



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 Polytechnic University - South Campus, using HOMER PRO software

Ernesto Rafael González Solórzano ¹ , Daniel Omar Gualotuña Caiza ¹ , Jaime Francisco Quinteros Flores ^{1,2} 

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Electricidad, Ecuador

² Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación en redes Eléctricas Inteligentes (GIREI), Carrera de Electricidad, Ecuador

egonzalezs@est.ups.edu.ec, dgualotunac@est.ups.edu.ec, jqinteros@ups.edu.ec

Fecha de recepción: 19 de julio de 2022; Fecha de aprobación: de 2022.

*Autor de correspondencia: Jaime Francisco Quinteros Flores (jqinteros@ups.edu.ec)

RESUMEN. Bajo el contexto de una dependencia por el consumo de combustibles fósiles, causantes del calentamiento global, el mundo requiere energía limpia y sostenible. En los últimos años se han realizado grandes avances en el ámbito de la energía renovable y sostenible. Por lo que el desarrollo energético sostenible resulta ser fundamental para satisfacer la creciente demanda de energía, preservando a la vez la calidad medioambiental, así como los recursos naturales necesarios en el presente y para el futuro. Así mismo, para lograr esta sostenibilidad es necesario realizar una transición energética centrada en el uso de energías renovables. Las edificaciones energéticamente sostenibles tienen un papel crucial para minimizar el impacto ambiental, ya que, haciendo uso de la tecnología solar fotovoltaica, por ejemplo, son capaces de generar gran parte o la totalidad de la energía que el edificio demanda. Este documento tiene como objetivo el diseño de una microrred óptima que hace uso del recurso solar en el software Homer pro, para otorgar sostenibilidad energética a uno de los bloques de la Universidad Politécnica Salesiana - Campus Sur. Para ello se hace uso de datos de irradiancia solar propia del sector, así como los datos de demanda energética del determinado bloque. Los resultados conseguidos dejan en claro que la opción de incorporar paneles solares y un banco de baterías a la microrred resulta ser la alternativa menos costosa y la que, al mismo tiempo otorga un mayor grado de sostenibilidad a la edificación.

Palabras clave. *Energía solar, energía renovable, Homer pro, microrredes, recurso solar fotovoltaico, sistema fotovoltaico, sostenibilidad/sustentabilidad energética.*

ABSTRACT. In the context of dependence on the consumption of fossil fuels, which cause global warming, the world requires clean and sustainable energy. In recent years, great advances have been made in the field of renewable and sustainable energy. Therefore, sustainable energy development is essential to meet the growing demand for energy, while preserving environmental quality and the natural resources needed now and in the future. Likewise, to achieve this sustainability it is necessary to carry out an energy transition focused on the use of renewable energies. Energy sustainable buildings have a crucial role to play in minimizing the environmental impact, since, by making use of solar photovoltaic technology, for example, they are able to generate much or all of the energy that the building requires. This paper aims to design an optimal microgrid that makes use of the solar resource in the Homer pro software, to provide energy sustainability to one of the blocks of the Salesian Polytechnic University - South Campus. For this purpose, the solar irradiance data of the sector is used, as well as the energy demand data of the specific block. The results obtained make it clear that the option of incorporate solar panels and a battery bank into the microgrid turns out to be the least expensive and at the same time provides a higher degree of sustainability to the building.

Keywords. *Solar energy, renewable energy, Homer pro, microgrids, solar photovoltaic resource, photovoltaic system, energy sustainability/sustainability.*

1. Introducción

Actualmente, el cambio climático producto del consumo de combustibles fósiles representa una amenaza que coloca en una situación delicada a la humanidad, por lo que resulta necesario realizar una transición energética basada en la descarbonización del sistema eléctrico [1].

Los beneficios que conlleva la descarbonización son: reducción del impacto ambiental, minimización del costo energético, incremento de la sostenibilidad, mejora en la eficiencia del sistema, aporte de estabilidad y resiliencia a la red, ahorro de energía, entre otros teniendo siempre en cuenta que estos beneficios son mayores que los costos asociados a dicho proceso [2].

