta manera se correrán de manera automática optimizaciones adicionales usando valores de entrada 50% mayores y 50% menores que los especificados en el caso de análisis, para generar diferentes escenarios de comparación. Son:
 - a. Precio de los combustibles
 - b. La velocidad del viento, si se tiene en cuenta la energía eólica
 - c. Tasa de descuento
13. Dar clic en el botón *Calculate*.
14. Aparece un cuadro de diálogo donde se presentan el número de iteraciones y avance en los cálculos de la optimización, buscando el menor valor presente neto (NPC). Este proceso tomará algunos minutos. Habiéndose alcanzado el 100% se cierra automáticamente el cuadro y aparece la ventana de resultados con las páginas *Summary*, *Tables* y *Graphs*.
15. Si requiere ingresar equipos que no estaban en las librerías de HOMER, puede cambiar la configuración del modelo, seleccionado el botón Design del menú File. En el cuadro Schematic se encuentran todos los elementos adicionados previamente al sistema y dando clic sobre uno de ellos, puede ingresar a revisar y modificar los datos de configuración. Habiendo realizado los cambios necesarios, de clic en el botón *Calculate*, ubicado en la parte superior derecha de la pantalla.

RESULTADOS

16. En la página *Tables*, se muestran la Tabla de análisis de sensibilidad en la parte superior, y la Tabla de optimización en la parte inferior de la pantalla. El análisis de sensibilidad evalúa el impacto de los cambios en la mayoría de los parámetros de entrada, en los resultados. Al señalar una de las filas en la Tabla de análisis sensibilidad, cambia la Tabla de optimización y se puede visualizar la Tabla de alternativas correspondiente a los valores de sensibilidad seleccionados.
17. La página *Graphs*, ilustra el sistema óptimo seleccionado para los valores dados del análisis de sensibilidad, base, mitad y doble, por ejemplo: la tasa nominal de descuento y el precio del combustible. Además, se puede superponer una variable de comparación, por ejemplo, el NPC. Los resultados permiten observar bajo que valores de las variables sensibles, un sistema sigue siendo el óptimo o deja de serlo. De esta manera el usuario selecciona el escenario bajo el cual desea analizar al sistema óptimo.
18. Para analizar el sistema óptimo (menor NPC), regrese a la página de las Tablas y seleccione el escenario elegido, dando un clic sobre éste en la Tabla superior, y doble clic en la fila del primer elemento de la lista inferior. Verifique que los elementos están ordenados de menor a mayor valor de NPC. Aparece una ventana con los resultados de la optimización, en la cual se pueden observar diferentes páginas tales como *Cost Summary*, *Cash Flow*, *Compare Economics*, *Electrical*, *Fuel Summary*, entre otras; que permiten diferentes maneras de visualizar el comportamiento del sistema óptimo, por ejemplo graficar las tendencias de comportamiento de los diferentes elementos del sistema, graficas de barras para comparar los costos, el flujo de caja durante el tiempo de vida proyectado para el sistema, aportes de las componentes renovables al suministro de la demanda energética, y el balance de energía por equipo, dentro del sistema; también entre otras funciones. Hasta aquí se obtienen los resultados para el diseño de un sistema óptimo monocriterio.

19. Al obtenerse los resultados de optimización, según las variables de sensibilidad requerida, se exporta la Tabla inferior, la cual lista las alternativas para un posterior análisis multicriterio. Si las alternativas presentadas de manera categorizada (Categorized), son insuficientes para un análisis multicriterio, se puede desplegar el listado global (Overall), dando clic en el botón selector ubicado en la parte superior derecha de la Tabla inferior. Este archivo importado a Excel continuará al siguiente paso de la metodología para la optimización multicriterio del sistema híbrido para un caso de estudio determinado.

Si desea realizar un análisis de sensibilidad alrededor de los valores obtenidos como óptimos puede ingresar a la configuración de los equipos y activar la opción *Search Space*, para ingresar los valores que desea analizar. Por ejemplo, para verificar el comportamiento del sistema con un inversor de mayor o menor potencia que el indicado por la optimización.

ANEXO C. Optimización Monocriterio de un Sistema Híbrido Usando iHOGA.

