

Análisis de la viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER

Andrea Tatiana Sarmiento Barrera, Iván Andrés Escudero Paredes, Jaime Fabian Valencia

Correa, Yulieth Muñoz Blanco

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica

Codirectores

Ing. Iván Edgardo Jiménez Vargas

Ing. Marlon Millán Martínez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a nuestro director, el profesor German Alfonso Osma Pinto, por su desempeño y su pasión al ser nuestro guía en este último proceso de formación académica en pregrado. A los ingenieros Iván Edgardo Jiménez Vargas y Marlon Millán Martínez, por su interés, dedicación y comprensión para con nosotros y el desarrollo del seminario. Por último, dejamos un mensaje de agradecimiento y reconciliación al estudiante de ingeniería eléctrica Francisco Javier Castro Bitar, por compartir sus conocimientos, habilidades y ser parte crucial en el desarrollo de este trabajo de grado, lamentamos los malentendidos y extendemos nuestro más profundo y sincero agradecimiento.

Andrea Tatiana Sarmiento Barrera

Iván Andrés Escudero Paredes

Jaime Fabian Valencia Correa

Yulieth Muñoz Blanco

A Dios, por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado salud para culminar esta hermosa etapa. A mis padres, Jaime y Gladys, mi orgullo y mi motivación, quienes creyeron en mí y me apoyaron día a día con su amor y esfuerzo. A mis abuelos, Evaristo y Cleofelina, mi más grande tesoro, por ser la principal inspiración de mis actitudes ante la vida y haberme llenado los bolsillos con monedas de amor. A mi hermana Zulith, para que al igual que yo pueda estudiar, gozar y defender con todo su aliento la universidad pública. A Laura, por brindarme su amor, comprensión, apoyo y presencia incondicional. A mi tía, primos y demás familiares en la tierra y en el cielo, quienes me regalaron una maravillosa cotidianidad de afecto. A mis compañeros y profesores, por compartir conmigo su tiempo y sus conocimientos. Al movimiento estudiantil, por inculcar en mí la conciencia, la reflexión y bajo la bandera de la unidad, la construcción de una Colombia para los colombianos.

Jaime Fabian Valencia Correa

Agradezco a mis padres por su gran apoyo incondicional en esta etapa de mi vida porque sin ellos no habría sido posible este logro, agradezco a mi hermana por su enorme apoyo y cariño, agradezco también a mis tíos, tías y primos por su interés y respaldo, agradezco a mis amigos con los que pude compartir todos estos años de angustias y alegrías, a mis compañeros de proyecto de grado por su entrega y momentos compartidos, agradezco también a mi director y codirectores por su constante apoyo, por estar siempre pendientes de nosotros y sus consejos, agradezco a todas las personas que estuvieron ahí en este proceso de enseñanza, mis sinceros agradecimientos a todos, este logro también es de ustedes.

Iván Andrés Escudero Paredes

Agradezco a Dios por permitirme terminar mi carrera y compartir esta felicidad con mi familia, a mis padres por el apoyo incondicional que me han dado en mi proceso de formación, porque fueron ellos quienes me dieron la fuerza para no rendirme y luchar por mi futuro, a mi hermano quien siempre ha estado ahí para escucharme y darme todo su amor. A Johan quien ha estado ahí en los momentos difíciles dándome su apoyo, amor, consejos y acompañarme en parte de este proceso. A los amigos que me regalo esta etapa de mi vida quienes también fueron un apoyo y que se volvieron parte de mi familia.

Para terminar, le agradezco al profesor German Osma, por brindar tiempo y conocimiento a este proyecto y a los codirectores por Iván Jiménez Marlon Millán por sus observaciones y compartir su conocimiento para culminar este proceso.

Andrea Tatiana Sarmiento Barrera

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición me ha permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Agradezco de manera especial, a mi mamá, Jeanneth Blanco, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad, por enseñarme a no temer a las adversidades porque Dios está conmigo siempre. A mi papá, Pacifico Muñoz, por su fortaleza, virtudes y valores inculcados en mí, por encaminarme en esta profesión y dejarme este hermoso legado. A mis Hermanos, Diana Marcela, Nury Adriana y Edwin Fabián por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí a lo largo de la preparación de esta profesión. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. A mi primo Fredy Muñoz, gracias por darme la fortaleza para iniciar este gran sueño y enseñarme a creer en mis capacidades.

Quiero agradecer a mi grupo de amigos de la escuela, con quienes estuve desde el comienzo de esta meta, por acompañarme, ayudarme cuando más los necesitaba, por darme ánimos para no decaer y enseñarme a tener fortaleza para enfrentar cualquier obstáculo. También, a cada uno de mis compañeros de carrera que me acompañaron a lo largo de este camino, aprendí mucho de cada uno de ustedes.

Yulieth Muñoz Blanco

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Dimensionamiento de una MG en HOMER.....	26
1.1 Consulta de información.....	27
1.1.1 Recursos disponibles en la zona.	28
1.1.2 Condiciones económicas.....	28
1.2 Estimar los perfiles de carga.....	29
1.3 Selección de componentes de una MG en HOMER.....	31
1.3.1 Fuentes de generación.....	31
1.3.2 Sistemas de almacenamiento.	33
1.3.3 Electrónica de potencia.....	34
1.3.4 Controlador.	36
1.4 Simulación en HOMER Pro.....	38
1.5 Resultados de la simulación.....	41
2. Análisis de operación en HOMER.....	45
2.1 Análisis de operación de una MG con HOMER.....	46
2.1.1 Operación de la MG en Villavicencio Meta.	47
2.1.2. Selección de los escenarios de operación.	50
3. Descripción de esquema de análisis financiero que emplea HOMER.....	55

3.1 HOMER Pro para el análisis financiero de una MG.....	55
3.2 Esquema de análisis financiero	56
3.2.1 Descripción del esquema (Información de entrada a HOMER Pro).....	57
3.2.2 Descripción del esquema (información de salida de HOMER Pro).	59
3.3 Argumento del esquema de análisis financiero generado para HOMER	61
3.3.1 Información financiera de entrada en el caso de estudio.	62
3.3.2 Información financiera de salida al caso de estudio.	63
3.3.3 Afectación de resultados por la relación entre información de entrada y salida.	64
4. Comparación financiera entre MG utilizando el estudio de viabilidad técnico-económico.....	66
4.1 Viabilidad técnico-económica	66
4.2 Estudio de viabilidad en HOMER Pro.....	70
4.3 Comparación financiera de dos MG.	72
5. Guía para dimensionar y analizar operacionalmente MG con HOMER PRO.....	76
6. Conclusiones.....	77
7. Entregables del seminario de investigación.....	79
Referencias Bibliográficas	81

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Desarrollo de los capítulos del seminario.....	20
Figura 2. Elementos para el diseño de una MG a partir de HOMER Pro.....	27
Figura 3. Interfaz en HOMER Pro donde se importan los recursos e ingresan las condiciones económicas de la zona	29
Figura 4. Interfaz de carga eléctrica en HOMER Pro.....	30
Figura 5. Interfaz del sistema fotovoltaico en HOMER Pro.....	32
Figura 6. Interfaz sistema de almacenamiento en HOMER Pro.....	34
Figura 7. (a) Convertidor operando como inversor y (b) convertidor operando como rectificador	35
Figura 8. Interfaz convertidor en HOMER Pro	35
Figura 9. Interfaz de optimizador avanzado de HOMER	39
Figura 10. Ajustes del optimizador en HOMER Pro	40
Figura 11. Configuraciones de optimización en HOMER Pro	41
Figura 12. Configuraciones de optimización en HOMER Pro	42
Figura 13. Esquema de resultados de simulación en HOMER Pro	44
Figura 14. Esquema de descripción de las etapas de dimensionamiento de una MG en HOMER Pro.....	45
Figura 15. Capacidad de funcionamiento de las fuentes de energía el 07 de abril	47

Figura 16. Perfil de generación vs carga de la MG el 07 de abril.....	48
Figura 17. Estado de carga del sistema de almacenamiento de la MG el 07 de abril.....	49
Figura 18. Flujo de potencias a las 03:00 el 07 de abril	50
Figura 19. Flujo de potencia a las 06:00 el 07 de abril	51
Figura 20. Flujo de potencia a las 16:00 el 07 de abril	52
Figura 21. Flujo de potencias MG a las 16:00 el 07 de abril	53
Figura 22. Flujos de potencias para el 19:00 el 07 de abril	54
Figura 23. Esquema de entradas y salidas financieras para el análisis financiero en HOMER Pro.....	56
Figura 24. Esquema de entradas y salidas financieras para el análisis financiero en HOMER Pro.....	64
Figura 25. Estudio de viabilidad de MG.....	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Listado de las sesiones realizadas para el desarrollo del seminario	21
Tabla 2. Estrategias de despacho disponibles en HOMER Pro	36
Tabla 3. Componentes de HOMER Pro y su función.....	37
Tabla 4. Resultados de simulación de la MG por componente.....	42
Tabla 5. Descripción del esquema de análisis financiero (Parámetros de ingreso en HOMER Pro).....	57
Tabla 6. Descripción del esquema de análisis financiero (parámetros de salida de HOMER Pro).....	60
Tabla 7. Información financiera de entrada en HOMER Pro (caso de estudio)	62
Tabla 8. Información financiera de salida de HOMER Pro (caso estudio)	64
Tabla 9. Verificación de relación de información financiera de entrada y salida.....	65
Tabla 10. Criterios de viabilidad para MG	68
Tabla 11. Configuraciones de viabilidad para MG.....	73
Tabla 12. Criterios financieros de viabilidad para MG.....	74
Tabla 13. Criterios financieros de viabilidad para MG.....	75
Tabla 14. Criterios ambientales de viabilidad para MG	75
Tabla 15. Contenido de los entregables del seminario de investigación	79

Lista de Apéndices

Ver apéndice P adjunto y puede ser consultado en la base de datos de la Biblioteca UIS, los demás apéndices pueden ser consultados con el semillero SIGED

Apéndice A. Sesión 1

Apéndice B. Sesión 2

Apéndice C. Sesión 3

Apéndice D. Sesión 4

Apéndice E. Sesión 5

Apéndice F. Sesión 6

Apéndice G. Sesión 7

Apéndice H. Sesión 8

Apéndice I. Sesión 9

Apéndice J. Sesión 10

Apéndice K. Sesión 11

Apéndice L. Sesión 12

Apéndice M. Sesión 13

Apéndice N. Sesión 14

Apéndice O. Sesión 15

Apéndice P. Guía técnica para dimensionar y analizar operacionalmente MG con HOMER Pro

Resumen

Título: Análisis de viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER*

Autor: Andrea Tatiana Sarmiento Barrera, Iván Andrés Escudero Paredes, Jaime Fabián Valencia Correa, Yulieth Muñoz Blanco**

Palabras Clave: Microrredes, HOMER, análisis financiero, viabilidad técnico-económica.

Descripción:

Este proyecto se realizó bajo la modalidad de seminario de investigación y en él se trató lo referente a dimensionamiento de microrredes utilizando HOMER Pro, donde se procedió con una contextualización sobre MG, identificación de etapas para el dimensionamiento, comparación entre los dos softwares de la compañía HOMER Energy, y estudio de los parámetros y resultados de HOMER Pro. Posteriormente se trató el análisis de operación de MG incluyendo escenarios de operación, definiciones, ejemplos de dimensionamiento y el alcance de HOMER Pro en el análisis de operación de una MG. Seguidamente se trató la parte financiera del software identificando sus parámetros de entrada y analizando la información financiera de los resultados de simulación, finalmente se trató la viabilidad técnico-económica de MG por medio de definiciones, utilización de indicadores, criterios de viabilidad y su aplicación a MG dimensionadas con HOMER Pro. En este proceso se logró un fortalecimiento en las habilidades de investigación científica y mejoras en la expresión oral de cada participante, así como un fortalecimiento en el trabajo grupal, por otro lado, se logró una apropiación del software HOMER Pro y HOMER Grid para el dimensionamiento de MG, también una adquisición de conocimientos fundamentales sobre MG en general propiciando así el dimensionamiento de múltiples ejemplos de aplicación de MG, la construcción de una lista de chequeo de criterios de viabilidad, un formato de reporte de viabilidad de MG, y una guía técnica de consulta para usuarios de HOMER Pro.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MSc. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirector: Ing. Iván Edgardo Jiménez Vargas, Ing. Marlon Millán Martínez

Abstract

Title: Technical-economic viability analysis of the implementation of microgrids, using the HOMER computer tool*

Author: Andrea Tatiana Sarmiento Barrera, Iván Andrés Escudero Paredes, Jaime Fabián Valencia Correa, Yulieth Muñoz Blanco **

Key Words: Microgrid, HOMER software, analysis, viability, users.

Description:

This project was carried out in the form of a research seminar and it dealt with the dimensioning of microgrids using HOMER Pro, where we proceeded with a contextualization on MG, identification of stages for dimensioning, comparison between the two company softwares HOMER Energy, and study of the parameters and results of HOMER Pro. Subsequently, the MG operation analysis was discussed including operation scenarios, definitions, sizing examples and the scope of HOMER Pro in the operation analysis of a MG. Next, the financial part of the software was discussed, identifying its input parameters and analyzing the financial information of the simulation results. Finally, the technical-economic viability of MG was discussed through definitions, use of indicators, feasibility criteria and its application to MG sized with HOMER Pro. In this process, a strengthening in scientific research skills and improvements in the oral expression of each participant was achieved, as well as a strengthening in group work, on the other hand, an appropriation of the HOMER Pro and HOMER Grid software for dimensioning was achieved. of MG, also an acquisition of fundamental knowledge about MG in general, thus facilitating the sizing of multiple examples of application of MG, the construction of a checklist of feasibility criteria, a format of MG feasibility report, and a technical guide for HOMER Pro users.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: MSc. Germán Alfonso Osma Pinto. Codirector: Ing. Iván Edgardo Jiménez Vargas, Ing. Marlon Millán Martínez

Introducción

Las microrredes eléctricas (MG) se proyectan como una opción para el suministro de energía de la población que no cuentan con la interconexión a la red convencional (Shyu, 2014). Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos, las MG son "un grupo de cargas interconectadas y recursos de energía distribuida dentro de límites eléctricos claramente definidos, que actúan como una entidad controlable y única con respecto a la red. Una MG puede conectarse y desconectarse de la red para permitir que funcione tanto en modo conectado a la red como en modo aislado" (Parkin, 2019).

Este tipo de sistemas son relativamente nuevos y complejos, debido a que, generalmente, involucran más de una fuente de energía, su planificación y análisis siguen siendo un desafío (Husein y Chung, 2018). El proceso de planificación incluye: selección de tecnologías, dimensionamiento de recursos de energía distribuida, simulación de operación óptima, para garantizar que se cumplan todos los criterios y restricciones de confiabilidad, estudio de la viabilidad financiera del sistema y análisis de incertidumbre para la gestión riesgos (Husein y Chung, 2018).

Actualmente, existen herramientas computacionales que permiten afrontar estos desafíos con la simulación y proyección de MG apoyadas en los recursos renovables. Evidentemente no existe una herramienta que aborde todos los problemas relacionados con la integración de estos recursos, sin embargo, el software 'ideal' depende en gran medida de las aplicaciones específicas que deban cumplirse.

En ese contexto, existe una amplia gama de herramientas de dimensionamiento energético disponibles, son diversas en términos de objetivos que cumplen y tecnologías que consideran (Kumar, Singh, Deng y P. Kumar, 2018). Entre las comunes en un escenario internacional se destacan BHP Screening Tool, HOMER Pro¹, HYDROGEMS, IHOGA y TRNSYS, ya que se centran en aplicaciones independientes de energía renovable, como edificios individuales, comunidades locales o proyectos únicos (Kumar, Singh, Deng y P. Kumar, 2018).

El software HOMER Pro, desarrollado por HOMER Energy LLC. Simula y optimiza sistemas de energía independientes y conectados a la red con cualquier combinación de turbinas eólicas, conjuntos fotovoltaicos, energía hidroeléctrica, energía de biomasa, grupos electrógenos, microturbinas y sistemas de almacenamiento, sirve tanto a cargas eléctricas como térmicas, integra todos los costos del sistema, realiza un análisis de sensibilidad, lo que puede ayudar al diseñador en un análisis del "qué pasaría si" e investigar los efectos de la incertidumbre o los cambios en las variables de entrada (Lund, Mathiesen, & Leahy, 2010).

Por otra parte, el software HOMER Grid permite dimensionar MG conectadas a la red con algoritmos basados en HOMER Pro. Aunque está diseñado para sistemas conectados a la red, también puede modelar MG fuera de la red en el caso de una interrupción prolongada del suministro energético. En general, optimiza la generación y el almacenamiento reduciendo los costos generales de energía (HOMER Energy).

Para el caso de la E3T, el profesor German Osma comentó "se evidenció la carencia de apropiación de este tipo de herramientas software, como HOMER Pro, lo cual se debe a la falta de capacitación dirigida por personal experto o de documentación específica que permita un proceso autodidacta intensivo de aprendizaje de su uso. Aunque HOMER Energy LLC pone varios

¹ Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

recursos a disposición de los usuarios, es necesario contar con recursos más especializados que faciliten el uso de HOMER Pro a miembros de la comunidad E3T, los cuales deben mostrar de manera detallada cómo interactuar con esta herramienta e interpretar los resultados para casos específicos” (G. Osma, 26 de agosto de 2019).

