



Diseño óptimo de una micro-red para maximizar la generación de potencia eléctrica en Paragachi y Wildtecsa modelado en Homer Pro

Optimal design of a microgrid to maximize electrical power generation at Paragachi and Wildtecsa modeled in Homer Pro

Jaime Francisco Quinteros Flores^{1,2*}, Stefany Fernanda Yáñez Rojas², Gabriel Alejandro Mendoza Tapia², Estefanía Alexandra Vaca Narvárez³

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación en redes Eléctricas Inteligentes (GIREI), Carrera de Electricidad, Ecuador.

² Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Electricidad, Ecuador.

³ Unidad Educativa “San Luis Gonzaga”, Proyecto EAC (Experiencia Avanzada de Cambio).

jquinteros@ups.edu.ec, syanezr@ups.edu.ec, gmendoza@ups.edu.ec, evaca@uegonzaga.edu.ec

*Autor de correspondencia: jquinteros@ups.edu.ec.

RESUMEN. El presente documento aborda la implementación de micro redes en diferentes locaciones de Ecuador como respuesta al aumento de usuarios, por consecuente incremento de potencia, por tanto, es necesario en la actualidad utilizar energías renovables. En la primera etapa se caracterizó el perfil de consumo energético con carga de tipo residencial, comercial o industrial, además de la construcción del perfil de potencia mediante el levantamiento de cargas y criterios estadísticos de uso y coincidencia. En la segunda etapa, se analizaron los recursos naturales, velocidad del viento y radiación solar disponibles en dos áreas de estudio a través del software especializado Homer Pro con coordenadas de latitud y longitud, por consiguiente, se analizó la viabilidad de los elementos de generación eléctrica renovable y se definió el uso. Además, se propuso la utilización de varias centrales de generación renovable con el fin de complementar la micro red en aspectos de inercia y estabilidad. Con la demanda de energía y los recursos de generación planteados, se diseñaron alternativas arquitectónicas de una potencial micro red para las dos ubicaciones seleccionadas, se realizaron simulaciones para casos interconectados con valores específicos a un entorno y un análisis económico de la implementación, obteniendo la viabilidad de la micro red. Por último, los resultados y las conclusiones obtenidas indican el funcionamiento de cada una de las centrales, cuando trabajan de forma aleatoria, esto en base a que el uso de recursos naturales como el sol y el viento, son recursos ilimitados, pero que no se encuentran presentes a toda hora del día, causando que se busque distintas formas de producir energía eléctrica.

Palabras clave. Despacho de generación eléctrica, energía eólica, energía solar, energías renovables, micro-red.

ABSTRACT. This document discusses the implementation of microgrids in different locations in Ecuador as a response to the increase of users and consequent increase of power, therefore, it is currently necessary to use renewable energies. In the first stage, the energy consumption profile with residential, commercial or industrial loads was characterized, in addition to the construction of the power profile by means of the survey of loads and statistical criteria of use and coincidence. In the second stage, the natural resources, wind speed and solar radiation available in two study areas were analyzed through the specialized software Homer Pro with latitude and longitude coordinates, consequently, the feasibility of renewable electric generation elements was analyzed and the use was defined. In addition, the use of several renewable generation plants was proposed in order to complement the microgrid in aspects of inertia and stability. With the energy demand and generation resources proposed, architectural alternatives of a potential microgrid were designed for the two selected locations, simulations were carried out for interconnected cases with specific values to an environment and an economic analysis of the implementation, obtaining the feasibility of the microgrid. Finally, the results and conclusions obtained indicate the operation of each of the plants, when they work randomly, based on the fact that the use of natural

Citación: J.F. Flores et al., “Diseño óptimo de una micro-red para maximizar la generación de potencia eléctrica en Paragachi y Wildtecsa modelado en Homer Pro”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 19, no. 2, pp. (5-14), 2023.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 09 de febrero de 2023. **Recibido con correcciones:** 05 de julio de 2023. **Aceptado:** 07 de julio de 2023.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v19.2.3753>

Copyright: 2023 J.F. Flores et al., This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

resources such as sun and wind are unlimited resources, but they are not present at all times of the day, causing the search for different ways to produce electricity.

Keywords. Power generation dispatch, wind energy, solar energy, renewable energies, micro-grids.

1. Introducción

En la actualidad una micro-red eléctrica es aquel sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, utilizando tecnología digital y favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable, con el objetivo de ahorrar energía, reducir costes e incrementar la fiabilidad [1][2]. Según Freris e Infield [3], las energías renovables, o las energías que provienen de la naturaleza, las cuales, se podrían considerar como inagotables, además, estas clases de energía son reconocidas por su diversidad, abundancia y potencia.

En este caso, se deberá realizar un análisis exhaustivo de los resultados y costos obtenidos a través de la simulación, con ello examinar si el sistema propuesto se puede implementar en la zona establecida. Además, de analizar si las ganancias del sistema diseñado podrán ser recuperados o si la implementación de este sistema no generara réditos económicos aceptables, complicando tanto su diseño como su implementación, recordando que, al diseñar un sistema renovable no se tendrán las garantías necesarias para su funcionamiento óptimo, ya que, al ser energías provenientes de la naturaleza no serán constantes durante todo el día. Por último, se tendrá que examinar si nuestro sistema cumple con la viabilidad requerida para que el sistema diseñado se pueda implementar en el caso de estudio que se está realizando. En este caso, para el análisis y posterior resolución de los inconvenientes creados por el uso de energías renovables, primero se realizara una simulación usando el programa HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) [4], con el cual, realizaremos un estudio de los costos de la implementación de este sistema, en los lugares determinados, de esta forma, tener un proyecto óptimo y viable, con el cual, generemos ganancias a futuro, sin incumplir con las normativas necesarias para el funcionamiento sin fallas de nuestro sistema.