El software iHOGA (<https://ihoga.unizar.es>), cuenta con una versión EDU para estudiantes de libre uso, en la cual el consumo total medio está limitado a 10 kWh/día, y no permite simular sistemas interconectados a la red. La versión PRO permite simulaciones interconectadas a la red, en un rango de demanda energética de 10 kWh/día hasta 5 MW. Actualmente, existe una versión especial para sistemas de 5 MW en adelante, sin límites, denominada MHOGA desarrollado con la colaboración de Sisener Ingenieros (<https://www.sisener.com>).

Gracias al apoyo del Dr. Rodolfo López Dufo, desarrollador del software iHOGA, se obtuvo el acceso a la versión PRO por algunos meses, lo cual permite realizar las simulaciones de los casos de estudio adicionales, dos de los cuales estaban conectados a la red, y uno más superaba el límite de los 10 kWh/día. Para la obtención de las alternativas de sistemas energéticos de los casos adicionales se empleó la siguiente metodología, donde los datos de entrada requeridos fueron la ubicación en coordenadas decimales (para definir los recursos disponibles en el sitio) y la matriz de demanda energética o el archivo plano de la misma para ser importado. Se utiliza la versión EDU para ilustrar la siguiente metodología paso a paso, cuya interfaz se visualiza en la Figura C1.

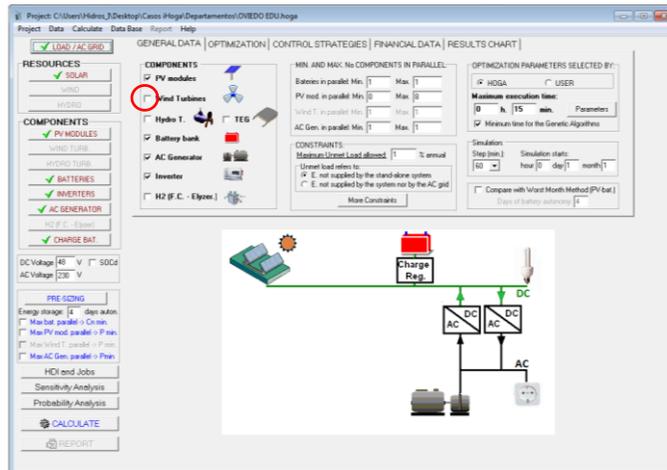


Figura C1 Interfaz del software iHOGA.

1. Crear un proyecto nuevo en iHOGA-EDU y dar clic en el botón LOAD/AC GRID, ingresar los datos de la demanda (matriz o importar). Si se va a importar un archivo, se debe seleccionar el tipo de carga AC/DC.

Matriz de demanda, se ingresan los datos de manera manual en la matriz que se muestra en la Figura C2 y se indica si la demanda es AC o DC:

Month	01h	1-2h	2-3h	3-4h	4-5h	5-6h	6-7h	7-8h	8-9h	9-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h	14-15h	5:16h
JANUARY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEBRUARY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MARCH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APRIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JUNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JULY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUGUST	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SEPTEMBER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OCTOBER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOVEMBER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DECEMBER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura C2 Matriz de demanda energética anual.

En la versión PRO, si el sistema es interconectado a la red se debe activar la opción en la última página de la configuración de la demanda, indicada en color rojo en la Figura C2.

Al importar los datos, la ventana AC no muestra una matriz, se queda en gris. Pero al graficar la demanda importada, esta se puede visualizar por días, meses o el año, indicando la cantidad de días que se quiere graficar, por ejemplo 7 días como se muestra en la Figura C3.

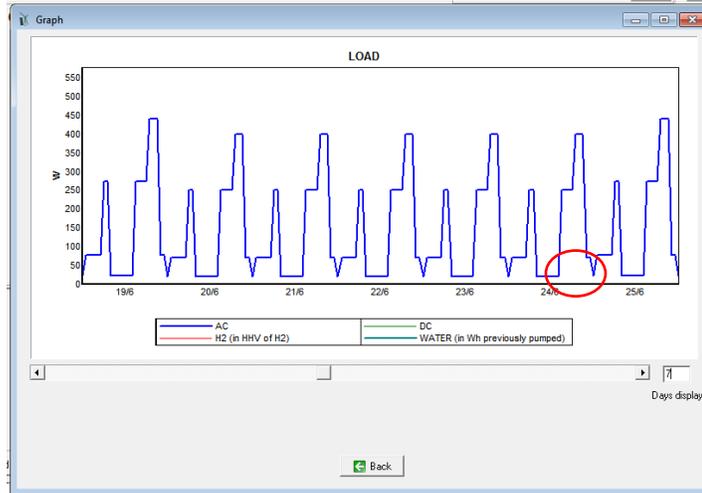


Figura C3 Demanda energética importada, graficada por 7 días.