Una de las varias formas de mitigar el cambio climático es mediante la integración de fuentes de energía renovable (ER), como lo son: eólica, solar, biomasa, geotermia, hidráulica, entre otras fuentes de energía limpia, mismas que son la base del proceso de transformación hacia un sistema de energía más verde, el cual conlleve a una reducción de emisiones de CO₂ [4]. Aunque una propuesta más contundente para conseguir dicho cometido es la implementación de micro redes.

Una microrred es una variante reducida del sistema interconectado de red tradicional que posee una parte de generación de energía limitada basada ER, y también la presencia de un consumo y una cobertura limitante [5]. El diseño de una micro red se ha visto impulsada a gran escala por la gestión de la demanda de energía eléctrica, la implementación de ER y su incorporación en la red de energía eléctrica [6].

Por lo que este artículo plantea el diseño de una microrred híbrida que cuenta con paneles solares, sistema de almacenamiento de energía, un convertidor y un generador a base de combustible, para uno de los bloques de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito, considerando que este posee una demanda de 10kW. Para montar y modelar la microrred propuesta se hará uso del software Homer pro.

Este documento está organizado de la siguiente manera: la primera sección ofrece una introducción cuyo contexto está en base a las energías renovables, así como de sus características. A su vez, en esta sección se presentan casos de diseño e implementación de microrredes en diferentes partes del mundo mediante el uso del software Homer pro y la funcionalidad de dicho

software. En la segunda sección se describe la metodología de diseño de la microrred en un software de simulación Homer pro, el cual se basa en un algoritmo de optimización que determina la mejor configuración tecnologías a utilizar en una microrred. La tercera sección muestra los resultados del proceso de optimización presentado por gráfico de costos y gráficos comparativos, así como un análisis de los datos conseguidos. Por último, en la cuarta sección se presentan las conclusiones del sistema de microrred propuesto en este trabajo. De igual manera en esta sección se dan indicaciones para trabajos futuros basados en los resultados alcanzados

En recientes años, el uso de energías renovables ha tomado gran relevancia por su potencial de representar una posible solución a la problemática abordada anteriormente. Las tecnologías con mayor potencial de desarrollo en el sector eléctrico resultan ser: la eólica y la solar fotovoltaica, siendo esta última la utilizada para el diseño de la microrred propuesta en este artículo. La energía solar fotovoltaica es la que mayor impacto y desarrollo ha tenido a lo largo de los últimos años gracias a los avances del desarrollo tecnológico [7], por lo que resulta lógico pensar que los beneficios ofrecidos por esta tecnología en años venideros serán mayores. Uno de los principales beneficios, y que puede ser apreciado ya en estos días, es la disminución del costo por infraestructura [8],[9]. Dicho parámetro resulta ser muy llamativo a los ojos de las microrredes.

Infinidad de sectores a nivel mundial están en la búsqueda de implementación de energías renovables a sus sistemas de generación eléctrica. Por lo que, disponer de herramientas que ayuden al proceso de evaluación de recursos, de manejo de equipos, de aspectos financieros entre varios otros resulta de gran utilidad. Casos fructíferos de instalación de microrredes en diferentes lugares del mundo, bajo criterio de reducción de gases contaminantes, así como de la evaluación del recurso energético y la viabilidad, haciendo uso del software Homer pro son el centro principal de las investigaciones y se detallan a continuación.

En [10] se propone una metodología de planificación para realizar un dimensionamiento óptimo de los componentes de una microrred, así como la validación de su funcionamiento con la finalidad de obtener

indicadores técnicos como: pérdidas de potencia, perfiles de voltaje entre otros. También el método es aplicado para evaluar los ingresos económicos de un mercado energético, para posteriormente lograr conseguir costos de energía y costos anuales netos óptimos e implementables a escenarios reales. En esta propuesta, para la microrred se utiliza un sistema fotovoltaico puro de 552kW, un inversor de 285kW y un grupo electrógeno de 180kW cuya única función es actuar como una fuente de respaldo ante emergencias.