2. Materiales y Métodos/ Metodología

2.1 Concepto de Micro-red

Una micro red se podría definirse como una agregación de elementos eléctricos en baja tensión de generación, de almacenamiento y cargas (usuarios), los cuales se encuentran agrupados en una cierta área geográfica acotada, que puede operar conectada a la red o en forma aislada. Respecto a los generadores, pueden ser de diversa naturaleza, entre los cuales están: microturbinas, motores reciprocantes como el caso de grupos electrógenos basados en diésel o gas o fuentes renovables como aerogeneradores y plantas fotovoltaicas [4]. Para efectos de la compañía eléctrica, la micro-red se ve como una sola carga que puede ser controlada en magnitud. Para los consumidores, la micro-red puede ser diseñada para satisfacer sus necesidades particulares, tales como: aumento de la confiabilidad local, reducción de las pérdidas por transporte, soporte local de tensión, entre otras [5][6].

La micro-red proporciona beneficios a los usuarios en cuanto a confiabilidad y calidad del servicio, no disponibles en la red principal, así como beneficios a la empresa suministradora al resolver problemas de sobrecargas en sus instalaciones. Los objetivos de una micro-red son el maximizar el uso y la capacidad de los activos de generación, mediante la inteligencia construida en ella, para así incrementar las eficiencias y minimizar los costos [7]–[9]. El núcleo principal en la micro-red es un sistema de tecnologías de la información, que permite la organización y el control de la red eléctrica como un ente único y una infraestructura de medición avanzada en las instalaciones de los usuarios [8][10]. En paralelo a las tecnologías de la información, uno de los motores principales para la realización del concepto de micro-red, ha sido el desarrollo de inversores que enlazan las fuentes que generan en corriente directa (CD), así como dispositivos de almacenamiento a la micro-red opera en corriente alterna (CA) y el sistema eléctrico principal, manteniéndola operación de la micro-red aun cuando la red principal sufra una falla [11].

La Micro-red tiene los siguientes componentes:

- a) Generación:
 - Renovables o no-renovables en función del recurso energético
 - Paneles solares.
 - Mini generadores o generadores eólicos.
 - Microturbinas.
 - Pilas de combustible.
 - Controlables o intermitentes (modo de operación)
 - Recurso energético primario
 - Interfaz basado en electrónica de potencia
- b) Almacenamiento:
 - Eléctrico
- c) Térmico
 - Baterías.
 - Almacenamiento térmico.
 - Volantes de inercia.
 - Ultracapacidad.
- d) Cargas:
 - Eléctricas
- e) Térmicas
 - Calidad de suministro (cargas críticas, procesos industriales)
 - Controlables o no interruptores
 - Punto de interconexión con la red eléctrica
- f) Protecciones:
 - Transiciones conectado a la red.
 - Potencias de cortocircuito para detección de faltas
- g) Sistemas de control:
 - Sistema de control central de la micro-red (BEMS)
 - Controladores locales (generadores controlados, cargas)
 - Comunicaciones (Operador de distribución, locales)
 - Distribución de la lógica de control (control primario, regulación secundaria, servicios auxiliares).

2.2 Generación Distribuida

Una de las principales características de las micro-redes, es que, por su propia definición, se comportan como pequeños centros de generación distribuida [12]. Este concepto engloba la generación de electricidad mediante instalaciones que son en general pequeñas (3

kW –10 MW) en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico [13]. La generación distribuida tiene diversas ventajas. Algunas de ellas son comunes a las de las micro-redes debido, tal y como se comentaba arriba, a que la generación distribuida es una característica intrínseca de las micro-redes. Entre ellas, encontramos [14]: fiabilidad, en específico en aquellas zonas donde los apagones son frecuentes, alta calidad del suministro eléctrico, reducción de pérdidas en las redes de transmisión y distribución, reducción de emisiones por algunas tecnologías de generación distribuida (solar, eólica).

2.2 Generación Características de la Generación Distribuida

Además, el concepto de generación distribuida (GD) ha surgido en los últimos años a través del desarrollo de sistemas eléctricos [15]. Su definición puede ser similar a la definición de una pequeña generación de electricidad fácil de usar. En general, los sistemas GD no están sujetos a estándares de desempeño de sistemas centralizados. Sin embargo, debido a diferencias significativas en las normas internacionales a este respecto, se considera que el método de GD no cumple con la definición propuesta. La tasa de penetración de GD en una red eléctrica particular es la relación entre la capacidad instalada de generación distribuida y la capacidad total de la red. La penetración no cumple con la definición de GD. Se estima que se alcanzarán un total de 25 a 30 % de generación total en los próximos años.

Las GD ofrecen las siguientes clasificaciones basadas en la potencia nominal:

- Una micro GD: Es de 1 (W) < potencia < 5 (kW).
- Una pequeña GD: Es de 5 (kW) < potencia < 5 (MW).
- Una mediana GD: Es de 5 (MW) < potencia < 50 (MW).
- Una gran GD: Es de 50 (MW) < potencia < 300 (MW).

