

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MICRORREDES A PARTIR DEL USO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HOMER

PhD. German Osma Pinto,
MSc. Iván Edgardo Jiménez Vargas, MSc. Marlon Millán Martínez,
Ing. Andrea Tatiana Sarmiento Barrera, Ing. Iván Andrés Escudero Paredes,
Ing. Jaime Fabian Valencia Correa, Ing. Yulieth Muñoz Blanco

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones,
Tel.: 57-6-6344000, Ext. 2360. E-mail: gealosma@uis.edu.co, ivan.jimenez@correo.uis.edu.co, marlon2198145@correo.uis.edu.co, {jaime.valencia2, andrea.sarmiento, ivan.escudero, yulieth.munoz }@correo.uis.edu.co

Abstract: Microgrids (MG) are composed of distributed generation sources and controllable loads; they operate as a single autonomous network, either in parallel or isolated from the grid. They are designed as an option for energy supply in areas where there is no interconnection to the local grid. The development of new software technologies has brought practicality in the dimensioning of MG, but it has also brought challenges in the interpretation of results and feasibility analysis in MG projects. This has motivated several studies about popular computational tools for MG sizing. However, these are summarized according to their location, year, architecture and technical aspects. In that context, this document includes a review of the HOMER Pro software and the stages for MG dimensioning in it. It proposes and applies to a case study, a technique for assessing the viability of MG through a checklist that includes technical, economic and environmental criteria focused on HOMER Pro.

Keywords: Analysis, HOMER, microgrid, viability.

Resumen: Las microrredes eléctricas (MG) están conformadas por fuentes de generación distribuida y cargas controlables; operan como una sola red autónoma, ya sea en paralelo o aislado de la red. Se proyectan como una opción para el suministro de energía en zonas donde no se cuenta con la interconexión a la red local. El desarrollo de nuevas tecnologías de software ha traído tanto practicidad en el dimensionamiento de MG como desafíos en la interpretación de resultados y análisis de viabilidad en proyectos de MG. Lo anterior ha motivado algunos estudios sobre herramientas computacionales disponibles en el mercado que mayormente solo consideran ubicación, año, arquitectura y aspectos técnicos. En ese contexto, este documento incluye una revisión del software HOMER Pro y propone un esquema de valoración de viabilidad de MG mediante una lista de chequeo que incluye criterios técnicos, económicos y ambientales enfocados a HOMER Pro.

Palabras clave: Análisis, HOMER, microrredes, viabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos, las microrredes eléctricas (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" (Abu-elzait, 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). Su proceso de planificación incluye etapas como selección de tecnologías, dimensionamiento de recursos de energía distribuida y simulación de la operación, entre otras. Tal proceso busca garantizar el cumplimiento de 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).

Nótese que existen herramientas computacionales orientadas a apoyar este proceso de planificación, principalmente en la etapa de dimensionamiento. Se destacan herramientas como BHP Screening Tool, HOMER Pro, HYDROGEMS, IHOGA y

TRNSYS, entre otras. Éstas pueden ser empleadas en aplicaciones independientes de energía renovable, como edificios o comunidades locales (Kumar *et al.*, 2018).

Existen diversos estudios en la literatura sobre el dimensionamiento de MG (Adriana & Ramón, 2012), algunos basados en fuentes de energía renovables que utilizan diferentes métodos, técnicas de optimización y herramientas de software populares como HOMER Pro (Kumar *et al.*, 2018). Sin embargo, estos estudios se resumen en función de su ubicación, año, arquitectura (conectados y aislados de la red, centralizados y descentralizados) junto con aspectos técnicos (detalles de componentes y estrategia de despacho) (Kumar *et al.*, 2018).

Un estudio de viabilidad de proyectos de MG debe basarse como mínimo en dos aspectos principales, técnicos y económicos. Mientras que en materia técnica se prioriza garantizar la demanda eléctrica, los aspectos económicos toman relevancia para la implementación del proyecto. Por lo tanto, un estudio de viabilidad de MG debe definir una estructura que evalúe múltiples criterios de decisión (Khalyasmaa, y Zinovieva, 2018).