Existen diversos estudios en la literatura sobre diseño de MG basados en fuentes de energía renovables que utilizan diferentes métodos (técnicas de computación flexible), técnicas de optimización (individuales y múltiples) y herramientas de software populares como HOMER Pro (Kumar, Singh, Deng y P. Kumar, 2018). Sin embargo, dichos estudios se resumen en función de su ubicación, año, arquitectura (esquemas aislados centralizados y descentralizados y esquemas conectados a la red centralizado y descentralizados) junto con aspectos técnicos (detalles de componentes, estrategia de despacho como el ciclo de carga, tipo de carga y fracción de renovables respectivamente) (Kumar, Singh, Deng y P. Kumar, 2018).

Por consiguiente, este trabajo de grado se propone como una herramienta agregada para futuros usuarios de HOMER. A diferencia de la literatura existente, se ahonda de manera general en las características operativas de las herramientas de computación, se formulan propuestas para la evaluación de viabilidad de proyectos de MG y los hallazgos relevantes se recogen en un documento de consulta estudiantil que brinda practicidad en el uso y modelado de MG.

El trabajo de grado fue desarrollado en modalidad seminario de investigación, con un total de dieciséis sesiones. Articula la docencia e investigación para la adquisición de competencias interpretativas, argumentativas y propositivas en los estudiantes participes. Según el Acuerdo Superior 4 de 2007 esta modalidad es definida como “Un proceso reflexivo, sistemático y crítico que tiene como propósito fortalecer en el estudiante las habilidades requeridas en el manejo de la información y la comunicación para desarrollar investigación científica, valiéndose de la

formación para el trabajo tanto personal como en equipo, y original sobre un tema específico. Asimismo, busca iniciar el estudio de nuevos objetos de investigación de interés para la Escuela” (Universidad Industrial de Santander, 2020).

Los recursos desarrollados permitirán apropiarse de manera clara, práctica y rápida la utilización de la herramienta computacional HOMER Pro, lo cual estará en consonancia con el quehacer investigativo en pregrado y posgrado del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) (Universidad Industrial de Santander, 2019), en la línea estratégica del uso racional de la energía (URE) y energías renovables (ER).

El objetivo general de este trabajo de grado consiste en *Realizar un análisis de viabilidad técnico-económica de proyectos de microrredes aisladas y conectadas a la red, a partir de la aprobación de las etapas de dimensionamiento y análisis de operación de las mismas a partir de la herramienta computacional HOMER*. Para su desarrollo, se definieron los siguientes objetivos específicos:

OE1: Identificar las etapas del proceso de dimensionamiento de una microrred en HOMER para su aplicación en el seminario mediante el estudio del software.

OE2: Realizar un análisis de operación de una microrred dimensionada a partir de simulaciones.

OE3: Describir el esquema de análisis financiero empleado por HOMER con el fin de definir los parámetros que son utilizados por medio del estudio de los resultados obtenidos por él.

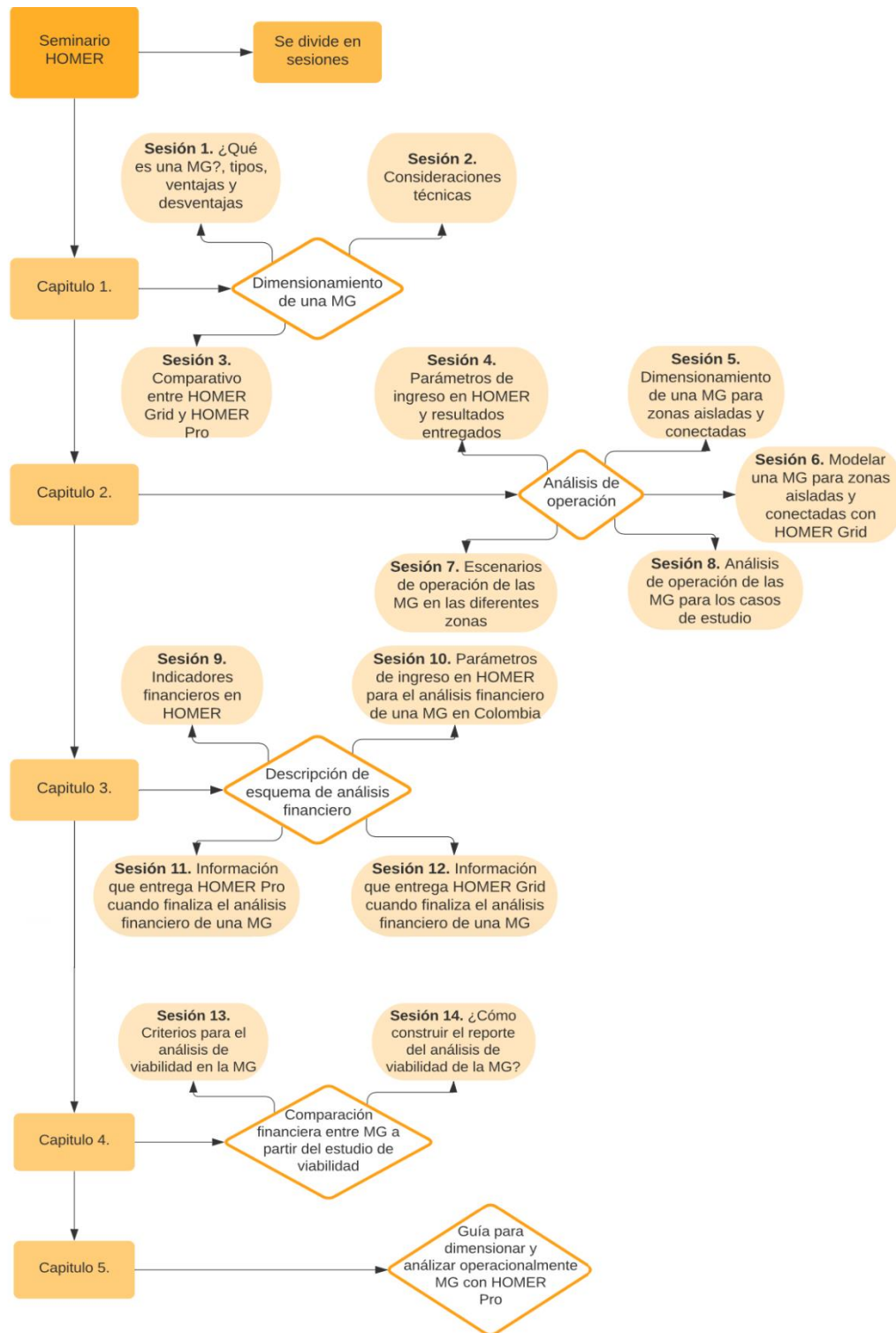
OE4: Realizar un estudio de viabilidad técnico-económica para una microrred interconectada a la red y aislada a la red con el fin de realizar una comparación financiera entre los dos escenarios.

OE5: Elaborar una guía para el dimensionamiento y análisis de operación de microrredes usando HOMER orientado a la formación de pregrado de Ingeniería Eléctrica E3T.

Con el fin de relacionar objetivos, sesiones, capítulos y facilitar la lectura del presente documento, la Figura 1 presenta un esbozo que contiene la estructura general y desarrollo del seminario de investigación.

Figura 1.

Desarrollo de los capítulos del seminario.



Cada sesión, mide avances de los objetivos propuestos por medio de una valoración grupal de cada temática considerando las condiciones de riesgos, restricciones y lineamientos de la modalidad de trabajo de grado (Universidad Industrial de Santander, 2007).

Cada integrante ejecuta un rol con una descripción específica en cada sesión, para una posterior defensa presencial del tema asignado. Luego del desarrollo de este trabajo de grado, el seminario presenta un documento técnico de consulta para usuarios de HOMER Pro, dirigido a estudiantes de ingeniería eléctrica de la E3T.

Para la ejecución de los objetivos proyectados en este trabajo de grado, se plantean tópicos (subtemas) a tratar en sesiones presenciales o virtuales con respecto al acontecer universitario. Un conjunto específico de sesiones aprobadas por el director y codirectores del seminario, convergen en el cumplimiento de un objetivo específico consignado en un capítulo puntual del presente documento. En ese sentido, existen dieciséis tópicos de estudio elegidos por consenso de los participantes del seminario, distribuidos en sesiones semanales y presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1.

Listado de las sesiones realizadas para el desarrollo del seminario

Sesión	Tema(s) de las sesiones	Hallazgos
1	¿Qué es una MG? y tipos de MG Ventajas y desventajas de una MG	Se identificaron las necesidades que tienen los usuarios que se encuentran en ZNI o su disponibilidad energética para implementar una MG, su tipo de funcionalidad y los componentes necesarios en cada una de estas.
2	Consideraciones técnicas para el dimensionamiento de una MG	Se identificaron las etapas para el óptimo dimensionamiento de una MG y se introdujo al método de optimización.

Sesión	Tema(s) de las sesiones	Hallazgos
3	Comparativo HOMER Grid y HOMER Pro	Se decidió que el software a implementar en el estudio del seminario sería HOMER Pro y así se definió el contenido de cada una de las etapas adaptadas al software.
4	Parámetros necesarios para el diseño de una MG con HOMER y los resultados entregados	Se identificaron los parámetros necesarios para diseñar MG en HOMER Pro y se analizaron los resultados que entrega el software al finalizar la simulación.
5	Dimensionamiento de una MG en HOMER para zonas conectadas y aisladas a la red: y otras variables de ingreso	Se abordaron los parámetros de ingreso faltantes en la sesión anterior y se identificó la afectación de los resultados respecto a variaciones y análisis de sensibilidad sobre algunos parámetros.
6	Modelamiento de una MG con los elementos apropiados para zonas conectadas y aisladas de la red, con HOMER Grid	Al estudiar el software HOMER Grid se observa que este tiene similitud con HOMER Pro, con los parámetros de ingreso y los modelos matemáticos para dimensionar los componentes. Aunque tiene restricciones en el momento de modelar.
7	Escenarios de operación de las MG en las zonas estudiadas.	Al comparar los resultados eléctricos que entrega HOMER Pro, con estimaciones realizadas en memorias de cálculo, se encontró que el software HOMER Pro entrega datos de operación reales. Si la MG diseñada tiene conexión a la red, HOMER Pro no dispone de la operación de los grupos electrógenos, por los costos que esto implica.

Sesión	Tema(s) de las sesiones	Hallazgos
8	Análisis de operación de las MG diseñadas para los casos en estudio.	Se determinó que con los resultados eléctricos de HOMER Pro no se puede realizar análisis de fallas, ni de transitorios. Y, de los criterios de confiabilidad estudiados se precisa que el único que puede calcularse con los resultados eléctricos es el valor esperado de pérdida de carga (LOLE).
9	¿Cuáles son los indicadores financieros en HOMER?	Se encontró que existen indicadores financieros de entrada y salida en el software, los cuales tocan aspectos puntuales de un diseño de MG como: el ciclo de vida del proyecto, operación, inversiones del proyecto, beneficios de proyecto, métodos para evaluar el proyecto, fuentes de funcionamiento y flujo de caja.
10	¿Qué parámetros se deben ingresar en el software para el análisis financiero de una MG en Colombia?	Con base al marco regulatorio y legal colombiano, se detectan dos grupos principales de parámetros, el primero contiene los activos fijos, los despreciables, no despreciables y los agotables. El otro grupo corresponde al capital de trabajo, que incluye costos de operación y costos de mantenimiento
11	¿Qué tipo de información entrega el software cuando finalizó el análisis financiero de una MG? (Enfoque HOMER Pro)	Se determinó que la información financiera más relevante entregada por el software es: costos de componentes, salidas de flujo de caja, tablas dinámicas, indicadores como la recuperación de la inversión, TIR, COE, NPC y otras métricas económicas. También, posibilita la comparación económica de un

Sesión	Tema(s) de las sesiones	Hallazgos
		escenario de MG con respecto a un caso de referencia.
12	¿Qué tipo de información entrega el software cuando finalizó el análisis financiero de una MG? (Enfoque HOMER Grid)	En HOMER Grid es posible ingresar una mayor gama de información financiera con respecto a la que se puede ingresar en HOMER Pro. Sin embargo, no se evidenció una notoria diferencia en la información entregada por este software con respecto a la entregada por el anterior. Se infiere que se debe a su estructura algorítmica.
13	Criterios para el análisis de la viabilidad de la MG	Se identificaron criterios asociados a indicadores arrojados por HOMER Pro, que permiten definir la viabilidad de un proyecto de MG. Se seleccionó una técnica de evaluación cualitativa, para definir la viabilidad de los criterios definidos. Se presentó una lista de comprobación que recoja los criterios de viabilidad, para una ágil evaluación.
14	¿Cómo se debe construir el reporte del análisis de viabilidad de la MG?	Mediante la evaluación de criterios, se definió la viabilidad técnica, económica y ambiental de un proyecto de MG y se propuso un reporte de viabilidad que recoja el conjunto de tópicos y alcances de un diseño en HOMER Pro. Se realizó una comparación de dos escenarios, aislado e interconectado, con el reporte de viabilidad para encontrar las diferencias en sus resultados y escoger la más optima.

Sesión	Tema(s) de las sesiones	Hallazgos
15	Analizar la información de la base de datos de HOMER en el territorio colombiano	Se seleccionaron siete lugares en diferentes puntos de Colombia, con el fin de lograr una distribución homogénea en el territorio y de esta manera se identificaron las diferentes bases de datos de los recursos disponibles en cada lugar elegido.
16	Documento técnico de consulta para usuarios de HOMER Pro.	Se realizó una guía, la cual pretende enseñar de forma fácil y sencilla el proceso para el dimensionamiento de MG por medio del software HOMER Pro, mostrando todos los aspectos de funcionamiento del sistema.

En este documento se desarrollan cinco capítulos dispuestos de la siguiente manera: El primer capítulo describe hallazgos generales encontrados sobre las etapas para tener en cuenta cuando se diseña una MG en el software HOMER Pro, además hace una síntesis de entradas y salidas asociadas para el cumplimiento satisfactorio de las etapas.

El segundo capítulo, aborda lo referente al análisis de operación de MG mediante simulaciones en la herramienta de computación. El tercer capítulo, presenta y describe una infografía, que sintetiza lo requerido por HOMER Pro para la obtención de resultados coherentes que sean de utilidad para el análisis financiero en función de parámetros de ingreso al software.

El cuarto capítulo, propone técnicas de análisis de viabilidad técnico-económica en proyectos de MG conectadas y aisladas de la red, así como un reporte técnico, económico y ambiental para la presentación de resultados basado en los alcances del programa computacional. Para finalizar, el quinto capítulo propone una guía ligera y puntual enfocada a la formación de estudiantes de ingeniería eléctrica de la E3T.

1. Dimensionamiento de una MG en HOMER

Según la RAE “dimensionar es determinar las dimensiones de algo” (RAE). para el caso de una MG, se busca determinar capacidad instalada (potencia o energía) y cantidad de cada componente por tecnología que la constituyen, las cuales son necesarias para suplir la carga demandada bajo un conjunto de criterios y restricciones.

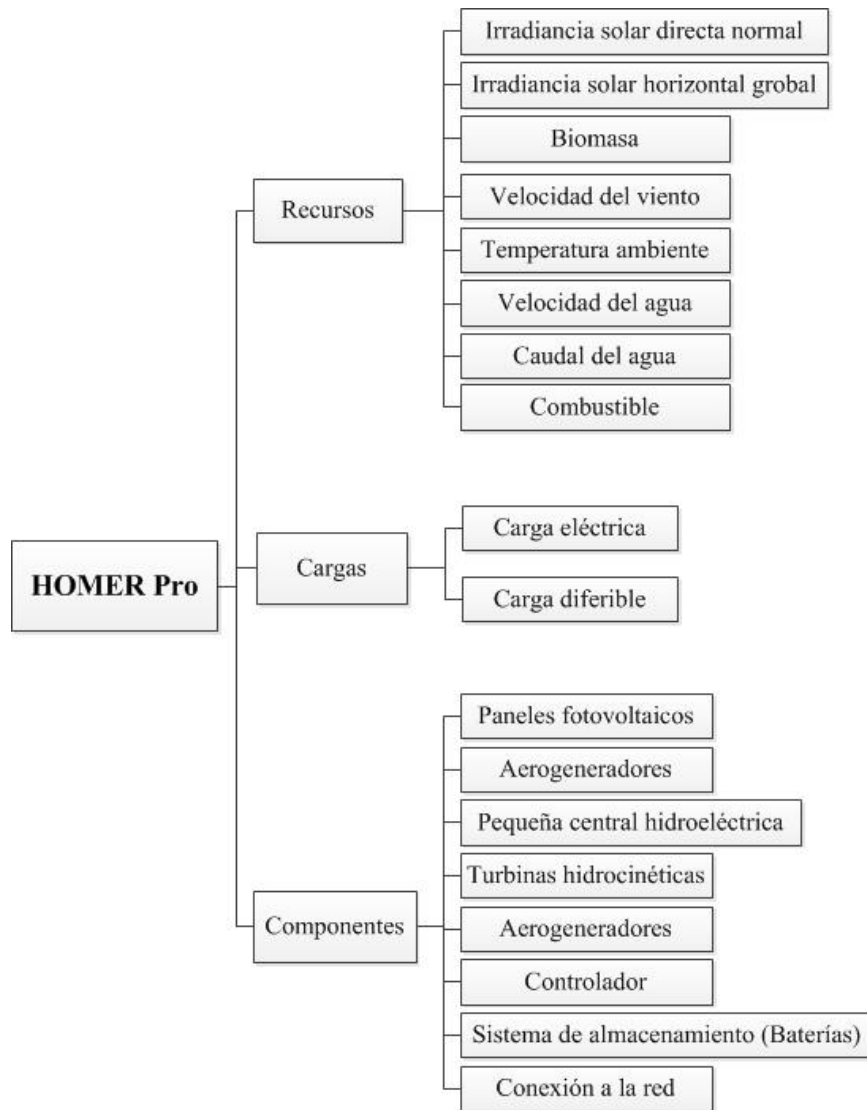
En el proceso de dimensionamiento de una MG en HOMER Pro, se identifican las siguientes cinco etapas: recolección de información, estimación de los perfiles de carga, selección de los componentes, simulación de la MG en HOMER Pro y análisis de resultados.

