

Estudio de capacidades de la herramienta HOMER para el dimensionamiento de sistemas
híbridos de generación de energía eléctrica

Karina Cuervo Arias, Yennifer Bibiana Sarmiento Ariza, Jersson Ferney García García, Lizeth
Tatiana Campos Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería

Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Le agradezco infinitamente a mi madre Sandra, por ser un apoyo incondicional durante todo mi proceso de aprendizaje en la universidad; por siempre brindarme su comprensión y amor tanto en momentos felices, como en los más difíciles que enfrenté durante este proceso. A mi hermana Juliana, porque con su ejemplo de asiduidad, disciplina y dedicación, me mostró el camino para poder alcanzar esta meta tan importante. A mi abuelita Julieta, que en paz descansa, por todo el amor y las enseñanzas que me brindó a lo largo de mi vida. A mi querido amigo y compañero de vida, Jhonatan, por su gran apoyo, por siempre alentarme a seguir adelante y ser un ejemplo de perseverancia.

Karina Cuervo Arias

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional y su ejemplo de perseverancia, a mi hermana Leticia por creer en mí y ser mi motivación. A mis amigas por su compañía y llenarme de alegrías y anécdotas. Agradezco a la ESSA y a la Fundación Estructurar por otorgarme la beca “Buena Energía para tu Proyecto de Vida” y a la Universidad Industrial de Santander por brindarme apoyos y oportunidades en este proceso de formación. Agradezco al profesor German Osma por su acompañamiento y motivación para dar siempre lo mejor de cada uno de nosotros y a mis compañeros de trabajo de grado por su constancia para realizar este proyecto y compartirme de su conocimiento.

Yennifer Bibiana Sarmiento Ariza

Agradezco a Dios por su ayuda y fuerzas brindadas. A mis papás por su apoyo y su constante esfuerzo para alcanzar mis metas, por sus palabras y sus consejos que me han guiado. A mis hermanos con los que he contado en todo momento. También quiero agradecer a mis primos que han sido como hermanos, por el aprecio y ayuda. A mis compañeros de estudio por los momentos compartidos y enseñanzas. Finalmente, darle gracias a los profesores que me acompañaron durante este proceso compartiendo su tiempo y conocimiento.

Jersson Ferney García García

Gracias a Dios por estar presente en mi vida y brindarme la sabiduría, salud y perseverancia para culminar con éxito mi etapa profesional. Agradezco a mi madre, Nubia Rodríguez, por su amor, comprensión y apoyo incondicional. A mi padre, Fredy Campos, por ser mi ejemplo y motivarme a cumplir mis sueños. A mis abuelos, María, Rosa y Ángel por ser la base de mi familia y enseñarme a creer en mis capacidades. A mi tía Marlene, Esperanza, Martha y mi tío Pedro por su amor, consejos y acompañamiento en este proceso. A Silvia, Claret y Leidy, amigas incondicionales, gracias por su compañía, ayuda y comprensión que siempre me han regalado.

Para finalizar, agradezco al profesor German Osma, por compartir sus conocimientos y por brindarme consejos que me han permitido crecer personal y profesionalmente.

Lizeth Tatiana Campos Rodríguez

Finalmente agradecemos al profesor German Osma Pinto por su acompañamiento y dirección en el desarrollo del presente trabajo.

Karina Cuervo Arias
Yennifer Bibiana Sarmiento Ariza
Jersson Ferney García García
Lizeth Tatiana Campos Rodríguez

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
1. Objetivos.....	22
1.1. Objetivo general	22
1.2. Objetivos específicos.....	22
2. Proceso de dimensionamiento, análisis financiero y operación de sistemas híbridos de generación.....	23
2.1. Proceso de dimensionamiento en HOMER Pro	24
2.2. Descripción del análisis financiero a partir del uso de HOMER Pro	30
2.3. Resultados asociados a la operación de microrredes.....	31
3. Estrategias de gestión de energía en HOMER Pro y tecnologías de almacenamiento.....	34
3.1. Características de las estrategias de gestión de energía en HOMER Pro.....	35
3.2. Análisis del comportamiento de las estrategias de gestión para un caso de estudio	36
3.3. Afectación de la estrategia de gestión en los datos de irradiancia solar y la carga	39
3.4. Afectación de la estrategia de gestión en el dimensionamiento de una microrred.....	40
3.5. Alternativas de almacenamiento disponibles en HOMER Pro.....	42
3.6. Análisis del efecto de las alternativas de almacenamiento para un caso de estudio	45
3.6.1 Comparaciones de los almacenamientos de energía.....	45
3.6.2 Afectación del modelo de batería en el dimensionamiento de una microrred.....	47
3.6.3 Afectación del almacenamiento en la estabilidad del sistema de generación	47
3.6.4 Afectación de los pasos de simulación en los resultados	48
4. Análisis de sensibilidad	50
4.1. Generalidades del análisis de sensibilidad en HOMER Pro.....	50
4.2. Aplicación del análisis de sensibilidad.....	52
4.2.1 Metodología para determinar la variable más influyente	52
4.2.2 Afectación del precio del combustible en la gestión de energía.....	53
4.2.3 Afectación de la capacidad de escasez en la configuración del sistema	54
4.2.4 Afectación en la energía generada por el sistema fotovoltaico	54
4.2.5 Afectación en la vida útil del sistema de almacenamiento	55
4.2.6 Afectación en el consumo de combustible del generador diésel	55
5. Interacción de HOMER Pro con otras herramientas software	56

5.1. Características de los software que interactúan con HOMER Pro	56
5.1.1 Descripción y requerimientos de las herramientas software	57
5.2. Aplicación del enlace entre HOMER Pro y otros software.....	59
5.2.1 Interacción de HOMER Pro con Excel	59
5.2.2 Interacción de HOMER Pro con HelioScope	60
5.2.3 Interacción de HOMER Pro con PVsyst	61
5.2.4 Interacción de HOMER Pro con Matlab	62
6. Criterios de evaluación de desempeño de microrredes	66
6.1. Criterios de desempeño identificados en la literatura.....	66
6.2. Criterios de desempeño en HOMER Pro.....	68
6.2.1 Indicadores de confiabilidad.....	68
6.2.2 Indicadores para la evaluación de costos.....	69
6.3. Análisis de los indicadores de desempeño de un caso de estudio	70
7. Estrategias de dimensionamiento de microrredes	74
7.1. Estrategias de dimensionamiento encontradas en la literatura	74
7.1.1 Software para el dimensionamiento de sistemas híbridos	75
7.1.2 Dimensionamiento óptimo	77
7.1.3 Métodos de solución de los problemas de optimización	78
7.1.4 Método de solución de problemas de optimización usado por el software HOMER Pro ..	80
7.2. Dimensionamiento a partir de la programación lineal.....	81
7.2.1 Programación lineal.....	81
7.2.2 Comparación de resultados entre la solución con programación lineal y HOMER Pro	83
8. Conclusiones.....	84
9. Entregables del seminario de investigación.....	85
Referencias bibliográficas	87

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema general de entradas y salidas de HOMER Pro</i>	24
Figura 2. <i>Información de entrada requerida por el software</i>	26
Figura 3. <i>Detalles de simulación entregados por HOMER Pro</i>	29
Figura 4. <i>Clasificación de resultados</i>	29
Figura 5. <i>Clasificación de resultados financieros</i>	31
Figura 6. <i>Clasificación de resultados técnicos operativos</i>	32
Figura 7. <i>Curvas de estrategias CC, CD y LF</i>	37
Figura 8. <i>Curvas de estrategias CC y GO</i>	38
Figura 9. <i>Curvas de estrategias LF, PS y CD</i>	39
Figura 10. <i>Tipos de almacenamientos presentes en HOMER Pro</i>	43
Figura 11. <i>Resultados financieros según el tipo de almacenamiento</i>	46
Figura 12. <i>Arquitecturas con advertencia de estabilidad en HOMER Pro</i>	48
Figura 13. <i>Metodología planteada para determinar la variable más influyente</i>	53
Figura 14. <i>Métodos de solución de la optimización</i>	78

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Listado de las sesiones realizadas en el seminario de investigación</i>	16
Tabla 2. <i>Caso de estudio</i>	27
Tabla 3. <i>Aspectos atendidos por el software HOMER Pro en el procedimiento de planificación y diseño de microrredes</i>	33
Tabla 4. <i>Datos horarios de irradiancia y carga para las estrategias de control CC y LF</i>	40
Tabla 5. <i>Capacidades de los componentes según la estrategia de control</i>	40
Tabla 6. <i>Características de las estrategias de control de HOMER Pro</i>	41
Tabla 7. <i>Resultados técnicos de operación según el tipo de almacenamiento</i>	45
Tabla 8. <i>Resultados de dimensionamiento para dos modelos de batería</i>	47
Tabla 9. <i>Afectación de los pasos de simulación en los resultados</i>	48
Tabla 10. <i>Características de los gráficos de sensibilidad</i>	51
Tabla 11. <i>Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 1 y 2</i>	60
Tabla 12. <i>Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 3 y 4</i>	61
Tabla 13. <i>Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 5 y 6</i>	62
Tabla 14. <i>Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 7</i>	63
Tabla 15. <i>Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 8</i>	64
Tabla 16. <i>Limitaciones y beneficios de los software que interactúan con HOMER Pro nombre</i>	65
Tabla 17. <i>Indicadores de evaluación de microrredes</i>	67
Tabla 18. <i>Indicadores de confiabilidad en HOMER Pro</i>	68
Tabla 19. <i>Indicadores financieros en HOMER Pro</i>	70
Tabla 20. <i>Indicadores de desempeño para tres arquitecturas seleccionadas</i>	71
Tabla 21. <i>Indicadores de desempeño según la estrategia de gestión con baterías de ion-Litio</i>	72
Tabla 22. <i>Indicadores de desempeño según la estrategia de gestión con baterías de plomo ácido</i>	73
Tabla 23. <i>Características de los software de dimensionamiento de sistemas híbridos</i>	76
Tabla 24. <i>Parámetros del problema de programación lineal</i>	82

NOMENCLATURA

AC: Alternating Current

ACS: Annual Capacity Shortage

CAPEX: Capital Expenditure

CC: Cycle Charging

CD: Combined Dispatch

COE: Cost of Energy

DER: Distributed Energy Resources

DOD: Depth of Discharge

DPSP: Deficiency of Power Supply Probability

EENS: Expected Energy Not Supplied

GA: Genetic Algorithm

GO: Generator Order

HOMER: Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

IRR: Internal Rate of Return

LA: Level of Autonomy

LCE: Levelized cost of energy

LF: Load Following

LLP: Load Loss Probability

LOLE: Loss of Load Expected

LPSP: Loss of Power Supply Probability

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NPC: Net Present Cost

NREL: National Renewable Energy Laboratory

O&M: Operation and Maintenance

OPEX: Operational Expenditures

PS: Predictive

PSO: Particle Swarm Optimization

ROI: Return of Investment

SOC: State of charge

TAC: Total Annualized Cost

UL: Unmet load

Resumen

Título: Estudio de capacidades de la herramienta HOMER para el dimensionamiento de sistemas híbridos de generación de energía eléctrica*

Autor: Karina Cuervo Arias, Yennifer Bibiana Sarmiento Ariza, Jersson Ferney García García, Lizeth Tatiana Campos Rodríguez**

Palabras claves: Sistema híbrido de generación, modelado y simulación, microrred, HOMER Pro.

Descripción:

Este trabajo de grado se realizó en modalidad seminario de investigación, con el fin de realizar un estudio de capacidades del dimensionamiento, análisis financiero y de operación del software HOMER Pro. Inicialmente, se presentan los parámetros básicos de entrada requeridos en HOMER Pro y los resultados obtenidos del proceso de dimensionamiento. Seguidamente, se describen las estrategias de gestión que tiene el software y se analiza su impacto sobre parámetros como la irradiancia, así como en el dimensionamiento de la microrred. Adicionalmente se identifican y exponen las tecnologías de almacenamiento disponibles en HOMER pro. Posteriormente, se aborda el análisis de sensibilidad y la afectación que tiene en la gestión de energía, dimensionamiento y operación de los componentes de la microrred. En el desarrollo del trabajo se expone la interacción de HOMER Pro con otras herramientas software, se explican y analizan los indicadores de desempeño de microrredes y, finalmente, se identifican las estrategias de dimensionamiento de sistemas híbridos de energía encontradas en la literatura y se realiza una comparación con la estrategia de dimensionamiento usada por el software HOMER Pro. Para abordar los temas del seminario de investigación se ejecutaron un total de dieciséis sesiones. Cada sesión cuenta con un documento técnico, una presentación con la información sintetizada y videos con la explicación del tema.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Germán Alfonso Osma Pinto.

Abstract

Title: Study of the capabilities of the HOMER tool for the sizing of hybrid electric power generation systems*

Author: Karina Cuervo Arias, Yennifer Bibiana Sarmiento Ariza, Jersson Ferney García García, Lizeth Tatiana Campos Rodríguez**

Key Words: Hybrid generation system, modeling and simulation, microgrid, HOMER Pro.

Description:

This project was carried out in a research seminar modality and addressed the study of the dimensioning, financial analysis, and operating capabilities of HOMER Pro software. Firstly, the basic input parameters required in HOMER Pro and the results obtained from the dimensioning process are presented. Secondly, the management strategies of the software are described and its impact on parameters such as irradiance, as well as on the dimensioning of a microgrid is analyzed. Additionally, storage technologies available in HOMER Pro are identified and exposed. Then, sensitivity analysis and the impact it has on energy management, dimensioning, and operation of the components of a microgrid are addressed. In the development of this project, the interaction of HOMER Pro with other software tools was exposed, micro-grid performance indicators are explained and analyzed too. Finally, the dimensioning strategies of hybrid energy systems found in the literature are identified and a comparison is made with the dimensioning strategy used by HOMER Pro. A total of sixteen sessions were carried out to address the topics of the research seminar. Each session has a technical document, a presentation with the synthesized information and videos with an explanation of the topic.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Germán Alfonso Osma Pinto.

Introducción

Las fuentes de energía renovables han tenido una creciente participación en los sistemas eléctricos alrededor del mundo. Estas fuentes han sido llamativas debido a que disminuyen la dependencia de fuentes contaminantes, no emiten gases de efecto invernadero, facilitan el acceso a energía en zonas aisladas, entre otras características.

El gobierno colombiano tiene como propósitos convertir el sistema eléctrico en un sistema eficiente y sostenible, así como establecer políticas que faciliten la introducción de las energías renovables no convencionales. En Colombia, la incorporación de estas fuentes de energía es importante ya que gran parte de la energía consumida es generada a partir de hidroeléctricas y debido a la variabilidad climática no es posible asegurar el recurso hídrico.

Lo anterior conlleva a requerir profesionales con conocimientos sobre energías renovables no convencionales, desde el diseño hasta la instalación y operación de estos sistemas. Además, se crea la necesidad de incorporar nuevas alternativas de solución en el sistema energético actual, como las microrredes.

Una microrred es un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos con límites eléctricos claramente definidos, que actúan como una única entidad controlable con respecto a la red. La microrred puede conectarse y desconectarse de la red, lo cual le permite operar tanto en modo conectado a la red como en modo isla (IEEE, 2019).

La tarea principal de la planificación y el diseño de la microrred consiste en determinar la configuración de los recursos de energía distribuidos, la estructura de la red eléctrica y las configuraciones del sistema de automatización. Los diseñadores deben tener en cuenta el perfil de carga local, la demanda de energía y los recursos energéticos al planificar una microrred. El

resultado de la planificación de la microrred debe ser lo suficientemente escalable para satisfacer la demanda inmediata, así como su crecimiento futuro.

En el diseño de una microrred uno de los aspectos importantes es la toma de decisiones respecto a su configuración, a saber: existencia, cantidad y capacidad de las tecnologías a implementar. Tales decisiones son complejas debido a la existencia de un gran número de opciones y posibles configuraciones a evaluar.

Para facilitar el diseño, en el año 2009 nace la empresa HOMER Energy con el objetivo de comercializar el software HOMER, desarrollado por el Dr. Peter Lilienthal, miembro del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (*National Renewable Energy Laboratory - NREL*) de Estados Unidos. HOMER se ha reestructurado y evolucionado en dos software, el software HOMER Pro y el software HOMER Grid.

Con el objetivo de aprovechar al máximo el software HOMER Pro, es importante apropiarse del manejo de esta herramienta, lo que implica reconocer tanto sus capacidades como sus limitaciones y desarrollar habilidades para interpretar los resultados que ofrece. Por esta razón, se comenzó una investigación en torno al uso del software con el desarrollo del trabajo de grado en modalidad seminario de investigación titulado “Análisis de viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER”. Con el fin de dar continuidad a esta investigación y profundizar en las capacidades de este software, se desarrolla este seminario de investigación.

Desarrollar este tópico por medio de la modalidad de seminario de investigación permite ofrecer un material que resulte útil para la comunidad E3T. Esto con el fin de que los profesionales adquieran destrezas en el manejo de este software comúnmente utilizado para el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía.

El seminario de investigación se llevó a cabo mediante una dinámica que comprende actividades de relatoría, correlatoría, discusión y elaboración de un documento síntesis, en el cual se incluye el estudio de los temas seleccionados (Universidad Industrial de Santander, 2015). La Tabla 1 lista las 16 (dieciséis) sesiones desarrolladas para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este documento***.

Tabla 1.

Listado de las sesiones realizadas en el seminario de investigación

Sesión	Título de la sesión	Conclusiones
1	Parámetros básicos de entrada requeridos en HOMER Pro para el dimensionamiento de sistemas híbridos de generación	El software cuenta con una interfaz amigable, la cual permite identificar de manera sencilla los parámetros y variables de entrada mínimos para llevar a cabo la simulación.
2	Resultados obtenidos del proceso de dimensionamiento por HOMER Pro	HOMER Pro garantiza resultados técnicos y financieros sobre el dimensionamiento y la operación del sistema híbrido de generación, sin abarcar todos los aspectos que contiene un diseño eléctrico.