En ese contexto, HOMER Pro es utilizado como un instrumento de dimensionamiento y evaluación técnico-financiera de sistemas de energía aislados o conectados a la red. Calcula diferentes permutaciones de posibles de MG basándose en las entradas proporcionadas y simula la operación del sistema. Organiza configuraciones de MG con respecto al menor costo presente neto (NPC) (Prema y Uma, 2016). Los resultados del software abarcan tópicos eléctricos, financieros y ambientales, por lo tanto, es posible obtener indicadores que puedan ser evaluados con criterios de viabilidad establecidos para MG.

Este documento está dispuesto de la siguiente manera. La Sección 2 describe de manera general a HOMER Pro, presenta el caso de estudio, propone una técnica de análisis de viabilidad y ahonda en las etapas de dimensionamiento de MG. La Sección 3 describe el análisis técnico-económico de proyectos de MG y aplica la propuesta de evaluación a un caso de estudio. Por último, la Sección 4 presenta las conclusiones más relevantes del estudio realizado.

2. METODOLOGÍA

Esta sección describe aspectos generales de HOMER Pro, los criterios para el análisis de viabilidad de MG y un caso de estudio.

2.1 Descripción de HOMER Pro

HOMER Pro es un software de dimensionamiento de sistemas de energía aislados o conectados a la red. Está basado en un algoritmo de búsqueda modificado “HOMER Optimizer” para la identificación de opciones con el menor NPC. Permite considerar diversas fuentes de generación (turbinas eólicas, sistemas fotovoltaicos, biomasa, grupos electrógenos, pequeñas centrales hidroeléctricas, turbinas hidro cinéticas), sistemas de almacenamiento de energía y cargas (eléctricas, térmicas o de hidrógeno). También permite realizar análisis de sensibilidad para estudiar el impacto de la variación de parámetros sobre los resultados.

La información de ingreso al software considera parámetros financieros (costos de capital, reemplazo, operación y mantenimiento) de cada componente, información técnica (eficiencia, vida útil, tensión y capacidad instalada), estrategias de despacho y recursos disponibles en la zona de estudio (velocidad del viento, irradiación solar, temperatura, biomasa, velocidad del agua y caudal). En la información de salida, la sección financiera cuenta con resumen de costos totales, flujos de caja y comparación financiera del caso de estudio respecto a un caso base. En la sección técnica, se encuentra valores de cantidad o capacidad de cada componente, energía generada, energía consumida, consumo de combustible por el grupo electrógeno y flujos de potencia, entre otros, para un año de simulación.

2.2 Criterios para el análisis técnico-económico de una MG

Para evaluar la viabilidad de un proyecto de MG es necesario utilizar indicadores y criterios que permiten calificar de cierto modo el proyecto con el fin de tomar una decisión sobre este. Un indicador es un dato informativo que permite valorar el desempeño de una actividad. Por otro lado, un criterio de viabilidad hace referencia a un requerimiento indispensable para la realización de un proyecto. El objetivo de los criterios es establecer un valor de referencia que deben cumplir los indicadores.

En proyectos de MG es indispensable considerar múltiples enfoques que listen distintos tipos de criterios (Wu *et al.*, 2019). Debido a esto se consideraron criterios ambientales, sociales, técnicos, financieros y regulatorios. Los criterios aportan a definir la viabilidad, 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.

Algunos de los criterios ya estaban formulados para proyectos de MG como el caso de (Veilleux *et al.*, 2020), donde utilizan un mínimo de

fracción de energías renovables del 60% y valores favorables de TIR de 8.95% a 15.28%, otros hacían referencia a proyectos en general y los restantes fueron reformulados. Se planteó una forma de evaluar los criterios utilizando el calificativo de aceptado o rechazado, algunos criterios son específicos para un tipo de MG como la autonomía. Estos criterios se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1: Indicadores de viabilidad