Las sesiones que dieron origen a este capítulo fueron la primera, segunda y tercera sesión, en donde se trató la definición, los tipos y las ventajas y desventajas de una MG, las consideraciones técnicas para su dimensionamiento y la comparación entre los dos softwares que ofrece HOMER, se decide trabajar con HOMER Pro.

En la Figura 2, se muestran de manera gráfica los recursos, cargas y componentes con los que cuenta HOMER Pro, con los cuales se puede diseñar una microrred para suplir cargas eléctricas y cumplir con las primeras etapas de dimensionamiento descritas anteriormente.

Figura 2.

Elementos para el diseño de una MG a partir de HOMER Pro



1.1 Consulta de información

Se consulta la información de recursos en la zona y factores económicos para dimensionar la MG con el fin de calcular la participación de las fuentes de generación para suplir la carga y cómo se comportan los costos del sistema.

1.1.1 Recursos disponibles en la zona.

HOMER Pro cuenta con la posibilidad de importar información de recursos de bases de datos predeterminadas. De esta manera, se descargaron los datos medidos de irradiancia solar en (kWh/m²), temperatura ambiente (°C), velocidad del viento (m/s) y demás recursos mostrados en la Figura 2, para la zona escogida que puedan ser implementados en el sistema de generación de la MG.

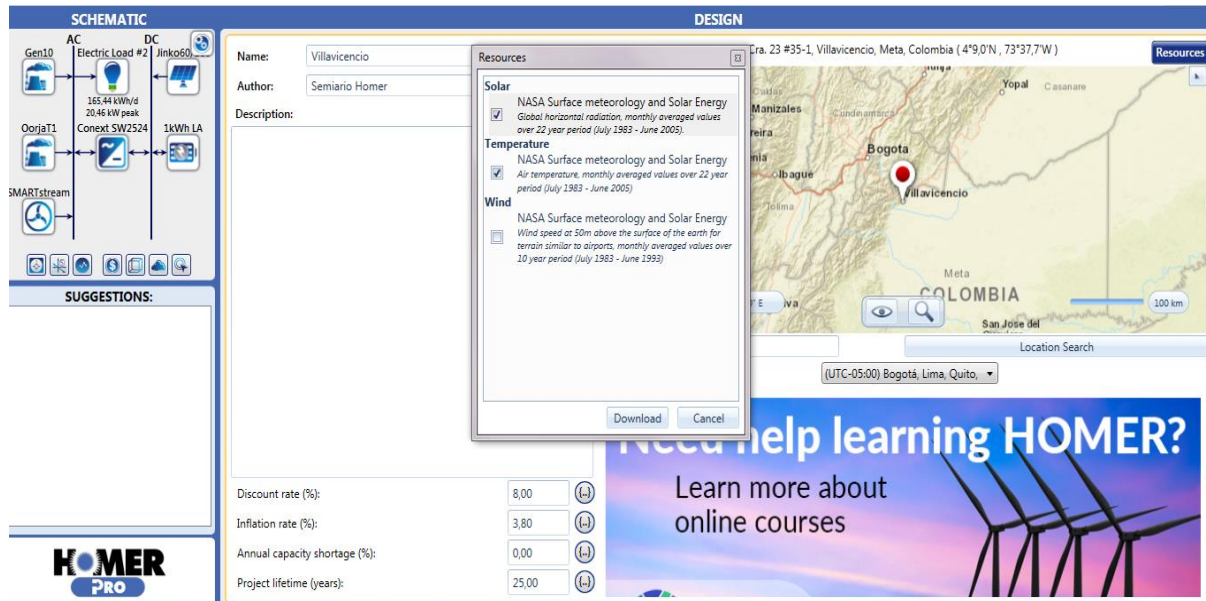
1.1.2 Condiciones económicas.

Definir parámetros financieros como la tasa de inflación, la tasa de descuento, valores de compra y venta de energía al operador de red en el país de aplicación de la MG y encontrar la disponibilidad de apoyos gubernamentales, índices de necesidades básicas insatisfechas y condiciones de acceso. (Garzón y Saavedra, 2017). Si se desea profundizar en los parámetros de ingreso del software se puede revisar el apéndice D.

En la Figura 3, se muestra la interfaz de HOMER Pro donde permite importar los recursos de irradiación solar, temperatura ambiente y la velocidad del viento de la base de datos de la NASA y donde se pueden ingresar los primeros parámetros financieros para el diseño de una MG.

Figura 3.

Interfaz en HOMER Pro donde se importan los recursos e ingresan las condiciones económicas de la zona



1.2 Estimar los perfiles de carga

Para la estimación de la carga, se consideran varios factores, como el clima, datos meteorológicos y posibles tipos de clientes. Dos de los métodos de estimación de carga, el llamado de uso final y el enfoque econométrico se utilizan ampliamente para su valoración a mediano y largo plazo. El desarrollo, mejoras e investigación de las herramientas matemáticas apropiadas darán lugar al desarrollo de técnicas de previsión de cargas más precisas.

Aplicando los procedimientos establecidos por el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050), se calcula la demanda máxima a partir del análisis de carga por usuario y las cargas especiales. Una vez estimado el valor de demanda máxima de la totalidad de usuarios, se calcula

la curva de carga según el tipo de servicio, aplicando los factores de demanda para usuarios de ZNI (Garzón y Saavedra, 2017). Para informarse más revisar el apéndice B.

Ahora bien, en HOMER se pueden importar los datos del tipo de carga a utilizar, como se indica en el Manual de HOMER Pro (Home Renergy, s.f.). Debido a que la información de la energía consumida por la carga rara vez está disponible, a menudo se sintetizan los datos de carga especificando el perfil de carga diario típico y agregando algo de aleatoriedad y así generando un año de datos de carga por hora (HOMER Pro). En la Figura 4, se muestra la interfaz para las cargas eléctricas que se ingresan o importan en el software.

Figura 4.

Interfaz de carga eléctrica en HOMER Pro



1.3 Selección de componentes de una MG en HOMER.

Parte fundamental de dimensionar una MG en HOMER Pro es seleccionar los componentes que esta contiene, como las fuentes de generación, el sistema de almacenamiento, el convertidor en el caso que sea necesario y el controlador. Estos componentes requieren parámetros de ingreso económicos, como:

- El capital, donde se ingresa el costo inicial que implica la mano de obra, compra del equipo e instalación del mismo.
- El costo del reemplazo de los equipos, el cual se debe hacer cada cierto tiempo dependiendo de la vida útil de cada componente.
- El costo fijo, se relaciona con los gastos de operación y mantenimiento que se requiere para garantizar un adecuado y oportuno funcionamiento de los componentes que involucra el sistema.

En los apéndices B, D y E, se puede profundizar sobre los parámetros de ingreso financieros y técnicos de las fuentes de generación, el sistema de almacenamiento y convertidor.

1.3.1 Fuentes de generación.

En este grupo se incluye la generación fotovoltaica, eólica, biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas y grupos electrógenos. Para determinar si alguna de estas fuentes de generación se puede implementar en la zona de instalación de la MG, se debe realizar un estudio donde se estime el potencial energético con cada uno de los recursos que esta utilice y lograr suplir la carga en su

mayoría con una capacidad de reserva, para lograr una disponibilidad y fiabilidad del suministro (Garzón y Saavedra, 2017).

HOMER Pro no realiza el estudio de potencial energético, sino que calcula la generación esperada de cada fuente a partir de los perfiles de los recursos ingresados al software dimensiona las fuentes de generación agregadas en el diseño de la MG, usándose el modelo matemático de cada una de ellas, las cuales se pueden encontrar en la página del Manual de HOMER Pro. En la Figura 5, se observa la interfaz del sistema fotovoltaico en HOMER Pro, la cual es similar en cuanto a parámetros financieros y ciclo de vida útil a las demás fuentes de generación, difiriendo solamente en parámetros técnicos específicos de cada fuente.

Figura 5.

Interfaz del sistema fotovoltaico en HOMER Pro

The screenshot displays the HOMER Pro software interface for configuring a PV system. The main window is titled "Add/Remove Jinko Eagle PERC60 300W". The interface is divided into several sections:

- Properties:** Name: Jinko Eagle PERC60 300W, Abbreviation: Jinko60, Panel Type: Flat plate, Rated Capacity (kW): 0.3, Temperature Coefficient: -0.390, Operating Temperature (°C): 45.00, Efficiency (%): 18.33, Manufacturer: Jinko Solar, Data Sheet for Eagle PERC60.
- Costs:** A table with columns for Size (kW), Capital (€), Replacement (€), and O&M (€/year). The table shows one entry with Size (kW) 1, Capital (€) \$ 0,00, Replacement (€) \$ 0,00, and O&M (€/year) \$ 0,00.
- Capacity Optimization:** HOMER Optimizer™, Search Space, Advanced.
- MPPT:** Explicitly model Maximum Power Point Tracker, Lifetime (years): 15,00.
- Search Space:** A table with columns for Size (kW) and Efficiency (%). The table shows one entry with Size (kW) 1 and Efficiency (%) 95.
- Use Efficiency Table?:** Efficiency (%): 95, Input Percentage (%), Efficiency (%), Click here to add new item.

Size (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00

Size (kW)	Efficiency (%)
1	95

1.3.2 Sistemas de almacenamiento.

Esta categoría contiene grupos de baterías, volantes de inercia, supercondensadores, almacenamiento a partir de bombeo de agua, celdas de combustible y almacenamiento de energía térmica. *El banco de baterías se dimensiona con el objetivo de satisfacer la demanda durante los periodos que no hay generación de energía eléctrica y para cargarse con el excedente de energía generada (Luna, 2017).*

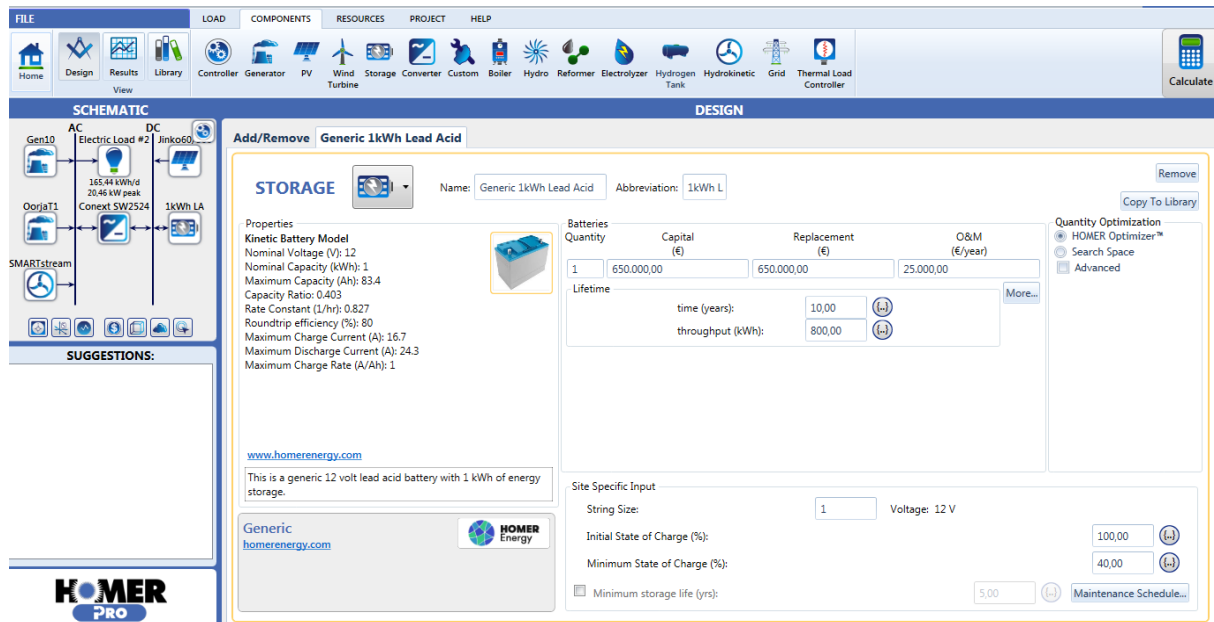
Aunque HOMER depende de la estrategia de envío del controlador, del cual se hablará más adelante. Los sistemas de almacenamiento se dimensionan con diferentes modelos matemáticos para tener una estimación de la energía, los modelos implementados por HOMER son: idealizado, cinético y el cinético modificado.

Para el modelo idealizado, solo se necesita ingresar la capacidad nominal en amperios-hora y HOMER usará este valor como la capacidad real del almacenamiento, este modelo funciona para baterías de iones de litio de alto rendimiento. El modelo de batería cinética calcula la cantidad máxima de energía que el sistema de almacenamiento puede descargar y la que puede absorber durante un periodo de tiempo específico, estos valores varían en el paso del tiempo debido al estado de carga, esto lo hace por medio de un sistema de dos tanques, y así separar la “energía disponible” para la generación de electricidad y la “energía ligada” que no se puede utilizar. Y el último modelo de cinética modificada, se basa en el modelo anterior con la adición de pérdidas dependientes de la velocidad, efectos de temperatura y degradación del rendimiento a lo largo de la vida útil.

La Figura 6, presenta la interfaz del sistema de almacenamiento en HOMER Pro, en la que se ingresan parámetros como número de baterías por cadena, el estado inicial y mínimo de carga.

Figura 6.

Interfaz sistema de almacenamiento en HOMER Pro

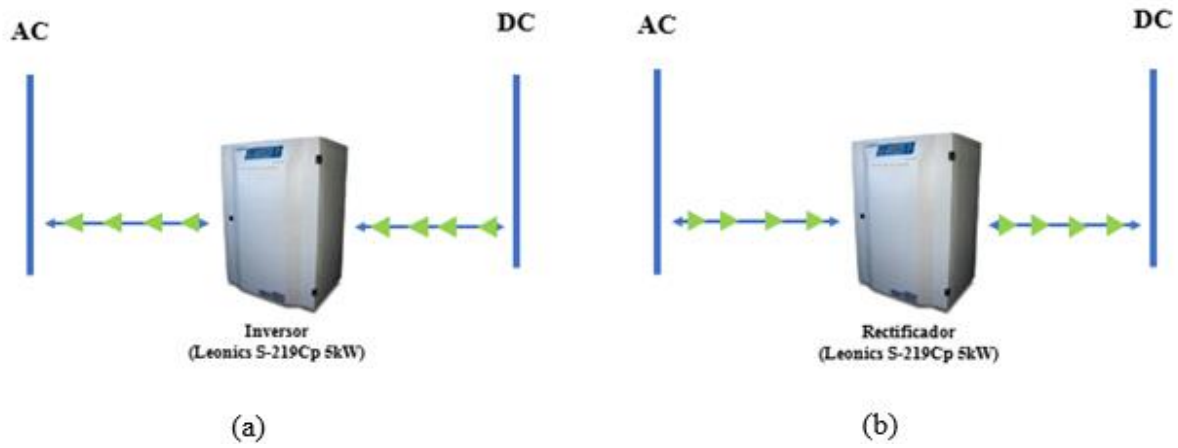


1.3.3 Electrónica de potencia.

Se asocia a todos los componentes electrónicos que están presentes en las MG, algunos de ellos monitorean variables en tiempo real y de manera bidireccional, llevando consigo información necesaria para que convertidores y sensores organicen el accionar del control de la MG. Los componentes de electrónica de potencia que HOMER permite dimensionar son convertidor que funciona de manera bidireccional, cuando el flujo de potencia es de DC/AC se comporta como inversor (ver Figura 7 (a)) y cuando la dirección del flujo es de AC/DC lo hace como rectificador (ver Figura 7 (b)).

Figura 7.

(a) Convertidor operando como inversor y (b) convertidor operando como rectificador



En la Figura 8, se presenta la interfaz del convertidor en HOMER Pro, la cual cuenta con un catálogo con parámetros predefinidos de cada convertidor.

Figura 8.