***El material de cada sesión se encuentra en un archivo Drive, el cual debe ser solicitado al director del proyecto de grado.

Sesión	Título de la sesión	Conclusiones
3	Reconocimiento de las estrategias de control implementadas por HOMER Pro y sus características	Las estrategias de control implementadas por HOMER Pro gestionan la energía de forma fiable y eficiente al menor costo.
4	Análisis comparativo de las estrategias de gestión a partir de los resultados obtenidos para el caso de estudio	La estrategia de ciclo de carga es recomendada cuando se tiene baja producción de energía con fuentes renovables y en caso contrario se recomienda la estrategia de seguimiento de carga. La estrategia de despacho predictivo y despacho combinado se recomienda cuando se tiene alta variabilidad meteorológica. El dimensionamiento puede afectarse por los costos, la variabilidad meteorológica y del funcionamiento propio de la estrategia.
5	Reconocimiento de las alternativas disponibles de almacenamiento de energía en el software HOMER Pro	El software cuenta con una base de datos amplia para las baterías electroquímicas, sin embargo, para las demás alternativas presenta una base de datos bastante limitada.
6	Análisis comparativo de las estrategias disponibles del almacenamiento de energía a partir de los resultados obtenidos para dos casos de estudio	Gracias a la función que permite modificar los modelos por defecto, es posible ajustar las alternativas de almacenamiento según los requerimientos específicos del usuario. El sistema de almacenamiento sí influye en el dimensionamiento de una microrred y sus indicadores de desempeño.

Sesión	Título de la sesión	Conclusiones
7	Descripción del enfoque, parámetros y variables vinculadas al análisis de sensibilidad en HOMER Pro.	<p>El análisis de sensibilidad en microrredes es una técnica utilizada para determinar la susceptibilidad en las salidas del modelo debido a los cambios en una variable.</p> <p>El modo gráfico y tabular del software HOMER Pro permite al usuario analizar de manera eficiente los datos obtenidos en un análisis de sensibilidad.</p>
8	Interpretación de resultados asociados a dimensionamiento y operación a partir de dos casos de estudio	<p>El precio del combustible no afecta directamente la gestión de energía, pero si afecta el dimensionamiento de una microrred.</p> <p>El generador diésel brinda confiabilidad al sistema lo que permite obtener una menor capacidad de escasez.</p>
9	Interpretación de resultados asociados a dimensionamiento y operación obtenidos a partir de la simulación de dos casos de estudio	<p>Los rangos de <i>SOC</i> mínimo y temperatura que representan los costos presentes netos más bajos son de 10% a 38% y 5°C a 30 °C respectivamente.</p> <p>La vida útil de las baterías se reduce en 0.02 años por grado que aumente la temperatura para temperaturas menores a los 30 °C, y se reduce en 0.2 años por cada grado que aumente la temperatura para temperaturas superiores a los 30 °C.</p>

Sesión	Título de la sesión	Conclusiones
10	Interacción de HOMER Pro con otras herramientas software	HOMER Pro permite la interacción con otros software que complementan sus resultados al considerar un mayor número de variables de entrada.
11	Resultados de la integración de HOMER Pro y otras herramientas software a partir de dos casos de estudio	Los software HelioScope y PVsyst son útiles en el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico de la microrred cuando en el lugar de estudio se tiene área limitada y efectos de sombra. Matlab es una herramienta de programación favorable para ser utilizada en un caso en que se requiera escribir un algoritmo personalizado para ser ejecutado en HOMER Pro.
12	Identificación de criterios de evaluación de desempeño de microrredes	En el dimensionamiento se recomienda considerar los costos, la confiabilidad, el impacto ambiental y otras condiciones que permitan obtener una mejor solución.
13	Descripción de los criterios de evaluación de microrredes incluidos en los resultados suministrados en HOMER Pro	Se evidencia que los indicadores financieros de confiabilidades encontradas en la literatura (<i>LPSP</i> y <i>ENNS</i>) son equivalentes a los que contiene el software HOMER Pro. El indicador <i>ACS</i> que calcula el software no está relacionado con el tiempo que no es atendida la carga y, por tanto, difiere de la definición encontrada en la literatura.

Sesión	Título de la sesión	Conclusiones
14	Evaluación del desempeño de dos casos de estudio a partir de los resultados directos suministrados por HOMER Pro y de indicadores complementarios identificados en la literatura	<p>Se considera importante el cálculo de los indicadores <i>LLP</i> y <i>LOLH</i> para conocer el porcentaje de tiempo que la carga no es atendida.</p> <p>Los indicadores entregados por HOMER Pro permiten realizar un análisis del dimensionamiento y desempeño de una microrred.</p>
15	Identificación de estrategias de dimensionamiento de microrredes en la literatura	<p>La optimización multi-objetivo permite al diseñador considerar simultáneamente varias funciones objetivo con el fin de realizar un dimensionamiento que cumpla con los requerimientos del sistema.</p> <p>IHOGA, Hybrid2 y HOMER Pro son software útiles en el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía.</p>
16	Análisis comparativo entre la estrategia de dimensionamiento de HOMER Pro y una alternativa seleccionada	<p>La estrategia de dimensionamiento a partir de la programación lineal permite encontrar una configuración con capacidad de suplir la demanda del sistema.</p> <p>El despacho de energía con programación lineal se realiza a partir las fuentes renovables y las baterías. El generador diésel se utiliza cuando estas no pueden suplir la carga.</p>

En este documento se desarrollan seis capítulos dispuestos de la siguiente forma: el

Capítulo 2 explica un manejo básico del software HOMER Pro. Se inicia con la presentación de sus generalidades y principios de funcionamiento, y posteriormente se describen los resultados obtenidos. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 1 y 2.

El Capítulo 3 expone las estrategias de gestión de energía y las tecnologías de almacenamiento que posee el software. Se compara el comportamiento de las estrategias y se analiza la afectación de estas sobre parámetros como la irradiancia y la temperatura, así como en el dimensionamiento de una microrred. Seguidamente se identifican y exponen los tipos y tecnologías de almacenamiento de energía disponibles en HOMER Pro con el fin de realizar un análisis comparativo. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 3, 4, 5 y 6.

El Capítulo 4 aborda el análisis de sensibilidad, realizando una descripción de su enfoque y las variables vinculadas al mismo en el software HOMER Pro. Posteriormente se indaga sobre las afectaciones en la gestión de energía, el dimensionamiento y en la operación de los componentes de una microrred. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 7, 8 y 9.

El Capítulo 5 presenta la identificación de las herramientas software que interactúan con HOMER Pro y complementan el dimensionamiento de una microrred. Se describe la interacción y la importancia de utilizar software como Excel, Matlab, PVsyst y Helioscope. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 10 y 11.

El Capítulo 6 identifica y expone los indicadores de evaluación de desempeño de microrredes y, posteriormente, realiza un análisis a partir de su aplicación. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 12, 13 y 14.

El Capítulo 7 realiza una revisión de los tres enfoques de dimensionamiento de sistemas

híbridos más utilizados en la literatura, a partir de la experiencia, usando un software y ejecutándose un dimensionamiento óptimo. Se destacan las ventajas y limitaciones de cada enfoque, adicionalmente se habla del método de solución de problemas de optimización usado por el software HOMER Pro. Finalmente se hace un análisis comparativo entre la estrategia de dimensionamiento de HOMER Pro y el dimensionamiento a partir de la programación lineal. Esta temática se desarrolla de forma detallada en las sesiones 15 y 16.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de grado consiste en *realizar un estudio de capacidades de dimensionamiento, análisis financiero y de operación de HOMER Pro*. Para su desarrollo, se definieron los siguientes objetivos específicos:

1.2. Objetivos específicos

Objetivo específico 1: Describir el proceso de dimensionamiento, análisis financiero y operación de sistemas híbridos de generación a partir del uso de HOMER Pro.

Objetivo específico 2: Identificar y exponer las características de la gestión de operación de sistemas híbridos de generación y de las alternativas de almacenamiento de energía disponibles en HOMER Pro.

Objetivo específico 3: Identificar y describir los atributos del análisis de sensibilidad de parámetros y variables de entrada sobre los resultados de dimensionamiento, análisis financiero y de operación de sistemas híbridos de generación en HOMER Pro.

Objetivo específico 4: Exponer posibles interacciones entre HOMER Pro y otras

herramientas software relacionadas con el proceso de dimensionamiento y análisis de operación de microrredes.

Objetivo específico 5: Identificar criterios de evaluación de desempeño para microrredes a partir de la información encontrada en la literatura y los resultados suministrados por HOMER Pro.

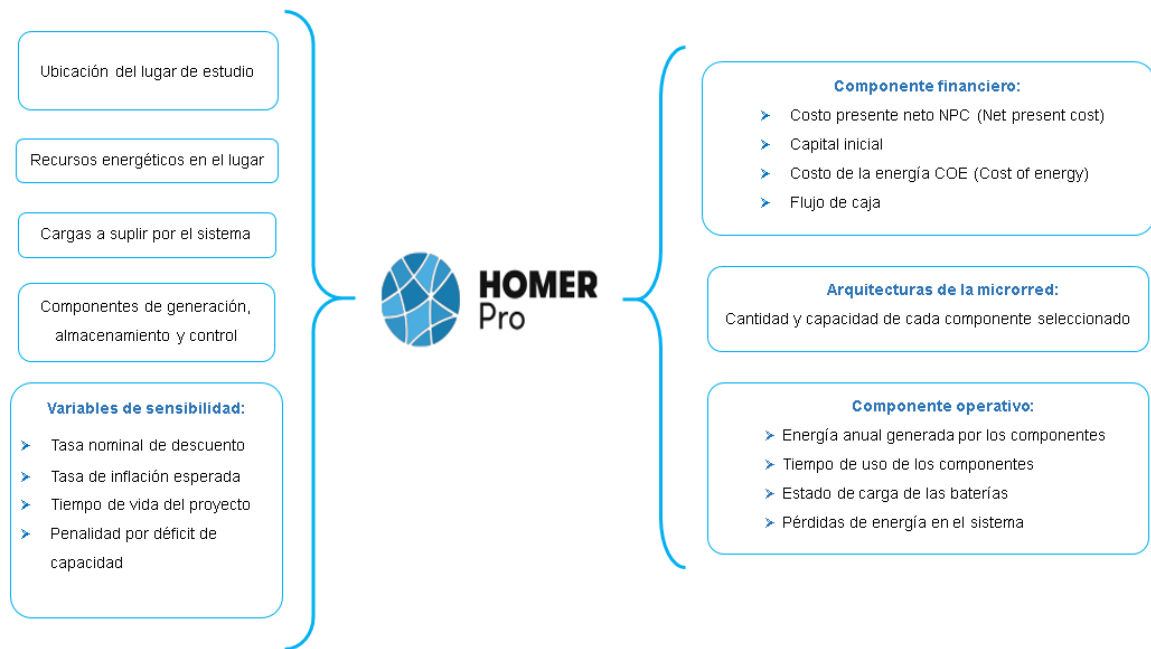
Objetivo específico 6: Reconocer similitudes y diferencias entre dos estrategias de dimensionamiento encontradas en la literatura y la estrategia implementada por el software HOMER Pro.

2. Proceso de dimensionamiento, análisis financiero y operación de sistemas híbridos de generación

El desarrollo del este trabajo se centra en el estudio de las capacidades del software HOMER Pro, el cual surge como una alternativa de solución al dimensionamiento de microrredes. Las microrredes son uno de los elementos clave para lograr la transición hacia un sistema energético basado en la eficiencia y la implementación de fuentes de energía renovable. El esquema de la Figura 1 ilustra de manera general las entradas y salidas que presenta el software HOMER.

Figura 1.

Esquema general de entradas y salidas de HOMER Pro



Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 1 y 2 de los entregables del seminario de investigación.

2.1. Proceso de dimensionamiento en HOMER Pro

La metodología del software consiste en que el usuario seleccione las diferentes tecnologías de generación de energía que desea tener en cuenta, además de la información relacionada a sus costos (capital, reemplazo, operación y mantenimiento) (*Operation and Maintenance - O&M*) y características técnicas como por ejemplo el porcentaje de degradación de los paneles fotovoltaicos. Posteriormente, se lleva a cabo una simulación para evaluar los componentes técnico y financiero de las posibles arquitecturas de la microrred y, finalmente, presentar los resultados aquellas que cumplen con los requerimientos estipulados y que cuenten con el menor costo presente neto (*Net Present Cost - NPC*).

El funcionamiento del software se basa en tres conceptos principales; simulación, optimización y análisis de sensibilidad.

HOMER Pro simula la operación de un sistema implementando cálculos de balance de energía en cada intervalo de tiempo del año. Para cada intervalo de tiempo se compara la demanda eléctrica y térmica con la energía que el sistema puede suministrar y se calculan los flujos de energía para cada uno de los componentes del sistema. En cuanto a los sistemas que incluyen baterías o generadores a base de combustibles, el software decide cómo operarlos y si es necesario descargar o no las baterías.

Estos balances de energía se calculan para cada configuración simulada. Posteriormente, se determina si la configuración es viable, es decir, si puede suplir la demanda eléctrica bajo las condiciones especificadas por el usuario y se estima el costo de instalación y operación del sistema para todo el tiempo de vida del proyecto. Dentro de los cálculos se consideran costos como: costo capital, reemplazo, operación y mantenimiento, combustibles e interés.

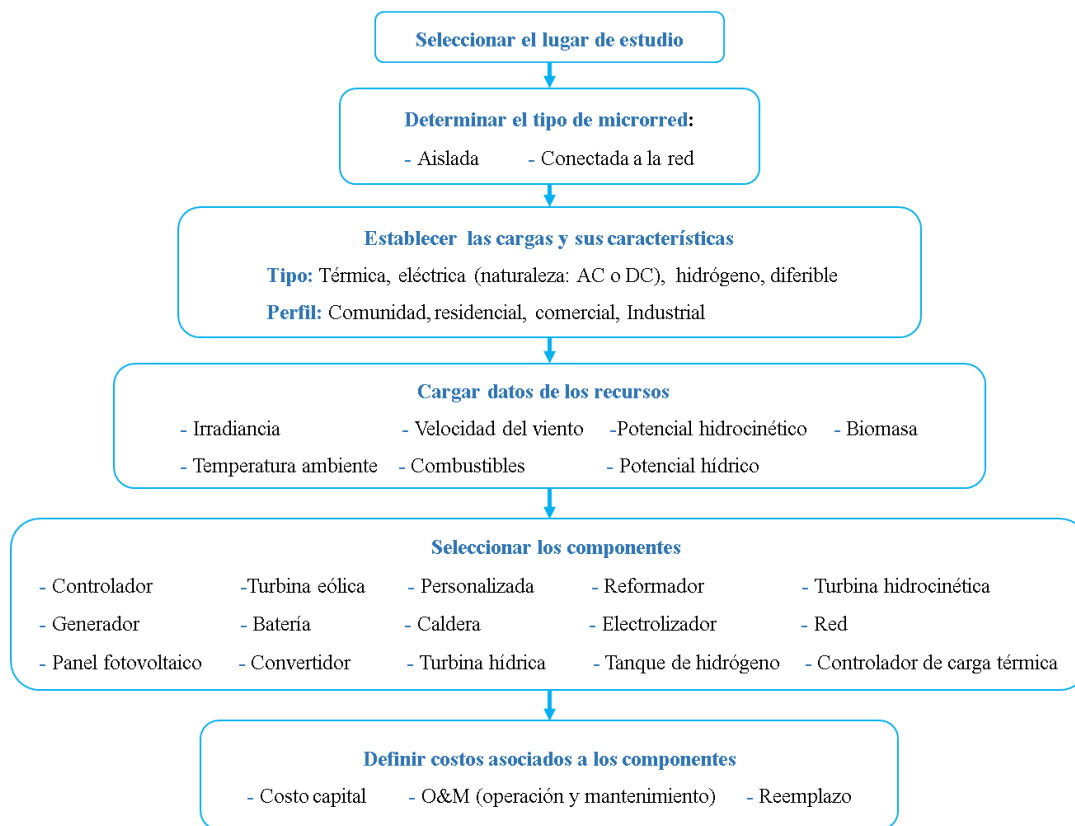
Luego de simular todas las posibles configuraciones, el software muestra una lista de las arquitecturas ordenadas según su *NPC* el cual puede usarse para comparar las diferentes opciones de diseño.

El análisis de sensibilidad consiste en especificar múltiples valores para una misma variable, llamada variable de sensibilidad. Cuando se definen variables de sensibilidad como entradas, el software repite el proceso de optimización para cada valor especificado de la variable en cuestión. Por ejemplo, si se define la velocidad del viento como una variable de sensibilidad, el software simulará configuraciones para el rango de velocidades de viento que el usuario especifique.

Inicialmente, se identifica la información de entrada requerida por el software para llevar a cabo la simulación de un caso de estudio. La Figura 2 indica de manera general la información que debe ser definida y se propone un orden a seguir para introducirla. También es posible apreciar las diferentes opciones que presenta el software en cuanto a los recursos del lugar y los componentes de la microrred, tanto de generación como de almacenamiento de energía.

Figura 2.

Información de entrada requerida por el software



Se implementó un caso de estudio para ilustrar el proceso indicado anteriormente. Como se muestra en la Tabla 2, la ubicación del caso de estudio corresponde a la Isla Phaluai en Tailandia (Madtharad & Chinabut, 2018). La microrred será de tipo aislado y contará con módulos fotovoltaicos, generador diésel, convertidor y sistema de baterías.

Tabla 2.*Caso de estudio*

Parámetros de la microrred		
Ubicación	Isla Phaluai, Tailandia	
Tipo	Aislada	
Recursos	Irradiancia promedio	5.05 kWh/m ² ·día
Carga	Tipo	Eléctrica
	Naturaleza	AC
	Perfil	Comunidad
	Consumo promedio de energía	3040 kWh/día
	Potencia pico	220 kW
Componentes	Sistema fotovoltaico	
	Sistema de almacenamiento (baterías)	
	Generador diésel	
	Convertidor	

La ubicación del caso de estudio se ingresa en la pestaña *Home* del software, donde también es posible ajustar algunos parámetros del proyecto como la tasa de descuento y de inflación, el déficit anual de capacidad y el tiempo de vida del proyecto.