Indicadores financieros	Criterios financieros	MG on-grid	MG off-grid
Valor presente neto	VPN > 0 Aceptable	✓	×
	VPN = 0 Indiferente		
	VPN < 0 Rechazado		
Tasa interna de retorno	TIR > 11,8% Aceptable	✓	✓
	TIR = 11,8% Indiferente		
	TIR < 11,8% Rechazado		
Beneficio – costo	B/C > 1 Aceptable	✓	×
	B/C = 0 Indiferente		
	B/C < 1 Rechazado		
Recuperación simple (vida útil de MG)	PRI < 40% Aceptable	✓	✓
	PRI = 40% Indiferente		
	PRI > 40% Rechazado		
Costo nivelado de energía	PVE > COE Aceptable	✓	×
	PVE < COE Rechazado		
	Menor costo de COE	×	✓
Indicadores ambientales	Criterios ambientales	MG on-grid	MG off-grid
Fracción de energías renovables	FER > 60% Aceptable	✓	✓
	FER < 60% Rechazado		
Ahorro de combustible	AH > 15% Aceptable	✓	✓
	AH < 15% Rechazado		
Emisiones	E < 40% Aceptable	✓	✓
	E > 40% Rechazado		
Indicadores técnicos	Criterios técnicos	MG on-grid	MG off-grid
Grado de autosuficiencia	GA ≥ 1 Aceptable	✓	✓
	GA < 1 Rechazado		
Valor esperado de pérdida de carga días/año	LOLE ≤ 0,1 Aceptable	✓	✓
	LOLE > 0,1 Rechazado		
Ciclos descarga profunda - batería (90%)	# > 400 Aceptable	✓	✓
	# < 400 Rechazado		
Autonomía baterías On-grid en horas	A ≥ 0,5 Aceptable	✓	×
	A < 0,5 Rechazado		
Autonomía baterías Off-grid en horas	A ≥ 4 Aceptable	×	✓
	A < 4 Rechazado		

En total, se plantean 29 criterios, de los cuales 12 se pueden abordar utilizando el software HOMER Pro. Los criterios técnicos restantes evalúan la tecnología a utilizar, la seguridad y fiabilidad del proyecto de MG. Estos son los criterios de madurez, seguridad y fiabilidad.

El criterio de aceptabilidad social mide la opinión de las personas, esta debe ser mayor a 60 % y se calcula según Ec. (1), mientras que el beneficio social considera los aportes del proyecto a la comunidad. Por otro lado, el criterio de densidad de usuarios tiene en cuenta el número de personas en el área de interés.

$$AS = \frac{\# \text{ de encuestas favorables}}{\# \text{ de encuestas aplicadas}} * 100\% \quad (1)$$

Los criterios ambientales restantes tienen en cuenta área de la tierra disponible, impacto visual que debe ser menor al 75% y se calcula según la Ec. (2) y permisos ambientales necesarios.

$$IV = \frac{\# \text{ de encuestas por molestias}}{\# \text{ de encuestas aplicadas}} * 100\% \quad (2)$$

Los criterios financieros restantes establecen un porcentaje de sobrecostos en transporte que debe ser menor al 10% y aprovechamiento de incentivos. También se tiene en cuenta valores de referencia de inversión inicial y costos de operación y mantenimiento según la tecnología utilizada.

Los criterios legales consideran la parte técnica que se debe cumplir ante el operador de red (OR), así como criterios y normativas aplicados a zonas no interconectadas (ZNI) y a los componentes de la MG. La información analizada llevó a la propuesta de una lista de chequeo de criterios de viabilidad enfocada a MG. Su utilización permite realizar un estudio de viabilidad con el objetivo de tomar una decisión frente a su implementación con base en el número y tipo de criterios cumplidos.

2.3 Caso de estudio

Para mostrar la aplicación de los criterios definidos, se realiza el dimensionamiento de una MG para una comunidad en Villavicencio, Meta (4.15,73,6283°), la cual, a su vez, está basada en una MG presentada por (Gaviria y Gomez, 2018). La Fig. 1 muestra el perfil de carga cuyo consumo energético es 165,44 kWh/día. Esta MG incluye un sistema fotovoltaico, una turbina hidro-cinética, un sistema de almacenamiento con baterías, un generador diésel y un generador a partir de biomasa, tal como muestra la Fig. 2.



Fig. 1. Perfil de carga de la MG estudiada.

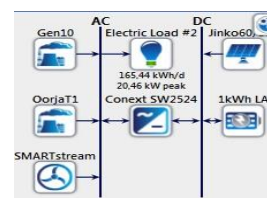


Fig. 2. Esquemático de la MG estudiada.