No todos los casos responden a un cambio en la forma de producir electricidad, ya que hay lugares en los cuales no es aplicable la forma tradicional de producirla (hidráulica o térmica), por lo que no queda otra opción que hacer uso de energías renovables no convencionales para abastecer, a cierto sector o a toda una comunidad, de servicio eléctrico. Lo que ocurre en [11] es un ejemplo de esto. En este lugar se pretende abastecer de servicio eléctrico a toda una comunidad ubicada en una isla haciendo uso de energía solar, un grupo electrógeno y un sistema de almacenamiento de energía por medio de baterías. El software Homer Pro, se utilizó para evaluar los costos inherentes a dicha propuesta, así como cual óptima resulta su implementación teniendo en cuenta indicadores medioambientales como económicos. Como resultado de la evaluación de dicha micro red autónoma, tras el respectivo análisis y simulación de escenarios en el software Homer Pro se tiene que el mejor diseño de sistema es aquel que cuenta con un campo fotovoltaico de 15.3kW, un grupo electrógeno de 17kW, un banco de baterías de plomo ácido de 57kWh y un convertidor con una potencia nominal de 6.93kW. Esta opción de diseño es la que más beneficios trae consigo; y además presenta el menor costo actual neto (£56,264), así como es la opción que menor cantidad de emisiones de carbono presenta.

Otra aplicación de uso de microrredes se muestra en [12], en donde se pretende implementar sistemas híbridos, que constan de gasificadores de biomasa, energía fotovoltaica y un sistema de baterías encargadas del almacenamiento de energía, para cubrir las necesidades energéticas de instituciones educativas. Mediante el uso del software Homer Pro, se lleva a cabo la fase de diseño, el modelamiento y la posterior optimización en base a los costos de implementación de

dicho sistema. Haciendo uso de paneles fotovoltaicos con capacidad de 5kW, una pila de combustible que aporta 5kW, gasificadores de biomasa y grupos electrógenos de 5 kW se consigue satisfacer la demanda e incluso tener un excedente de 36kWh al año de manera ininterrumpida y con un porcentaje de 0% de carga insatisfecha.

Con lo mencionado en los ejemplos anteriores podemos ver la importación del software Homer Pro para el desarrollo, diseño, estudio e implementación de proyectos de generación eléctrica que aprovechan los recursos naturales, como lo son las microrredes.

De manera similar a los trabajos citados anteriormente, el diseño de una microrred haciendo uso del software Homer pro con el objetivo de alcanzar sostenibilidad para uno de los bloques de la Universidad Politécnica Salesiana en base a la solución más económica producto de la optimización propia que brinda el software, se aborda en este trabajo.

1.1 Software Homer pro.

HOMER Pro es un software utilizado para optimizar el diseño de sistemas eléctricos, microrredes, por ejemplo; ya sea que estos se encuentren conectados a la red o funcionen de forma aislada (modo isla). HOMER, correspondiente a las siglas en inglés de Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources, permite que la ingeniería y la economía trabajen a la par para poder encontrar el plan óptimo y funcional aplicable a la red a implementar. Este poderoso software permite realizar: análisis de sensibilidad, análisis económicos, estimaciones de la potencia, rentabilidad de las tecnologías a utilizar, el dimensionamiento de los componentes que se verán involucrados, como se ve modificado el aspecto económico en base a cambios en las cargas o en los costos y saber si el recurso que se tiene en mente ocupar es el más indicado o adecuado [13-16].

Esta herramienta de simulación analiza todas las posibles combinaciones entre diferentes tecnologías en base a operaciones de balance de energía a lo largo de un año y entrega como resultado la solución con el menor costo y que a su vez integra los múltiples componentes del sistema [4].

Cuando el software encuentra la o las configuraciones que más beneficios aportan al sistema, Homer pro se encarga de estimar costos de: operación y

mantenimiento, inversión, reemplazos, ciclos de vida, intereses y combustibles, así como de ofrecer la posibilidad de observar el flujo de energía de los componentes de manera horaria y su comportamiento [16].