2. Dar clic en el botón **RESOURCES - SOLAR** e ingresar las coordenadas decimales de la ubicación del sitio de estudio. Posteriormente, descargar los datos de la NASA, seleccionar la altura de 10 m y dar OK, como se indica en la Figura C4.

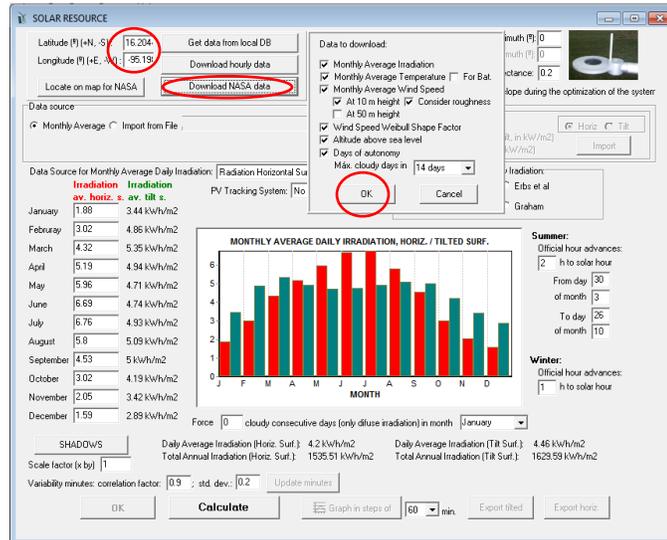


Figura C4 Ventana de recurso solar iHOGA.

Al cargar los nuevos datos de irradiancia, se obtiene la siguiente imagen de la Figura C3, dar clic en calcular para cargar los datos y en OK para cerrar la ventana, Figura C5.

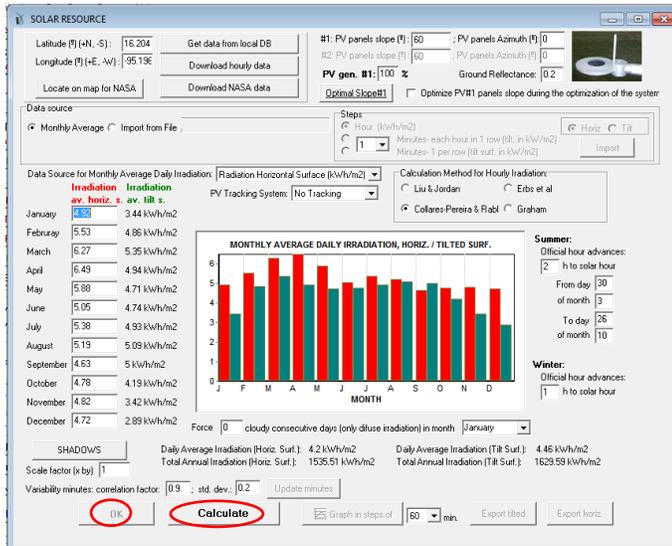


Figura C5 Dar en “calcular” para cargar los datos de irradiancia.

- Para activar el botón del viento WIND, dar clic en la casilla de chequeo del aerogenerador, como que se observa en la Figura C1. Al dar clic aparece un signo de admiración “!” enseguida de la palabra WIND, y de COMPONENTS-WIND TURB., lo cual solicita que se ingrese la información requerida para estimar el recurso eólico y del aerogenerador que se va a simular. Al dar clic en “¡ WIND” se abre la ventana que se presenta en la Figura C6.