Los parámetros técnicos y financieros de ingreso de cada componente en el software se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de ingreso de los componentes de la MG.

Artículo	Especificación
Generador Diesel	
Nombre	Generic 10 kW
Marca	Genérico
Capacidad	Capacidad fija de 10 kW
Costo de capital	3.800.000 \$
Costo de reemplazo	1.160.000 \$
Costo de oper. y mnto	30.000 \$/por hora
Precio de combustible	2.400 \$/L
Generador Biomasa	
Nombre	Oorja 1.5 kW Model T-1
Capacidad	1,5 kW
Costo de capital	1.200.000 \$
Costo de reemplazo	450.000 \$
Costo de oper. y mnto	15.000 \$/por hora
Tipo de combustible	Metanol
Modulo PV	
Marca	Jinko Eagle PERC60
Tipo de panel	Flat plate
Potencia nominal	300 W
Costo de capital	8.000.000 \$/ 3 kW
Costo de reemplazo	8.000.000 \$/ 3 kW
Costo de oper. y mnto	150.000 \$/ año
Vida útil	25 años
Turbina de hidrocínética agua	
Nombre	SMART Free Stream
Capacidad nominal	5 kW
Costo de capital	51.350.000 \$/kW
Costo de reemplazo	51.350.000 \$/kW
Costo de oper. y mnto	5.000.000 \$/año
Vida útil	10 años
Batería	
Marca	Kinetic Battery Model
Tipo de batería	Plomo y acido
Capacidad nominal	1 kWh
Costo de capital	650.000 \$/kW
Costo de reemplazo	650.000 \$/kW
Costo de oper. y mnto	25.000 \$/año
Vida útil	10 años
Convertidor de potencia	
Marca	Schneider Conext
Nombre	SW2524
Capacidad nominal	3 kW
Costo de capital	6.056.787 \$/ 3kW
Costo de reemplazo	6.056.787 \$/ 3kW
Costo de oper. y mnto	60.567,87 \$/año
Vida útil	10 años

2.4 Dimensionamiento de la MG en HOMER Pro
Para el proceso de dimensionamiento de la 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.

2.4.1 Consulta de información

Se consulta la información de recursos en la zona y factores económicos para dimensionar la MG para calcular la participación de las fuentes de generación y los costos del sistema. En HOMER Pro es posible importar datos recursos como irradiancia solar, temperatura ambiente y velocidad del viento. Asimismo, se incluyen parámetros financieros como tasa de inflación, tasa de descuento, valores de compra y venta de energía, índices de necesidades básicas insatisfechas y condiciones de acceso (Garzón y Saavedra, 2017).

HOMER Pro permite importar los datos de recursos y cargas (HOMER Energy, 2020). Con el fin

de estimar curvas de carga para su posterior importe, se recomienda aplicar los procedimientos establecidos por la NTC 2050 (Garzón y Saavedra, 2017). Si estos datos no están disponibles, el software ofrece perfiles de carga predeterminados (HOMER Energy, 2020).

2.4.2 Selección de componentes de una MG en HOMER

HOMER Pro permite seleccionar los componentes de la MG, como fuentes de generación, sistema de almacenamiento, convertidor en el caso que sea necesario y controlador. Se requiere el ingreso de parámetros financieros (e.g. inversión inicial).

2.4.3 Simulación en HOMER Pro

La solución óptima simulada por HOMER Pro, satisface restricciones específicas al menor costo actual neto total (NPC) y costo de energía (COE) (Mohammed *et al.*, 2018). Como el software logra realizar tanto análisis de optimización como de sensibilidad tras su simulación, se facilita la evaluación de las configuraciones según costo del combustible, disponibilidad de las fuentes y carga (Sanjeev *et al.*, 2019).

2.4.5 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación se dividen en cuatro grupos, a saber: resumen de costos, flujo de caja, resultados energéticos y resumen de las emisiones. La Tabla 3 presenta los resultados y la Fig. 4 sintetiza los resultados de simulación de HOMER Pro. La Fig. 5 muestra un esquema que describen cada una de las etapas que influyen en el dimensionamiento de una MG en HOMER Pro con sus respectivas entradas y de salidas.