Por todo lo anterior, se considera que la generación distribuida es una fuente de energía conectada de manera bidireccional a la red de distribución o a una red eléctrica de baja tensión. Por lo tanto, proponen definir la GD como conectividad y ubicación en lugar de capacidad de producción, ni ponen límites a la tecnología o la capacidad de aplicación potencial de la GD [16].

2.3 Energías Renovables

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales que producen energía de forma inagotable e indefinida [17]. Por ejemplo, la energía solar, la energía eólica o la energía mareomotriz son fuentes renovables de energía. También se consideran renovables cuando se obtienen a partir de fuentes que se regeneran con el tiempo de manera natural, como la masa forestal [18]. Una de las principales ventajas de las energías renovables es que, además de ser inagotables, presentan un nulo o bajo impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se consideran energías limpias [19].

2.4 Homer Pro

El programa HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) [20], es un modelo que permite la optimización de varias aplicaciones para micro redes, evaluando diseños conectados al sistema eléctrico de potencia (SEP) [21], así como los diseños fuera del SEP, con algoritmos libres de derivadas [21]. La modelación usada para diseñar y analizar los distintos sistemas híbridos que usa el HOMER, contiene varios componentes entre ellos tenemos: generadores convencionales, aerogeneradores, paneles solares, hidroeléctricas, cargas, convertidores, baterías y otros elementos que servirán para realizar la simulación de micro redes. Al contener estas herramientas el software permitirá que la ingeniería y la economía trabajen a la par, brindando de esta forma información de los sistemas realizados [22]. Cabe mencionar que HOMER es un software licenciado que posee la universidad.

Homer efectúa la simulación, optimización y análisis de sensibilidad, basándose en los datos proporcionados por el usuario. En este caso la simulación no solo determina si un sistema de potencia se puede realizar o no, sino también, realiza una estimación completa del costo que tendrá mantener el sistema de potencia, en funcionamiento durante su vida útil [23].

Para realizar la simulación óptima del sistema de potencia realizado, HOMER debe contar con estos cinco datos de entrada [24].

- 1) Datos meteorológicos del viento, la radiación solar, la temperatura, etc.
- 2) Datos del perfil de demanda eléctrica.
- 3) Costos de operación y mantenimiento, costo de reemplazo, precio del combustible, tasa de interés, costos de la vida útil del sistema, costo fijo del sistema, costos de mantenimiento y penalización por emisiones.

- 4) Datos técnicos, como la reserva operativa que debe tener el sistema.
- 5) Datos del equipo.

Es la variable sobre la cual el usuario no tiene control, ya que, el Homer se puede integrar de nuevo al sistema establecido, sobre la variable de sensibilidad establecida por el usuario. Entre los factores de sensibilidad que tenemos en el software son la radiación solar a nivel mundial, el costo del aerogenerador, el costo de la batería y el costo del combustible para los generadores [25]. El modelo de optimización simula el sistema, a través, del cálculo del balance energético cada hora durante un año, comparando la demanda requerida en una hora, con la demanda que puede proporcionar el sistema en esa misma cantidad de tiempo, además de calcular los flujos que ingresan y los flujos que salen a cada elemento del sistema [25], en base a los recursos eólicos, solares y costos que representa instalar los diferentes tipos de energía con los que contamos en el programa [27][28]. Homer Pro tiene en su base de datos dos algoritmos de optimización, entre los cuales tenemos: Un algoritmo convencional (Grid Search), que para la simulación utiliza todas las combinaciones factibles definidas en el Search space [29].

Un algoritmo patentado (HOMER Optimizer), en el cual, no se necesita especificar todas las posibles búsquedas que necesite el usuario [30].

3. Metodología

La implementación de micro redes puede aportar y receptor a la demanda de energía eléctrica en el sistema de potencia basadas en fuentes de energía renovables son soluciones sustentables para prosumidores (consumidor final), con el fin de autoabastecerse de energía eléctrica y vender el restante de la generación contribuyendo a la curva de demanda de forma positiva, en este documento contribuiremos con un ejemplo a seguir de diseño de micro-redes, además lo optimizaremos y compararemos con un escenario diferente; esta modelación la realizaremos en el software Homer Pro.

3.1 Homer Pro

Se puede apreciar como funciona el software Homer Pro, donde hay diferentes etapas que componen el algoritmo de Homer, ver figura 1.

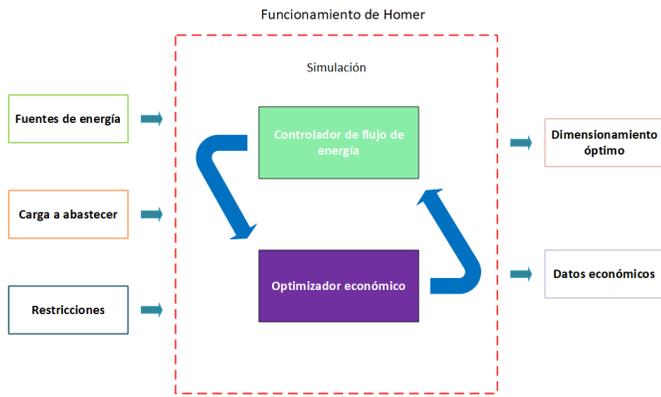


Figura. 1 Funcionamiento del Homer Pro. “Fuente: Autores”

La primera etapa constituye las variables de entrada como son las fuentes de generación que se van a utilizar, la carga a cuál se va a abastecer y las restricciones. La segunda etapa es la más importante es donde se realiza la optimización y el control de flujo de la potencia a entregar. Como última etapa se encuentran las variables de salida.