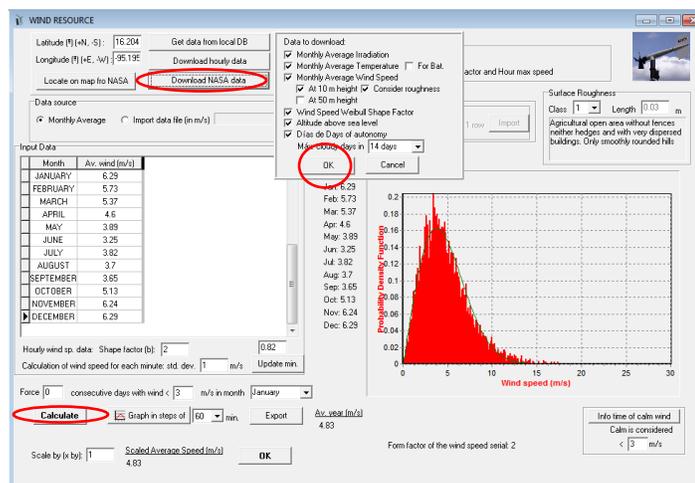


Figura C6 Ventana del recurso eólico.

Los datos de la ubicación se cargan de la información ingresada en la ventana del recurso solar, por lo tanto, solo se da clic en el botón de descargar los datos de la NASA y en OK. Ahora se da clic en el botón “Calculate” para que se genere la gráfica de distribución de probabilidad. El recurso se puede visualizar por días, dando clic en el botón “Graph in steps of”.

- Seleccionar los componentes que se utilizarán para generar las alternativas. Se pueden ingresar varios tipos de módulos FV, así como diferentes tipos de aerogeneradores, baterías y cargador de baterías. En el caso del inversor, solo se puede seleccionar uno a la vez (Figura C7(d)), pero si se desea analizar varios inversores, se pueden correr varias simulaciones y al

final unirlos en la lista de alternativas en Excel. En las Figuras C7 (a, b, c, d, e y f) se presentan los diferentes equipos considerados.

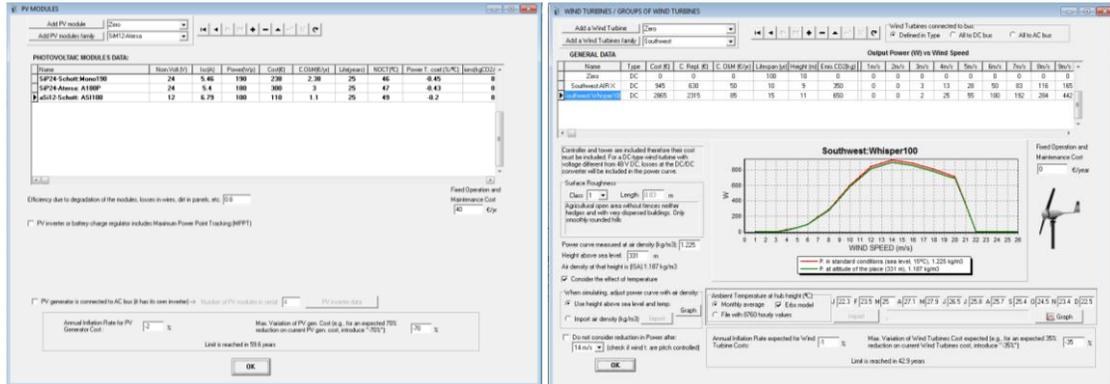


Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (a) Módulos FV, (b) Aerogeneradores.

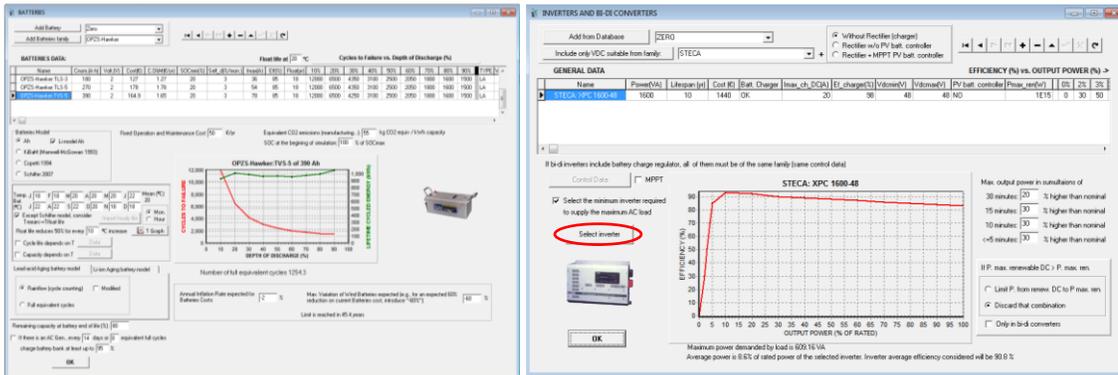


Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (c) Baterías, (d) Inversores.