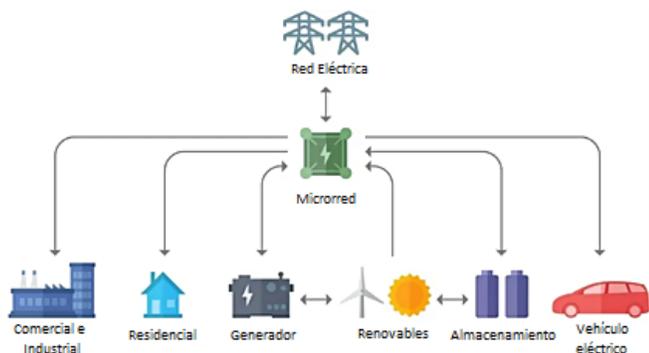


Figura 1. Algunas funcionalidades del software HOMER Pro.

Fuente: HOMER Energy

El programa responde a un diagrama de flujo de trabajo, en el cual los diversos componentes que intervienen en el modelado, en conjunto con sus subcomponentes, han sido discutidos de forma gradual. En dicha imagen de flujo de trabajo, las líneas continuas corresponden a los pasos o procesos principales en la etapa de modelamiento y diseño, mientras que las líneas entrecortadas representan las posibles opciones a seguir de acuerdo con el parámetro principal seleccionado [18].

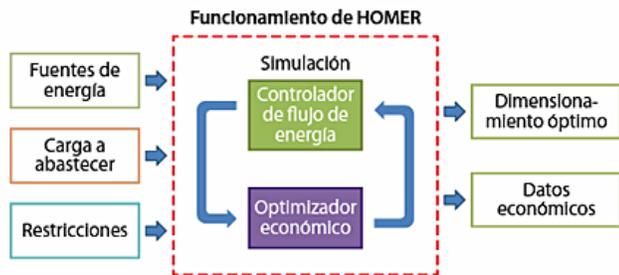


Figura 2. Diagrama de flujo de trabajo del software HOMER Pro. [18]

A todo este flujo se lo puede resumir en tres pasos, donde el paso uno es parametrización de los datos de entrada, incluyendo los recursos del sitio, perfiles de carga y componentes del sistema. El paso dos corresponde al proceso de análisis de la simulación y optimización en base a las variables de entrada. Y el paso

tres muestra los resultados en base a parámetros financieros y el rendimiento del sistema. Existen varios programas computacionales para simular, optimizar y analizar la viabilidad tanto como los aspectos técnicos y económicos de sistemas fotovoltaicos. A continuación, se presentan algunos softwares de simulación, así como sus características principales.

- **SAM:** Este software desarrollado por NREL en colaboración con SNL, lanzado en agosto del 2007 y que utiliza lenguaje de programación C++ se utiliza para simular posibles configuraciones de sistemas fotovoltaicos y hacer predicciones de estimaciones de costos y rendimiento. Para cumplir con su cometido, este software hace uso de varias entradas como lo pueden ser: especificaciones técnicas de los elementos a utilizar, el diseño del sistema, la vida útil del sistema, las pérdidas, etc. SAM facilita la toma de decisiones en la industria de energías renovables [19].
- **PVsyst:** creado por el ingeniero eléctrico Michel Villoz y el físico Andre Mermoud se utiliza para el diseño y simulación de sistemas fotovoltaicos. Este software toma como entradas: la orientación del plano, el arreglo fotovoltaico, los componentes del sistema, la información técnica de los componentes para realizar la simulación; la cual entrega como resultado varias variables, como lo pueden ser: energía inyectada a la red, necesidad de energía del usuario, energía disponible del sol; las cuales pueden tener valores horarios, diarios o mensuales. También es posible realizar evaluaciones económicas en base a los precios de los componentes, la inversión y cualquier costo adicional [19].
- **PV*SOL premium:** es un software alemán desarrollado por Valentine Software para la simulación dinámica con visualización en 3D y análisis detallado de sombras de sistemas fotovoltaicos. Los diseñadores de sistemas fotovoltaicos, ingenieros, consultores e instaladores pueden utilizar el software para diseñar profesionalmente los sistemas fotovoltaicos. PV*SOL facilita la realización de predicciones precisas y ofrece a los clientes el mejor rendimiento de su inversión mediante la

visualización de los sistemas y la creación de informes profesionales [19].