Existen varios softwares que se utilizan para realizar el estudio propuesto, sin embargo, se utiliza el software Homer Pro dado que, es manejado como estándar mundial para realizar optimización y diseño de micro-redes.

En el aprovechamiento de energías renovables tales como solar y eólica es de vital importancia seleccionar una localización con índices aptos de energía solar y velocidades de viento; que en el caso de los paneles solares mientras más horas de irradiación solar mayor será la producción de energía eléctrica; por ejemplo si seleccionamos como localización de diseño el polo norte tenemos que saber que por 3 meses en el año no amanece y esto sería inviable para un sistema fotovoltaico, además, tiene velocidades de viento por encima de 320 km/h; con estos datos determinamos que sería inviable el proyecto; por todo lo antes mencionado para el estudio que realizaremos seleccionaremos dos localizaciones donde el proyecto sea viable además; estas ubicaciones en la actualidad ya se encuentran operando centrales de generación de energías renovables (solar y eólica). Las localizaciones seleccionadas son Paragachi y Wildtecsa.

Se puede apreciar el área seleccionada en la zona de Paragachi para ubicar la MR ver figura 2, mientras que, se aprecia la zona que se seleccionó en Wildtecsa para ubicar la MR ver figura 3.

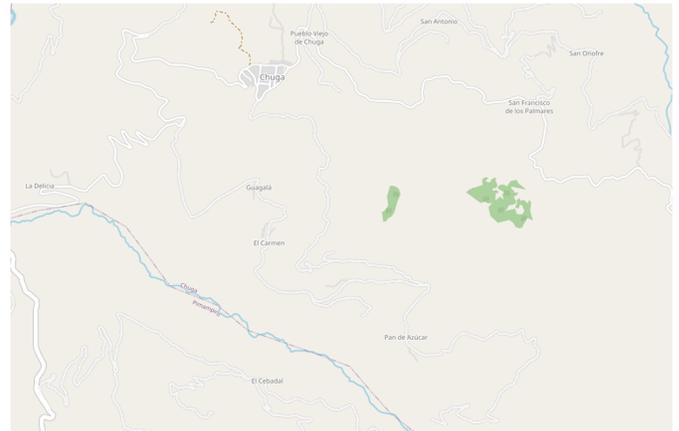


Figura. 2 Localización de Paragachi. “Fuente: OpenStreetMap”



Figura. 3 Localización de Wildtecsa. “Fuente: OpenStreetMap”

Una vez seleccionadas las ubicaciones aproximadas, proseguiremos a utilizar la interfaz y las herramientas de Homer Pro. En primer lugar, ubicaremos las localizaciones y obtendremos las coordenadas y los datos de los recursos energéticos ver tabla 1.

Tabla 1. Datos de Meteorología de superficie y energía solar. “Fuente: www.meteoblue.com”

Energías Renovables Promedio Anual	Paragachi, Ecuador (0°22,3'N, 77°54,3'W)	Wildtecsa (1°54,3'N 79°50,7'W)
Recurso Solar GHI	5.21 (kWh/m ² /día)	4.21 (kWh/m ² /día)
Recurso Eólico	1.66 (m/s)	2.51 (m/s)
Recurso de Temperatura	18.34 (°C)	21.94 (°C)

Se aprecia la radiación solar promedio de cada mes, además del promedio del índice de claridad que es una de las variables que utiliza el algoritmo del software Homer Pro para realizar el estudio ver figura 4.

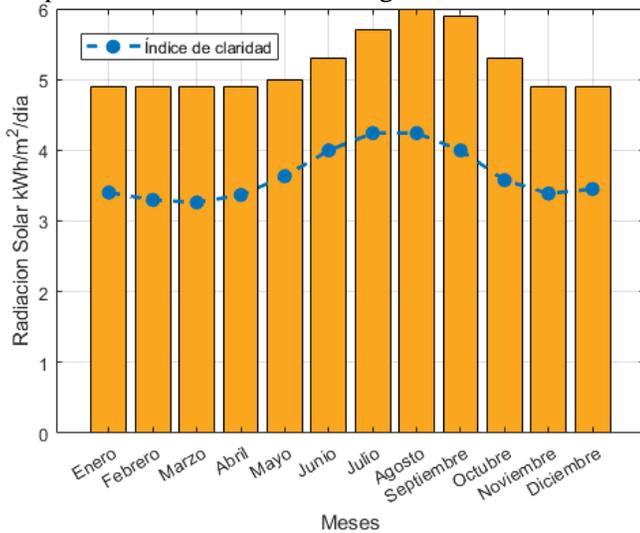


Figura. 4 Radiación Solar. "Fuente: Autores"

La figura que se muestra a continuación ver figura 5, representa la velocidad promedio del viento en cada mes, es una variable clave al momento de elegir los generadores eólicos, además de la potencia de salida, es necesario saber la velocidad que se obtiene en cada región para aprovechar de manera óptima el aerogenerador