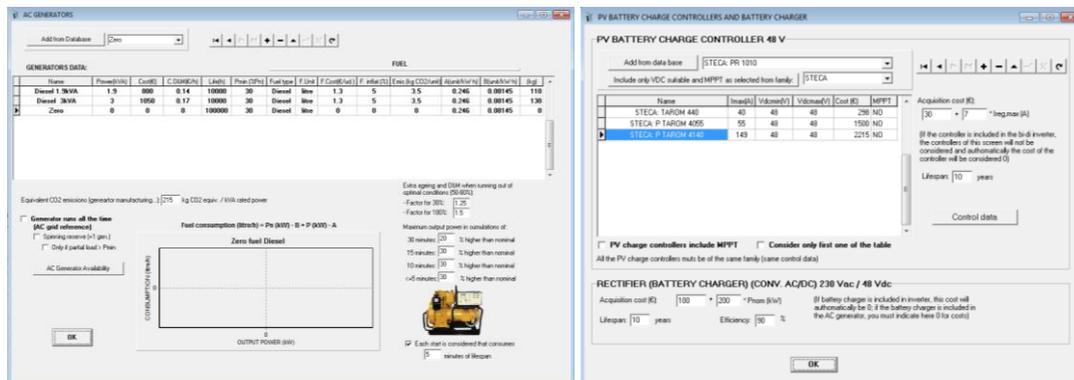


Figura C7 Ventanas de los componentes del sistema (e) Generador AC, (f) Controladores de carga.

- El botón PRE-SIZING es de gran utilidad ya que guía al usuario para añadir o quitar equipos a la simulación con el fin de reducir su número, por ejemplo, si es la potencia fotovoltaica requerida es muy alta usando paneles FV de baja potencia, se puede cambiar o incluir un módulo de mayor potencia nominal, para ahorrar espacio. Antes de realizar el pre-