Interfaz convertidor en HOMER Pro

La interfaz de usuario de HOMER Pro muestra la configuración de un convertidor Schneider Conext SW2524. El panel principal está dividido en SCHEMATIC y DESIGN. En el panel DESIGN, se muestra la configuración de un convertidor Schneider Conext SW2524. Se incluyen propiedades, costos, eficiencia y opciones de configuración.

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (\$/year)
3	\$ 6.056.787,80	\$ 6.056.787,80	\$ 60.567,87

Properties:

- Name: Schneider Conext SW2524
- Abbreviation: Conext SW2524
- sesolar.com

Notes:

Both grid forming and grid following. It is a battery dedicated inverter

Costs:

Capacity Optimization:

- HOMER Optimizer™
- Search Space
- Advanced

Inverter Input:

- Lifetime (years): 10,00
- Efficiency (%): 90,00

Rectifier Input:

- Relative Capacity (%): 90,00
- Efficiency (%): 90,00

Parallel with AC generator?

Got questions? Check out the HOMER KnowledgeBase

1.3.4 Controlador.

Abarca el control de la gestión de la energía que fluye entre la generación y la carga, determinando las pautas con que cada fuente debe suplir la demanda. En HOMER, este componente se encarga de establecer la estrategia de despacho de la MG con el fin de suplir la carga, Las estrategias determinadas por el software se identifican en la siguiente Tabla.

Tabla 2.

Estrategias de despacho disponibles en HOMER Pro

Estrategias de despacho	Funcionalidad	Tipos de microrredes
Ciclo de carga	El generador opera a potencia de salida máxima para suplir la carga primaria, haciendo que el excedente se redirija a servir la carga diferible, cargar el banco de baterías y servir el electrolizador.	MG aislada de la red con generador y sistema de almacenamiento.
Ciclo combinado	En cada paso de tiempo, se decide cual es la decisión más barata: el seguimiento de carga o el ciclo de carga.	
Orden de generador	Se realiza una tabla donde se define la prioridad de operación de los generadores y el despacho de pedidos implementará la primera fila que cumpla con la capacidad de operación requerida.	

Estrategias de despacho	Funcionalidad	Tipos de microrredes
Seguimiento de carga	El generador suministra lo suficiente para satisfacer la carga primaria, redirigiendo las fuentes renovables a suplir la carga del sistema de almacenamiento o servir la carga diferible.	MG aislada con sistema de almacenamiento e interconectada a la red con generador.
Estrategia de despacho Link MATLAB y una API del controlador en C++	HOMER Pro da la opción de agregar un código de MATLAB en el cual se determina la estrategia de despacho que se desea implementar en la MG, también se encuentra disponible como complemento la estrategia por medio de C++.	Depende de la configuración que tenga el código.

La Tabla 3 relaciona los componentes que se encuentran en HOMER Pro y la función que estos cumplen en una MG diseñada en el software.

Tabla 3.

Componentes de HOMER Pro y su función

Componentes	Función
Controlador	Establecer las reglas que rigen el uso de generadores y sistema de almacenamiento por medio de las estrategias de despacho.
Generador	Servir como sistema de respaldo de la MG

Componentes	Función
PV	Generar energía eléctrica aprovechando el recurso solar y eólico
Aerogenerador	
Almacenamiento	Almacenar la energía excedente para utilizarla en momentos de baja generación y picos de demanda
Convertidor	Transformar la tensión y corriente de AC/DC o DC/AC según las características de cada MG
Caldera	Abastecer las cargas térmicas a base de un combustible particular
Hidro	Generar energía eléctrica aprovechando el recurso hídrico por medio de PCH
Reformador	Producir hidrogeno a base de un combustible en particular
Electrolizador	Aprovechar los excedentes de energía eléctrica para producir hidrogeno
Tanque de hidrogeno	Almacenar el hidrogeno producido
Hidrocinética	Generar energía eléctrica aprovechando el recurso hídrico por medio de turbinas hidrocinéticas instaladas en los afluentes
Red	Interconectar la MG, permitiéndole comprar y vender energía
Controlador de carga térmica	Aprovechar el excedente de energía eléctrica para suplir la carga térmica

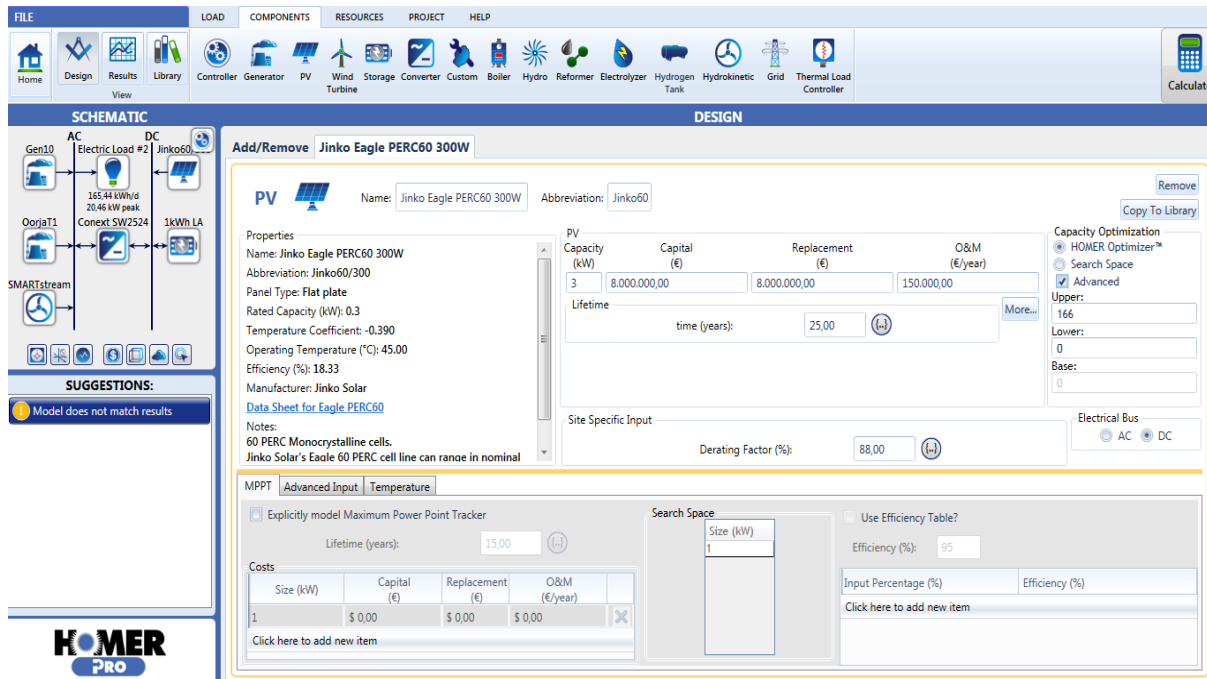
1.4 Simulación en HOMER Pro

HOMER simula por medio de su función de optimización, para realizar esta acción en los componentes seleccionados se puede escoger el optimizador de HOMER, el cual trabaja minimizando el valor presente neto. Si se agrega la opción de avanzado (ver Figura 9), puede ingresar los límites inferior y superior para obtener el resultado de la simulación de cada configuración de MG, que se refiere a los componentes que tiene la MG. También se puede escoger

la opción de búsqueda de espacios, que determina uno o varios valores de cantidad de componentes o potencia como resultados de la simulación.

Figura 9.

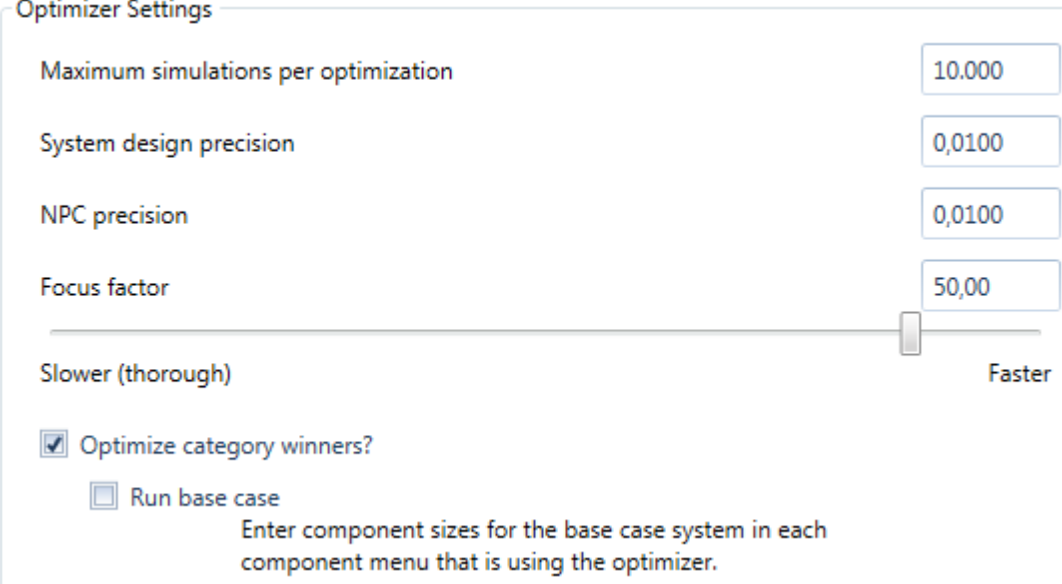
Interfaz de optimizador avanzado de HOMER



La Figura 10, muestra los ajustes del optimizador donde se especifican las simulaciones máximas por optimización, la precisión del diseño del sistema, la precisión del costo presente neto y el factor de enfoque con el que HOMER Pro optimiza.

Figura 10.

Ajustes del optimizador en HOMER Pro



Optimizer Settings

Maximum simulations per optimization	10.000
System design precision	0,0100
NPC precision	0,0100
Focus factor	50,00

Slower (thorough) Faster

Optimize category winners?

Run base case

Enter component sizes for the base case system in each component menu that is using the optimizer.

En HOMER Pro es posible ajustar los parámetros de optimización donde se puede seleccionar que tipos de sistemas omitir durante la simulación, ajustar los minutos por paso de tiempo, utilización de sistemas con múltiples generadores, sistemas con capacidad del generador menor que la carga máxima, sistemas con dos tipos de aerogeneradores y emitir una advertencia si la autonomía y la penetración de renovables establecidas no cumplen con los valores especificados (ver Figura 11).

Figura 11.

Configuraciones de optimización en HOMER Pro

Optimization Settings

Minutes per time step: 60 Time steps per year: 8,760

- Allow systems with multiple generators.
- Allow systems with two types of wind turbines.
- Limit excess thermal output (% of load): 10
- Issue a warning if an off-grid system has:
 - maximum renewable penetration greater than 55%
 - battery autonomy of less than 2 hrs

Se puede realizar un análisis de sensibilidad ingresando diversos valores de un parámetro, cuando no se conoce el valor exacto de este y se quiere identificar la variación de las salidas con los cambios que tenga este parámetro. HOMER realiza una optimización por separado para cada valor del parámetro específico y muestra automáticamente los resultados de optimización en modo tabular, en esa tabla se puede ver ordenar y filtrar todas las simulaciones factibles. Para profundizar sobre la simulación y optimización del software se puede revisar los apéndices B y E.

1.5 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación se dividen en cuatro grupos, como, el resumen de costos, el flujo de caja, los resultados eléctricos y el resumen de las emisiones que tuvo la configuración de la MG seleccionada. Una configuración hace referencia a la combinación de componentes para suplir la demanda de la MG, La Figura 12, presenta un ejemplo de configuración. En los resultados

de simulación se obtienen múltiples configuraciones ordenadas por el menor costo presente neto. Para profundizar en el tema dirigirse a los apéndices G y K.

Figura 12.

Configuraciones de optimización en HOMER Pro



La Tabla 4 presenta el tipo de resultados en el dimensionamiento de cada componente de las configuraciones.

Tabla 4.

Resultados de simulación de la MG por componente

Componentes	Dimensionamiento
Generador	Capacidad instalada
PV	
Hidro	
Convertidor	
Reformador	
Electrolizador	
Controlador de carga térmica	
Almacenamiento	Cantidad de baterías
Aerogenerador	Cantidad de aerogeneradores

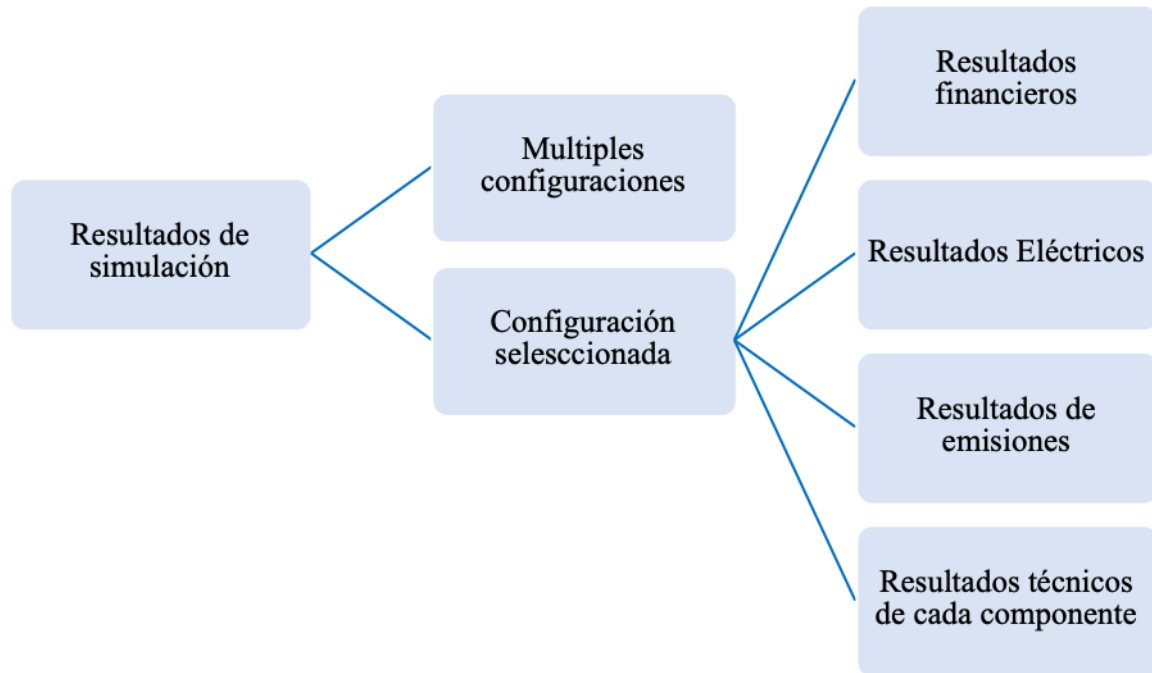
Componentes	Dimensionamiento
Hidrocinética	Cantidad de turbinas
Tanque de hidrogeno	Capacidad en kg
Red	Cantidad de potencia disponible. Por defecto 999.999 kW

El resumen de costos muestra el flujo de caja total, categorizándolo por componente o por tipo de costo haciendo referencia al capital, al reemplazo, a la operación y mantenimiento, el combustible y la recuperación representándolo en una gráfica y por tipo de costo anualizado o presente neto por medio de una tabla; el flujo de caja muestra el flujo de efectivo del sistema año a año en forma gráfica o tabular, y personalizado.

En los resultados eléctricos del sistema se puede observar una tabla de la energía generada, una tabla de la energía consumida, datos de exceso y escasez de energía, la fracción de renovables y el valor máximo de penetración de renovables durante el año; en las emisiones entrega un resumen de los contaminantes anuales emitidos por el sistema; y finalmente en los resultados de la simulación cada componente tiene su lugar donde muestra los detalles del funcionamiento de cada uno de ellos durante la vida útil de la MG. La Figura 13 presenta un resumen de los resultados de simulación de HOMER Pro.

Figura 13.

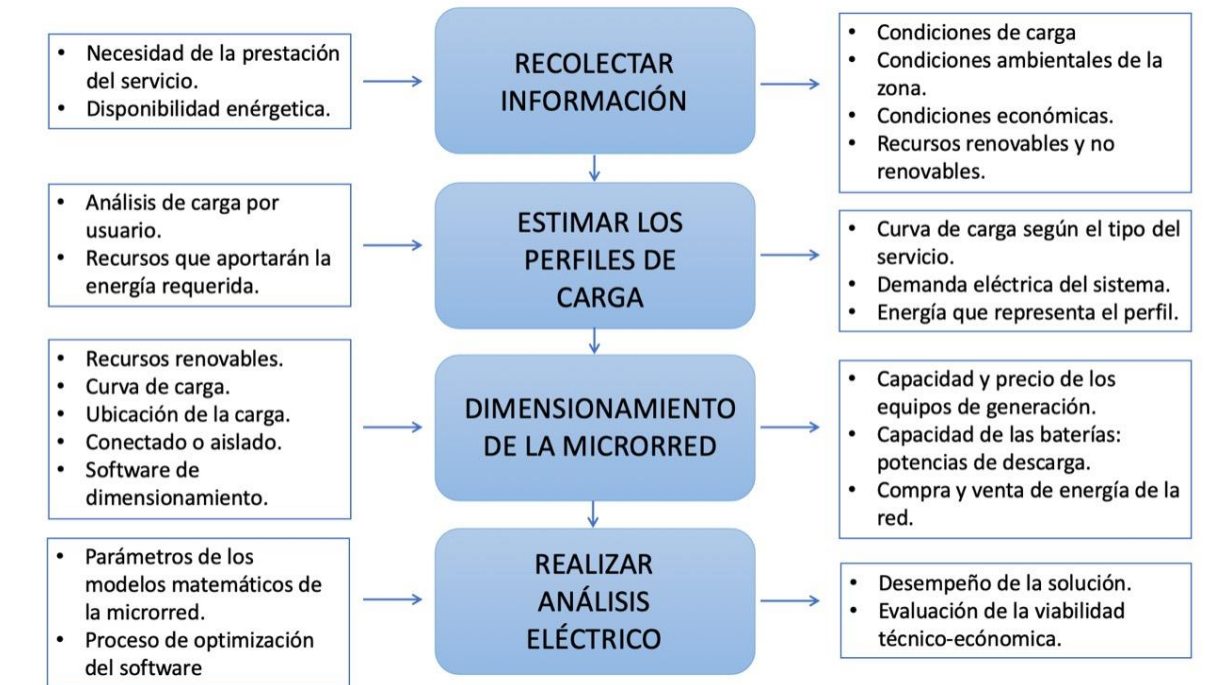
Esquema de resultados de simulación en HOMER Pro



Por último, se muestra en la Figura 14, el esquema donde se describen cada una de las etapas que influyen en el dimensionamiento de una MG en HOMER Pro, con sus respectivas variables de entrada y de salida

Figura 14.