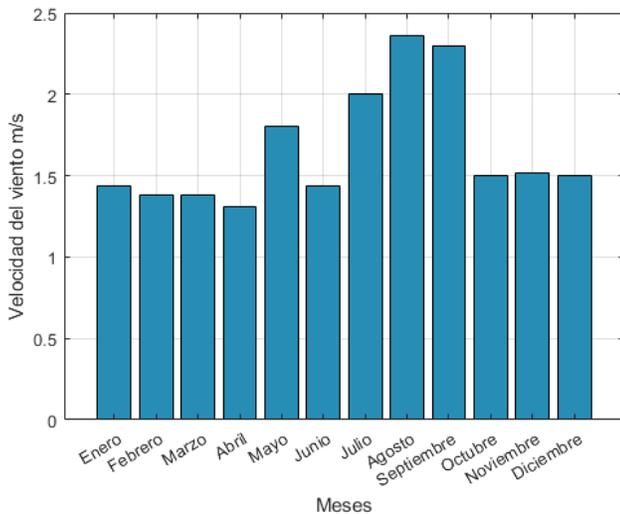


Figura. 5 Velocidad del Viento. "Fuente: Autores"

Una vez obtenidos los datos de los recursos energéticos procedemos a modelar el sistema de potencia para el

diseño donde implantaremos una carga en representación a un consumo de un usuario residencial, una generación fotovoltaica y eólica, un inversor de corriente (DC- AC), además nos conectamos a la red para vender los excedentes de energía eléctrica; una vez implementado el modelo, de manera gráfica se puede observar los resultados y el comportamiento de la carga ver figura 6 y 7, los datos de las componentes para el modelo se los detalla a continuación ver tabla 2, hay que recalcar que la moneda utilizada para este trabajo es el dólar americano.

Tabla 2. Datos de componentes eléctricos rescatados de Homer Pro. "Fuente: Autor(es)"

Paneles fotovoltaicos - Fronius Symo 20.0-3-M with Generic PV (Fron20)	
Sistema DC	
Tipo de Panel	Placa Plana
Potencia Nominal	20 (kW)
Producción anual	28.800 kWh
Temperatura de operación	45 (°C)
Rendimiento	17.30 %
Turbina eólica - Bergey Excel 10 (XL10)	
Sistema trifásico	
Potencia Nominal	10 (kW)
Punto óptimo de generación	16(m/s) = 12,546 (kW)
Producción día	35 - 75 kWh
Producción anual	12.600 - 27.000 kWh
Torre	18-49(m)
Carga	
Tipo	Residencial
Promedio anual de consumo energético	11.26(kWh/d)
Inversor - Fronius Symo 20.0-3-M (Fron20)	
Sistema DC-AC trifásico	
Potencia Nominal	20(kW)
Eficiencia	98%
Vida útil	10(años)
Conexión al Sistema Eléctrico de Potencia (Grid)	
Tarifas simples	
Precio de energía entregada por la Red	0.14 (\$/kWh)
Precio de venta de energía de la micro-red	0.40 (\$/kWh)

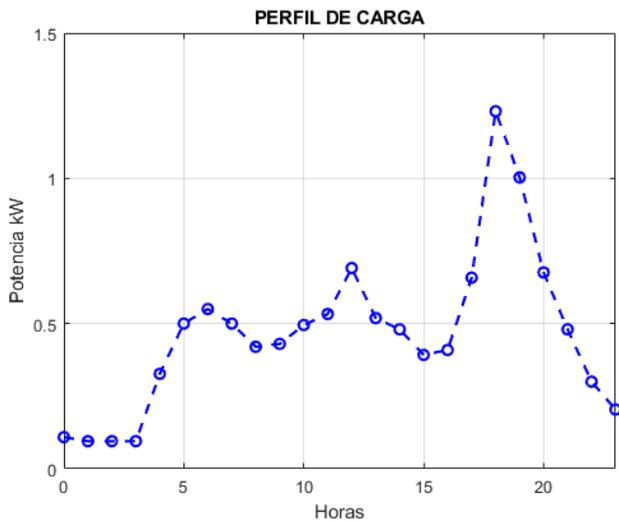


Figura. 6 Comportamiento de la carga en Homer Pro. “Fuente: Autor(es)”

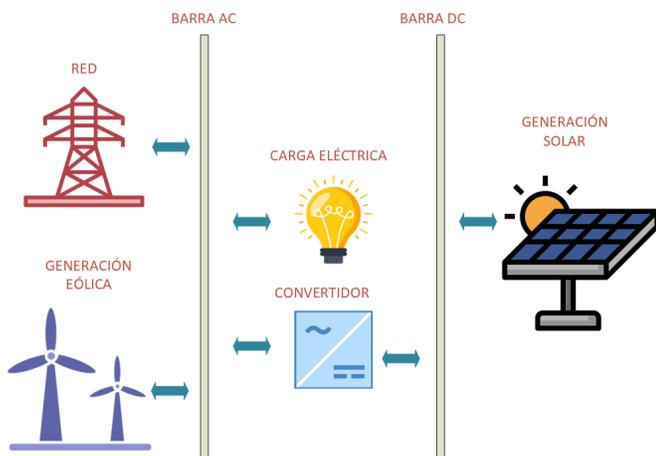


Figura. 7 Modelo de micro red implementado en Homer Pro. “Fuente: Autor(es)”