- **Solaris PV:** es el software profesional de cálculo de energía solar fotovoltaica desarrollado por la empresa italiana ACCA para diseñar sistemas fotovoltaicos con gran facilidad para conseguir la mejor solución económica y técnica. Este modelo utiliza datos de entrada como los datos meteorológicos, los módulos, los inversores, las baterías, etc. para obtener un análisis técnico y financiero para la configuración del sistema. Solaris PV puede calcular el rendimiento global del sistema fotovoltaico (producción total anual con un programa de producción horaria) y evaluar la rentabilidad y el periodo de amortización de todo el sistema fotovoltaico. Este software permite comprobar los efectos de las sombras proyectadas sobre los módulos fotovoltaicos por obstáculos cercanos, como antenas y chimeneas, y visualizar gráficamente las interferencias de las sombras [19].

En el caso de estudio propuesto se hace uso del software Homer pro debido a que este representa el estándar mundial para el diseño y optimización de microrredes y por todos los resultados y análisis que trae consigo su proceso de simulación.

1.2 Recurso solar en Ecuador

El recurso solar fotovoltaico es uno de los que mayor presencia tiene en la naturaleza, se estima que cerca de 885 millones de TWh llegan a la superficie del planeta, por lo que, esta energía es una buena opción de desarrollo sostenible [20-22].

Al estar el país situado en la zona ecuatorial, este cuenta con altos índices de radiación solar. Por consecuente, la inserción de sistemas fotovoltaicos destinados al abastecimiento de demanda energética trae consigo buenos resultados, como se menciona en [23-26].

Sin embargo, resulta necesario aclarar que no es igual la generación fotovoltaica a lo largo y ancho del país, ya que este al ser geográficamente diverso, tiene una gran diversidad de zona, mismas que poseen sus propias condiciones climáticas [27],[28].

Como el lugar para el cual se propone el diseño de la microrred corresponde a una locación dentro de la ciudad de Quito, a continuación, se presenta datos de la

evolución del recurso solar en esta ciudad. En el año 2013, la cantidad de energía solar promedio diaria que recae sobre el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) corresponde a la mostrada en la siguiente imagen:

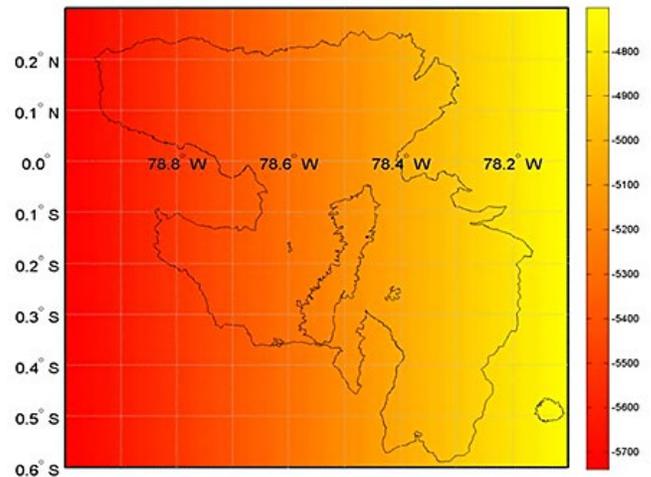


Figura 3. Energía solar promedio diaria DMQ. [26]

Se puede observar que el recurso solar se ve intensificado al oeste de la ciudad, independientemente de la topografía (valles o montañas). En 2018, haciendo uso de cuatro estaciones meteorológicas pertenecientes a la red metropolitana de monitoreo de la ciudad de Quito, se obtuvo información de la radiación solar promedio anual del lugar, determinando así que, el sur de Quito cuenta con una potencia solar de $4.52 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ mientras que el noreste de Quito cuenta con una potencia solar de $5.18 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ [29]. Por parte de [8], el cual también explora el potencial solar en la ciudad de Quito, tenemos que la irradiación promedio anual presente en la ciudad corresponde a $4.58 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, alcanzando temperaturas máximas y mínimas dentro de un rango de 9.77°C y 21.37°C . Y finalmente, por parte de [30] se establece que posee una irradiancia promedio diaria de 4.2 kWh/m^2 , llegando a alcanzar picos superiores a los 6 kWh/m^2 .