Esquema de descripción de las etapas de dimensionamiento de una MG en HOMER Pro



Adaptado de una metodología de diseño de microrredes para zonas no interconectadas de Colombia.

2. Análisis de operación en HOMER

El análisis de operación de una MG es la caracterización del sistema eléctrico que puede incluir análisis de flujos de potencia, análisis de cortocircuito simétricos y asimétricos, análisis de contingencias, simulación de transitorios, estabilidad del sistema, entre otros. A partir de los resultados de este análisis, se toman decisiones con el fin de reducir costos y prevenir posibles

fallas, verificar un correcto funcionamiento de la MG o hacer correcciones en la misma, para optimizar su funcionamiento.

Debido a la investigación realizada en el transcurso del seminario, se conoce que el comportamiento de una MG se estudia a partir de escenarios de operación, donde se identifican casos particulares como, funcionamiento de una MG en un día de alta demanda, un día con excesos de generación de energía eléctrica o la presencia de una falla en el sistema en una hora específica.

En HOMER Pro no es posible realizar un análisis de fallas, ni de transitorios, debido a que el software no provee resultados de tensiones y corrientes de cada nodo del sistema, además no es posible simular contingencias.

Respecto al análisis de operación de una MG, con la herramienta computacional HOMER Pro se puede estimar la participación de cada fuente generación y el sistema de almacenamiento en la capacidad de operación, el comportamiento de cada componente de la MG durante el día seleccionado y definir escenarios de operación a partir de los resultados eléctricos horarios obtenidos en un periodo de un año que este, para observar los flujos de potencia de la MG, las pérdidas en el convertidor, la participación del sistema de almacenamiento, observar el comportamiento del estado de carga (SOC) del sistema de almacenamiento y la carga no satisfecha.

2.1 Análisis de operación de una MG con HOMER

Para demostrar cómo se realiza un análisis de operación en HOMER Pro, se simula una MG aislada ubicada en Villavicencio, Meta y está basada en el estudio de (Gaviria y Gómez, 2018). La carga es una comunidad con un consumo de 165,44 kWh/día, cuenta con un sistema

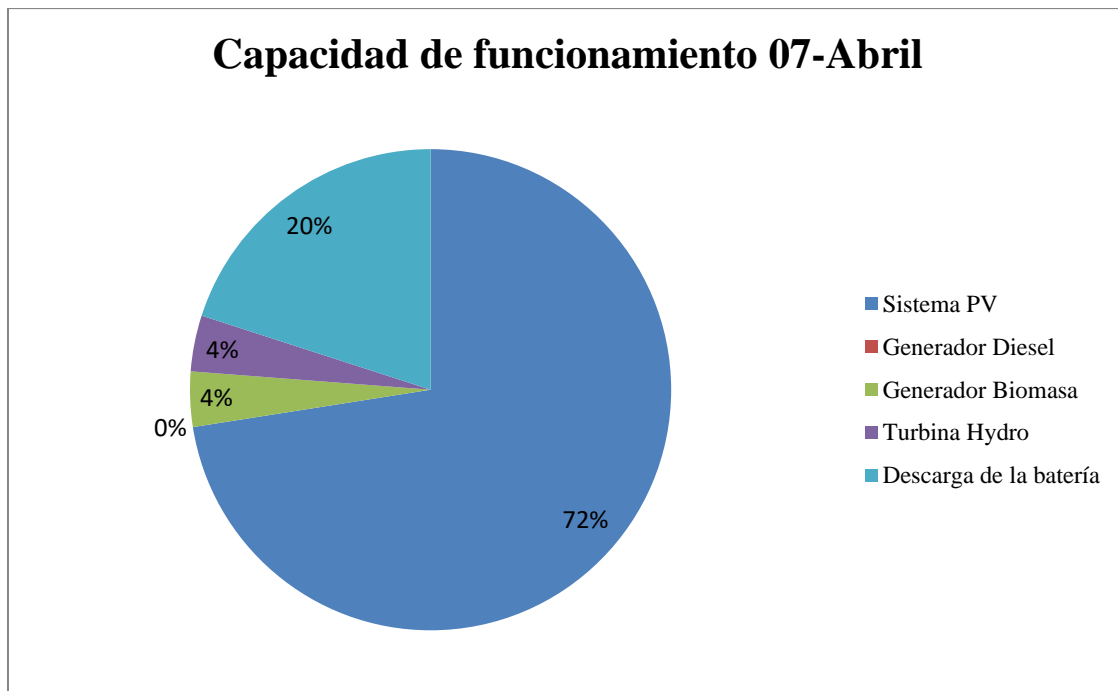
fotovoltaico, una turbina cinética, sistema de almacenamiento con baterías, un generador diésel y un generador a partir de biomasa.

2.1.1 Operación de la MG en Villavicencio Meta.

Al diseñar la MG se configura el generador a partir de biomasa para que funcione los fines de semana. De los resultados entregados por HOMER Pro se selecciona el sábado siete de abril para realizar el análisis de operación de la MG, donde se observa la participación el total de energía generada, la participación de cada fuente, y la cantidad máxima de carga eléctrica que la MG podría suplir en cualquier momento del día como se puede observar en la Figura 15.

Figura 15.

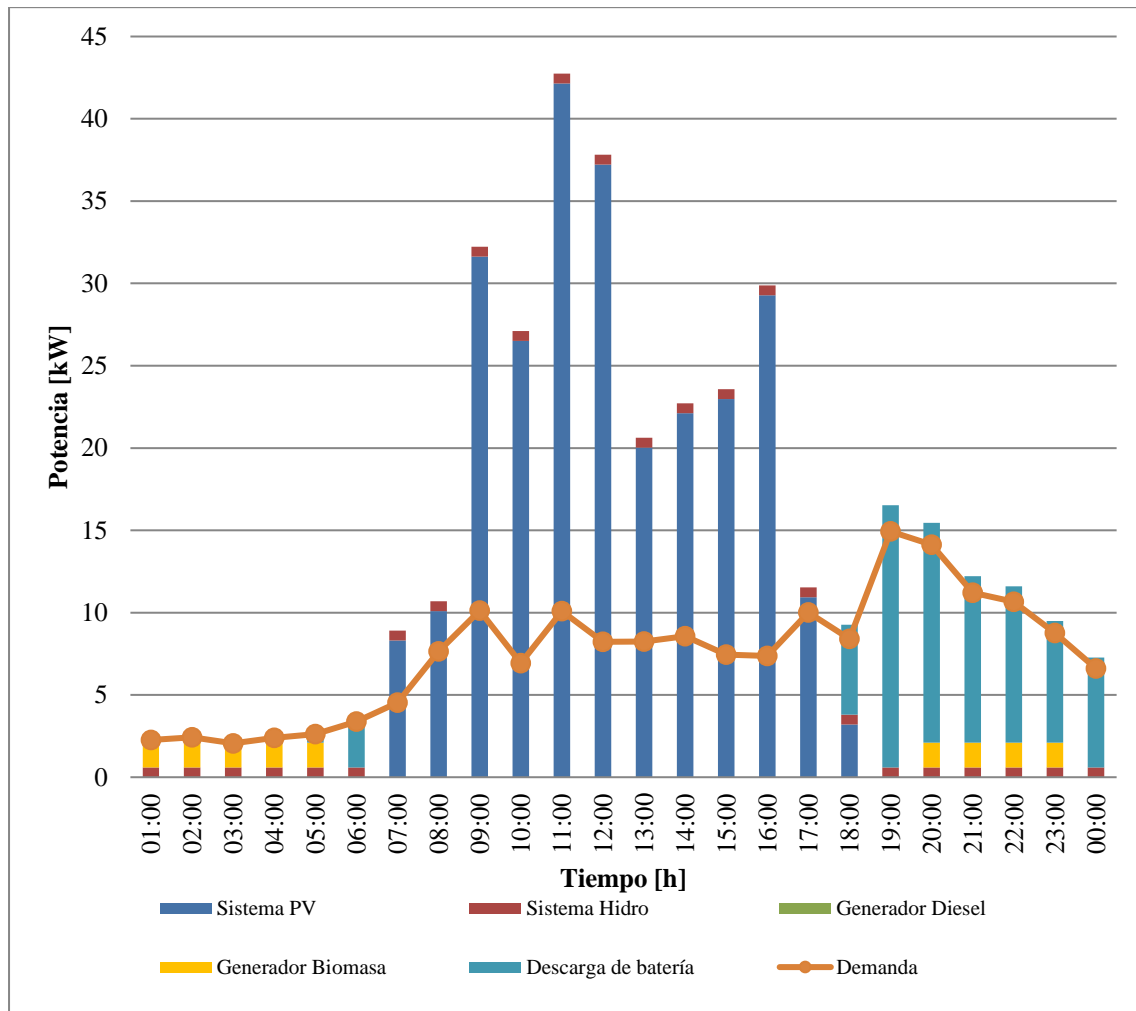
Capacidad de funcionamiento de las fuentes de energía el 07 de abril



También con los resultados se puede obtener el perfil de generación y de consumo, para observar el comportamiento en potencia hora a hora del sistema, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16.

Perfil de generación vs carga de la MG el 07 de abril



En la Figura 16, se observa exceso de generación entre las siete de la mañana y las cuatro de la tarde, debido a que el sistema fotovoltaico está generando aproximadamente cuatro veces más de lo demandado y este exceso de energía carga el sistema almacenamiento. En las horas de

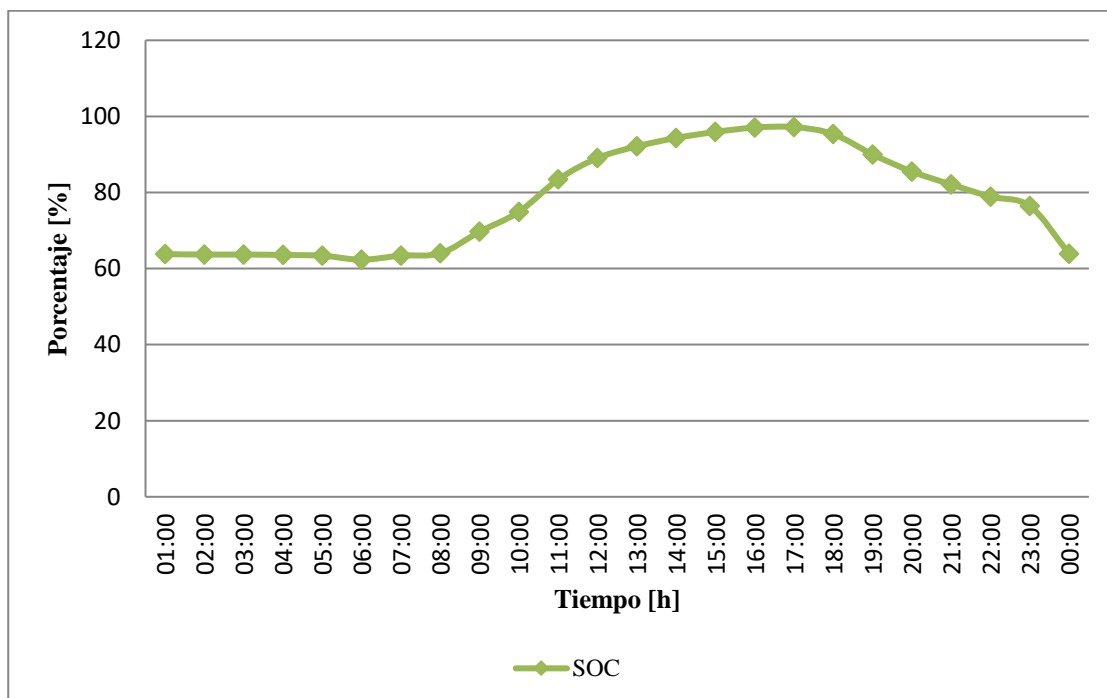
la noche se presenta la demanda máxima que es suplida en su mayoría por el sistema de almacenamiento.

El generador a base de biomasa opera en las horas donde no se tiene generación con fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) los fines de semana, como lo es de 1:00 a 5:00 y de las 20:00 a las 23:00 del 07 de abril. También se observa que el sistema hidroeléctrico está generando energía durante todo y no existe una carga insatisfecha.

El estado de carga de la batería para el siete de abril se aprecia en la Figura 17, donde se observa un estado de carga con pocas variaciones entre la 1:00 y las 8:00, posteriormente la batería comienza a cargarse aproximadamente hasta las 17:00 y después de esta hora se descarga hasta alcanzar un estado de carga próximo al 62%, en ningún momento alcanza el estado mínimo de carga del 40%.

Figura 17.

Estado de carga del sistema de almacenamiento de la MG el 07 de abril



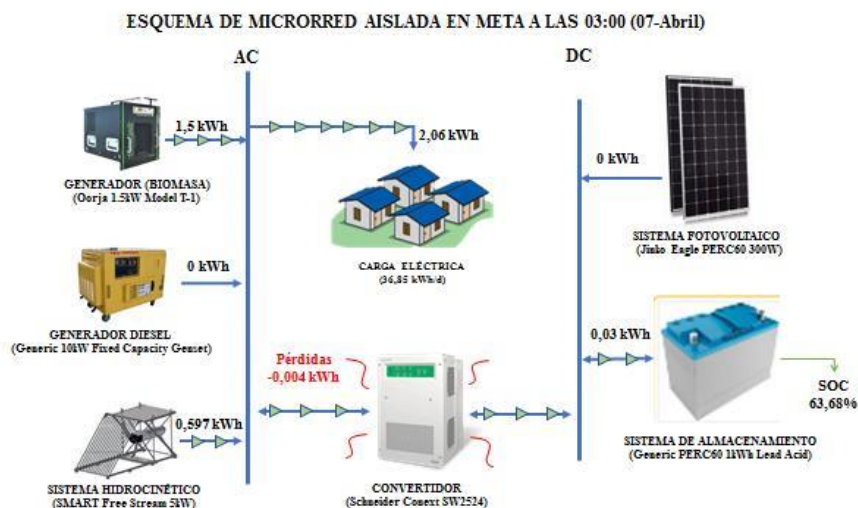
2.1.2. Selección de los escenarios de operación.

Parte del análisis de operación de una MG en HOMER Pro es seleccionar los escenarios de operación. Se escogen las horas donde se presenta el estado mínimo y máximo de carga del sistema de almacenamiento, las pérdidas mínimas y máximas del convertidor, el instante donde hay un exceso máximo de generación o carga máxima insatisfecha y algunos otros parámetros eléctricos que se consideren relevantes, para hacer los flujos de potencia de cada escenario.

2.1.2.1. Flujo de potencias a las 03:00. En este horario fue seleccionado debido a que es en el único instante del día en que el convertidor opera como rectificador y tiene pérdidas mínimas. Eso ocurre porque el sistema fotovoltaico no está generando y esto hace que el excedente de generación del sistema hidrocínético y el grupo electrógeno a base de biomasa carguen el sistema de almacenamiento.

Figura 18.