En la pestaña *Load* se ajustan los parámetros relacionados con la carga, como la curva de demanda, su perfil, la energía diaria consumida y su variabilidad.

En cuanto a los recursos, en la pestaña *Resources* se importan los datos de irradiancia y temperatura, en este caso. El software cuenta con la base de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*) y del *NREL*.

Para la mayoría de los componentes disponibles en la pestaña *Components* es posible ingresar el costo capital, reemplazo y *O&M*. Además, cada componente tiene parámetros

específicos, como el factor de degradación para los módulos fotovoltaicos, la tasa mínima de carga para el generador diésel, el estado de carga (*State of charge - SOC*) para las baterías y la eficiencia para el inversor.

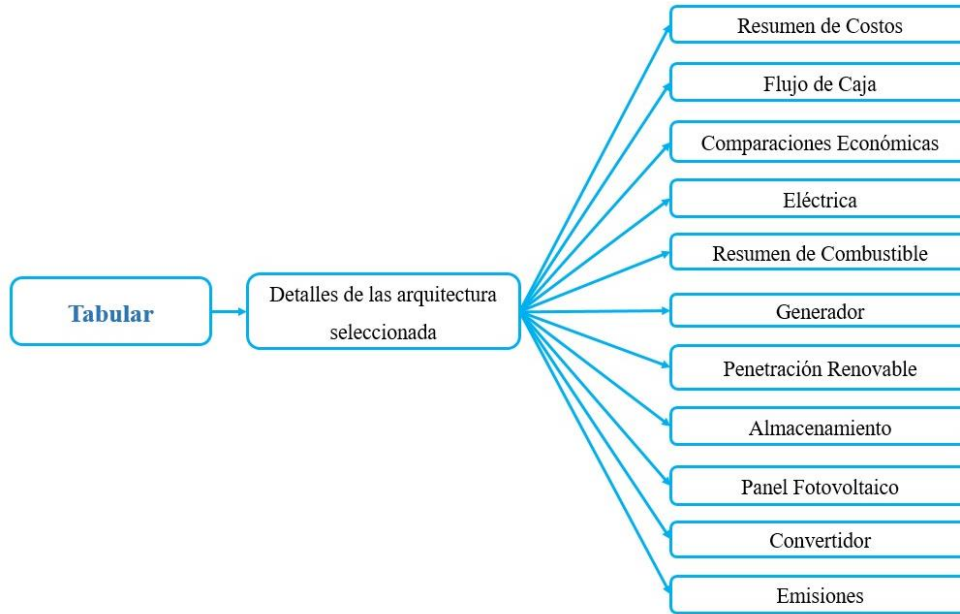
Finalmente, se realiza la simulación del caso para obtener los resultados, los cuales contienen información operativa y financiera de las diferentes arquitecturas halladas por el software. Estos resultados se presentan por medio de gráficos, tablas y esquemas los cuales se describen de manera más detallada a continuación.

La primera interfaz de resultados muestra tres pestañas principales; la pestaña *Summary* presenta la descripción general de una comparación económica entre dos arquitecturas de la microrred, la pestaña *Tables* enumera todas las arquitecturas factibles y muestra datos financieros y técnicos para cada una, en la sección correspondiente a *Graphs*, se encuentran dos tipos; gráficos de sensibilidad y optimización, por último el software expone un reporte con el número total de arquitecturas omitidas en opción *Calculation Report*.

Al seleccionar una arquitectura en la pestaña *Tables* se obtienen los detalles de simulación que se muestran en la Figura 3. También se muestran diferentes gráficos como los de series temporales que permiten analizar el comportamiento de la microrred, Dmap, y algunos de tipo estadístico como la función de distribución acumulativa, histogramas y la curva de duración.

Figura 3.

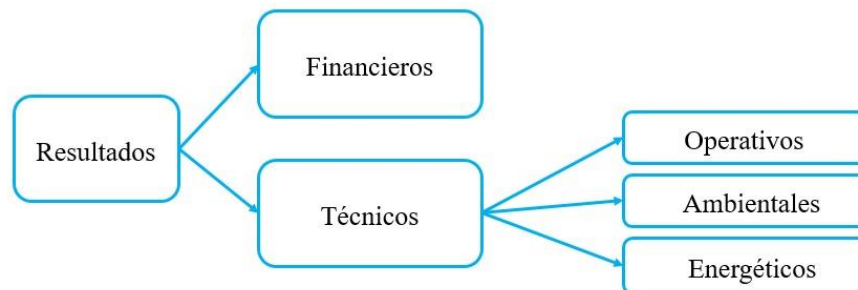
Detalles de simulación entregados por HOMER Pro



HOMER Pro clasifica los resultados según las variables de sensibilidad y los optimiza de acuerdo con los costos. Con el objetivo de dar una visión general y facilitar el manejo de la gran cantidad de información entregada por el software, en la Figura 4 se propone una clasificación de los resultados.

Figura 4.

Clasificación de resultados



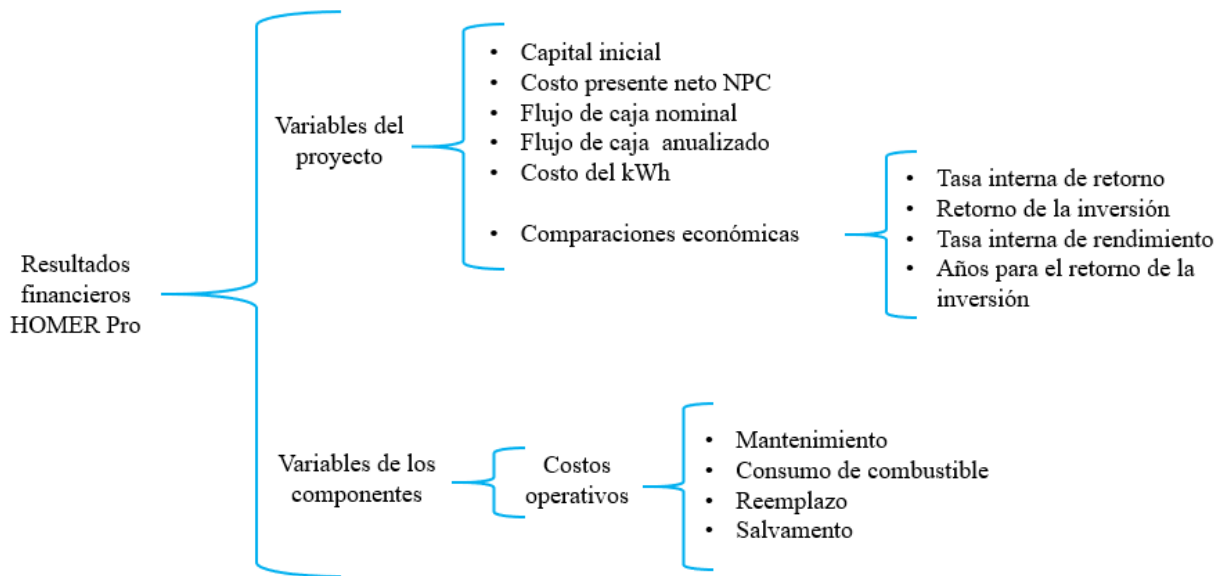
2.2. Descripción del análisis financiero a partir del uso de HOMER Pro

El análisis financiero consiste en el estudio de indicadores económicos con la finalidad de apoyar la toma de decisiones durante la planificación de la microrred. Este análisis es apropiado para determinar la capacidad financiera del proyecto y la rentabilidad del capital invertido.

En el proceso de dimensionamiento HOMER Pro calcula el capital inicial, el *NPC* y el flujo de caja anual del proyecto. EL *NPC* equivale a la suma de los flujos de caja, donde los flujos negativos representan los costos de reemplazo, *O&M*.

La rentabilidad del proyecto y el tiempo estimado de retorno de la inversión son evaluados a partir de los flujos de caja. Sin embargo, al tratarse de una microrred aislada sin ganancias monetarias, las tasas de retorno son calculadas a partir de la comparación económica de dos arquitecturas.

Para realizar la evaluación financiera es necesario que el usuario identifique los indicadores financieros entregados por HOMER Pro. El esquema de la Figura 5 muestra la clasificación de los resultados financieros que presenta el software.

Figura 5.*Clasificación de resultados financieros*

2.3. Resultados asociados a la operación de microrredes

La operación de la microrred tiene como objetivos aumentar la disponibilidad del servicio, minimizar el costo de energía (*Cost of Energy - COE*) y reducir el impacto ambiental. Un componente importante en la operación es el controlador, el cual realiza el despacho de energía y planifica la operación del generador diésel y del sistema de almacenamiento en base a las características operativas de los componentes, la energía disponible de las fuentes de generación, la demanda de la carga, entre otras variables que serán descritas más adelante.

En los resultados del software podemos encontrar la pestaña *Electrical* que contiene información de la producción y el consumo anual de energía eléctrica en el sistema. Se presentan tablas con el aporte de energía eléctrica de cada componente de la microrred, la cantidad total de energía eléctrica que se utilizó para servir la carga, el exceso de electricidad, la carga eléctrica

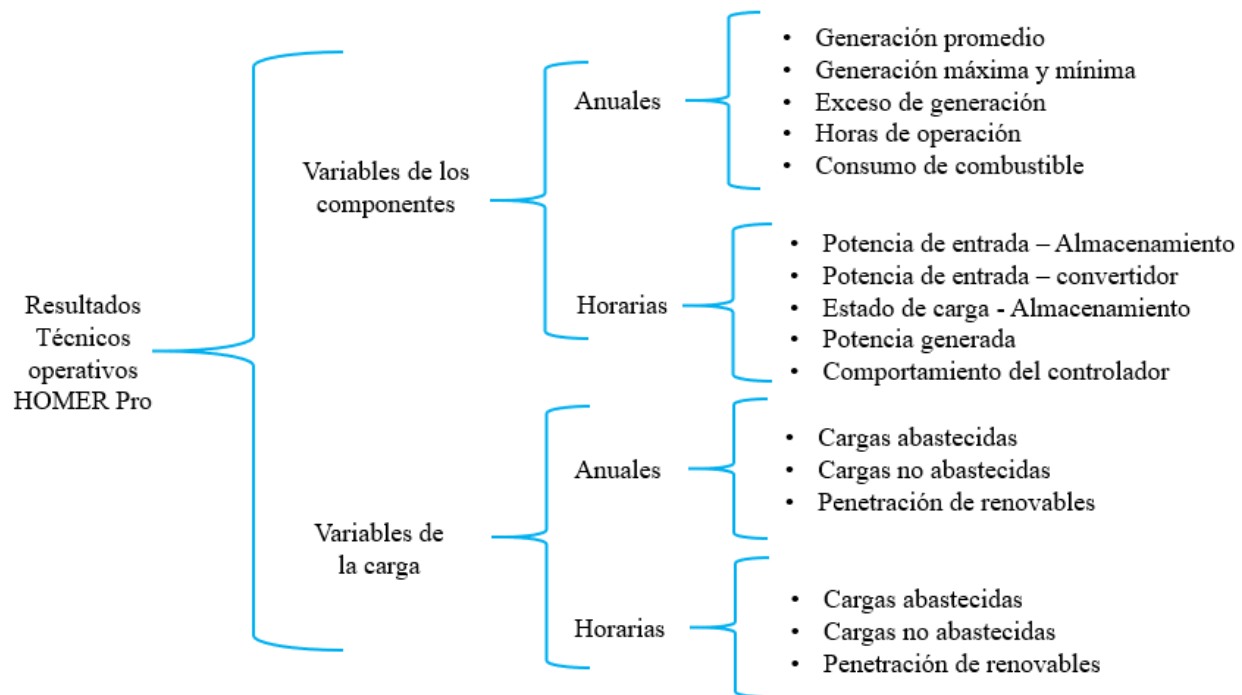
insatisfecha, y la fracción de penetración renovable.

Los resultados incluyen un diagrama que presenta el consumo promedio mensual máximo, mínimo y general de una variable, un Dmap que presenta la cantidad de recurso utilizado por hora cada día del año y un diagrama lineal que ilustra el promedio de uso para cada día del año.

Si se trata de una microrred *On grid* aparece una pestaña adicional con los cargos de energía y la demanda máxima atendida por la red en kW. Los resultados técnicos operativos están clasificados en el esquema de la Figura 6.

Figura 6.

Clasificación de resultados técnicos operativos



Una vez conocidos en detalle los resultados es preciso identificar aquellos aspectos que considera el software en el procedimiento de planificación y diseño de microrredes. Según el Estándar IEEE 2030.9-2019, la principal tarea para la planificación y diseño de microrredes es

determinar la función objetivo, así como realizar un análisis de carga, un análisis de recursos energéticos, el diseño del sistema eléctrico, el diseño del sistema de automatización y una evaluación técnica, económica y ambiental.

La Tabla 3 muestra la participación de HOMER Pro en el procedimiento de planificación y diseño de microrredes, los demás aspectos deben ser calculados y estudiados utilizando diferentes metodologías de diseño.

Tabla 3.

Aspectos atendidos por el software HOMER Pro en el procedimiento de planificación y diseño de microrredes

Aspectos considerados por HOMER Pro	
Técnicos	
Pronóstico de carga	✓
Análisis de recursos	✓
Producción de energía	✓
Penetración de renovables	✓
Emisiones	✓
Arquitectura	✓
Potencia de salida	✓
Horas de operación	✓
Cantidad de componentes	✓
Autonomía de las baterías	✓
Estado de carga de las baterías	✓
Consumo de combustible	✓
Medición de energía	✓
Selección del nivel de tensión y punto de acople	X
Pérdidas de carga	X
Diagrama unifilar	X
Planos	X
Protecciones	X
Evaluación de estabilidad	X
Comunicaciones	X
Monitoreo y control de calidad de energía	X
Sistema de puesta a tierra	X
Barrajes	X
Conductores y ductos	X

Técnicos	
Tableros eléctricos	X
Financieros	
Resumen de costos	✓
Flujo de caja	✓
Presupuesto	X
Incentivos	X
Métricas económicas	
Tasa interna de retorno	✓
Retorno de la inversión	✓

HOMER Pro cuenta con una interfaz amigable, la cual permite identificar de manera sencilla los parámetros y variables de entrada mínimos para llevar a cabo una simulación. El software garantiza resultados técnicos y financieros sobre el dimensionamiento y la operación de un sistema híbrido de generación, sin abarcar todos los aspectos que contiene un diseño eléctrico. Los esquemas de las Figuras 4, 5 y 6 permiten dar una visión general y facilitan el manejo de la gran cantidad de información entregada por el software.

3. Estrategias de gestión de energía en HOMER Pro y tecnologías de almacenamiento

Una estrategia de gestión es un conjunto de reglas utilizadas para dirigir el funcionamiento de los generadores y la operación del banco de baterías en los sistemas híbridos de energía. Estas estrategias gestionan la energía de forma fiable y eficiente al menor costo. La determinación de la estrategia de gestión óptima para una microrred depende de muchos factores, incluidos los tamaños de los generadores y el banco de baterías, el precio del combustible, el costo de operación y mantenimiento de los generadores y la cantidad de energía renovable en el sistema.

Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 3, 4, 5 y 6 de los entregables del seminario de investigación.

3.1. Características de las estrategias de gestión de energía en HOMER Pro

HOMER Pro cuenta con seis estrategias de control Ciclo de carga (*Cycle Charging - CC*), Seguimiento de carga (*Load Following - LF*), Enlace Matlab, Orden de generador (*Generator Order - GO*), Despacho combinado (*Combined Dispatch - CD*) y Despacho predictivo (*Predictive - PS*).

El ciclo de carga es una estrategia de gestión en la cual, si se necesita un generador, su funcionamiento se hará a potencia nominal. El exceso de producción de energía eléctrica cubrirá otros objetivos de menor prioridad como cumplir con la carga diferible o cargar los dispositivos de almacenamiento.

El seguimiento de carga es una estrategia de control cuyo objetivo es satisfacer la demanda durante tanto tiempo como sea posible, y reducir el tiempo de interrupción del sistema. También busca maximizar el uso de las fuentes de energía renovable, priorizando su uso sobre otras fuentes que tenga del sistema.

La estrategia de despacho combinado utiliza la estrategia *CC* y la estrategia *LF* permitiendo un uso más eficiente del generador. En cada instante, el controlador evalúa la aplicación de cada estrategia *LF* o *CC* conforme sea más conveniente.

En la estrategia de despacho predictivo se conoce la demanda eléctrica y térmica futura, así como la próxima disponibilidad de recursos solares y eólicos. Esta estrategia cuenta con una previsión de 48 horas y utiliza este conocimiento para operar las baterías de manera económica. La configuración de este controlador en el software es sencilla, pues sólo requiere los datos asociados a sus costos.

El orden de generador es una estrategia de control en la cual HOMER Pro sigue un orden definido de combinaciones de generadores y utiliza la primera combinación de la lista que cumple con la capacidad operativa. La estrategia de orden del generador sólo admite sistemas con generadores, paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, un convertidor y/o componentes de almacenamiento.

La estrategia de control enlace Matlab permite escribir un algoritmo de control de energía. HOMER Pro interactúa con el software Matlab para ejecutar sus funciones durante la simulación.