Tabla 3: Resultados de simulación.

Componentes	Dimensionamiento
Generador, PV, hidro, convertidor, reformador, electrolizador y controlador de carga térmica	Capacidad instalada
Controlador de carga térmica	
Almacenamiento	Cantidad
Aerogenerador	Cantidad
Hidrocínética	Cantidad
Tanque de hidrogeno	Capacidad en kg
Red	Potencia disponible

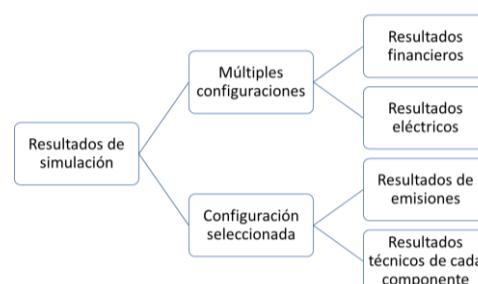


Fig. 4. Esquema de resultados de simulación.

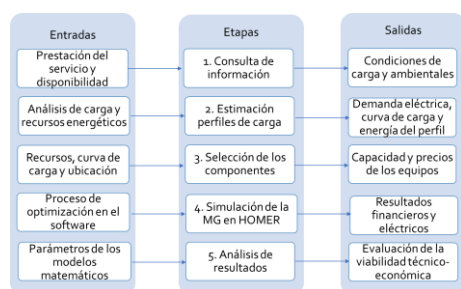


Fig. 5. Etapas de dimensionamiento de una MG.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de operación de una MG es la caracterización del sistema eléctrico. 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.

3.1 Descripción de análisis financiero en HOMER Pro

El análisis financiero es el estudio e interpretación de la información contable de un proyecto, tiene como fin de diagnosticar su situación actual y proyectar su desarrollo (Roldán, 2017). 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 *et al.*, 2019).

3.1.1 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 (Kumar, Singh *et al.*, 2018). Aunque el software presenta una variedad de indicadores económicos, 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 *et al.*, 2020).

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

3.1.2 Esquema de análisis financiero

Los hallazgos de esta investigación 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 financieros útiles en el análisis de viabilidad del dimensionamiento de una MG (ver Fig. 6).

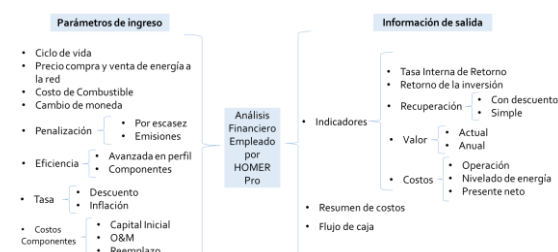


Fig. 6. Esquema para el análisis financiero.

El esquema de la Fig. 6, 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). También presenta información financiera entregada por HOMER Pro tras simular. 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, estos indicadores financieros se obtienen mediante una comparación económica respecto a un caso base (Veilleux *et al.*, 2020).

3.1.3 Análisis financiero para un caso de estudio

Con influencia de una MG establecida en: "Metodología de optimización para MG eléctricas en zonas no interconectadas" se dispone a dimensionar una MG aislada (Cataño y Gómez, 2018). El sistema 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 5 kW, sistema de almacenamiento de 1 kW, inversor de 3 kW y conexión a la red. Se busca aleatoriamente un diseño de MG que cuente con la mayoría o la totalidad de los componentes mencionados, se le denomina "caso de estudio" y se opta por recoger todos los parámetros financieros de ingreso en la Tabla 4.