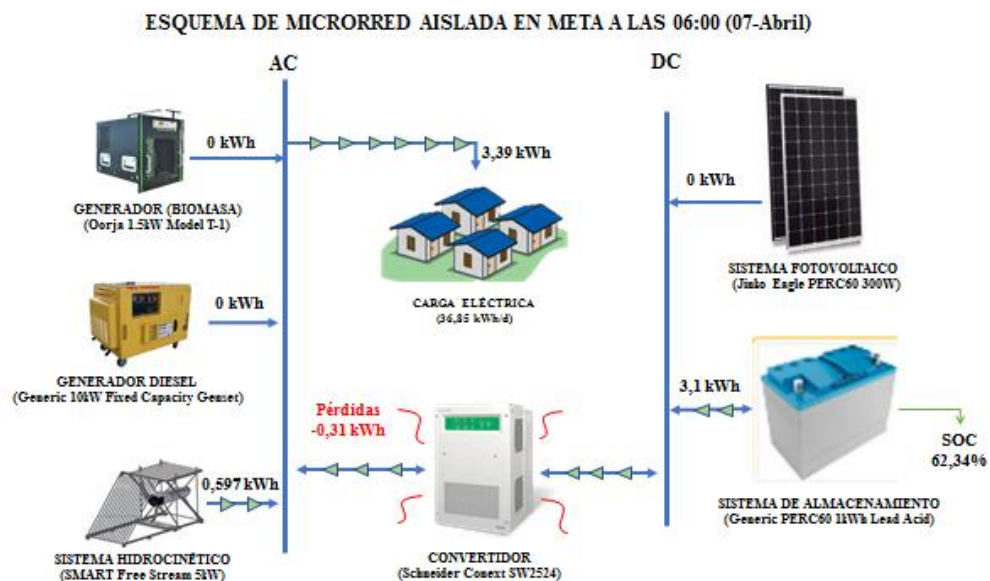
Flujo de potencias a las 03:00 el 07 de abril



2.1.2.2 Flujo de potencias a las 06:00. A esta hora se observa el estado mínimo de carga del sistema de almacenamiento en este día que es mayor al definido para la batería que es de 40%, dado que no es el primer día en que opera la MG y no se encuentra al 100% el SOC del almacenamiento, de las FNCER solo genera el sistema hidrocínético y el convertidor opera como inversor ya que el flujo va de la barra de DC a la barra de AC.

Figura 19.

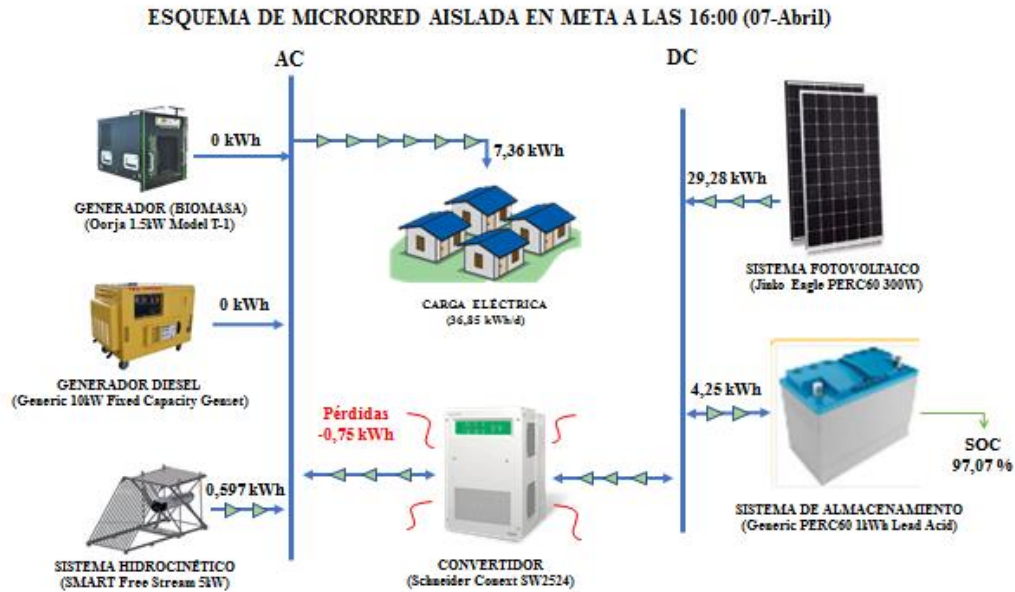
Flujo de potencia a las 06:00 el 07 de abril



2.1.2.3 Flujo de potencias a las 16:00. El mayor exceso de generación se tiene en este horario con un valor de 17,51 kWh, debido a que el sistema fotovoltaico genera cuatro veces lo demandado, haciendo que sea su generación máxima en todo el día. El sistema de almacenamiento es cargado con parte del exceso de generación del sistema fotovoltaico y el convertidor opera como inversor teniendo pérdidas de 0,75 kWh.

Figura 20.

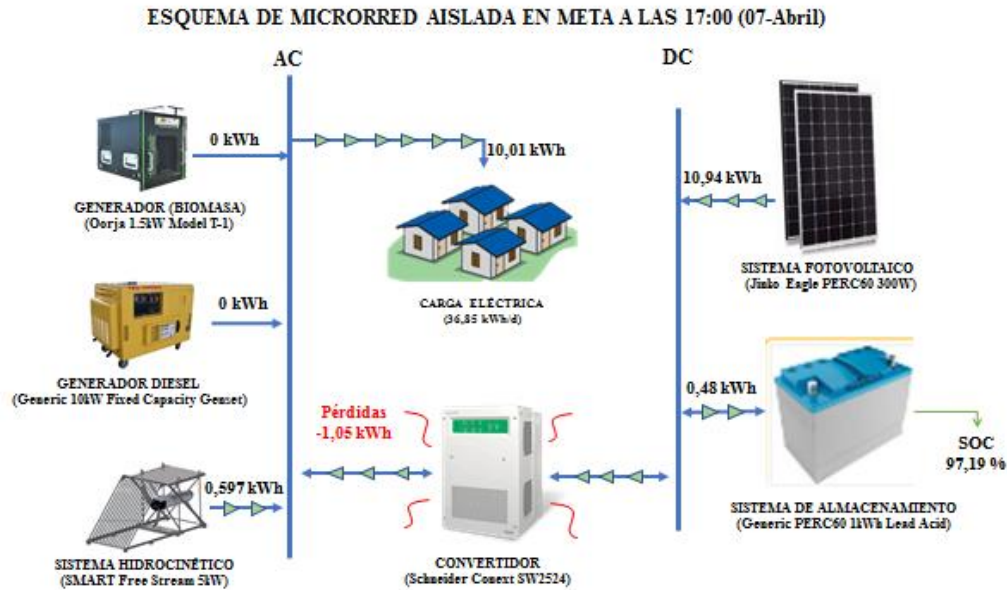
Flujo de potencia a las 16:00 el 07 de abril



2.1.2.4. Flujo de potencias a las 17:00. El SOC máximo del sistema de almacenamiento se observa en este instante del día con un valor de 97,19%, no llega al 100% debido a que la batería tiene una tasa de carga máxima determinada que impone un límite a la tasa a la que el sistema puede cargar el banco de almacenamiento. También se observa que el SOC en este escenario no varío con respecto al anterior y esto se debe a que disminuye la corriente de carga al aumentar el estado de carga. El sistema fotovoltaico carga la batería con el excedente de su generación ya que el sistema hidrocínético también está supliendo la carga.

Figura 21.

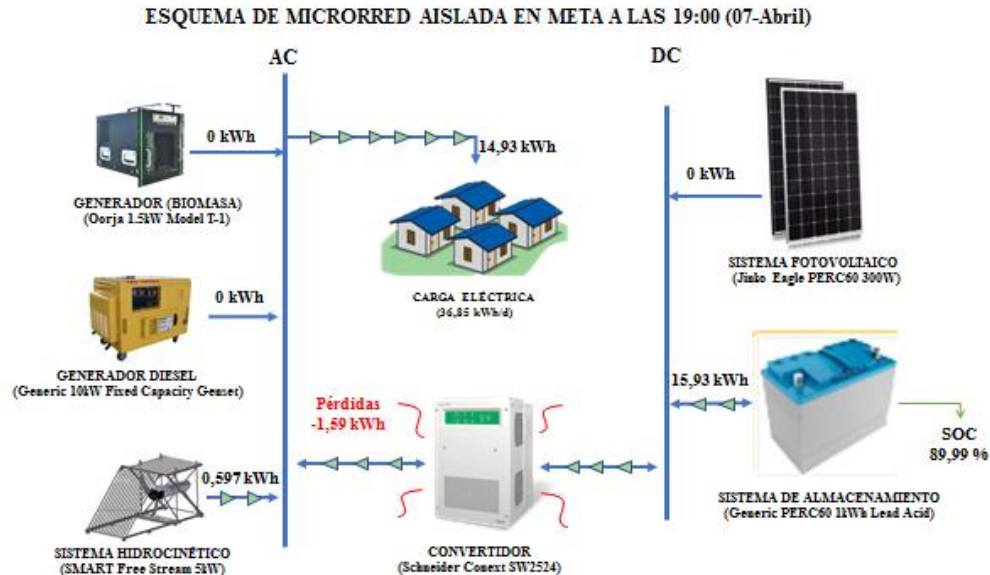
Flujo de potencias MG a las 16:00 el 07 de abril



2.1.2.5. Flujo de potencias a las 19:00. En este horario se observan las pérdidas máximas que tiene el convertidor el 07 de abril, están ligadas a la eficiencia del inversor en este caso. El sistema de almacenamiento es el que suplente en su mayoría la carga haciendo que el convertidor opere como inversor, por lo tanto, las pérdidas del convertidor son de la energía que entrega la batería.

Figura 22.

Flujos de potencias para el 19:00 el 07 de abril



Para concluir el análisis de operación que la MG se observa que no hay carga insatisfecha el 07 de abril y en los resultados entregados por el software tiene un valor de cero, esto se debe a que cuando la MG tiene algún sistema de respaldo HOMER Pro prefiere ponerlos en funcionamiento que dejar carga insatisfecha. También la operación eléctrica de la MG depende bastante de la estrategia de despacho que se defina en el software, ya que como se ha dicho antes esta determina como va a funcionar cada FNCR.

3. Descripción de esquema de análisis financiero que emplea HOMER

El análisis financiero es el estudio e interpretación de la información contable de un proyecto, empresa u organización, tiene como fin de diagnosticar su situación actual y proyectar su desarrollo futuro (Roldán, 2017). En el proceso de diseño y planificación de un sistema de MG, es fundamental realizar un análisis técnico-económico, este debe capturar todos los costos y beneficios económicos asociados con la operación de la MG. Por lo tanto, proporciona al diseñador un medio para resolver el problema de dimensionamiento óptimo y evaluar su viabilidad (Husein, Kan y Col, 2019).

3.1 HOMER Pro para el análisis financiero de una MG

HOMER Pro se utiliza para realizar un análisis técnico y financiero detallado con un enfoque de crecimiento plurianual para determinar el sistema de energía óptimo, lo cual es poco probable que se observe en la literatura hasta ahora (Kumar, Singh, Deng y P. Kumar, 2018). Aunque la herramienta computacional presenta una gran variedad de indicadores económicos, los cuales se presentaran más adelante en conjunto con el esquema de análisis financiero del software, el principal resultado financiero de HOMER Pro es el costo presente neto (NPC) y el costo de la energía (COE) de las configuraciones de los sistemas examinados (Barrozo, Valencia y Cárdenas, 2020).

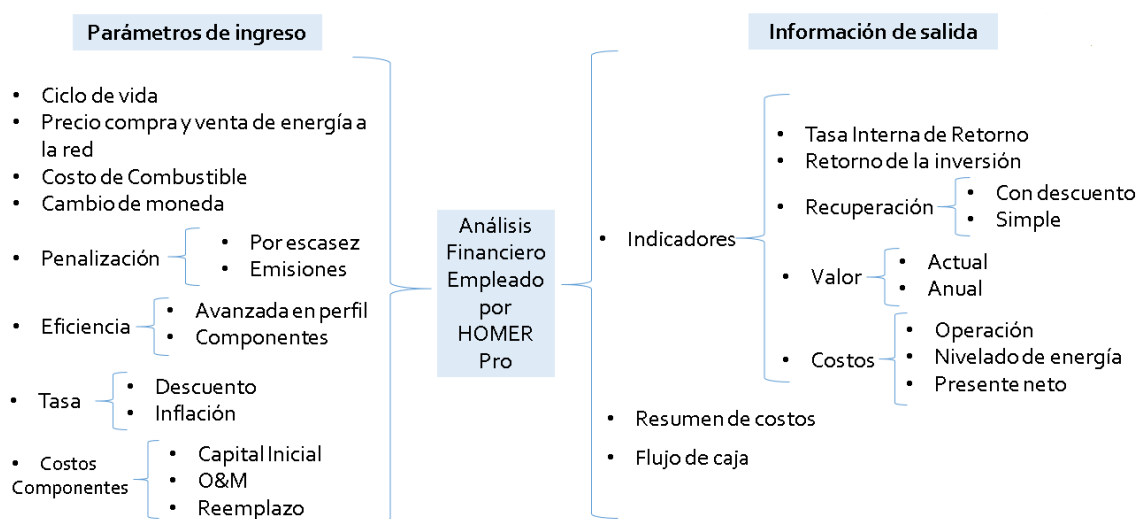
El análisis del NPC es apropiado para una comparación económica entre configuraciones de sistemas de energía, debido a que el NPC recoge la diversidad de costos asociados a la generación de energías renovables y no renovables. El análisis del COE es útil para un análisis financiero porque presenta el costo promedio por kilovatio-hora (\$ / kWh) de electricidad producido por el sistema en cuestión (Barrozo, Valencia y Cárdenas, 2020).

3.2 Esquema de análisis financiero

Los hallazgos de las sesiones indicadas para la solución de este capítulo (ver Tabla 1), influyen en la elaboración de un esquema de análisis financiero, este muestra la información mínimamente requerida por HOMER Pro para generar indicadores con respecto a parámetros financiero útiles en el análisis de viabilidad del dimensionamiento de una MG (ver Figura 23).

Figura 23.

Esquema de entradas y salidas financieras para el análisis financiero en HOMER Pro



3.2.1 Descripción del esquema (Información de entrada a HOMER Pro).

El esquema de la Figura 23, presenta ocho parámetros financieros de entrada: tiempo de vida del proyecto, precios de la red, costo de combustible, cambio de moneda, penalización, eficiencia, tasas y costos de componentes. Los parámetros de entrada son significativos para el software pues dependiendo de cómo se configure un diseño de MG, HOMER Pro podrá simular cientos o incluso miles de sistemas (HOMER Energy, 2020). Por consiguiente, se plantea la Tabla 5, que define y describe específicamente cada parámetro de entrada presente en el esquema con el propósito de tener claridad en la información que se consigna en el software.

Tabla 5.

Descripción del esquema de análisis financiero (Parámetros de ingreso en HOMER Pro)

Tipo de información	Nombre	Descripción
Parámetros financieros de ingreso en HOMER Pro	Tiempo de vida del proyecto (años)	Determina la duración del proyecto, haciendo que todos los cálculos financieros sean limitados por este valor.
	Precio de compra y venta a la red (\$)	Define los intercambios con la red eléctrica que afectan el costo nivelado de energía y flujos de caja del proyecto, convergiendo en el costo presente neto.
	Costo de combustible (\$/L)	Pueden afectar considerablemente el costo nivelado de la energía y la

Tipo de información	Nombre	Descripción
		matriz de flujo de caja de la MG.
	Cambio de moneda	Establece la unidad económica con la que se pretende trabajar el proyecto esta depende específicamente de la ubicación de la MG.
	Penalización (\$/kWh)	Se dividen en dos categorías, penalización por escasez y emisiones. Influyen en otros costos de operación y mantenimiento y en costos totales de la MG.
	Eficiencia específica de los componentes (%)	Afecta todos los parámetros de salida en general.
	Eficiencia avanzada del perfil de carga (%)	Hace referencia a las tecnologías, se implementa con el fin de reducir el consumo de dicha carga y se presenta como otros costos el proyecto.
	Tasas de descuento (%)	Se usa para calcular el factor de descuento.
	Tasa de inflación (%)	Representa un incremento anual en los costos de los componentes, afectando de forma directa la matriz de flujos de caja.
	Costos capitales para componentes (\$)	Representa un incremento anual en los costos de los

Tipo de información	Nombre	Descripción
		componentes, afectando de forma directa la matriz de flujos de caja.
	Costo de operación y mantenimiento para componente (O&M) (\$/vida útil) y (\$/por h)	Recoge todos los gastos que tenga un componente para su operación y mantenimiento durante su vida útil o en los grupos electrógenos por hora de operación.
	Costo de reemplazo para componente (\$)	Precio por efecto de cambio de componente por daño o finalización de su vida útil.

3.2.2 Descripción del esquema (información de salida de HOMER Pro).

El esquema de la Figura 23, presenta la información financiera entregada por HOMER Pro una vez se calcula un sistema de MG. Esta información es relevante para un análisis económico ya que comprende indicadores financieros y dos conjuntos (resumen de costos y el flujo de caja) que sintetizan la información de dichos indicadores, cabe mencionar que la mayoría de estos indicadores financieros se obtienen mediante una comparación económica respecto a un caso base (ver apéndice J).

Los parámetros de salida son relevantes debido a que le permiten al diseñador de MG evaluar la viabilidad financiera real de un proyecto y apoyar el modelado de HOMER Pro (Veilleux et al., 2020). Por consiguiente, se plantea la Tabla 6, para definir y describir específicamente la información de salida presente en el esquema de análisis financiero del software.