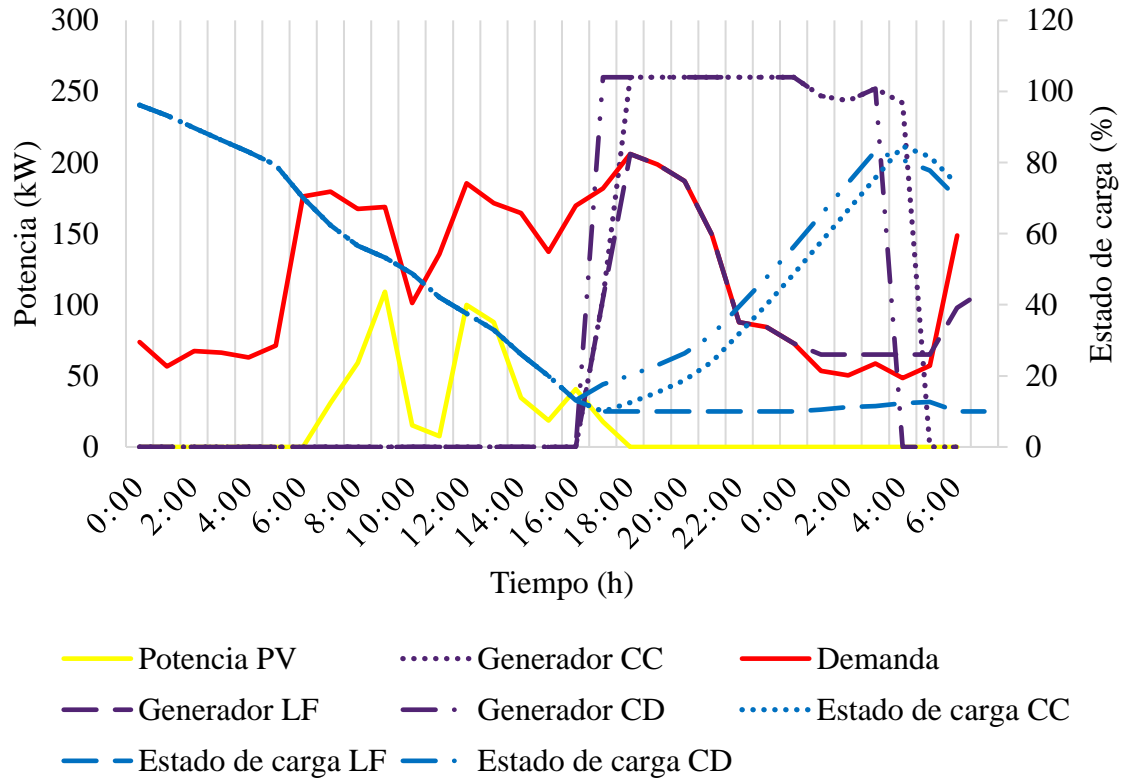
3.2. Análisis del comportamiento de las estrategias de gestión para un caso de estudio

Con la finalidad de observar el comportamiento de las estrategias de gestión se aplica cada una de estas al caso de estudio mostrado en la Tabla 2. En las gráficas que se muestran a continuación se puede apreciar los cambios al utilizar diferentes estrategias de gestión. Se realiza la comparación para el día 1 de enero que se caracteriza por tener baja producción de potencia con los paneles fotovoltaicos.

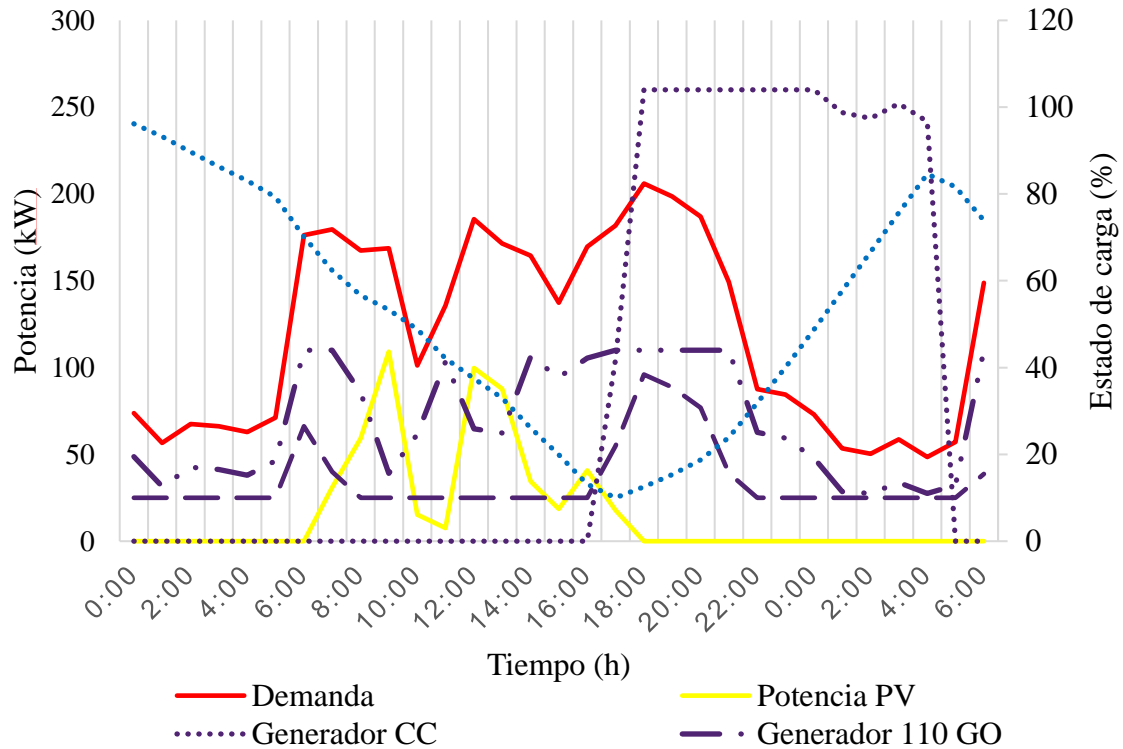
La Figura 7 muestra las gráficas de las estrategias de ciclo de carga, seguimiento de carga y despacho combinado. En la gráfica se puede evidenciar que en la estrategia *CC*, el generador produce energía a máxima potencia para suplir la demanda de energía y cargar las baterías, entretanto en la estrategia *LF*, el generador sólo produce la energía necesaria para suplir la carga. La estrategia *CD* tiene un comportamiento similar a la estrategia de ciclo de carga en este caso.

Figura 7.

Curvas de estrategias CC, CD y LF



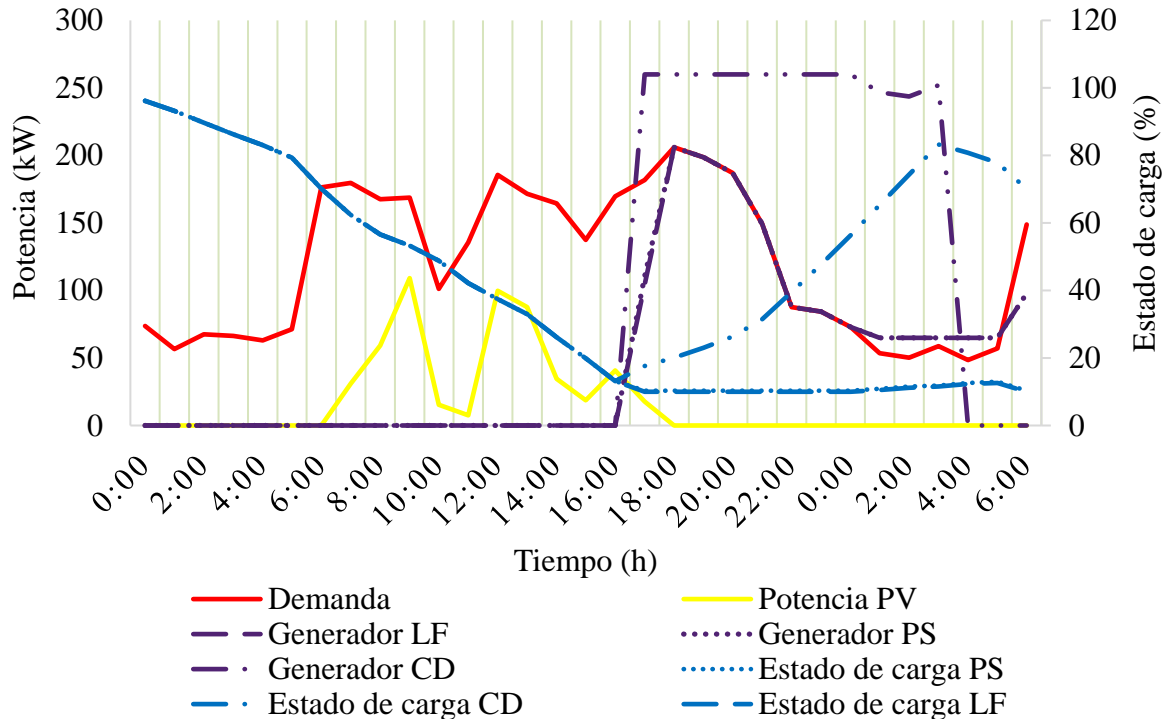
La Figura 8 muestra las gráficas de las estrategias *CC* y *GO*. Para cada estrategia se identifica el uso que tienen los generadores del sistema, en el caso de orden de generador los usa todo el tiempo mientras que en el caso de ciclo de carga sólo lo hace cuando se han descargado las baterías.

Figura 8.*Curvas de estrategias CC y GO*

En la Figura 9, se observa que la estrategia *CD* tiene un comportamiento similar a la estrategia de ciclo de carga mencionada anteriormente. Las estrategias *PS* y *LF* presentan un comportamiento similar debido a que las dos estrategias tienen como características el aprovechamiento de la energía producida con fuentes renovables y el uso del generador cuando la producción de energía sea baja.

Figura 9.

Curvas de estrategias LF, PS y CD



3.3. Afectación de la estrategia de gestión en los datos de irradiación solar y la carga

Los datos de irradiación solar y la carga son los mismos si se cambia la estrategia de gestión. En la tabla 4, se puede observar los datos de irradiación solar y carga para el día 15 de enero, para las estrategias *CC* y *LF*. Los datos hora a hora se obtienen descargando el reporte que HOMER Pro entrega luego de cada simulación.

Tabla 4.*Datos horarios de irradiancia y carga para las estrategias de control CC y LF*

Fecha y hora	Irradiancia solar (kW/m ²)		Carga (kW)	
	CC	LF	CC	LF
1/15/2007 12:00 AM	0	0	71.47	71.47
1/15/2007 1:00 AM	0	0	60.91	60.91
1/15/2007 2:00 AM	0	0	61.32	61.32
1/15/2007 3:00 AM	0	0	59.30	59.30
1/15/2007 4:00 AM	0	0	57.30	57.30
1/15/2007 5:00 AM	0	0	62.80	62.80
1/15/2007 6:00 AM	0.00	0.00	171.96	171.96
1/15/2007 7:00 AM	0.19	0.19	160.15	160.15
1/15/2007 8:00 AM	0.47	0.47	169.01	169.01
1/15/2007 9:00 AM	0.65	0.65	150.20	150.20
1/15/2007 10:00 AM	0.73	0.73	103.34	103.34
1/15/2007 11:00 AM	0.90	0.90	118.40	118.40
1/15/2007 12:00 AM	0.77	0.77	172.87	172.87

3.4. Afectación de la estrategia de gestión en el dimensionamiento de una microrred

El dimensionamiento de una microrred puede depender de los costos, la variación climatológica y el funcionamiento propio de la estrategia de gestión aplicada. En la tabla 5, se puede observar que se obtiene diferente capacidad de paneles fotovoltaicos y baterías con cada estrategia de gestión aplicada.

Tabla 5.*Capacidades de los componentes según la estrategia de control*

Estrategia	PV (kW)	Gen (kW)	Baterías
CC	500	260	7
LF	767	260	37
DC	527	260	15
PD	708	260	23
GO	322	110	4

La afectación debido a la variación climatológica se explica con el siguiente ejemplo. Se aplica la estrategia seguimiento de carga en una situación donde se tiene alta producción con fuentes renovables y presenta exceso de energía. El exceso de energía ocurre cuando se genera más energía que la requerida por la carga. Para este caso el software dimensiona un banco de baterías suficientemente grande para aprovechar esa energía y por ende disminuir el uso del generador.

Por otra parte, si se tiene la misma estrategia de gestión, pero la producción con fuentes renovables es baja, de modo que sólo puede suplir la carga en algunos momentos del día y hay poco exceso de energía. El software dimensiona pocas baterías, debido a que las baterías en esta estrategia se cargan con las fuentes renovables.

En la tabla 6 se pueden observar las características de cinco de las estrategias de control con las cuales cuenta el software HOMER Pro. En las características se consideran las restricciones en cuanto al uso de componentes, la cantidad de generadores que se puede utilizar en la simulación de la microrred y el tipo de sistema.

Tabla 6.

Características de las estrategias de control de HOMER Pro

Consideraciones	Ciclo de carga	Seguimiento de carga	Orden de generador	Despacho combinado	Despacho predictivo
Componentes					
Generador	✓	✓	✓	✓	✓
Paneles fotovoltaicos	✓	✓	✓	✓	✓
Turbinas eólicas	✓	✓	✓	✓	✓
Convertidor	✓	✓	✓	✓	✓
Baterías	✓	✓	✓	✓	✓
Caldera	✓	✓	X	✓	✓
Componentes de hidrogeno	✓	✓	X	✓	✓

Componentes					
Componente hidroeléctrico	✓	✓	X	✓	✓
Componente de hidrocínético	✓	✓	X	✓	✓
Cantidad de generadores					
Un solo generador	✓	✓	X	✓	✓
Múltiples generadores	✓	✓	✓	X	X
Tipo de sistema					
Sistema On-grid	✓	✓	X	X	X
Sistema Off-grid	✓	✓	✓	✓	✓

3.5. Alternativas de almacenamiento disponibles en HOMER Pro

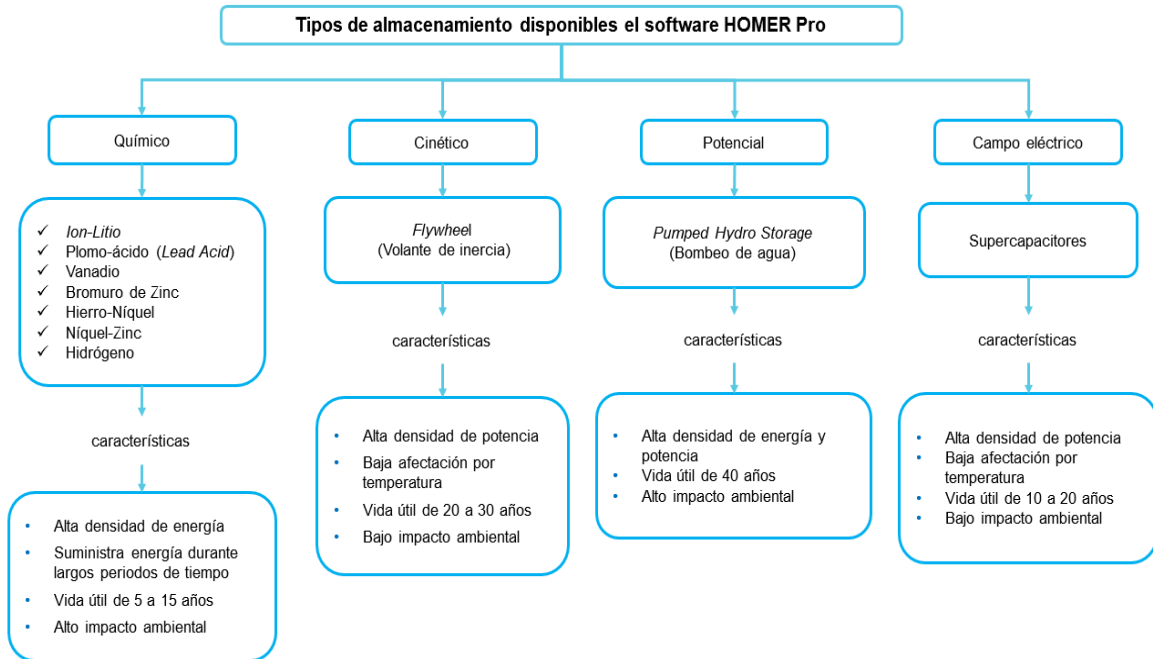
Las energías renovables como la solar fotovoltaica o eólica, han sido utilizadas en gran medida para solucionar los problemas relacionados con el calentamiento global, la dependencia de combustibles fósiles y el incremento en la demanda de energía. La producción de energía con fuentes renovables depende de recursos que tienen características intermitentes y fluctuantes. Los sistemas de almacenamiento de energía han sido ampliamente aceptados como una de las potenciales soluciones para contrarrestar esta variabilidad.

Con sistemas de almacenamiento no es necesario utilizar la energía eléctrica en el mismo instante de tiempo en el que se produce. Existen diferentes tipos de almacenamiento según la forma como se almacena la energía; las cuales pueden ser en forma térmica, química, cinética, potencial y de campo eléctrico.

El software HOMER Pro cuenta con cuatro tipos de almacenamiento que corresponden a las baterías electroquímicas, el volante de inercia, almacenamiento por bombeo de agua y los supercapacitores como se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Tipos de almacenamientos presentes en HOMER Pro



El software ofrece una base de datos bastante amplia para las baterías electroquímicas, cuenta con las tecnologías más populares en el mercado como las de Plomo-ácido y Litio además de otros tipos como aquellas compuestas por Níquel-Zinc, Hierro-Níquel, Vanadio, entre otras. El funcionamiento de este tipo de batería se basa en la reacción química dada entre los materiales que la componen, la cual permite disponer de energía eléctrica tanto a la entrada como a la salida de la batería.

El almacenamiento de Hidrógeno también está presente en el software, pero en este caso, no se realiza una conversión de este elemento químico en energía eléctrica, sino que se utiliza para alimentar cargas que demanden Hidrógeno directamente si el usuario especifica una carga de este tipo.

El volante de inercia o *Flywheel* dentro del software presenta una base de datos bastante reducida, contando únicamente con tres modelos diferentes. Este tipo de almacenamiento consiste en convertir la energía eléctrica en cinética por medio de un motor-generador el cual mantiene su movimiento por períodos de tiempo prolongados debido a que se encuentra en un medio con mínima fricción. Se caracteriza por suministrar gran cantidad de energía en periodos cortos de tiempo, es decir, presentan alta densidad de potencia.