Tabla 4: Información financiera de entrada en HOMER Pro (caso de estudio)

Nombre	Valor	Unidad
Tiempo de vida del proyecto	25	[años]
Precio de compra	550	(\$)
Precio de venta a la red	450	(\$)
Costo de combustible	2.400	(\$/L)
Cambio de moneda	COP	-

Penalización	0	(\$/kWh)
Eficiencia específica PV	18,33	(%)
Eficiencia específica inversor	90	(%)
Eficiencia específica de almacenamiento	80	(%)
Tasas de descuento	8	(%)
Tasa de inflación	3,8	(%)
Costos capitales para PV	8.000.000	(\$)
Costos capitales para inversor	6.056.787,80	(\$)
Costos capitales para de almacenamiento	650.000	(\$)
Costos capitales para turbina Hydro	51.350.000	(\$)
Costos capitales para de respaldo Diésel	3.800.000	(\$)
Costos capitales para de respaldo de metanol	1.200.000	(\$)
Costo de operación y mantenimiento para PV (O&M)	150.000	(\$/año)
Costo de operación y mantenimiento para inversor (O&M)	60.567,87	(\$/año)
Costo de operación y mantenimiento para almacenamiento(O&M)	25.000	(\$/año)
Costo de operación y mantenimiento para turbina Hydro (O&M)	5.000.000	(\$/año)
Costo de operación y mantenimiento para respaldo Diésel (O&M)	30.000	(\$/año)
Costo de operación y mantenimiento para respaldo metanol (O&M)	15.000	(\$/año)
Costo de reemplazo para PV	8.000.000	(\$)
Costo de reemplazo para inversor	6.056.787,80	(\$)
Costo de reemplazo para almacenamiento	650.000	(\$)
Costo de reemplazo para turbina Hydro	51.350.000	(\$)
Costo de reemplazo para respaldo Diésel	1.160.000	(\$)
Costo de reemplazo para respaldo metanol	450.000	(\$)

Para obtener los indicadores financieros satisfactoriamente es necesario seleccionar dos configuraciones de MG. Una de ellas es el caso de estudio y la otra el caso base, este último demarcado en color verde en la Fig. 7. La Tabla 5, presenta los resultados financieros incluidos los resultados de la comparación económica.

Architecture										Cost	
Link	Gen	Or	1kWh	Sh	Conex	NPC	Initial capital				
100	150	126	1	6.73	XDR4518	XDR152M					
96.0	10.0	150	332	1	18.7	XDR1.568	XDR566M				

Fig. 7. Interfase HOMER Pro de análisis financiero comparativo.

Tabla 5: Información financiera de salida

Nombre	Valor	Unidad
Costo presente neto (NPC)	1.562.054.000	(\$)
Costo nivelado de energía (COE)	1.664,22	(\$)
Costo de operación del sistema	64.072.180	(\$)
Valor actual	2.944.803.000	(\$)
Valor anual	189.425.100	(\$/año)
Retorno de la inversión (ROI)	48.2	(%)
Tasa interna de rendimiento (TIR)	54.7	(%)
Recuperación simple	1.82	(años)
Recuperación de la inversión (Con descuento)	1.93	(años)

En HOMER Pro existe una relación entre la información financiera de entrada y la información financiera de salida. Esta relación es más evidente al perturbar cualquier variable de entrada, esto se reflejada en los indicadores de salida.

3.2 Interpretación de los resultados técnicos

Los resultados eléctricos que entrega HOMER Pro, permiten hacer un análisis de operación, como se muestra a continuación. De los resultados se escoge el siete de abril para su análisis operativo, se puede realizar un perfil de generación versus carga para el caso estudiado (ver Fig. 8).

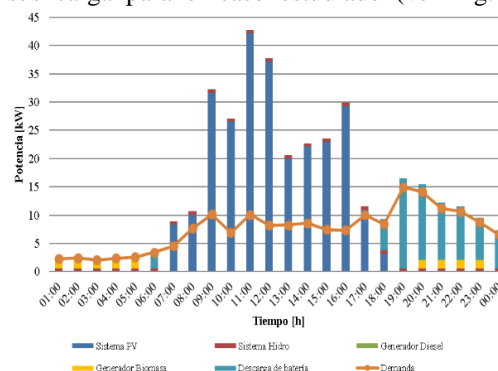


Fig. 8. Perfil de generación vs carga de la MG para el día 07 de abril.

En la Fig. 8 se observa exceso de generación de las siete de la mañana a las cuatro de la tarde, debido al sistema fotovoltaico y este exceso de energía se dirige a cargar el sistema de almacenamiento. La demanda máxima se presenta en la noche y se suple en su mayoría por el sistema de almacenamiento.