Una vez que se realizó el modelamiento de la micro-red, se realiza el análisis económico tomando en consideración variables como el costo nivelado de energía (COE), costos de operación y mantenimiento (O&M). Como principal variable que se analiza es el COE, la cual entrega como resultado la relación que existe entre la energía total que puede ser utilizada y el gasto anual total de la electricidad, el cálculo de esta variable se lo puede ver en la ecuación 1.

$$COE = \frac{C_{AT} - C_{boiler} * H_{atendida}}{E_{atendida}} \quad (1)$$

Donde el C_{AT} es el costo total anual expresado en \$/año, C_{boiler} es el costo marginal para caldera en \$/kWh, $H_{atendida}$ es la carga térmica total atendida y $E_{atendida}$ representa la carga eléctrica total abastecida expresada en kWh/año.

4. Resultados

4.1 Resultados del modelo

Homer pro; como resultados nos entrega casos de sensibilidad, clasificando todos los casos factibles; además, los datos son tabulados en la interfaz de manera sencilla de identificar. A continuación, presentamos los datos resultantes ver tabla 3, para los dos casos de estudio (Paragachi y Wildtecsa.).

Tabla 3. Resultado de arquitectura en casos de sensibilidad de Homer Pro. “Fuente: Autor(es)”

Caso 1 - Paragachi, Ecuador (0°22,3'N , 77°54,3'W)		
Viabilidad del sistema	93.9 %	
Producción		
Panel fotovoltaico	29.334 (kWh/año)	
Turbina eólica	519 (kWh/año)	
Salida Media		
Inversor	0.179(kW)	
Red (Utilidad \$ 9998.08)		
Energía Compra	1.576 kWh	\$ 206.72
Energía Vendida	29. kWh	\$ 10.208,8
Caso 2 - Wildtecsa, Ecuador (1°54,3'N , 79°50,7'W)		
Viabilidad del sistema	94.4 %	
Producción		
Panel fotovoltaico	27.268 (kWh/año)	
Turbina eólica	1.217 (kWh/año)	
Salida Media		
Inversor	3.05(kW)	
Red (Utilidad \$ 9984.88)		
Energía Compra	1.656 kWh	\$ 198,72
Energía Vendida	25.459 kWh	\$ 10.183,60

Interpretando los resultados obtenidos ver tabla 3, se concluye para el caso 1 y 2 Paragachi y Wildtecsa, que tenemos un único caso de sensibilidad viable utilizando todos los componentes eléctricos; dado que tenemos generación fotovoltaica en corriente DC por lo tanto es obligatorio utilizar un inversor del tipo DC-AC, y tomando en cuenta que la generación eólica trabaja en corriente AC, podemos conectarnos a la red gracias a la electrónica de potencia siendo prosumidores en conexión bilateral, teniendo como alternativa vender los

excedentes de generación eléctrica; por lo tanto se determina que los dos modelos son rentables ya que su índice de diferencia en cuanto a la viabilidad del caso 1 respecto al 2 vendría a ser 0.53%, lo cual sería despreciable; por lo cual la implementación de generación distribuida para los dos casos es asequible. Cabe recalcar que en el caso de no ser un prosumidor desde el punto de vista económico y solo aportar y respetar con un equilibrio de consumo a la red, el diseño vendría a ser inviable dado que esta sobre dimensionado en base a la demanda del usuario residencial. Por otro lado, analizando desde el punto de vista productivo tenemos que la generación eólica no cumple con la curva de potencia estimada ya que los vientos que tenemos para los dos casos son inferiores a 3 (m/s); por lo tanto, la generación eólica queda descartada para los dos casos. Por lo antes mencionado definimos que el estudio de sensibilidad de Homer PRO estima para nuestro caso de estudio el mejor escenario donde exista la posibilidad de tener todos los componentes propuestos en operación sin tener producción de energía perdida. Siguiendo este análisis el caso con mayor rentabilidad vendría a ser el caso 1; donde contemos con la carga, conexión a la red y el conjunto de generación fotovoltaica.

4.2 Resultados del modelo

Para el caso de optimización, del modelo implementado en Homer Pro enlista todos los casos viables, además el software nos ofrece los cálculos para cada escenario, que se lo define como, ¿Qué pasaría si estuviera inoperativo cierto componente del sistema?, tomado en cuenta que el usuario residencial no puede quedarse sin energía eléctrica; dicho de esta manera todos los datos relevantes para nuestro análisis son presentados en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Posibles Escenarios viables óptimos de acuerdo con los componentes del sistema para Paragachi y Wildtecsa. “Fuente: Autor(es)”

Posibles escenarios Óptimos	Escenario S	Escenario T	Escenario H	Escenario F
Inversor	SI	SI	NO	NO
Panel Fotovoltaico	SI	SI	NO	NO
Red	SI	SI	SI	SI
Turbina eólica	SI	NO	SI	NO

Tabla 5. Energía vendida y comprada para cada caso en Homer Pro. “Fuente: Autor(es)”