Tabla 6.*Descripción del esquema de análisis financiero (parámetros de salida de HOMER Pro)*

Tipo de información	Nombre	Descripción
Indicadores financieros	Tasa interna de rendimiento (TIR) (%)	Es la tasa de descuento a la cual el caso base y el sistema actual tienen el mismo costo actual neto.
	Retorno de la inversión (ROI) (%)	Es el ahorro anual de costos en relación con la inversión inicial
	Recuperación simple (años)	Es el número de años en que el flujo de efectivo acumulado, de la diferencia entre el sistema actual y el sistema de caso base, cambia de negativo a positivo.
	Recuperación de la inversión (Con descuento) (años)	Es una indicación de cuánto tiempo tomaría recuperar la diferencia en los costos de inversión entre el sistema actual y el sistema de caso base.
	Costo de operación del sistema (\$)	Es el valor anualizado de todos los costos e ingresos distintos de los costos de capital iniciales.
	Costo nivelado de energía (COE) (\$)	Costo promedio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema.
	Costo presente neto (NPC) (\$)	Valor presente de todos los costos en los que incurre el sistema durante su vida útil, menos el valor presente de todos los ingresos que gana durante su vida útil.
	Valor actual (\$)	El valor actual es la diferencia entre los costos actuales netos del sistema de caso base y el sistema actual
El valor anual (\$/año)	Es el valor presente multiplicado por el factor de recuperación de capital	

Tipo de información	Nombre	Descripción
Conjuntos de síntesis financiera	Resumen de costos	Indica que ingresos y costos totalizados por el ciclo de vida existen en cada componente y para el sistema.
	Flujo de caja	Muestran todos los costos de inversión inicial del proyecto, reemplazo, operación y mantenimiento y combustible en toda su vida útil. También, entrega los ingresos y egresos reales de efectivo, la depreciación y amortización y el valor de rescate que se obtiene al final de su vida útil.

3.3 Argumento del esquema de análisis financiero generado para HOMER

Como parte del proceso de descripción del esquema propuesto, es necesario exhibir como se afecta la información de salida debido a la dependencia de la información de entrada consignada en HOMER Pro. De este modo se propone un diseño práctico y propio de una MG influenciado por un sistema establecido en la pasantía de investigación: "Metodología de optimización para MG eléctricas en zonas no interconectadas" (Cataño y Gómez, 2018).

De esta manera el sistema a estudiar mediante simulaciones en la herramienta computacional comprende un sistema fotovoltaico de 0.3 kW, generadores de respaldo Diésel de 10 kW y respaldo de metanol (Biomasa) de 1.5 kW, turbina Hydro de 1 kW, sistema de almacenamiento de 10 kW h, inversor de 3 kW y conexión a la red. Para más información acerca de los componentes de la MG de diseño por favor dirigirse al apéndice L.

3.3.1 Información financiera de entrada en el caso de estudio.

Se busca aleatoriamente un diseño de MG que cuente con todos los componentes mencionados anteriormente, se le denomina “caso de estudio” y se opta por presentar los parámetros financieros de ingreso en la Tabla 7, estos influyen directamente en la información de salida entregada por HOMER Pro.

Tabla 7.

Información financiera de entrada en HOMER Pro (caso de estudio)

Nombre	Valor
Tiempo de vida del proyecto [años]	25
Precio de compra (\$)	550
Precio de venta a la red (\$)	450
Costo de combustible (\$/L)	2400
Cambio de moneda	Peso Colombiano
Penalización (\$/kWh)	0
Eficiencia específica del componente PV (%)	18.33
Eficiencia específica del componente inversor (%)	90
Eficiencia específica del componente de almacenamiento (%)	80
Tasas de descuento (%)	8
Tasa de inflación (%)	3.8
Costos capitales para componente PV (\$)	8.000.000
Costos capitales para componente inversor (\$)	6.056.787,80
Costos capitales para componente de almacenamiento (\$)	650.000
Costos capitales para componentes turbina Hydro (\$)	51.350.000
Costos capitales para componentes de respaldo Diésel (\$)	3.800.000
Costos capitales para componentes de respaldo de metanol (\$)	1.200.000

Nombre	Valor
Costo de operación y mantenimiento para componente PV (O&M) (\$/año)	150.000
Costo de operación y mantenimiento para componente inversor (O&M) (\$/año)	60.567,87
Costo de operación y mantenimiento para componente de almacenamiento(O&M) (\$/año)	25.000
Costo de operación y mantenimiento para componente de turbina Hydro (O&M) (\$/año)	5.000.000
Costo de operación y mantenimiento para componente de respaldo Diésel (O&M) (\$/año)	30.000
Costo de operación y mantenimiento para componente de respaldo metanol (O&M) (\$/año)	15.000
Costo de reemplazo para componente PV (\$)	8.000.000
Costo de reemplazo para componente inversor (\$)	6.056.787,80
Costo de reemplazo para componente de almacenamiento (\$)	650.000
Costo de reemplazo para componente de turbina Hydro (\$)	51.350.000
Costo de reemplazo para componente de respaldo Diésel (\$)	1.160.000
Costo de reemplazo para componente de respaldo metanol (\$)	450.000

3.3.2 Información financiera de salida al caso de estudio.

Cabe recordar que, para obtener los indicadores financieros mencionados anteriormente es necesario la selección de dos configuraciones de MG. En ese sentido la Figura 24 presenta dos configuraciones, el caso de estudio y el base, este último demarcado en color verde y elegido debido a que se encuentra alimentado únicamente por la red de suministro local. Se opta por presentar en la Tabla 8, los parámetros financieros de salida disponibles para el diseño de MG y conforme a la comparación económica generada por el software.

Figura 24.

Esquema de entradas y salidas financieras para el análisis financiero en HOMER Pro

Architecture							
Jinko60/300 (kW)	Gen10 (kW)	OorjaT1 (kW)	1kWh LA	Grid (kW)	SMARTstream	Conext SW2524 (kW)	
				999,999			
166	10.0	1.50	1	999,999	1	92.9	

Tabla 8.

Información financiera de salida de HOMER Pro (caso estudio)

Nombre	Valor
Tasa interna de rendimiento (TIR) (%)	7,9
Retorno de la inversión (ROI) (%)	5,2
Recuperación simple (años)	8,88
Recuperación de la inversión (Con descuento) (año)	14,78
Costo de operación del sistema (\$)	-29.745.880
Costo nivelado de energía (COE) (\$)	64,24
Costo presente neto (NPC) (\$)	224.825.400
Valor actual (\$)	291.493.100
Valor anual (\$/año)	18.750.360

3.3.3 Afectación de resultados por la relación entre información de entrada y salida.

En HOMER Pro existe una estrecha relación entre la información financiera consignada a parámetros de entrada y la información suministrada por el software representada por indicadores financieros de salida. Esta relación es más evidente al perturbar cualquier variable de entrada

debido a que se ve directamente reflejada en los indicadores de salida. A continuación, se plantean dos ejemplos que sirven de argumentos que refuerzan la afirmación anteriormente planteada.

Argumento A Si se presenta una eliminación del valor de venta de energía a la red, el diseño de MG deja de recibir ingresos, lo cual implica que al menos un indicador financiero de salida varía con respecto a su valor original.

Argumento B: Si se presenta un aumento en el tiempo de vida del proyecto de 5 años y un aumento en la tasa de inflación a 4.2%, al menos un indicador financiero de salida varía con respecto a su valor original. Lo anterior se evidencia en la Tabla 9.

Tabla 9.

Verificación de relación de información financiera de entrada y salida.

Nombre	Valor		
	Original	Argumento A	Argumento B
Tasa interna de rendimiento (TIR) (%)	7,9	7,2	7,9
Retorno de la inversión (ROI) (%)	5,2	10,3	5,2
Recuperación simple (años)	8,88	8,03	8,88
Recuperación de la inversión (Con descuento) (año)	14,78	11,85	14,39
Costo de operación del sistema (\$)	-29.745.880	24.785.450	-25.145.890
Costo nivelado de energía (COE) (\$)	64,24	479,12	57,35
Costo presente neto (NPC) (\$)	224.825.400	461.089.000	233.162.700
Valor actual (\$)	291.493.100	55.229.470	366.595.300
Valor anual (\$/año)	18.750.360	3.552.648	20.300.640

4. Comparación financiera entre MG utilizando el estudio de viabilidad técnico-económico

Este capítulo aborda el estudio de viabilidad y la comparación financiera entre MG, comienza con una introducción sobre viabilidad, posteriormente se describe el proceso para llegar a un análisis de viabilidad técnico económico contrastando criterios de viabilidad para MG interconectadas a la red y aisladas. Continúa con una descripción del software respecto a su utilización para realizar el análisis y finalmente se aborda la comparación técnico-económica de dos tipos de MG. Para dar cumplimiento al cuarto objetivo se realizó un análisis de viabilidad basados en consultas, investigaciones y el uso de la herramienta computacional HOMER Pro considerando aspectos técnicos, financieros y ambientales, finalmente se aplicó a un caso de MG interconectada a la red y aislada, realizando la comparación respectiva entre los dos casos.

4.1 Viabilidad técnico-económica

Antes de ahondar en el proceso de comparación financiera por medio de un estudio de viabilidad técnico-económico es necesario introducir el concepto de viabilidad, este se refiere a un asunto que, por sus circunstancias, tiene probabilidad de poderse llevar a cabo (RAE). En el caso de proyectos de inversión puede entenderse por viabilidad “la capacidad de un proyecto de asimilarse al medio intervenido y transformarlo, en forma sostenible”. Esta debe cumplir con la identificación de las limitaciones, restricciones y supuestos, establecer las oportunidades presentes, definir los requisitos para desarrollar el proyecto y evaluar las distintas opciones (Sobrero, 2009).

Ahora bien, el estudio necesario para llegar a una comparación financiera de MG debe basarse en dos aspectos principales, estos son la parte técnica y la económica. En el ámbito de proyectos la parte económica es considerada como fundamental para tomar decisiones sobre la realización de estos, sin embargo, en el caso específico de MG primero es necesario identificar el propósito del proyecto, con el fin de establecer otros aspectos relacionados a la viabilidad que se deban evaluar. Por lo tanto, para realizar un estudio de viabilidad enfocado a MG es necesario definir una estructura que abarque la viabilidad desde múltiples aspectos.

Para definir dicha estructura primero se realizó una investigación en la literatura de MG, encontrándose así la necesidad de utilizar indicadores y criterios que permiten calificar de cierto modo el proyecto con el fin de tomar una decisión sobre este. Los indicadores hacen referencia a un dato informativo obtenido a partir de una relación entre dos términos, permitiendo conocer o valorar las características relacionadas a este. Por otro lado, un criterio según la RAE es “una condición que permite concretar una elección” (RAE). Un criterio de viabilidad hace referencia a aquel criterio que se vuelve indispensable para que un proyecto se pueda realizar.

Se prosiguió estableciendo cuales debían ser los pilares del estudio de viabilidad, concluyéndose así que, en proyectos de MG como cualquier otro proyecto de electrificación, es indispensable considerar múltiples enfoques, entre ellos la parte ambiental, social, técnica, financiera y regulatoria. A partir de esto se estableció la ruta a seguir para llegar al estudio de viabilidad de MG. Se identificaron una amplia variedad de criterios que aportan a la viabilidad, los cuales se clasifican en cualitativos y cuantitativos.

Los criterios cualitativos se enfocan en la calidad o valor de un objeto o entidad mientras que los criterios cuantitativos permiten la obtención de un valor numérico para ser analizado. El objetivo de los criterios es establecer un valor de referencia que deben cumplir los indicadores. A

partir de las investigaciones, se encontró que algunos de ellos ya estaban formulados para proyectos de MG, otros hacían referencia a proyectos en general y los restantes fueron adaptados y reformulados basados en el dimensionamiento de MG.

Posteriormente se planteó una forma de evaluarlos por medio del calificativo de aceptado o rechazado, tanto para criterios cualitativos como cuantitativos, algunos criterios son específicos para un tipo de MG como se observa en la Tabla 10.

El análisis de esta información dio como resultado la propuesta de una lista de chequeo de criterios de viabilidad enfocado a MG tanto interconectadas a la red como aisladas, que abarca criterios técnicos, financieros, ambientales sociales y regulatorios. La utilización de la lista de chequeo permite realizar un estudio de viabilidad a MG con el objetivo principal de tomar una decisión frente a su implementación basados en el número y tipo de criterios cumplidos.

Cabe aclarar, que para tomar una decisión definitiva del proyecto influyen otras características y condiciones específicas de cada MG en particular, y finalmente el inversionista es el encargado de decidir si desea realizar la implementación del proyecto en base a la información presentada. Para ver la información completa acerca de los criterios de viabilidad para MG remitirse al apéndice L.

Tabla 10.

Criterios de viabilidad para MG

Indicadores financieros	Criterios de viabilidad		
	Criterios financieros	MG on-grid	MG off-grid
<i>Valor presente neto</i>	VPN > 0 Aceptable		
	VPN = 0 Indiferente	✓	X
	VPN < 0 Rechazado		

Indicadores financieros	Criterios de viabilidad		MG on-grid	MG off-grid
	Criterios financieros			
<i>Tasa interna de retorno</i>	TIR > 11,8%	Aceptable		
	TIR = 11,8%	Indiferente	✓	✓
	TIR < 11,8%	Rechazado		
<i>Beneficio – costo</i>	B/C > 1	Aceptable		
	B/C = 0	Indiferente	✓	X
	B/C < 1	Rechazado		
<i>Recuperación simple (sobre vida útil de MG)</i>	PRI < 40%	Aceptable		
	PRI = 40%	Indiferente	✓	✓
	PRI > 40%	Rechazado		
<i>Costo nivelado de energía</i>	PVE > COE	Aceptable	✓	X
	PVE < COE	Rechazado		
	Menor costo posible de COE		X	✓
Indicadores ambientales	Criterios ambientales		MG on-grid	MG off-grid
<i>Fracción de energías renovables</i>	FER > 60%	Aceptable	✓	✓
	FER < 60%	Rechazado		
<i>Ahorro de combustible</i>	AH > 15%	Aceptable	✓	✓
	AH < 15%	Rechazado		
<i>Emisiones</i>	E < 40%	Aceptable	✓	✓
	E > 40%	Rechazado		
Indicadores técnicos	Criterios técnicos		MG on-grid	MG off-grid
<i>Grado de autosuficiencia</i>	GA ≥ 1	Aceptable	✓	✓
	GA < 1	Rechazado		
<i>Valor esperado de pérdida de carga días/año</i>	LOLE ≤ 0,1	Aceptable	✓	✓
	LOLE > 0,1	Rechazado		
<i>Número de ciclos de descarga profunda al 90% de la batería</i>	# > 400	Aceptable		
	# < 400	Rechazado	✓	✓
	A ≥ 0,5	Aceptable	✓	

Indicadores financieros	Criterios de viabilidad		
	Criterios financieros	MG on-grid	MG off-grid
<i>Autonomía de las baterías on-grid en horas</i>	A < 0,5 Rechazado		X
<i>Autonomía de las baterías off-grid en horas</i>	A ≥ 4 Aceptable	X	✓
	A < 4 Aceptable		

4.2 Estudio de viabilidad en HOMER Pro

Como se ha mencionado anteriormente, HOMER Pro es un software técnico-financiero enfocado en el dimensionamiento de MG y otros sistemas de energía híbridos, con la premisa de obtener el menor costo presente neto (NPC) en la solución del problema de optimización. Los resultados de simulación incluyen resultados eléctricos, financieros y ambientales. Por lo tanto, es posible obtener indicadores a partir de HOMER Pro para ser utilizados en los criterios de viabilidad establecidos para MG.

Ahora bien, no todos los criterios establecidos se pueden evaluar con HOMER Pro, además, algunos indicadores utilizados del software son resultados directos, y otros son calculados a partir de la información de las simulaciones. Para poder aplicar completamente la lista de chequeo a proyectos de MG es necesario realizar una recolección de información abarcando los resultados entregados por HOMER, la socialización del proyecto con la comunidad beneficiaria, la aplicación de normas, leyes, regulaciones y la obtención de licencias ambientales entre otras.