No.	NPC(k)	Em.CO2(kg)	Unmet(kWh)	Unmet(%)	Days auton.	Ci(W/h)	Ppi	Renovable	LCOE (€/kWh)	HDI	Jobs	No. PV. Pan.	No. PV. Pan.	Pot. PV.Pan	P total.	PV(W Slope)(%)	No. Wind T.	Pot. Wind T.	P total.	Wind Hydro T.(%)	AC. Gener.(%)	No. AC. Gene	Fuel Cell.(W)	Elect.	
1	18130.1	159.6	0	0	1E+10	7.18	100	0.7941	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	1	0		
2	18222.3	160.102	25.717	2.13	1E+10	3.45	97.87	0.7878	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
3	18295.3	148.056	0	0	1E+10	3.31	100	0.7771	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
4	18437.9	146.8	0	0	1E+10	8.21	100	0.7777	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
5	18615.4	135.589	0	0	1E+10	3.79	100	0.7945	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
6	18759.4	176.569	18.923	1.56	1E+10	7.48	98.44	0.7905	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
7	19047.1	159.6	0	0	1E+10	7.18	100	0.8027	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
8	19086.6	147.281	0	0	1E+10	4.97	100	0.8041	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
9	19212.3	148.056	0	0	1E+10	3.31	100	0.8097	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
11	19345.8	160.32	22.8	1.88	1E+10	5.18	98.12	0.8111	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
12	19391.9	175.456	0	0	1E+10	2.74	100	0.813	0.5049	0.0097	4	8	100	3200	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
13	19333.7	159.601	0	0	1E+10	7.18	100	0.8148	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
14	19355	146.8	0	0	1E+10	8.21	100	0.8157	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
15	19430.5	135.719	0	0	1E+10	5.68	100	0.8189	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
16	19498.9	148.056	0	0	1E+10	3.31	100	0.8218	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
17	19532.2	263.226	0	0	1E+10	9.57	94.49	0.8232	0.5049	0.0072	4	6	100	2400	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
18	19532.5	135.589	0	0	1E+10	3.79	100	0.8232	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
19	19618.5	163.14	0	0	1E+10	3.05	100	0.8298	0.5049	0.0085	4	7	100	2800	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
20	19641.6	146.801	0	0	1E+10	8.21	100	0.8278	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
21	19788.1	194.6	0	0	1E+10	5.93	100	0.8339	0.5049	0.0097	4	8	100	3200	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
22	19804.1	267.963	0	0	1E+10	9.57	94.2	0.8346	0.5049	0.0072	4	6	100	2400	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
23	19819.1	135.59	0	0	1E+10	3.79	100	0.8352	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
24	19848.5	154.593	0	0	1E+10	3	100	0.8365	0.5049	0.0074	4	6	100	2400	60	1	925	925	0	0	0	0	1	0	
25	19874.2	263.971	0	0	1E+10	4.42	93.87	0.8376	0.5049	0.0072	4	6	100	2400	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
26	19890	207.382	0	0	1E+10	3.45	97.55	0.8382	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	1900	1	0	
27	19933.8	162.395	19.787	1.64	1E+10	8.93	98.36	0.8399	0.5049	0.0091	2	8	190	3040	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
28	19977.6	147.281	0	0	1E+10	4.97	100	0.8428	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
29	20009.7	152.485	26.597	2.2	1E+10	4.12	97.8	0.843	0.5049	0.0091	2	8	190	3040	60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
30	20096.9	181.8	0	0	1E+10	6.62	100	0.847	0.5049	0.0085	4	7	100	2800	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
31	20164.1	272.389	0	0	1E+10	4.42	93.53	0.8498	0.5049	0.0072	4	6	100	2400	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
32	20167.5	210.33	0	0	1E+10	7.48	98.21	0.8499	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	1900	1	0
33	20177.4	210.973	0	0	1E+10	3.45	97.4	0.8503	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	3000	1	0
34	20209	175.456	0	0	1E+10	2.74	100	0.8517	0.5049	0.0097	4	8	100	3200	60	1	547	547	0	0	0	0	1900	1	0
35	20273.1	177	0	0	1E+10	4.11	100	0.8544	0.5049	0.0097	4	8	100	3200	60	1	547	547	0	0	0	0	1	0	
36	20384.2	147.282	0	0	1E+10	4.97	100	0.8549	0.5049	0.0096	4	8	100	3200	60	1	0	0	0	0	0	3000	1	0	
37	20347.6	135.719	0	0	1E+10	5.68	100	0.8575	0.5049	0.0084	4	7	100	2800	60	1	0	0	0	0	0	1900	1	0	
38	20461.5	213.654	0	0	1E+10	7.48	98.07	0.8623	0.5049	0.0073	4	6	100	2400	60	1	547	547	0	0	0	0	3000	1	0

Figura C10 Tabla en Excel con las alternativas generadas por iHOGA.

- La optimización multiobjetivo se obtiene ingresando a la pestaña optimización señalada en la Figura C9 (b). En esta pestaña se da activar a la opción "MULTI-OBJECTIVE" y de nuevo se da a calcular. Los resultados de la optimización multiobjetivo se presentan en la Figura C11.

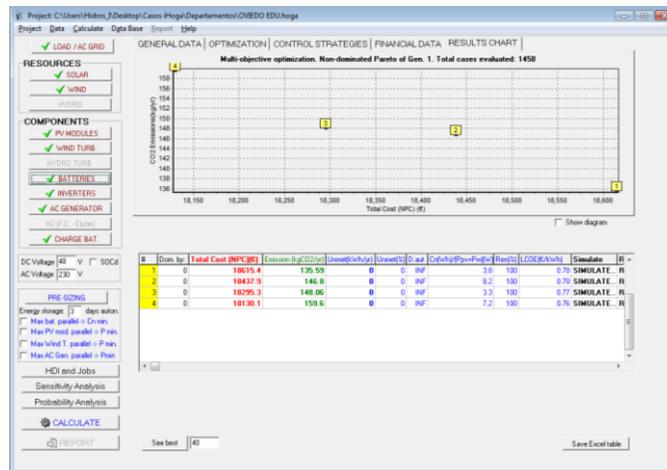


Figura C11 Ventana de resultados multiobjetivo iHOGA.

- Estos resultados también pueden guardarse como un archivo de Excel para visualizar de mejor manera los resultados y comparar los sistemas obtenidos. El resultado de la simulación multiobjetivo se emplea en esta investigación, solo como punto de comparación de los resultados obtenidos por la metodología y software multicriterio propuestos y desarrollados en esta tesis.