Caso 1 - Paragachi, Ecuador (0°22,3'N , 77°54,3'W)			
Bidireccionalidad	Energía (kWh)	Compra	Energía vendida (kWh)
Escenario S	1.576		29.496
Escenario T	1.828		25.539
Escenario H	2.261		5,132
Escenario F	2.673		1,531
Caso 2 - Wildtecsa (1°54,3'N , 79°50,7'W)			
Bidireccionalidad	Energía (kWh)	Compra	Energía vendida (kWh)
Escenario S	1.656		25.459
Escenario T	1.955		24.541
Escenario H	3.659		340
Escenario F	4.109		0

Al interpretar los resultados del modelo ver tablas 4,5 tenemos cuatro escenarios viables para los dos casos de estudio, donde se asume al consumidor final o usuario residencial como el componente con un 100% de importancia en el sistema, definiendo que no debe existir un escenario donde se quede sin energía eléctrica. Por consiguiente, analizamos en la tabla V que para el escenario S y T para los dos casos de estudio tenemos porcentajes despreciables de diferencia, además de contar con los índices más altos de energía vendida. Por otro lado, los escenarios H y F tienen índices de energía vendida demasiado pequeños. Tomando las conclusiones antes mencionadas seguimos con el análisis a la tabla 4 donde nos detalla que componentes del sistema están en operación o en su caso contrario inoperativos, en esta tabla encontramos que para el escenario T está operando la generación fotovoltaica y se encuentra inoperativa la generación eólica y para el caso del escenario H tenemos lo contrario. Por ultimo habiendo analizado las tablas 4 y 5 tomamos la decisión de elegir al escenario T para los dos casos de estudio, como nuestro diseño solución para este documento ya que en el hemos encontrado que la generación fotovoltaica tiene la mayor parte de producción con alrededor de 27000 kWh anuales para ambos casos y descartando la implementación de generación eólica por sus bajas velocidades de viento de 3 (m/s) con una producción energética de 80 a 340 kWh anuales, ya que la turbina eólica trabaja eficientemente con velocidades de viento de 10 a 24 (m/s) con producción energética de 12.600 – 27.000 kWh.

5. Conclusiones

Uno de los aportes significativos del presente trabajo investigativo, es que, mediante la metodología propuesta, se puede realizar análisis técnico-económicos de una mejor manera, además conocer la viabilidad del proyecto, para el trabajo realizado se concluyó que, el proyecto es viable en las locaciones seleccionadas, también se logró obtener el mejor escenario para maximizar la eficiencia de la energía minimizando costos.

La implementación de generación fotovoltaica es viable en Paragachi y Wildtecsa; por otro lado, la generación eólica no es viable, además, el software HOMER PRO es confiable ya que los datos utilizados de recursos energéticos son reales y hemos comprobado la veracidad de los mismos ya que las dos localizaciones seleccionadas tienen actualmente instalados sistemas fotovoltaicos óptimos y han descartado la implementación de sistemas de generación eólica.

En conclusión, el software utilizado en este estudio es una herramienta útil para analizar las principales características operativas de las micro-redes. Se pueden examinar diferentes casos y tipos de fuentes de energía y se puede ingresar información de una manera sencilla. Sin embargo, los datos relacionados con las fuentes de energía (es decir, sistema fotovoltaico, eólica, diésel y red convencional, entre otros) deben ser lo más precisos posible. De esta forma, los resultados de la simulación permitirán definir la viabilidad, el retorno de la inversión y otros aspectos relevantes para diseñar y planificar las micro-redes.

El realizar primero la simulación de un sistema renovable, nos aseguramos de que su implementación sea la adecuada, ya que, podremos ver su funcionalidad al ingresarlo al SEP, además de los costos por implementar el diseño de este sistema renovable, pudiendo notar si la realización del sistema es factible o no, por lo cual, la simulación es de gran ayuda, teniendo en cuenta que muchos proyectos no son realizables por el hecho de que generan pérdidas desde su diseño.

El software tiene una interfaz intuitiva que facilita la comprensión y manipulación de diferente característica además cuenta con una sección de ayuda que da acceso a la explicación detallada de cada componente y su comportamiento en el circuito o análisis. Este programa facilita un análisis de costos, en diferentes escenarios que nos permite analizar cual configuración es viable. El software solo nos permite ingresar un determinado número de componentes en cada literal esto lo podemos constatar en la opción de controladores que lo

encontramos en la barra de herramientas en la sección de componentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a la Universidad Politécnica Salesiana a la carrera de Electricidad por el apoyo logístico para la elaboración del presente artículo

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores contribuyeron en la investigación, experimentación, así como en la conceptualización, preparación y corrección del artículo con un aporte del 100% del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] R. D. Medina, "Micro-redes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad," *Ingenius*, no. 12, pp. 15–23, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.02.
- [2] J. Quinteros, P. Masache, and D. Carrón, "Revisión para la restauración optima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad," *I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, 2021, [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2928>.
- [3] L. Freris and D. Infield, *Power Balance / Frequency Control*. 2008.
- [4] İ. Çetinbaş, B. Tamyürek, and M. Demirtaş, "Design, analysis and optimization of a hybrid microgrid system using HOMER software: Eskişehir osmangazi university example," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 8, no. 1, pp. 65–79, 2019, doi: 10.14710/ijred.8.1.65-79.
- [5] D. Restrepo, B. Restrepo-Cuestas, and A. Trejos, "Microgrid analysis using HOMER: A case study," *DYNA*, vol. 85, no. 207, pp. 129–134, 2018, doi: 10.15446/dyna.v85n207.69375.
- [6] A. Arango-manrique and Ricardo, "HOMER Pro ® : A Case Study in Colombia," *Energies*, pp. 1–19, 2020.
- [7] Ministerio de Energía y Recursos Renovables, "Plan Maestro de la Electricidad. Expansión de la generación," 2017, Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/ecuador-actualiza-su-plan-maestro-de-electricidad-para-impulsar-inversiones-en-energias-renovables-no-convencionales-por-cerca-de-usd-2-200-millones/>.