El funcionamiento del almacenamiento por bombeo de agua se basa en aprovechar la energía gravitacional de un depósito de agua que se encuentra a cierta altura. El agua es bombeada desde un reservorio de menor elevación hacia uno de mayor elevación, esta agua previamente bombeada es liberada hacia la turbina para producir energía. En el software es posible encontrar un único modelo genérico para este tipo de almacenamiento el cual presenta un reservorio que puede almacenar 100 m³ de agua que puede ser descargada en un periodo de 12 horas.

En cuanto a los supercapacitores, su principio de funcionamiento es el mismo de un capacitor convencional sin embargo, los supercapacitores presentan una densidad de energía mucho más alta debido al material del electrolito utilizado y la disposición del mismo, pues en este caso existe una barrera o separador al interior de las dos placas del supercapacitor lo que reduce la distancia entre las cargas positivas y negativas, y como consecuencia aumenta la capacitancia o capacidad de almacenar energía. El software cuenta con un único modelo genérico de 3000 Farads de capacitancia nominal. Al igual que el volante de inercia, el supercapacitor es un componente con alta densidad de potencia y por lo tanto entrega gran cantidad de energía en periodos cortos de tiempo.

3.6. Análisis del efecto de las alternativas de almacenamiento para un caso de estudio

3.6.1 Comparaciones de los almacenamientos de energía

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los sistemas de almacenamiento se simula el caso de estudio mostrado en la tabla 2. El componente de almacenamiento se dimensiona con *homer optimizer* y los componentes de generación se mantienen constantes con las siguientes características; estrategia de gestión despacho combinado, alta producción de renovables, capacidad del sistema fotovoltaico 500 kW, generador 260 kW y convertidor 232 kW. En la tabla 7 se muestra la capacidad del almacenamiento y el porcentaje de renovables para las arquitecturas con menor *NPC* en cada simulación. La Figura 11 permite realizar una comparación entre los resultados financieros para cada tipo de almacenamiento.

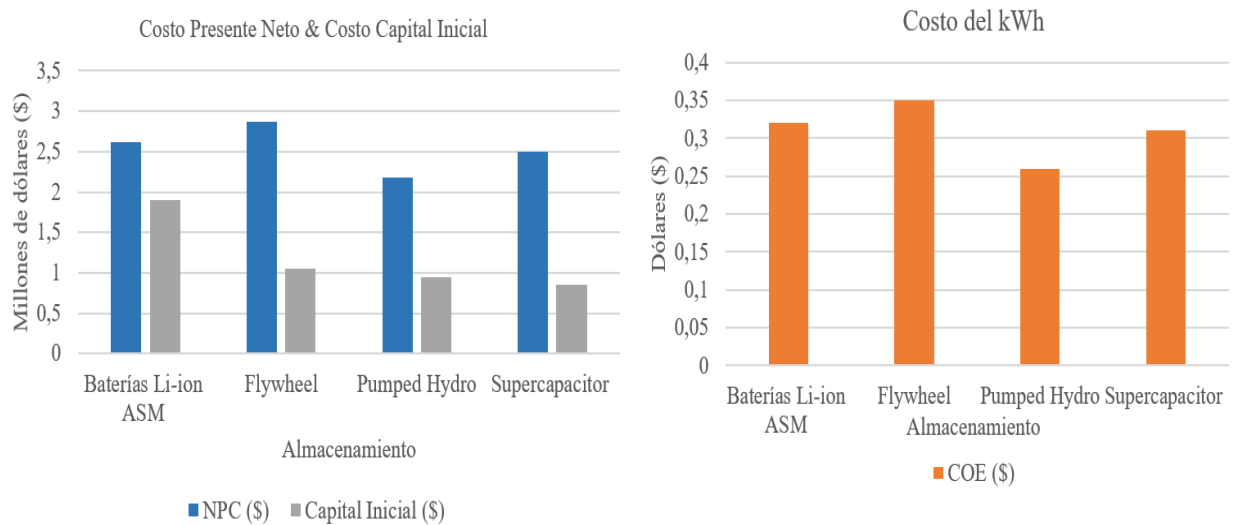
Tabla 7.

Resultados técnicos de operación según el tipo de almacenamiento

	Baterías Li-Ion ASM	Flywheel	Pumped Hydro	Supercapacitor
Capacidad nominal kWh	1,841	25	2,287	4
% Penetración de renovables	66	35.7	53	35.5

Figura 11.

Resultados financieros según el tipo de almacenamiento



Al comparar el costo de capital inicial y la capacidad nominal de los 4 escenarios es posible afirmar que el almacenamiento con supercapacitores es el más costoso en relación \$/kWh, debido a que el perfil de carga para el caso de estudio es de tipo residencial los almacenamientos de tipo potencia *Flywheel* y *Supercapacitor* presenta el *COE* y *NPC* más elevado.

Para los almacenamientos de tipo energía, las baterías de Li-ion obtuvieron el porcentaje más alto de penetración de renovables, conllevan un alto costo de capital inicial y su alto *NPC* se debe al número de reemplazos, el *Pumped Hydro* obtuvo el menor *NPC* ya que no requiere de reemplazos durante el proyecto, menor *COE* y mayor capacidad nominal en kWh con respecto a los demás almacenamientos. Sin embargo, al modificar los componentes de generación, la carga o el lugar de estudio, los resultados obtenidos pueden variar. Es importante destacar que las baterías de Li-ion pese a tener un alto costo de capital inicial son más usuales en el mercado y su instalación no requiere una condición geográfica determinada como es el caso del *pumped hydro*, por ello son

más atractivas frente a otros tipos de almacenamiento.

3.6.2 Afectación del modelo de batería en el dimensionamiento de una microrred

El dimensionamiento realizado por HOMER Pro entrega las capacidades nominales de cada tipo de componente en la microrred, en las tablas 8 se ilustran las capacidades obtenidas al simular con dos modelos de baterías Li-ion, *Kinetic Model* y *Modified Kinetic Battery Model ASM*. Se selecciona la opción *homer optimizer* para todos los componentes de la microrred.

Tabla 8.

Resultados de dimensionamiento para dos modelos de batería

Modelo	Batería			Resultados		
	Capacidad (Ah)	Tensión nominal (V)	Cantidad de baterías	PV (kW)	Gen (kW)	Convertidor (kW)
<i>Kinetic</i>	76.4	720	15	527	260	207
ASM	77.6	720	4	388	260	181

El modelo de batería *Kinetic* está enfocado en el efecto Peukert y el modelo *ASM* tiene en cuenta las pérdidas por efectos de degradación y temperatura. Si se mantiene constante la capacidad de los paneles en 527 kW para ambos casos es necesario aumentar el número de baterías tipo *ASM* con el fin de almacenar la energía del sistema fotovoltaico considerando las pérdidas omitidas en las baterías de tipo *Kinetic*. Con el objetivo de mantener el *NPC* más bajo el software disminuye la capacidad en kW para los paneles fotovoltaicos y las baterías *ASM*.






















3.6.3 Afectación del almacenamiento en la estabilidad del sistema de generación

Con el fin de mantener la estabilidad del sistema el banco de baterías debe tener la capacidad para almacenar la energía proveniente de las fuentes de generación, para identificar si HOMER Pro prioriza el *NPC* sobre la estabilidad del sistema, se simula el caso anterior con un

valor fijo de capacidad de los paneles fotovoltaicos en 500 kW y se observa si aparece la advertencia de inestabilidad en la arquitectura ganadora. La Figura 12 muestra que la arquitectura ganadora para el caso de estudio presenta advertencia de inestabilidad sin baterías de ion-Litio ASM, al aumentar la cantidad a 6 baterías desaparece la advertencia.

Figura 12.

Arquitecturas con advertencia de estabilidad en HOMER Pro

Architecture									
					PV (kW)	Gen (kW)	28S24M	CONV (kW)	NPC (\$)
					500	260		232	\$2.92M
					500	260		232	\$2.92M
					500	260	6	232	\$2.96M
					500	260	7	232	\$3.02M

3.6.4 Afectación de los pasos de simulación en los resultados

El controlador utiliza los datos calculados en cada paso de tiempo para determinar la estrategia de gestión adecuada, por ello es importante conocer el impacto de los pasos de simulación en los resultados obtenidos. En la tabla 9 se observa que al variar los pasos de simulación se modifica la energía de entrada y salida del banco de baterías.

Tabla 9.

Afectación de los pasos de simulación en los resultados

Resolución	Energía de entrada (kWh/mes)	Energía de salida (kWh/año)
1 hora	488.14	468.97
1 minuto	65.37	63.59

Para entender mejor los resultados de la tabla 6.3 se realiza un balance de potencia el día 2 de enero a las 16:00 horas, los resultados de simulación con resolución de 1 hora mostraron que la energía generada no es igual a la consumida y almacenada. En la simulación con paso de 1 minuto el balance de potencia por el contrario es igual a cero. Con pasos de simulación de 1 hora el software no toma las variaciones minútales de algunas variables como la irradiancia y la temperatura, lo cual afecta los resultados de producción de energía de los componentes.

En este capítulo se describieron las características de las estrategias de gestión y las tecnologías de almacenamiento. Se encontró que en el dimensionamiento de una microrred con HOMER Pro influyen considerablemente, la estrategia de gestión seleccionada, la variabilidad climatológica y los costos. Por esta razón es recomendable seleccionar la estrategia de gestión de acuerdo con el potencial energético presente en el lugar de estudio.

El software cuenta con cuatro tipos de alternativas de almacenamiento de las cuales tres de ellas; Pumped Hydro, Flywheel y los Supercapacitores presentan una cantidad de modelos limitada. En comparación, las baterías electroquímicas cuentan con una base de datos mucho más amplia, con una gran variedad de modelos y fabricantes.

HOMER Pro da la opción de seleccionar varias tecnologías de almacenamiento como variables de entrada en la simulación, sin embargo, el software en sus resultados no considera arquitecturas con más de un tipo de almacenamiento a la vez. Otro aspecto a resaltar es que el almacenamiento y su capacidad interfieren en el funcionamiento de la estrategia de gestión de energía de una microrred.

4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad en microrredes es una técnica utilizada para determinar la susceptibilidad en las salidas del modelo debido a los cambios en una variable. En el software HOMER Pro se realiza un análisis de sensibilidad ingresando múltiples valores para una variable de entrada en particular. HOMER Pro repite su proceso de optimización para cada valor de la variable permitiendo identificar cómo son afectados los resultados. Los resultados de este análisis son usados por el usuario para tomar decisiones con mayor claridad.

Existen varias razones para realizar un análisis de sensibilidad. Una razón es que posiblemente no se conozca el valor exacto de una variable. Al especificar un rango de valores, se puede determinar qué tan importante es esa variable y cómo cambia la solución según su valor.

Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 7, 8 y 9 de los entregables del seminario de investigación.

4.1. Generalidades del análisis de sensibilidad en HOMER Pro

El software cuenta con una amplia variedad de tablas y gráficos que permiten al usuario observar los resultados de las simulaciones realizadas. El modo tabular predeterminado por el software HOMER Pro contiene la tabla casos de sensibilidad y la tabla resultados de optimización.

La tabla de casos de sensibilidad muestra una lista de los mejores sistemas factibles para cada caso de sensibilidad ingresado, es decir aquellos sistemas con menor costo presente neto. La tabla de resultados de optimización permite al usuario obtener información de los sistemas factibles para cada caso de sensibilidad en particular.

Cuando el análisis involucra más de una variable de sensibilidad, un gráfico a menudo transmite los resultados de una manera más significativa que una tabla. HOMER Pro cuenta con cuatro tipos de gráficos para visualizar los resultados de sensibilidad. Los gráficos son los siguientes: *Line plot*, *Spider plot*, *Optimal system type plot* y *Surface plot*.

El gráfico *Line plot* del software HOMER Pro representa la relación de una variable de sensibilidad con un parámetro seleccionado. *Spider plot* es el gráfico que resume los cambios porcentuales de cada variable de sensibilidad sobre una variable dependiente seleccionada. *Optimal system type plot* es el gráfico que representa el tipo de arquitectura con menor NPC para cada caso de sensibilidad. *Surface plot* es un gráfico de colores. En la tabla 10 se encuentran la información más relevante de los gráficos de sensibilidad.

Tabla 10.

Características de los gráficos de sensibilidad

Gráfica	Eje X	Eje Y	Máxima cantidad de parámetros a graficar	Características
<i>Optimal system type plot</i>	Variable de sensibilidad independiente	Variable de sensibilidad independiente	1	Representa el tipo de arquitectura con menor NPC para cada caso de sensibilidad
<i>Surface plot</i>	Variable de sensibilidad independiente	Variable de sensibilidad independiente	2	La escala de colores define el comportamiento del parámetro seleccionado
<i>Line plot</i>	Variable de sensibilidad independiente	Variable dependiente	2	Representa la relación de una variable de sensibilidad con un parámetro seleccionado
<i>Spider plot</i>	Valor relativo asociado a las variables de sensibilidad	Variable dependiente	1	Resume la relación de cada variable de sensibilidad sobre la variable dependiente seleccionada

HOMER Pro también permite realizar un enlace de sensibilidad conectando las variables de sensibilidad que varían de manera similar para reducir el número de optimizaciones que el software ejecuta. El software realiza un procedimiento de optimización independiente para cada combinación posible de valores de variables de sensibilidad. El número total de casos de sensibilidad es el producto del número de valores especificados para cada variable de sensibilidad.

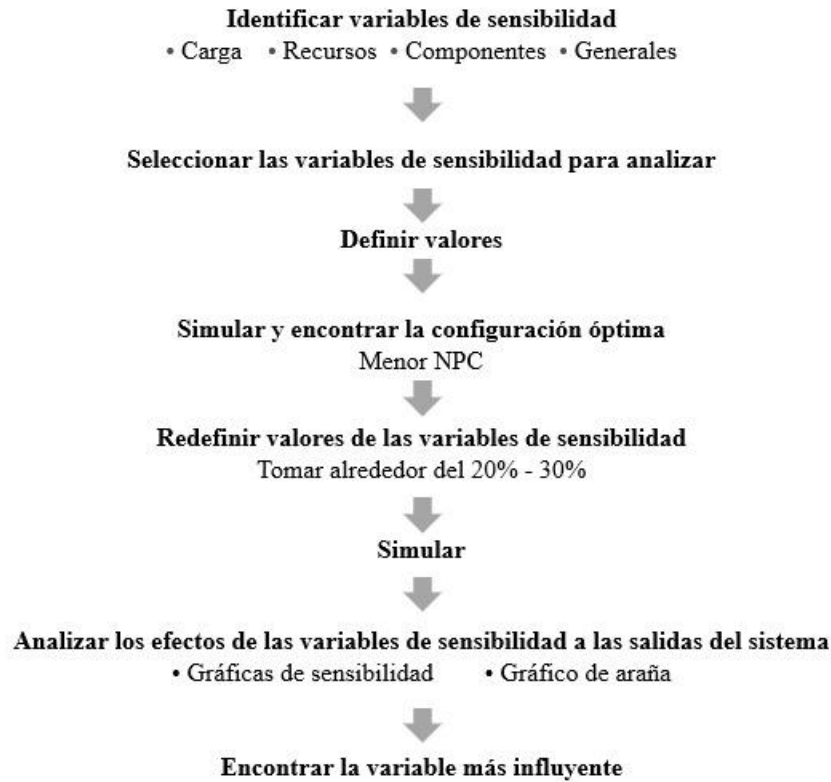
4.2. Aplicación del análisis de sensibilidad

4.2.1 Metodología para determinar la variable más influyente

La variable más influyente es aquella entrada que afecta significativamente los resultados. Es importante para un investigador conocer esta variable y así dedicar un mayor tiempo y trabajo para definir un valor más preciso de esta. Se propone la metodología mostrada en la Figura 13, la cual permite determinar la variable más influyente a partir de la gráfica de araña que se obtiene del software HOMER Pro.

Figura 13.

Metodología planteada para determinar la variable más influyente



4.2.2 Afectación del precio del combustible en la gestión de energía

Una de las características de las estrategias de gestión en el software HOMER Pro es despachar primeramente las fuentes renovables, luego el sistema de almacenamiento y finalmente el generador diésel. Se disminuye el precio del combustible para observar si el comportamiento mencionado es alterado.

Se encuentra que los costos afectan considerablemente al sistema, afecta directamente el dimensionamiento independientemente de la estrategia de gestión utilizada o del potencial energético del lugar. Por ende, la operación es consecuencia del dimensionamiento. Al disminuir

el precio del combustible, el software dimensiona una menor capacidad de paneles fotovoltaicos y hace un mayor uso del generador.

4.2.3 Afectación de la capacidad de escasez en la configuración del sistema

La capacidad de escasez es un indicador mencionado en sistemas aislados y se refiere al porcentaje de carga que no se abastece. La labor de un investigador o diseñador está en encontrar una combinación de componentes que logre una capacidad de escasez baja, menor al cinco por ciento.

Al simular en el software se encuentra que la capacidad de escasez se puede disminuir al aumentar la capacidad del generador diésel. Por el contrario, se puede utilizar sólo los paneles fotovoltaicos cuando no se tiene baja capacidad de escasez.

4.2.4 Afectación en la energía generada por el sistema fotovoltaico

Las variables de sensibilidad estudiadas fueron el factor de degradación y la temperatura ambiente del lugar de estudio.

El factor de degradación tiene en cuenta la reducción en la energía generada por los paneles debido a las condiciones de operación como por ejemplo la suciedad, el sombreado, las pérdidas por efecto Joule en los conductores, el envejecimiento de los paneles, entre otros.

La temperatura de operación corresponde a la temperatura que alcanzan las células del módulo fotovoltaico dependiendo de la temperatura ambiente y la irradiación solar en el lugar.