Se realizaron ejemplos de aplicación de una MG interconectada a la red y una aislada utilizando HOMER Pro, con la finalidad de evaluar la viabilidad de estas, adaptando la lista de chequeo con un enfoque a los resultados de simulación. Se identificó el posible mejoramiento del estudio de viabilidad a partir de variación de parámetros o análisis de sensibilidad con HOMER

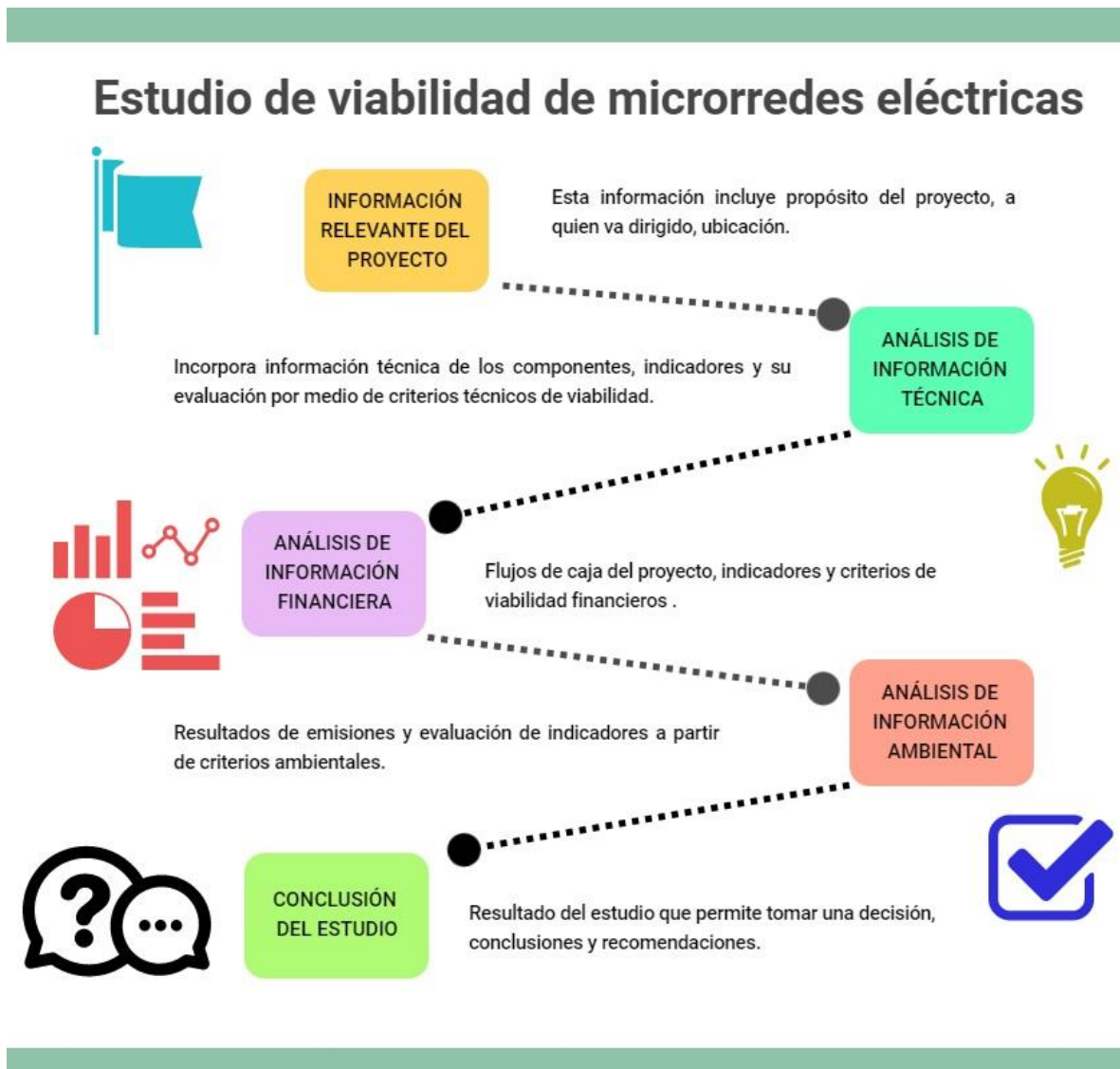
Pro. Esto deriva a la realización de un reporte como forma de presentar los resultados de viabilidad de proyectos de MG.

HOMER Pro brinda la posibilidad de generar un reporte de resultados, seleccionando el tipo de graficas e información a incluir, pero estos carecen de un análisis de viabilidad, por ello se construyó un formato de reporte de viabilidad para MG donde se presenta toda la información del proyecto por medio de gráficos y tablas para finalmente concluir con la viabilidad de un proyecto.

En este formato de reporte se realiza una comparación de tres configuraciones y se especifica un caso base como referencia, para presentar una oferta variada de posibilidades al inversionista. El reporte finaliza especificando cuales configuraciones son viables para la toma de decisiones. La Figura 25, presenta la composición del estudio de viabilidad.

Figura 25.

Estudio de viabilidad de MG



4.3 Comparación financiera de dos MG.

La comparación financiera pretende sintetizar relaciones y diferencias entre dos escenarios de un mismo diseño de microrred. Utilizando el software HOMER Pro se consideró primero el diseño de una microrred aislada a la cual se le realizó el estudio de viabilidad y se presentó su

respectivo reporte, seguidamente se utilizó el mismo caso de microrred aislada agregando como componente la red eléctrica, esto llevo a un cambio de resultados cuya finalidad fue identificar las implicaciones de ser sometido a la interconexión con la red y así llegar a una conclusión de viabilidad entre los dos escenarios.

El caso de estudio de MG aislada ubicada en Villavicencio, Meta basada en el estudio de (Gaviria y Gómez, 2018). La Tabla 11, presenta los resultados del dimensionamiento para cada configuración.

Tabla 11.

Configuraciones de viabilidad para MG

Componentes	MG Aislada				MG Conectada			
	Config 1	Config 2	Config 3	Caso base	Config 1	Config 2	Config 3	Caso base
PV kW	95	95	95	X	95	95	95	X
Generador Diésel kW	10	10	10	10	10	10	10	X
Generador biomasa kW	X	X	1,5	X	X	X	1,5	X
# de baterías	446	373	334	423	1	1	1	X
Red kW	X	X	X	X	999.999	999.999	999.999	999.999
# de turbinas hidro cinéticas	X	1	1	X	X	1	1	X
Convertidor kW	20	20	20	10,3	41,5	41,5	41,5	X

Para realizar el análisis de viabilidad se utilizó la misma capacidad instalada para el sistema fotovoltaico en los dos tipos de MG y se utilizó el optimizador de HOMER Pro para dimensionar

el sistema de almacenamiento de baterías y el convertidor. La Tabla 12, muestra los resultados para NPC, COE y TIR de los tipos de MG.

Tabla 12.

Criterios financieros de viabilidad para MG

Configuraciones		Costo presente neto \$	Costo nivelado de energía \$/kWh	Tasa interna de retorno %
MG aislada	Config 1	1.259.690.612	1.342	85,9
	Config 2	1.404.802.353	1.497	82,3
	Config 3	1.562.773.842	1.665	86,5
	Caso base	4.788.656.172	5.102	X
MG conectada	Config 1	500.935.451	244	4,5
	Config 2	656.212.093	317	0,3
	Config 3	887.481.572	428	0
	Caso base	516.318.504	550	X

Se observa una reducción aproximadamente del 50% en NPC y COE de la MG conectada a la red en comparación con la MG aislada, mientras que, la TIR presenta valores altos en la MG aislada respecto a la conectada a la red. La Tabla 13, muestra los resultados de costos iniciales, costos de operación y mantenimiento y porcentaje de recuperación simple para las tres configuraciones seleccionadas de cada tipo de MG.

Tabla 13.*Criterios financieros de viabilidad para MG*

Configuraciones		Costo inicial \$	Costo de O&M \$	Recuperación simple %
MG aislada	Config 1	588.747.642	333.881.642	4,68
	Config 2	592.824	412.183.095	4,84
	Config 3	563.855.546	632.966.723	4,6
	Caso base	299.612.269	3.352.551.788	X
MG conectada	Config 1	341.558.383	80.485.261	60,76
	Config 2	392.908.383	136.172.203	99,32
	Config 3	394.108.383	365.791.285	100
	Caso base	0	516.318.504	X

La Tabla 14, muestra los resultados de la evaluación ambiental para las tres configuraciones de cada tipo de MG. Los valores de emisiones y ahorro de combustible se calcularon respecto a los resultados del caso base.

Tabla 14.*Criterios ambientales de viabilidad para MG*

Configuraciones		Fracción de energías renovables %	Emisiones de dióxido de carbono %	Ahorro de combustible %
MG aislada	Config 1	98,6	1,45	98,54
	Config 2	96,2	3,84	96,65
	Config 3	95,5	5,96	98,37
	Caso base	X	100	0

Configuraciones		Fracción de energías renovables %	Emisiones de dióxido de carbono %	Ahorro de combustible %
MG conectada	Confg 1	76,9	50,34	100
	Confg 2	78,7	47	100
	Confg 3	78,6	49,5	100
	Caso base	X	100	100

5. Guía para dimensionar y analizar operacionalmente MG con HOMER PRO

Cuando se usa por primera vez un software para el diseño de sistemas eléctricos, generalmente cuenta con un manual de usuarios que da proyecciones técnicas, económicas o aplicativas del mismo.

Sin embargo, el manual de HOMER Pro presenta los resultados entregados por el software, y aunque son útiles, éste no describe el análisis de operación de una MG, por tal motivo este seminario propone la creación de una guía ligera y concreta que ayude con dichos aspectos para establecer una visión general de HOMER Pro y que sea una base para estudios futuros, facilitando la comprensión del software dado que no existe una evidente apropiación de este tipo de herramientas.

Se realiza la guía como un manual introductorio al dimensionamiento y operación de MG en HOMER Pro. Usando la herramienta Microsoft Word, se desarrolla la guía que cuenta con una introducción al documento y cinco capítulos dispuestos de la siguiente manera. El primer capítulo presenta en detalle los parámetros de ingreso al software, el segundo capítulo habla de la etapa

para el dimensionamiento de MG presentes en HOMER Pro, el tercer capítulo presenta la información (con un enfoque técnico) entregada por el software tras la simulación de una MG, el cuarto capítulo describe análisis de operación de una MG y define las estrategias de despacho de HOMER Pro que permiten realizar un análisis de operación, el último capítulo presenta el material audiovisual producto del desarrollo de las sesiones presenciales, lo anterior busca aportar en la orientación y formación de estudiantes de E3T (Ver apéndice P).

6. Conclusiones

- Este trabajo de grado presenta una revisión sobre las características de los softwares de la compañía HOMER Energy para el desarrollo efectivo de MG. Entre las dos herramientas que brinda esta compañía, HOMER Pro es el que más se ajusta a las necesidades del seminario que son dimensionar y analizar MG aisladas y conectadas a la red.
- Para considerar un proyecto de MG y realizar un correcto análisis técnico-económico se debe tener claridad del objetivo de este, ya sea técnico, económico o social. Además, las características de cada proyecto y las expectativas del inversionista pueden influir en su valoración y realización.
- Un diseño de MG debe satisfacer como mínimo un estudio de etapas de dimensionamiento que cuente con la disponibilidad energética y una estimación del potencial de recursos energético de la zona de instalación de la MG.

- La interconexión de una MG conlleva a una reducción del NPC y el COE con respecto al modo de operación aislado, debido al aprovechamiento de excesos de energía y a la reducción en el uso de otras fuentes de generación más costosas como grupos electrógenos y aumenta la confiabilidad del sistema. Además, las emisiones generadas por la MG pueden permanecer constantes o aumentar dependiendo de las características específicas del proyecto, así como también la fracción de energías renovables puede disminuir considerable.

- Un estudio de viabilidad permite considerar un proyecto de MG por medio de la valoración de indicadores con respecto a criterios de decisión. Si algún indicador no cumple su criterio, no se descarta el proyecto, ya que puede ser susceptible a cambios por mejorar.

7. Entregables del seminario de investigación

Como resultado final del seminario se entrega una carpeta en OneDrive al semillero de investigación en generación distribuida (SIGED), por cada una de las dieciséis (16) sesiones, donde se incluye la totalidad temática. La Tabla 15, describe el contenido de cada carpeta.

Tabla 15.

Contenido de los entregables del seminario de investigación

Nombre de la carpeta	Contenido de la carpeta
Guía técnica para dimensionar y analizar operacionalmente una MG	Infografía de la guía técnica (formato PDF) Guía técnica (formato PDF)
Archivos en común de todas las carpetas de las sesiones	
<ul style="list-style-type: none"> • Documento con información técnica (formato PDF) • Presentación con la información técnica abreviada (diapositivas formato PDF) • Videos de la presentación (formato mp4) • Acta con el desarrollo de cada sesión (formato PDF) 	
Archivos adicionales de las siguientes sesiones	
Sesión 7	Simulaciones (formato HOMER), resultados eléctricos entregados por HOMER Pro, y memorias de cálculos de las MG aislada y conectada a la red con bases de datos NASA e IDEAM (formato xlsx).
Sesión 10	Informe generado por HOMER Grid (formato PDF)

Sesión 13	Lista de chequeo para la viabilidad técnico – económico de MG aisladas y conectadas a la red (formato PDF).
Sesión 14	Informes de viabilidad para MG aislada y conectada a la red (formato PDF). Formato del reporte de viabilidad de una MG (formato PDF) Reporte generado por HOMER Pro (formato PDF).

Referencias Bibliográficas

- Abu-elzait, S. y Parkin, R. (2019). The Effect of Dispatch Strategy on Maintaining the Economic Viability of PV-based Microgrids. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 1203-1205
- Aguirre Mendoza, A. M., Diaz Mendoza, K. y Pasqualino, J. (Mayo 2019). Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia. *Ecological Engineering. Volumen* (130). 252-262
- Anzures, C., Posada, J., Osorio, K., Vidal Medina, J. R., Sanchez, V. M. y Lopez, U. (2018). Operación de Sistemas de Generación y Suministro de Energía Eléctrica en Zonas no Interconectadas de Colombia. *IEEE ANDESCON*. 1-6
- Budes Barrozo, F., Valencia Ochoa, G. y Cárdenas Escorcía, Y. (2020). An Economic Evaluation Of Renewable And Conventional Electricity Generation Systems In A Shopping Center Using HOMER Pro. *Contemporary Engineering Sciences. 10th ed.* 3.
- Bukar, A. L., Tan, C. W. y Lau, K. Y. (Agosto 2019). Optimal sizing of an autonomous photovoltaic, wind, battery, diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm. *Solar energy. Volumen* (188). 685-696
- Gaviria Cataño, F. and Gómez Leal, J. (2018). Metodología De Optimización Para MG Eléctricas En Zonas No Interconectadas. *Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali*. 80-90
- HomerEnergy. (2020). HOMER Pro - Microgrid Software For Designing Optimized Hybrid Microgrids. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- HOMER Energy. Agregar una carga. https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.12/adding_a_load.html

HOMER Energy

- Husein, M. y Chung II. Y. (2018). Optimal design and financial feasibility of a university campus microgrid considering renewable energy incentives. *Applied Energy. Volume (225)*. 273-289
- Husein, V. B., Kang, M y col. (2019). Diseño óptimo para una microrred del campus teniendo en cuenta el incentivo de descarga de ESS y la viabilidad financiera. *J. Electr. Ing. Technol. Volume (14)*, 1095-1107
- IEA, IRENA, UNSD, WB, WHO. (2019). The energy progress report 2019. The world bank, Washington D.C. Tracking SDG7.
- Kumar, A., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. y Bansal R.C. (2018). Multiyear Load Growth Based Techno-Financial Evaluation of a Microgrid for an Academic Institution. *IEEE. Volume (6)*, 37533-37555.
- LoRESTANI, A. Gharehpetian, G.B. y Nazari, M. H. (Julio 2019). Optimal sizing and techno-economic analysis of energy- and cost-efficient standalone multi-carrier microgrid. *ENERGY. Volumen (178)*. 751-764
- Morad, M., Nayel, M., Elbaset, A.A. and Galal, A. I. A. (2018). Sizing and Analysis of Grid-Connected Microgrid System for Assiut University Using HOMER Software. *IEEE*
- Roldán, P. N. (2017). Análisis financiero. <https://economipedia.com/definiciones/analisis-financiero.html>
- Sagani, A. Vrettakos, G. y Dedoussis, V. (2017). Viability assessment of a combined hybrid electricity and heat system for remote household applications. *Solar Energy. Volume (151)*. 33-47
- Salisu, S., Mustafa, M.W., Olatomiwa, L. y Mohammed, O. O. (2019). Evaluación de la viabilidad técnica y económica de un sistema híbrido de energía fotovoltaica, eólica y diesel en una comunidad remota del centro norte de Nigeria. *Alexandria Engineering Journal. Volumen (58)*. 1103-1118

- Ser COLOMBIA Asociación Energías Renovables. (2020). Normativa aplicable a las Energías Renovables. Recuperado de <https://www.ser-colombia.org/index.php/energias-renovables/normatividad>
- Shanbog, NS., Agalgaonkar, Y. y Rajarathnam, U. (2019). Un análisis de viabilidad financiera del hidrógeno en las microrredes. Segunda conferencia Internacional sobre potencia y Control d la Unidad Embebida (ICPEDC). 58-63.
- Shyu, C. W. (2014). Ensuring Access to electricity and minimum basic electricity needs as a goal for the post-MDG development agenda after 2015. *Energy Sustain. Volumen* (19). 29-38
- Subramanyam, V. Jin, T. y Novoa, C. (2020). Sizing a renewable microgrid for flow shop manufacturing using climate analytics. *Journal of cleaner production. Volume* (252)
- Universidad Industrial de Santander. (2007). Lineamientos para el seminario de investigación como modalidad para el desarrollo del trabajo de grado, primera edición. p. 4
- Universidad Industrial de Santander. (2020). MODALIDAD SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN. https://www.uis.edu.co/webUIS/es/trabajosdegrado/seminario_investigacion.html
- Universidad Industrial de Santander. (2019). Presentación del Grupo de Investigación GISEL. <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/academia/facultades/fisicoMecanicas/escuelas/e3t/investigacionExtension/GISEL/index.html>
- Veillux, G., Potisat, T., Pezim, D., Ribback, C., Ling, J., Krysztofínski, A., Ahmed, A., Papenheim, J. Mon Pineda, A, Sembian, S., Chucherd, S. (2020). Techno-economic analysis of microgrid projects for rural electrification: A systematic approach to the redesign of Koh Jik off-grid case study. *Energy for Sustainable Development. Volume* (54). 1-13.