- [8] M. R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. 2005.
- [9] P. Gonzáles, D. Gualotuña, and J. Quinteros, "Diseño de una Micro-Red óptima mediante el uso del recurso solar fotovoltaico en la Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur , utilizando el software HOMER PRO Design of an optimal microgrid based on the solar photovoltaic resource at the Salesian," *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 2, pp. 109–123, 2022.
- [10] J. A. C. González, R. C. Pérez, A. C. Santos, and M. A. C. Gil, *Centrales de energías renovables González, José A C Pérez, Roque C Santos, Antonio C Gil, Manuel A C*. 2009.
- [11] D. Carrión and L. Ortiz, "Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos," *Ingenius*, no. 10, 2013, doi: 10.17163/ings.n10.2013.05.
- [12] D. A. Balaguera, A. F. Cortes, and M. A. Uruena, "Distributed generation scheme analysis, as an option for Bogota electrical system," *2012 IEEE Int. Symp. Altern. Energies Energy Qual. SIFAE 2012 - Conf. Proc.*, no. October, 2012, doi: 10.1109/SIFAE.2012.6478889.
- [13] A. P. Adeagbo, F. K. Ariyo, K. A. Makinde, S. A. Salimon, O. B. Adewuyi, and O. K. Akinde, "Integration of Solar Photovoltaic Distributed Generators in Distribution Networks Based on Site's Condition," *Solar*, vol. 2, no. 1, pp. 52–63, 2022, doi: 10.3390/solar2010004.
- [14] J. P. Muñoz, M. V. Rojas, and C. R. Barreto, "Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador," *Ingenius*, no. 19, pp. 60–68, 2018, doi: 10.17163/ings.n19.2018.06.
- [15] H. Mohamad, H. Mokhlis, A. H. A. Bakar, and H. W. Ping, "A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3952–3962, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.06.010.
- [16] G. Sánchez, C. Fernando, V. Salgado, and C. Afranio, "Estudio de mercado para la introducción de sistemas fotovoltaicos," 2017.
- [17] R. D. Robinett III Richard and E. Henes Chair Professor, "Autonomous Energy Grids (AEG's)," no. October, pp. 37–46, 2020.
- [18] O. O. D. P.-B. R. Núñez, "Micro-redes en la red eléctrica del futuro --caso Huatacondo.,," *Cienc. y Tecnol.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–16, 2013.
- [19] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Sáez, "Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism," *IEEE SSCI 2011 - Symp. Ser. Comput. Intell. - CIASG 2011 2011 IEEE Symp. Comput. Intell. Appl. Smart Grid*, pp. 131–138, 2011, doi: 10.1109/CIASG.2011.5953338.
- [20] J. Divya Navamani, A. Lavanya, C. M. Prahadheeshwar, and S. Mohammed Riyazudeen, "Hybrid power system design using homer pro," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 1 Special Issue4, pp. 605–609, 2019.
- [21] C. S. Lai, G. Locatelli, A. Pimm, X. Wu, and L. L. Lai, "A review on long-term electrical power system modeling with energy storage," *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p. 124298, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124298.
- [22] K. M. Kotb, M. R. Elkadeem, M. F. Elmorshedy, and A. Dán, "Coordinated power management and optimized techno-enviro-economic design of an autonomous hybrid renewable microgrid: A case study in Egypt," *Energy Convers. Manag.*, vol. 221, no. March, p. 113185, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113185.
- [23] K. E. Okedu and R. Uhunmwangho, "Optimization of renewable energy efficiency using HOMER," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 421–427, 2014, doi: 10.1234/ijrer.v4i2.1231.g6294.
- [24] L. Khalil, K. Liaquat Bhatti, M. Arslan Iqbal Awan, M. Riaz, K. Khalil, and N. Alwaz, "Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. S110–S115, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.054.
- [25] P. D. I. Torino, "Mini-Grids for the Production of," 2018.
- [26] V. Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, "Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 594–604, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.01.013.
- [27] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, "Integrated assessment of a sustainable microgrid for a remote village in hilly region," *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, no. November 2018, pp. 442–472, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.084.
- [28] S. Salehin, M. T. Ferdaous, R. M. Chowdhury, S. S. Shithi, M. S. R. B. Rofi, and M. A. Mohammed, "Assessment of renewable energy systems combining techno-economic optimization with energy scenario analysis," *Energy*, vol. 112, pp. 729–741, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.110.
- [29] R. B. Hiremath, S. Shikha, and N. H. Ravindranath, "Decentralized energy planning; modeling and application-a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 5, pp. 729–752, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.07.005.
- [30] P. A. Trotter, N. J. Cooper, and P. R. Wilson, "A multi-criteria, long-term energy planning optimisation model with integrated on-grid and off-grid electrification – The case of Uganda," *Appl. Energy*, vol. 243, no. December 2018, pp. 288–312, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.178.