Según los resultados, tanto el costo presente neto como la producción de energía presentaron un comportamiento lineal en función de la temperatura ambiente. A mayor

temperatura, mayor *NPC* y menor producción de energía para una misma irradiación solar.

4.2.5 Afectación en la vida útil del sistema de almacenamiento

En este caso, las variables de sensibilidad analizadas fueron la profundidad de descarga (*Depth of Discharge – DOD*) y la temperatura ambiente. La profundidad de descarga es el porcentaje de la capacidad total de la batería que se usa durante un ciclo de descarga. Cada tipo de batería tiene un porcentaje de profundidad de descarga recomendado por el fabricante con el fin de garantizar la vida útil de la misma.

El análisis se realizó para dos tipos de batería, Plomo-Ácido y Litio. Según los resultados, la vida útil de las baterías de Plomo-ácido se ve más afectada por las altas temperaturas y las descargas profundas, pues requieren de varios reemplazos durante la vida del proyecto y en consecuencia, su *NPC* es mayor en comparación con las baterías de Litio.

A diferencia de las baterías de Plomo-ácido, la vida útil de las baterías de Litio no se reduce significativamente debido a la temperatura y ni a las descargas profundas, de hecho, solamente se aprecia una reducción de uno a dos años de vida útil entre una profundidad de descarga del 20% al 90%.

4.2.6 Afectación en el consumo de combustible del generador diésel

Se realizó un análisis de sensibilidad para la tasa mínima de carga del generador. Dicha tasa, corresponde al mínimo porcentaje de la potencia nominal que el generador entregará a la carga con el fin de prevenir que opere a una potencia más baja de la recomendada por el fabricante.

Según los resultados obtenidos, la tasa mínima de carga tuvo un impacto bajo respecto al consumo de combustible ya que, para los diferentes valores asignados a esta variable de sensibilidad, el consumo de combustible se mantuvo prácticamente constante, dado que en todas las simulaciones la carga no llegó a demandar una potencia menor a ninguno de los valores asignados para la variable. En este caso, el efecto que tenga la tasa mínima de carga sobre el consumo de combustible depende tanto del despacho que simule el software como del consumo que presente la carga, por lo tanto, no es posible que el usuario manipule este comportamiento sólo al cambiar el valor de la tasa mínima de carga.

El análisis de sensibilidad en microrredes es una técnica utilizada para determinar la susceptibilidad en las salidas del modelo debido a los cambios en una variable. El modo gráfico y tabular del software HOMER Pro permiten al usuario analizar de manera eficiente los resultados obtenidos en un análisis de sensibilidad.

Se presenta una metodología que permite determinar la variable más influyente y de esta forma el diseñador logre enfocar su atención en aquella variable que genera un mayor impacto en los resultados, como la temperatura ambiente, la degradación propia del componente o el estado de carga en el caso de las baterías. Permite realizar un análisis general de la vida útil u otros aspectos de los componentes durante el tiempo de vida del proyecto.

5. Interacción de HOMER Pro con otras herramientas software

5.1. Características de los software que interactúan con HOMER Pro

HOMER Pro es una herramienta de optimización que estudia diversas combinaciones de equipos y recursos energéticos considerados en una microrred para obtener un sistema de

generación viable, permite la interacción con algunas herramientas software como Excel, HelioScope, PVsyst y Matlab, de este modo reúne la mayor cantidad de variables de entrada para obtener resultados más precisos a partir de la simulación, convirtiéndose en un software más completo y novedoso. Con el objetivo de verificar la capacidad de HOMER Pro para reconocer y utilizar datos provenientes de otros software, se realiza la interacción con las cuatro herramientas computacionales descritas a continuación.

Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 10 y 11 de los entregables del seminario de investigación.

5.1.1 Descripción y requerimientos de las herramientas software

Excel es una herramienta del paquete de Microsoft con licencia paga, sin periodo de prueba para el usuario. Cuenta con gráficas, tablas dinámicas y un lenguaje de programación macro llamado Visual Basic. Para realizar la interacción es necesario tener el software instalado y con licencia activa. HOMER Pro admite importar datos de Excel relacionados con la carga eléctrica, térmica o de hidrógeno para realizar la simulación de la microrred. Estos datos deben estar en un archivo de serie temporal csv.

HelioScope es un paquete de software online que requiere conexión a internet para realizar el proyecto y cargar los datos de producción fotovoltaica en kWh a HOMER Pro, cuenta con 21 días de prueba gratis para el usuario. HelioScope facilita el diseño y la ingeniería de paneles solares. Consiste en herramientas de diseño y simulaciones de energía para ayudar a los instaladores a mejorar los diseños de sus paneles solares. Considera en sus variables de entrada el área disponible para la instalación y las pérdidas por sombreado, cableado y desajuste de módulo.

Dimensiona el arreglo de paneles, el convertidor y el banco de baterías del sistema fotovoltaico. En los resultados entregados por HelioScope encontramos producción de energía horaria, recomendaciones para diseño de equipos, diagrama unifilar con detalle del cableado, planos CAD del diseño entre otros.

PVsyst es un software de licencia paga que ofrece una prueba gratis de 21 días para el usuario. PVsyst simplifica el proceso de diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, estudia, simula y analiza su comportamiento. Al igual que HelioScope permiten dimensionar el arreglo de paneles, el convertidor y el banco de baterías del sistema fotovoltaico. Considera en sus variables de entrada el área disponible para la instalación y las pérdidas por sombreado, cableado y desajuste de módulo. Los resultados de PVsyst nos muestran producción de energía horaria, análisis de índice de rendimiento y fracción solar, un diagrama de pérdidas detallado y clasificado por irradiancia, energía nominal del conjunto, energía efectiva en la salida del conjunto, pérdidas del convertidor y del almacenamiento. HOMER Pro Permite traer los resultados de producción fotovoltaica en kWh y continuar con el modelado de la microrred.

Matlab es un sistema de cómputo numérico de entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Es una herramienta de licencia paga sin periodo de prueba, para la interacción es necesario contar con una versión HOMER Pro 3.7 o posterior instalada, versión 32 / 64 bits y Matlab instalado versión 32 / 64 bits según sea el caso. HOMER Pro permite la interacción con este software de dos formas mediante el controlador Matlab Link y el componente personalizado.

El controlador Matlab Link permite crear un algoritmo de despacho de energía usando la sintaxis propia de Matlab, los parámetros de simulación y los estados de simulación definidos por HOMER Pro los cuales guardan la información de los componentes de generación y de la carga

que hacen parte de la estrategia de gestión de energía. Esta opción permite al usuario diseñar un controlador con objetivos específicos que satisfaga sus necesidades e intereses teniendo en cuenta aspectos relevantes del entorno donde será ejecutado el proyecto. Adicionalmente podrá comparar el desempeño de la microrred al usar una estrategia de gestión diferente a las integradas en HOMER Pro. Para diseñar el controlador es necesario crear 3 funciones de Matlab que serán llamadas por HOMER Pro y deben ubicarse en 3 archivos.m con la misma ubicación. La función *MatlabStartSimulation* verifica el problema, detecta errores en la variable *Simulation_parameters* e inicializa valores en la salida *Custom_variables*, la función *MatlabDispath* implementa el algoritmo de gestión de energía y la función *MatlabEndSimulation* analiza si surgen errores durante la simulación.

En cuanto a el componente personalizado se puede cargar un componente de generación modelado en Matlab, panel fotovoltaico, turbina eólica, turbina hidro o red eléctrica. Se crea un archivo .m con la función *MatlabUpdateState* que calcula la potencia de salida del componente personalizado. El algoritmo creado en MATLAB da vía libre al usuario para modelar un componente de generación teniendo en cuenta especificaciones de operación determinadas, límites máximos y mínimos de operación y modificaciones necesarias en cada simulación ejecutada.

5.2. Aplicación del enlace entre HOMER Pro y otros software

Para analizar la aplicación del enlace entre HOMER Pro y otros software, se simulan ocho casos de estudio que se pueden ver a detalle en la sesión 11 del seminario de investigación.

5.2.1 Interacción de HOMER Pro con Excel

En el análisis de la integración HOMER Pro con Excel se implementó el caso de estudio 1 simulado con una carga importada de Excel y el caso de estudio 2 simulado con una carga perfil

residencial encontrada en el software. Los casos de estudio consisten en el dimensionamiento de una microrred de tipo residencial.

Al usar carga perfil residencial se tiene una demanda eléctrica mayor en comparación con el caso 1 por tanto, el dimensionamiento de los componentes es superior, así como el costo presente neto del proyecto. En la tabla 11 se pueden observar los resultados de la simulación.

Tabla 11.

Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 1 y 2

Caso	Estrategia	PV (kW)	Gen (kW)	Cantidad de baterías	Conv (kW)	NPC (\$)	COE (\$)	Costo de operación (\$)	Capital inicial (\$)	Exceso (%)
Carga importada de Excel	CD	0.46	0.44	1	0.23	8,302	0.47	508.6	1,727	10.7
Carga perfil residencial	CD	0.69	0.62	3	0.32	8,593	0.49	430.9	3,023	7.67

Resulta útil cuando el usuario tiene datos medidos de la carga eléctrica de un lugar específico que sean importados al software HOMER Pro. Con esta información el dimensionamiento de la microrred es más preciso.

5.2.2 Interacción de HOMER Pro con HelioScope

Para realizar el análisis de la integración HOMER Pro con HelioScope se implementó el caso de estudio 3 denominado datos de producción importados de HelioScope y el caso de estudio 4 dimensionamiento del sistema fotovoltaico por HOMER Pro. Los casos de estudio se tratan del dimensionamiento de una microrred de tipo residencial.

Para el caso de estudio denominado dimensionamiento del sistema fotovoltaico por HOMER Pro como se muestra en la tabla 12, el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

de la microrred tiene una capacidad mayor al caso de estudio 3. Lo mencionado anteriormente ocurre debido a que el software HOMER Pro no considera la restricción del área disponible en el lugar.

Tabla 12.

Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 3 y 4

Caso	Estrategia	PV (kW)	Gen (kW)	Conv (kW)	Gen (%)	PV (%)	NPC (\$)	COE (\$)	Costo de operación (\$)	Capital inicial (\$)
Datos de producción importados de HelioScope	LF	18.9	140	20	91.6	8.4	2,022	0.63	153,111	42,732
Carga perfil residencial	LF	21	140	20	89.9	10.1	2,038	0.64	153,268	56,364

Cuando el diseñador de la microrred requiera de un área limitada para la instalación de los paneles solares fotovoltaicos es recomendable realizar previamente el diseño y dimensionamiento de la instalación fotovoltaica en HelioScope.

5.2.3 Interacción de HOMER Pro con PVsyst

En el análisis de la integración HOMER Pro con PVsyst se implementó el caso de estudio 5 denominado datos de producción importados de PVsyst y el caso de estudio 6 dimensionamiento del sistema fotovoltaico por HOMER Pro. Los casos de estudio se tratan del dimensionamiento de una microrred de tipo residencial.

Para el caso de estudio denominado datos de producción importados de PVsyst, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de la microrred tiene una capacidad mayor al caso de estudio 6 como se puede observar en la tabla 13. El software PVsyst considera el efecto de las

sombras que afectan el lugar de estudio.

Tabla 13.

Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 5 y 6

Caso	Estrategia	PV (kW)	Baterías	Conv (kW)	NPC (\$)	COE (\$)	Costo de operación (\$)	Capital inicial (\$)
Datos de producción importados de PVsyst	LF	3.7	75	2.55	233,908	3.68	1,780.09	210,896
Dimensionamiento de sistema fotovoltaico por HOMER Pro	LF	2.33	75	0.32	233,918	3.68	1,780.50	210,900

Cuando el lugar donde se va a realizar la instalación de los paneles solares fotovoltaicos tiene gran cantidad de objetos cercanos como casas o árboles que causan sombras, es recomendable realizar previamente el diseño y dimensionamiento de la instalación fotovoltaica en PVsyst.

5.2.4 Interacción de HOMER Pro con Matlab

Para realizar el análisis de la integración HOMER Pro con Matlab se implementó el caso de estudio 7 denominado “Ejemplo página HOMER” y el caso 8 “Ejemplo trabajo de grado”. El caso de estudio 7 corresponde a una microrred aislada compuesta por un sistema de paneles solares fotovoltaicos y un generador diésel conectados a la barra de AC.

El algoritmo de despacho de energía implementado en Matlab consiste en utilizar el sistema de paneles solares fotovoltaicos para servir la carga, y el generador sólo será usado si la generación fotovoltaica no puede cumplir con la carga requerida en un momento determinado. En la tabla 14 se muestra que para este caso de estudio HOMER Pro dimensiona los componentes de la microrred

de la misma forma para todas las estrategias de control, esto ocurre porque la microrred no tiene sistema de almacenamiento.

Tabla 14.

Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 7

Caso	Estrategia	PV (kW)	Gen (kW)	Generador (%)	PV (%)	NPC (\$)	COE (\$)	Costo de operación (\$)	Costo inicial (\$)
Microrred Off-Grid: Paneles y generador conectados a la barra de AC	Matlab	8.42	10	55.8	44.2	180,659	0.77	11,635	30,250
	CC	8.42	10	55.8	44.2	180,659	0.77	11,635	30,250
	LF	8.42	10	55.8	44.2	180,659	0.77	11,635	30,250
	CD	8.42	10	55.8	44.2	180,659	0.77	11,635	30,250
	PS	8.42	10	55.8	44.2	180,659	0.77	11,635	30,250

El caso de estudio 8 corresponde al análisis de los resultados obtenidos en el trabajo de grado denominado *Energy Management System Benchmarking For A Remote Microgrid* realizado en la Universidad Carlos III de Madrid en el año 2017. La microrred aislada está compuesta por un sistema de paneles solares fotovoltaicos, un generador diésel, baterías y un convertidor.

La estrategia de gestión de energía implementada en Matlab tiene por objetivo extender la vida útil esperada de las baterías y satisfacer la demanda. Adicionalmente, el autor del trabajo de grado busca realizar una comparación en el dimensionamiento de los componentes de la microrred al cambiar la estrategia de control con el fin de encontrar la arquitectura que maximice la penetración de energía renovable para obtener beneficio económico y medioambiental.

La estrategia de gestión de energía implementada en Matlab se comparó con dos de las

estrategias de control del software HOMER Pro denominadas Ciclo de carga y Seguimiento de carga. Las diferencias entre las estrategias de gestión de energía son el nivel de uso de generador diésel en la microrred y la estrategia de carga de las baterías. Para el caso de estudio 8 con la estrategia de seguimiento de carga del software HOMER Pro se obtiene la arquitectura ganadora, aquella con menor costo presente neto y adicionalmente la microrred alcanza la fracción renovable más alta como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15.

Características de las arquitecturas ganadoras para el caso de estudio 8

Caso	Estrategia	PV (kW)	Gen (kW)	Cantidad de baterías	Conv (kW)	NPC (\$)	Fracción de renovable (%)
Microrred Off-Grid <i>paper</i> : sistema fotovoltaico, generador diésel, sistema de baterías y convertidor	Matlab	922	1,625	258	1,300	25.31M	13
	CC	922	1,625	258	1,300	24.74M	13
	LF	922	1,625	258	1,300	24.6M	15

De los tres modelos propuestos, el que reduce más la dependencia del combustible es la estrategia de seguimiento de carga. Reduce los costos y proporciona la mayor penetración solar. La estrategia de ciclo de carga maximiza el uso del sistema de almacenamiento, que es lo opuesto al resultado deseado debido a la naturaleza de los materiales de los que están hechas las baterías y su precio de mercado actual. Por otro lado, la estrategia de gestión de energía implementada en Matlab proporciona la mejor gestión del sistema de almacenamiento, pero también aumenta el consumo de combustible y, en consecuencia, los costos operativos.

En la tabla 16 se encuentran la información sobre las limitaciones y beneficios de usar cada uno de los cuatro software con los que HOMER Pro permite realizar una interacción.

Tabla 16.

Limitaciones y beneficios de los software que interactúan con HOMER Pro nombre

Software	Limitaciones	Beneficios
PVsyst	Es necesario importar el archivo con el caso de estudio para ejecutarlo en un equipo diferente	Aprovechar la información de área limitada, edificaciones o grandes árboles cerca Considerar pérdidas por desajuste de módulo, entre otras
HelioScope	La simulación del sistema fotovoltaico en HelioScope requiere conexión a internet durante todo el proceso	Aprovechar la información de área limitada, edificaciones o grandes árboles cerca Entrega al usuario diseño de planos en Autocad Suministra el diagrama unifilar y recomendaciones del diseño de equipos
Matlab	Especificar correctamente la ruta de los archivos .m Previo conocimiento de la sintaxis necesaria para realizar un código de despacho en Matlab Limitadas fuentes de información respecto al tema Se requiere HOMER Pro para verificar si el código funciona correctamente	Uso en proyectos donde las condiciones climáticas no se ajustan a ningún controlador de HOMER Pro Permite ensayar una estrategia de despacho de energía para una microrred con estudio financiero en HOMER Pro
Excel	Los datos de producción en kWh deben estar en un archivo .csv	Obtener una simulación más precisa de una microrred con datos de carga reales medidos o estimados

La interacción de HOMER Pro con Excel, HelioScope, PVsyst y Matlab permite considerar en la simulación variables de entrada adicionales, con el fin de obtener un dimensionamiento de la microrred más preciso. Adicionalmente, complementa su alcance en algunos aspectos de la etapa de diseño.

6. Criterios de evaluación de desempeño de microrredes

El diseño de microrredes se ha concentrado en el dimensionamiento y combinaciones de los componentes que la conforman, tomando como principales restricciones los costos y la confiabilidad del sistema. Para evaluar los costos y confiabilidad del sistema se han empleado indicadores de desempeño.

Los indicadores de desempeño para los sistemas híbridos de energía eléctrica pueden ayudar a evaluar la confiabilidad y / o factibilidad. Estos indicadores ayudan al diseñador a dimensionar adecuadamente los componentes del sistema.

Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 12, 13 y 14 de los entregables del seminario de investigación.

6.1. Criterios de desempeño identificados en la literatura

En la literatura se han encontrado algunos indicadores utilizados para la evaluación de costos, confiabilidad y en otros aspectos como el impacto ambiental. La tabla 17 contiene la descripción de dichos indicadores.

Tabla 17.

Indicadores de evaluación de microrredes

Indicador	Descripción
Indicadores de evaluación de costos	
TAC	Representa el costo por año del capital más el costo anual del mantenimiento y reparaciones de la instalación.
NPC	Se define como el valor presente de flujos de efectivo, que incluye el costo inicial de todos los componentes del sistema, el costo de reemplazo y el costo de mantenimiento.
COE/LCE	Es el precio por unidad de energía y se calcula como la relación entre el costo total del sistema tomado anualmente.
Indicadores de evaluación de confiabilidad	
<i>LSP</i>	Es la relación entre el déficit de potencia suministrada sobre la demanda eléctrica en un cierto periodo de tiempo.
<i>LLP</i>	Se define como el periodo de tiempo de corte de energía dividido por el tiempo de trabajo total del sistema.
<i>UL</i>	Es la carga que no se puede servir dividida por la carga total de un período de tiempo
<i>LA</i>	Es la fracción de tiempo durante el cual se puede cumplir con la carga especificada
<i>SOC</i>	Da cuenta de la energía almacenada en el sistema de almacenamiento de energía en un periodo tiempo.
<i>DPSP</i>	Se define como la probabilidad de que se produzca un suministro de energía insuficiente cuando el sistema no puede satisfacer la demanda de carga
<i>EENS</i>	Cuando la carga excede la disponibilidad en el sistema energético, <i>EENS</i> da una medida de la energía esperada que no se suministró.
<i>LOLE</i>	Es el número promedio de horas las cuales se espera que la carga del sistema exceda la capacidad de generación disponible.
Otros indicadores	
Flujo de emisiones de carbono	El flujo de emisiones de carbono indica el nivel de emisiones de carbono, se relaciona con la cantidad de energía generada o consumida a partir de fuentes térmicas.
<i>REP</i>	Es la relación entre la energía total de las fuentes de energía renovable y la demanda total de la carga primaria para un año.

6.2. Criterios de desempeño en HOMER Pro

6.2.1 Indicadores de confiabilidad

En la tabla 18 se aprecian los indicadores identificados en la literatura que se encuentran en HOMER Pro.

Tabla 18.

Indicadores de confiabilidad en HOMER Pro

Indicadores de confiabilidad			
Indicador	HOMER Pro	Forma de calcularlo	Calculable
<i>LPSP</i>	✓	Igual	----
<i>LLP</i>	X	----	Sí
<i>EENS</i>	✓	Igual	----
<i>LOLE</i>	X	----	Sí
<i>LA</i>	X	----	Sí
<i>DPSP</i>	X	----	Sí
<i>ACS</i>	✓	Diferente	----

Es posible calcular aquellos indicadores que no presenta el software en los resultados. A continuación, se indica la forma en que es posible calcularlos a partir de la información suministrada por el software.

Para calcular el indicador pérdida de carga esperada (*Loss of Load Expected – LOLE*) es necesario exportar los datos horarios de la simulación y posteriormente contar el número de veces

que se presentó un déficit de energía o que no se abasteció completamente la demanda de la carga. Este número corresponderá a las horas en las que no fue abastecida completamente la energía demandada por la carga.

Una vez calculado el indicador *LOLE* es posible calcular el indicador probabilidad de pérdida de carga (*Load Loss Probability – LLP*). Es necesario recordar que los datos horarios que son exportados del software corresponden a la simulación de un año de la vida del proyecto que en este caso se simuló con intervalos de tiempo de una hora y por lo tanto el *LLP* será igual a la división entre el *LOLE* y 8760 que corresponde al total de intervalos para un año en este caso. Al calcular el *LLP* también será posible calcular el indicador nivel de autonomía (*Level of Autonomy – LA*).

Se identificó que el indicador déficit de capacidad anual (*Annual Capacity Shortage – ACS*) calculado por el software difiere al hallado en la literatura, pues está relacionado con la cantidad de potencia que es requerida en determinado instante de tiempo respecto a la demanda eléctrica de la carga. Este indicador difiere de la energía esperada no suministrada (*Expected Energy not Supplied – EENS*) o *Unmet load* en el software, pues el *ACS* tiene en cuenta una capacidad operativa de reserva que calcula el software como un respaldo de capacidad para el sistema en caso de que ocurran situaciones adversas, como un sombreado importante en la superficie del sistema fotovoltaico o la conexión de grandes cargas motoras al sistema.

6.2.2 Indicadores para la evaluación de costos

En la tabla 19 se observan los indicadores revisados en la literatura con los cuales cuenta el software. En este caso, dos de ellos se calculan diferente en HOMER Pro.

Tabla 19.*Indicadores financieros en HOMER Pro*

Indicadores para evaluación de costos		
Indicador	HOMER Pro	Forma de calcularlo
<i>NPC</i>	✓	Diferente
<i>COE</i>	✓	Igual
<i>TAC</i>	✓	Diferente

La diferencia en los cálculos del *NPC* y el costo total anualizado (*Total Annualized Cost – TAC*) consiste en que el software primero realiza el flujo descontado de caja del proyecto para poder calcularlos.

Por último, se realizó una revisión de otros indicadores presentes en el software como el reortno de la inversión (*Return of Investment – ROI*), la tasa interna de retorno (*Internal Rate of Return – IRR*), el *Simple pay back*, el *Present Worth* y el *Annual Worth*. Los cuales tienen una interpretación particular, pues es necesario comparar dos casos de estudios para poder calcularlos debido a que por lo general, las microrredes aisladas no presentan ingresos a lo largo de la vida del proyecto.

6.3. Análisis de los indicadores de desempeño de un caso de estudio

Con el fin de analizar los indicadores de desempeño se simuló el caso de estudio mostrado en la tabla 2 con la estrategia de gestión Despacho Combinado. Se hizo un análisis de algunos indicadores identificados en el software y en la literatura para tres arquitecturas factibles de la microrred.

Tabla 20.

Indicadores de desempeño para tres arquitecturas seleccionadas

Arquitectura	<i>Funmet</i>	<i>DPSP%</i>	<i>LLP</i>	<i>LA</i>	<i>NPC M US</i> (\$)	<i>COE US</i> (\$)	Emisiones (kg CO ₂ /año)
1 Gen: 40 kW PV: 400 kW Bat: 825 kW	25.7	22.85	0.63	0.37	1.66	0.27	201
2 Gen: 40 kW PV: 500 kW Bat: 1100kW	19.1	16.83	0.53	0.47	1.85	0.28	164
3 Gen: 100 kW PV: 80 kW Bat: 55 kW	19.9	22.09	0.47	0.52	2.14	0.33	672
Arquitectura	<i>Funmet</i>	<i>DPSP%</i>	<i>LLP</i>	<i>LA</i>	<i>NPC M US</i> (\$)	<i>COE US</i> (\$)	Emisiones (kg CO ₂ /año)
1 Gen: 40 kW PV: 400 kW Bat: 825 kW	25.7	22.85	0.63	0.37	1.66	0.27	201
2 Gen: 40 kW PV: 500 kW Bat: 1100kW	19.1	16.83	0.53	0.47	1.85	0.28	164
3 Gen: 100 kW PV: 80 kW Bat: 55 kW	19.9	22.09	0.47	0.52	2.14	0.33	672

La tabla 20 nos muestra que la arquitectura 1 obtuvo el menor *NPC* y los valores más altos de porcentaje de carga desatendida *Funmet* y la deficiencia de probabilidad de suministro (*Deficiency of Power Supply Probability – DPSP*). Aunque los indicadores *LLP* y *LA* no son calculados en HOMER Pro se deben considerar en la evaluación técnica del proyecto para conocer el promedio de tiempo en el cual la carga no fue abastecida durante la operación de la microrred. Al aumentar la capacidad de los paneles fotovoltaicos y del banco de baterías en la arquitectura 2, se elevó el valor de *NPC* del proyecto, sin embargo, los indicadores *Funmet*, *DPSP* y *LLP* disminuyeron lo cual indica una mejor confiabilidad en la microrred. Al comparar los indicadores de las tres arquitecturas, es posible afirmar que, para el caso de estudio simulado, la arquitectura 2

(atenderá de forma más eficiente y por mayor tiempo la carga) presentará un mejor desempeño durante la operación de la microrred sin elevar de forma significativa el *NPC* y el *COE* del proyecto.

A continuación, se simuló el caso de estudio con cada estrategia de gestión de energía, los demás componentes tienen las siguientes características; Paneles fotovoltaicos 100 kW, generador 150 kW, banco de baterías ion-Litio 220 kW y convertidor *homer optimizer*, los resultados se presentan en la tabla 21.

Tabla 21.

Indicadores de desempeño según la estrategia de gestión con baterías de ion-Litio

	Estrategia de gestión	Funmet	DPSP (%)	LLP	LA	NPC M US (\$)	COE US (\$)	Emisiones (kg CO₂/año)
1	Seguimiento de carga	4.67	7.74	0.26	0.74	2.65	0.34	800
2	Despacho combinado	2.24	2.07	0.18	0.81	2.71	0.34	814
3	Ciclo de carga	0.15	0.13	0.019	0.98	2.75	0.34	835
4	Despacho Predictivo	0.30	0.13	0.04	0.96	2.76	0.34	845

Debido a la capacidad del generador la estrategia *CC* presenta el valor más bajo de *Funmet* y *DPSP*, el nivel de autonomía es 0.981 lo cual indica que la confiabilidad de la microrred es del 98.1%, en cuanto a los indicadores financieros, el *COE* es el más bajo y el *NPC* está por encima al calculado con las estrategias *LF* y *CD*. Aunque la estrategia ciclo de carga suple la energía demanda a un bajo costo, es causa de un valor alto de emisiones de CO₂.

Teniendo en cuenta que las baterías de ion-Litio y plomo ácido difieren en ciclo de vida útil, porcentaje de profundidad de descarga y porcentaje de auto descarga, se realizó otra simulación con un banco de baterías plomo ácido de 220 kW y se compararon sus resultados con los obtenidos en la simulación con baterías de ion-Litio.

En la tabla 22 es posible observar que los indicadores de confiabilidad *Funmet*, *DPSP* y *LLP* aumentaron en los 4 escenarios, esto indica una reducción de confiabilidad de la microrred. Debido a las limitaciones de las baterías de plomo ácido frente a las de ion-litio, para la estrategia ciclo de carga la confiabilidad del sistema disminuyó a un 94.8%, el *NPC* del proyecto aumentó en 0.13 M US\$, el *COE* aumentó en \$0.17 USD y las emisiones de CO₂ se elevaron en 10 kg/año.

Tabla 22.

Indicadores de desempeño según la estrategia de gestión con baterías de plomo ácido

	Estrategia de gestión	Funmet	DPSP (%)	LLP	LA	NPC M US (\$)	COE US (\$)	Emisiones (kg CO₂/año)
1	Seguimiento de carga	4.63	4.26	0.27	0.73	2.76	0.35	800
2	Despacho combinado	0.94	0.44	0.1	0.9	2.99	0.37	882
3	Ciclo de carga	0.41	0.04	0.05	0.95	2.89	0.35	845
4	Despacho Predictivo	0.41	0.03	0.04	0.96	2.89	0.35	848

En el desarrollo de este capítulo se presentan algunos indicadores de evaluación de costos, evaluación de confiabilidad, financieros, entre otros. Los indicadores de desempeño son usados en modelos de optimización y de decisión multicriterio para el dimensionamiento de microrredes. HOMER Pro contiene algunos indicadores para evaluar aspectos económicos,

financieros, de confiabilidad y ambientales que permiten determinar la viabilidad de una microrred.

Es posible calcular algunos de los indicadores de confiabilidad descritos en la literatura, las horas de carga perdida (*Loss of Loas Hours – LOLH*), *LLP* y *LA* con la información que proporciona el software HOMER Pro para complementar el análisis técnico y financiero del proyecto.

7. Estrategias de dimensionamiento de microrredes

El dimensionamiento de los sistemas híbridos de energía consiste en determinar la capacidad nominal de las fuentes de generación, convertidores y sistemas de almacenamiento de energía, de tal manera que se optimicen los costos y se garantice el suministro de energía en todo momento.

Los temas que se abordan a continuación se exponen de manera más detallada en los documentos correspondientes a las sesiones 15 y 16 de los entregables del seminario de investigación.

7.1. Estrategias de dimensionamiento encontradas en la literatura

El dimensionamiento de los sistemas híbridos de energía puede realizarse de múltiples formas y de acuerdo con diversos enfoques. Los tres enfoques utilizados con mayor frecuencia son el dimensionamiento a partir de la experiencia, el uso de herramientas computacionales y el dimensionamiento óptimo.

El dimensionamiento a partir de la experiencia se usa en proyectos pequeños, que tienen recursos limitados de inversión y con poca información. Los diseñadores usan este enfoque cuando tienen conocimientos en aplicaciones específicas.

El uso de herramientas computacionales es de los enfoques más populares actualmente. El empleo de software para el dimensionamiento es útil ya que se obtienen resultados rápidos y confiables para los casos de estudio.

El dimensionamiento óptimo es flexible y adaptable. Este enfoque requiere de conocimientos avanzados del problema de optimización. Para llevarlo a cabo se debe realizar el planteamiento matemático del problema y posteriormente programarlo en un software.

7.1.1 Software para el dimensionamiento de sistemas híbridos

Los tres software más usados en la literatura para el dimensionamiento de sistemas híbridos son HOMER Pro, Hybrid2 e IHOGA.

HOMER Pro es un software para el dimensionamiento y optimización de sistemas híbridos de energía. Desarrollado por Dr. Peter Lilienthal, miembro del Laboratorio de Energías Renovables de Estados Unidos. Las ventajas de esta herramienta computacional es que tiene una interfaz amigable para el usuario, permite realizar análisis de sensibilidad y obtener un informe detallado de las arquitecturas óptimas. Con respecto a la parte operativa el software no tiene en cuenta la inclinación de los paneles solares fotovoltaicos en la simulación.

Hybrid2 es un programa usado para la simulación del rendimiento y el costo de sistemas híbridos de energía. Desarrollado por ingenieros del Laboratorio Nacional de Energías Renovables y la Universidad de Massachusetts. Este software permite únicamente realizar optimizaciones

mono objetivo. La ventaja es que tiene una interfaz gráfica de resultados que permite una revisión fácil y detallada de la simulación.

IHOGA es un software de simulación y optimización de sistemas híbridos de energía. Desarrollado por investigadores de la Universidad de Zaragoza. Las ventajas es que permite realizar análisis de sensibilidad, optimización mono-objetivo y multi-objetivo y, adicionalmente, en la simulación tiene en cuenta la inclinación de los paneles solares fotovoltaicos. Este software no permite considerar cargas térmicas en los sistemas.

En la tabla 23 se encuentra un cuadro resumen que contiene información sobre el tipo de software, componentes, tipo de carga, características y optimización de los software HOMER Pro, Hybrid2 e IHOGA.

Tabla 23.

Características de los software de dimensionamiento de sistemas híbridos

	Características	Software		
		HOMER Pro	Hybrid2	IHOGA
Tipo de software	Software comercial y pago	✓	x	✓
	Software gratuito	x	✓	x
	Código abierto	x	✓	✓
Componentes	PV - Generador diésel - Baterías	✓	✓	✓
	Turbina eólica	✓	✓	✓
	Turbina hidráulica	✓	✓	✓
	Electrolizador - Tanque de hidrógeno	✓	✓	✓
Tipo de carga	Carga eléctrica	✓	✓	✓
	Carga de hidrógeno	✓	✓	✓
	Carga térmica	✓	✓	x
Características	Estrategias de control	✓	✓	✓
	Simulación	✓	✓	✓
Optimización	Optimización económica	✓	✓	x
	Optimización multiobjetivo	✓	x	✓
	Algoritmo genético	x	x	✓

7.1.2 Dimensionamiento óptimo

El proceso de optimización implica el desarrollo de un modelo matemático apropiado, junto con un algoritmo para resolver un problema representativo. El proceso generalmente se implementa mediante un software de optimización con el fin de hallar la mejor solución dentro de un conjunto de soluciones factibles.

El despacho en un sistema híbrido de energía es la programación que define el modo de operación de las fuentes de generación y de los sistemas de almacenamiento de energía que tiene el sistema para cubrir la demanda.

Existen dos estrategias para realizar el dimensionamiento óptimo, el despacho óptimo y por reglas de forma iterativa. El despacho óptimo se plantea como un problema de optimización matemática y está compuesto por variables de optimización, función objetivo y restricciones. Las variables de optimización son variables que se quieren determinar. La función objetivo busca maximizar o minimizar, para el caso de los sistemas híbridos de energía usualmente se requiere minimizar los costos y las emisiones de gases contaminantes. Las restricciones son funciones que pueden ser igualdades o desigualdades. Las restricciones dan sentido físico al problema y son aquellos valores que las variables de diseño no pueden tomar.