Como parte del análisis de operación se seleccionan los escenarios de operación. Para esta selección se tienen en cuenta las horas donde se presentan los parámetros eléctricos relevantes para el estudio como: El estado de carga de la batería, el exceso de generación o carga máxima insatisfecha y algunos otros, para realizar los flujos de potencia de cada escenario.

El flujo de potencia de las tres de la mañana fue seleccionado debido a que el convertidor opera como rectificador y tiene mínimas pérdidas. Debido a que el excedente del sistema hidrocinético y el grupo electrógeno de biomasa cargan el sistema de almacenamiento y el flujo de potencia es de la barra AC a la barra DC (ver Fig. 9).

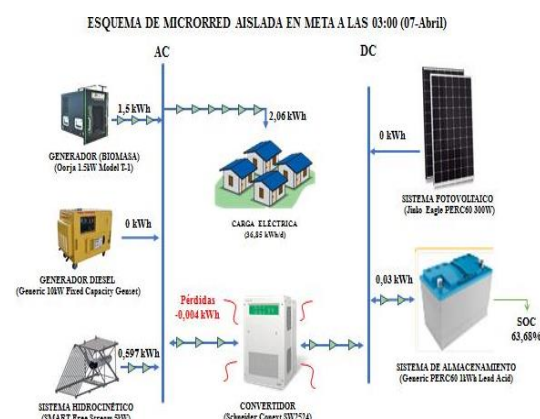


Fig. 9. Flujo de potencias - 3 a.m. - 07 de abril.

3.3 Evaluación de viabilidad (caso de estudio)

Se propone una lista de chequeo para comprobar el cumplimiento de los criterios de viabilidad por medio de una evaluación cualitativa, donde “A” corresponde a un criterio aprobado, “R” corresponde a un criterio rechazado y “N/A” corresponde a un criterio no aplicado. Esto brinda practicidad al diseñador de MG para hacer juicios de viabilidad conforme lo requiera. Dicha lista se usa en el caso de estudio y se organiza según los alcances del software HOMER Pro (criterios técnicos, ambientales y financieros).

La comparación económica analiza el impacto de incorporar un sistema fotovoltaico. Para evaluar el indicador de recuperación simple se realiza una regla de tres sobre el tiempo de vida útil del proyecto como se aprecia en la Ecuación (3). Para los demás criterios financieros se evalúa directamente el indicador.

Tabla 6: Lista de chequeo (caso de estudio)

Indicadores financieros	Criterios financieros	Valor	Calif.
Tasa interna de retorno	TIR > 11,8% =>Aceptable	54.7%	A
	TIR = 11,8% =>Indiferente		
	TIR < 11,8% =>Rechazado		
Recuperación simple (sobre vida útil de MG de 25 años)	PRI < 40% =>Aceptable	7.28%	A
	PRI = 40% =>Indiferente		
	PRI > 40% =>Rechazado		
Costo nivelado de energía	Menor valor de COE	1664.22	N/A
Indicadores ambientales	Criterios ambientales	Valor	Calif.
Fracción de energías renovables	FER > 60% =>Aceptable	95.6%	A
	FER < 60% =>Rechazado		
Ahorro de combustible	AH > 15% =>Aceptable	98.16%	A
	AH < 15% =>Rechazado		
Emisiones	E < 40% =>Aceptable	5.38 %	A
	E > 40% =>Rechazado		
Indicadores técnicos	Criterios técnicos	Valor	Calif.
Grado de autosuficiencia	GA ≥ 1 =>Aceptable	2.28	A
	GA < 1 =>Rechazado		
Pérdida de carga días/año	LOLE ≤ 0,1 =>Aceptable	0.01	A
	LOLE > 0,1 =>Rechazado		
# de ciclos de descarga profunda al 90%	# > 400 =>Aceptable	900	A
	# < 400 =>Rechazado		
Autonomía de las baterías off-grid	A ≥ 4 h =>Aceptable	28.9	A
	A < 4 h =>Rechazado		

$$PRI = \frac{\text{recuperación simple (años)} * 100\%}{\text{tiempo de vida útil del proyecto (años)}} \quad (3)$$