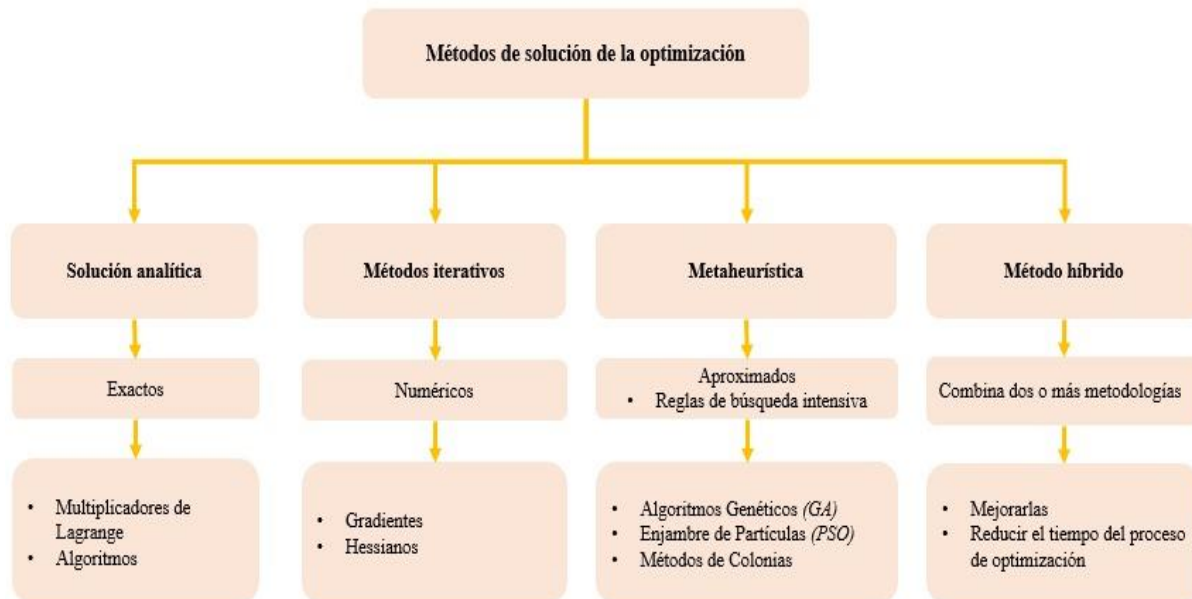
La estrategia por reglas es un proceso iterativo que consiste en el despacho siguiendo reglas. Esta estrategia busca la mejor solución utilizando un algoritmo con el fin de hallar la solución de forma rápida. El algoritmo contiene las restricciones del sistema.

7.1.3 Métodos de solución de los problemas de optimización

Actualmente existe gran variedad de metodologías para el dimensionamiento de sistemas energéticos híbridos. La forma más sencilla de clasificarlos es según su nivel de complejidad en solución analítica, métodos iterativos, metaheurística y método híbrido como se muestra en la Figura 14.

Figura 14.

Métodos de solución de la optimización



La solución analítica es exacta y se realiza a través de los multiplicadores de Lagrange o algunos algoritmos de solución. Los métodos iterativos son numéricos, están basados en Hessianos o gradientes. Un ejemplo de los métodos iterativos son Gauss Seidel y Newton Raphson. La metaheurística es uno de los métodos de solución más recientes pero aproximados. Este método se basa en algoritmos que permiten determinar una solución óptima o mínimo a partir de unas reglas de búsqueda intensiva. Algunos ejemplos de metaheurísticas son los algoritmos genéticos, los

enjambres de partículas y los métodos de colonias. Los métodos híbridos se han propuesto para combinar dos o más metodologías con el fin de mejorarlas y para aumentar su tiempo de convergencia en el proceso de optimización. La metodología híbrida se caracteriza por su flexibilidad y dinámica en el dimensionamiento de los sistemas.

La inteligencia de enjambres es un método de solución metaheurística. Esta es una disciplina que se centra en los comportamientos colectivos que resultan de las interacciones de los individuos entre sí y con su entorno o medioambiente al igual que lo hacen los enjambres naturales. En este método los individuos tienden a seguir a un líder.

La optimización de enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization – PSO*) es un método inspirado en ciertos comportamientos sociales. En este método se considera un enjambre de partículas donde la posición de cada una de ellas representa un posible punto de solución en el espacio del problema de diseño. Cada partícula se denota por su posición y velocidad. Es un proceso iterativo en el cual cada partícula registra continuamente la mejor solución. Las reglas que modelan este tipo de método son tres el histórico, el entorno y la experiencia. El histórico permite a las partículas recordar la ubicación, el entorno es la valoración de la posición de cada una y la experiencia hace referencia a la comunicación.

Los algoritmos genéticos (*Genetic Algorithm – GA*) son métodos de optimización inspirados en mecanismos biológicos tales como la mutación, cruce, selección natural y supervivencia de los más aptos. Estos mecanismos son los que guían la búsqueda del óptimo. Con este método se encuentran soluciones muy eficientes en poco tiempo de computación.

En términos generales la estructura de un algoritmo genético para optimizar una función con una o múltiples variables sigue los siguientes pasos. Como primer paso se inicializa

aleatoriamente una población de individuos. En este caso, cada individuo representa una combinación de valores de variables. En el segundo paso los valores de las funciones objetivo son computados para cada solución candidata en la población. Con los valores de las funciones objetivo se determina la utilidad de las diferentes características de las soluciones candidatas y se le asigna un valor de aptitud a cada una de ellas. Como tercer paso se realiza un proceso de selección de las soluciones candidatas en las que los individuos con mejores aptitudes tengan una mayor probabilidad de heredar sus características a la siguiente generación. En el cuarto paso se realiza la fase de reproducción en la que se crea la descendencia utilizando las operaciones de reproducción. Se cruzan dos individuos de la población existente para generar un nuevo descendiente. Finalmente, se aplica un proceso de mutación aleatorio sobre el nuevo individuo y se añade a la población. Si se cumple el criterio de parada se detiene el proceso de optimización, si no se regresa al segundo paso.

7.1.4 Método de solución de problemas de optimización usado por el software HOMER Pro

El método que utiliza HOMER Pro para el diseño multiobjetivo se conoce como método de las ponderaciones. El método de las ponderaciones se basa en la idea de convertir el problema multiobjetivo en uno escalar. Se construye una función objetivo que sea suma de las funciones objetivo de partida. Las funciones se ponderan según un peso relativo que se le asigne a cada una de ellas. De esta forma, para cada ponderación posible, se obtiene un problema escalar que consiste en minimizar la función resultante, sujeta a las restricciones del problema original.

Las ventajas del método de las ponderaciones es que es un método sencillo de aplicar y sí las ponderaciones están bien asignadas se obtiene una solución eficiente. La desventaja es que en caso de existir muchas restricciones, conlleva una gran cantidad de tiempo resolver el problema.

7.2. Dimensionamiento a partir de la programación lineal

7.2.1 Programación lineal

La programación lineal se caracteriza por tener restricciones y función objetivo de forma lineal. Las técnicas de programación lineal minimizan el costo de producción promedio de energía cumpliendo los requisitos de carga de forma fiable, y teniendo en cuenta los factores ambientales. En este documento nos enfocaremos en atender la carga de forma fiable con el menor costo.

Para el planteamiento del problema de programación lineal se considera la necesidad energética, los recursos energéticos del lugar de estudio, la formulación matemática de los componentes del sistema, la función objetivo y las restricciones. La solución del problema se realiza utilizando un algoritmo desarrollado en Matlab. El algoritmo permite dimensionar una microrred con paneles fotovoltaicos, turbina eólica, baterías y generador diésel.

El algoritmo tiene como variables de entrada la necesidad energética, los recursos energéticos, las características técnicas de los componentes y los costos asociados. Como salidas presenta la cantidad de componentes, el costo total, el cumplimiento de las restricciones, la potencia suministrada por cada fuente de energía y el estado de carga de las baterías.

La necesidad energética se refiere a la carga que se desea atender. Los recursos energéticos son el suministro que se requiere para transformar la energía como la irradiancia, la temperatura y la velocidad del viento. La Tabla 24 presenta los parámetros considerados en el problema de programación lineal.

Tabla 24.

Parámetros del problema de programación lineal

Parámetro	Descripción
Modelo del sistema fotovoltaico	La potencia producida por un panel depende de las características del panel fotovoltaico, la irradiancia y la temperatura
Modelo de la turbina eólica	La potencia generada por una turbina eólica depende directamente de la velocidad del viento
Modelo de las baterías	Para las baterías es importante hallar el estado de carga en cada instante de tiempo. El estado de carga indica la cantidad de energía almacenada
Modelo del generador diésel	En el generador diésel es importante conocer el consumo de combustible ya que nos permite saber cuánto se debe invertir en costos por combustible cada año.
Modelo económico	El modelo económico incluye los costos por consumo de combustible y los costos por operación y mantenimiento del generador diésel.
Función objetivo	La función objetivo es la ecuación que será minimizada o maximizada cumpliendo con la condiciones o restricciones dadas.
<i>CAPEX</i>	Es el costo de compra e instalación de los componentes del sistema
<i>OPEX</i>	Son los costos de operación y mantenimiento de cada componente
Restricciones	
Balance de potencia	Con la restricción de balance de potencia se asegura que la potencia suministrada por las fuentes de energía igual a la potencia de la carga.
Límite de potencia del generador diésel	Con esta restricción se limita la potencia del generador diésel entre cero y su potencia nominal.
Carga y descarga de las baterías	Esta restricción considera la potencia máxima de carga y la potencia máxima de descarga de la batería.
Confiabilidad	Para evaluar la confiabilidad se utiliza el indicador <i>LPSP</i> que muestra el porcentaje de potencia que no se suministra y se calcula como la relación entre la potencia que no se suministra y la demanda total.
Estado de carga	La restricción de estado de carga garantiza que la energía de la batería se encuentre entre el estado de carga mínimo y el estado de carga máximo.

7.2.2 Comparación de resultados entre la solución con programación lineal y HOMER Pro

Para realizar la comparación de resultados se tomó un caso de estudio que corresponde a una microrred aislada en JNTUK Vizianagaram India (Sandeep, Vakula, 2016). Los componentes de la microrred son paneles fotovoltaicos de 300 W, baterías de 1 kWh y generador diésel de 1 kW con los cuales se desea atender una carga promedio mensual de 514.4 kWh.

La arquitectura obtenida del problema de programación lineal está conformada por siete paneles fotovoltaicos, ocho baterías de plomo ácido y un generador diésel. Se verificó el cumplimiento de la restricción de confiabilidad, *LPSP* menor al 5%. De lo anterior se concluye que la estrategia de dimensionamiento a partir de la programación lineal permite encontrar una configuración con capacidad de suplir la demanda del sistema.

La arquitectura ganadora obtenida de HOMER Pro está conformada por un sistema fotovoltaico de 1120 W, que representa aproximadamente 4 paneles fotovoltaicos de 300W, un generador diésel de 1 kW y 9 baterías de 1 kWh de plomo ácido. Otra arquitectura obtenida con HOMER Pro está conformada por 7 paneles fotovoltaicos, 1 generador diésel y 6 baterías de plomo ácido.

Se observa que la cantidad de componentes obtenidos con programación lineal es diferente a la obtenida con HOMER Pro. Esta diferencia se debe a la cantidad de restricciones, la formulación matemática y el despacho de energía de cada estrategia de solución.

El despacho de energía con programación lineal se realiza a partir de la producción de las fuentes renovables y las baterías. El generador diésel se utiliza cuando éstas no pueden suplir la carga. El despacho con HOMER Pro se realiza acorde a la estrategia de ciclo de carga. En esta estrategia primero se despachan las fuentes renovables y baterías, a diferencia de la programación

lineal, en la cual el generador diésel supe la carga cuando se requiere y carga las baterías.

Los tres enfoques utilizados con mayor frecuencia en el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía son a partir de la experiencia, el uso de herramientas computacionales y el dimensionamiento óptimo. Actualmente los software IHOGA, Hybrid2 y HOMER Pro son usados ampliamente en el dimensionamiento de estos sistemas.

Para el caso de estudio analizado la programación lineal resultó ser una estrategia apropiada para realizar el dimensionamiento del sistema híbrido de energía, ya que sus resultados dan cumplimiento a las restricciones de confiabilidad planteadas.

8. Conclusiones

Por medio de la modalidad de seminario de investigación fue posible proporcionar información útil, que permite apropiar los conceptos básicos del funcionamiento del software e interpretar algunos aspectos de los resultados, como aquellos de carácter técnico, operativo y financiero; pues se lleva a cabo la creación de material tanto escrito como audiovisual que facilita el aprendizaje de estos temas.

La modalidad de trabajo de grado seminario de investigación permite que sus integrantes fortalezcan habilidades comunicativas y de investigación científica. También promueve el trabajo en equipo y la creación de material didáctico para presentar los temas de interés.

Es recomendable que se realice un estudio previo del potencial energético de los recursos del lugar y la carga a suplir con el fin de definir los tipos de componentes de generación que van a ser seleccionados en el software. HOMER Pro realiza la simulación de las posibles arquitecturas para el caso de estudio implementado, pero es el usuario quien debe definir en primer lugar los componentes que podrían hacer parte de dichas arquitecturas.

En el dimensionamiento de una microrred es importante definir adecuadamente la tecnología de almacenamiento y la estrategia de gestión debido a la influencia que presentan en este proceso. Se recomienda seleccionar la estrategia de gestión de energía de acuerdo con el potencial energético y la variabilidad meteorológica del lugar de estudio.

Los gráficos de sensibilidad obtenidos al realizar una simulación en HOMER Pro, permiten identificar las características de las arquitecturas al modificar el valor de una variable determinada, así como reconocer aquella que influye más en un resultado.

HOMER Pro está enfocado principalmente en la etapa de dimensionamiento de microrredes. Su interacción con otros software considera variables de entrada adicionales que permiten realizar dicha etapa de forma más precisa. Además, complementa su alcance en algunos aspectos de la etapa de diseño; por lo tanto, es necesario tener claro el enfoque y las necesidades energéticas del proyecto para tomar la decisión de implementar alguna interacción con otro software.

Con el fin de apropiarse del manejo del software es importante realizar una revisión de la fundamentación teórica además de un ejercicio de interpretación, aplicación y exposición de los aspectos que hacen parte de la planificación y el diseño de microrredes; sus componentes de generación, estrategias de gestión, tecnologías de almacenamiento, indicadores de desempeño y estrategias de dimensionamiento.

9. Entregables del seminario de investigación

Como resultado final se tiene una carpeta en Drive para cada una de las dieciséis (16) sesiones, donde se incluye la totalidad de la temática. Cada sesión cuenta con un documento

técnico, una presentación con la información sintetizada y videos con la explicación del tema.

Debe solicitarse al director del trabajo de grado el acceso a esta información.

Referencias bibliográficas

- Alam, M. N., Chakrabarti, S., & Ghosh, A. (2019). Networked Microgrids : State-of-the-Art and Future Perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3), 1238–1250.
- Dash, R. L., Behera, L., Mohanty, B., & Kumar Hota, P. (2018). Cost and sensitivity analysis of a microgrid using HOMER-Pro software in both grid connected and standalone mode. *International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics and Communication Engineering, ICRIEECE*, 3444–3449. <https://doi.org/10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009218>
- Diaf, S., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2008). Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island. *Energy Policy*, 36, 743–754. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.028>
- Gaviria Cataño, F. A., & Gómez Leal, J. C. (2018). Metodología De Optimización Para MG Eléctricas En Zonas No InterconectadaS. In *Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali*.
- Gonzáles Santacruz, C. A. (2015). *Análisis Técnico de los Diferentes Tipos de Baterías Comercialmente Disponibles para su Integración en el Proyecto de una Microrred Aislada* (Vol. 151). Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad de Ingeniería, Colombia.
- Irigoyen Tineo, A. (2017). *Energy Management System Benchmarking for a Remote Microgrid*. Universidad Carlos III de Madrid, España.
- Jiménez, I. E. (2021). *Dimensionamiento de microrredes usando lp*. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Khan, F. A., Pal, N., & Saeed, S. H. (2018). Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(April), 937–947. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.107>
- Khasawneh, H. J., Mondal, A., Illindala, M. S., Schenkman, B. L., & Borneo, D. R. (2015, September 14). Evaluation and Sizing of Energy Storage Systems for Microgrids. *2015 IEEE/IAS 51st Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, I and CPS*. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2015.7266408>

- Khasawneh, H. J., Mustafa, M. B., Al-Salaymeh, A., & Saidan, M. (2019). Techno-Economic Evaluation of On-Grid Battery Energy Storage System in Jordan using Homer Pro. *IEEE AEIT*.
- Kondili, E. (2010). Design and performance optimisation of stand-alone and hybrid wind energy systems. In *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845699628.1.81>
- Lian, J., Zhang, Y., Ma, C., Yang, Y., & Chaima, E. (2019). A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112027>
- Lilienthal, P. (2020). *HOMER Pro 3.14 User Manual*. HOMER ENERGY. <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>
- Madtharad, C., & Chinabut, T. (2018). Microgrid Design for Rural Island in PEA Area. *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC*. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541848>
- Nayak, A., Kasturi, K., & Nayak, M. R. (2018). Cycle-charging dispatch strategy based performance analysis for standalone PV system with DG & BESS. *International Conference on Technologies for Smart City Energy Security and Power: Smart Solutions for Smart Cities, ICSESP*. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376672>
- Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., & Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, 3, 890–925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>
- Rose, M. F., Merryman, S. A., & Johnson, C. R. (1991). Comparative Analysis of Energy Storage Media and Techniques. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 6(12), 26–32. <https://doi.org/10.1109/62.121935>
- Salles, D. M., Da Silva, D. P., Matias, C. A., Domingues, E. G., Pinto, L. S., Milograna, J., & Calixto, W. P. (2017). Behavior of temperature in photovoltaic panels installed on surfaces with different albedo indexes. *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967346>
- Sarmiento, T., Escudero, I., Valencia, J., & Muñoz, Y. (2021). Análisis de viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER. In *Universidad Industrial de Santander*.

Shezan, S. A., Hasan, K. N., & Datta, M. (2019). Optimal Sizing of an Islanded Hybrid Microgrid Considering Alternative Dispatch Strategies. *Australasian Universities Power Engineering Conference*.

Tello-Maita, J., & Marulanda-Guerra, A. (2017). Optimization models for power systems in the evolution to smart grids: A review. *Dyna*, 84(202), 102–111.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.63354>

Zhang, L., Wang, F., Xu, Y., Yeh, C. H., & Zhou, P. (2021). Evaluating and Selecting Renewable Energy Sources for a Microgrid: A Bi-Capacity-Based Multi-Criteria Decision Making Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12, 921–931.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3024553>