La información de fracción de energías renovables se encuentra en “resultados eléctricos”. El ahorro de combustible se calcula según la Ecuación (2), donde C.E es caso de estudio y C.B caso base y se consulta en “resumen de combustible”.

$$AH = 100\% - \frac{\text{consumo de combustible C.E (litros)} * 100\%}{\text{consumo de combustible C.B (litros)}} \quad (4)$$

Los resultados de emisiones se encuentran en la pestaña “emisiones” y solo se tiene en cuenta las de dióxido de carbono, se calcula según Ec. (5).

$$E = \frac{\text{Emisiones C.E} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) * 100\%}{\text{Emisiones C.B} \left(\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right)} \quad (5)$$

El grado de autosuficiencia se calcula dividiendo la cantidad de energía generada sobre la energía consumida, mientras que el valor de pérdida de carga se evalúa directamente. Respecto al número de ciclos de descarga profunda se encuentra en la librería del software en el apartado de baterías.

Por último, la autonomía de la MG se encuentra en la pestaña de “Batería”. A partir de los criterios evaluados se concluye en la Tabla 6 que el caso de estudio presenta viabilidad respecto al caso base.

Tabla 6: Resultado de viabilidad de la MG (caso de estudio)

Caso de estudio	Viable financieramente
	Viable ambientalmente
	Viable técnicamente

4. CONCLUSIONES

• Para considerar un proyecto de MG 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.

• 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.

REFERENCIAS

- Adriana, A., y Ramón, A. (2012). Microrredes: nuevo paradigma en las redes eléctricas. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Manizales.
- 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).

- A. I. Khalyasmaa, E. L. Zinovieva y S. A. Eroshenko, "Formation Features of Criterias for Assessing the Feasibility of Innovative Technical Solutions," 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO), St. Petersburg, 2018.
- 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*. 10, No. 3.
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87.
- Chian Woei, S. (2014). Ensuring access to electricity and minimum basic electricity needs as a goal for the post-MDG development agenda after 2015. *Energy for Sustainable Development*, 19.
- Gaviria Cataño, F. y Gómez Leal, J. (2018). Metodología De Optimización Para MG Eléctricas En Zonas No Interconectadas. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- Husein, M. y Chung II. Y. (2018). Optimal design and financial feasibility of a university campus microgrid considering renewable energy incentives. *Applied Energy*. **Vol. 225**.
- J.D. Garzón-Hidalgo y A.J. Saavedra-Montes. (2017). "Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia", *Tecnológicas*, **Vol. 20**, No. 39.
- 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*. **Vol. 6**.
- Lawder M., Viswanathan V. y Subramanian V. (2015). Balancing autonomy and utilization of solar power and battery storage for demand based microgrids, *Journal of Power Sources*, **Vol. 279**.
- Mohammed Morad , Mohamed Nayel , Adel A. Elbaset y A. I. A. Galal. (2018) "Sizing and Analysis of Grid-Connected Microgrid System for Assiut University Using HOMER Software," 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo.
- P. V. y U. R. K. (2016), "Sizing of microgrids for Indian systems using HOMER," *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, Delhi.
- Rodrigues Y., Monteiro M., Abdelaziz M., Wang L., de Sousa A. y Ribeiro P. (2020). Improving the autonomy of islanded microgrids through frequency regulation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **Vol. 115**.
- Sanjeev Dutta, Ai Qian, Ashok Adhikari, Wang Yue, Zhang Yufan y Li Zhaoyu. (2019) "Modelling and Cost Optimization of an Islanded Microgrid with an Existing Microhydro using HOMER Software," 2nd Asia Conference on Energy and Environment Engineering (ACEEE), Hiroshima.
- Veilleux G., Potisat T., Pezim D., Ribback C., Ling J., Krysztofinski A., Ahmed A. y Papen J. (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*, **Vol. 54**.
- Wu T., Xu D. y Yang J. (2019). Multiple Criteria Performance Assessment for Decentralized Energy Systems: A Case Study, 5th International Conference on Information Management (ICIM), Cambridge, United Kingdom.

SITIOS WEB

- HomerEnergy. (2020). HOMER Pro - Microgrid Software For Designing Optimized Hybrid Microgrids. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>