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño de Microrred mediante el uso del recurso solar fotovoltaico

El proceso de implementación de la microrred se inicia mediante la estimación de la carga eléctrica y la recopilación de datos correspondientes al recurso energético solar para la ubicación establecida. De igual

manera, es necesario considerar costos iniciales correspondiente a las tecnologías que se implementará en el modelo para efectuar un análisis económico que conlleve a determinar qué tecnologías son viables. Este análisis económico, se ejecutará mediante el software HOMER, el cual simula todas las configuraciones factibles del sistema definidas por el espacio de búsqueda, y por el algoritmo patentado HOMER Optimizer que consiste en buscar el sistema menos costoso.

El proceso para el diseño de la microrred mediante el uso del software se establece en la Figura 4.

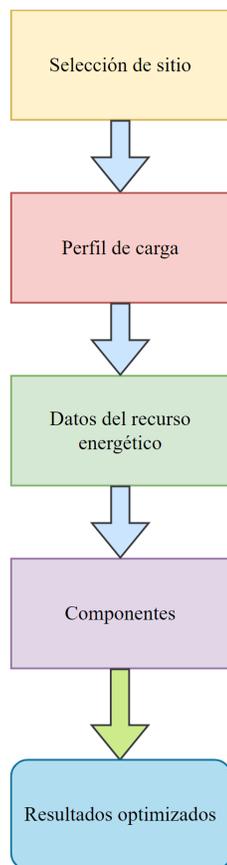


Figura 4. Diseño de microrred mediante el uso del software HOMER.

2.1.1 Selección de sitio

Como primera etapa en el diseño de la microrred, se establece la ubicación, donde se llevará a cabo la implementación de las tecnologías, por consiguiente, se estableció como sitio el edificio (Bloque C) del campus sur de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) ubicada en la ciudad de Quito, Ecuador. Las coordenadas geográficas con respecto a la latitud son de $0^{\circ}16'54.0S$, y de longitud $78^{\circ}33'00.0"W$. Estas coordenadas son fundamental para la recopilación de datos de temperatura y radiación solar los cuales, permiten estimar la producción de energía y realizar un análisis de eficiencia para la tecnología empleada. En la Figura 5, se ilustra el sitio para llevar a cabo la implementación de la microrred.

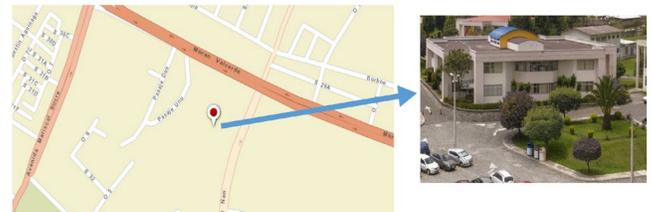


Figura 5. Bloque C del campus sur de la Universidad Politécnica Salesiana.
Fuente: Google Maps.

2.1.2 Determinación del perfil de carga diario

Para el dimensionamiento de las tecnologías, es necesario considerar las cargas que tiene el edificio (Bloque C) tales como: laboratorios de control numérica computarizada, neumática, teoría de control, hidráulica y comunicaciones avanzadas para obtención de valores de energía diaria y potencia máxima. Por consiguiente, para el caso de estudio se ha establecido sintéticamente por el software HOMER fijando como valores base de demanda de energía diaria de $95.32kWh$ y una potencia máxima de $15kW$ de manera que se aplique entradas de variabilidad aleatoria para que los datos de carga tengan una tendencia más realista. El perfil de carga diario y mensual se ilustra en la Figura 6 y Figura 7 respectivamente.

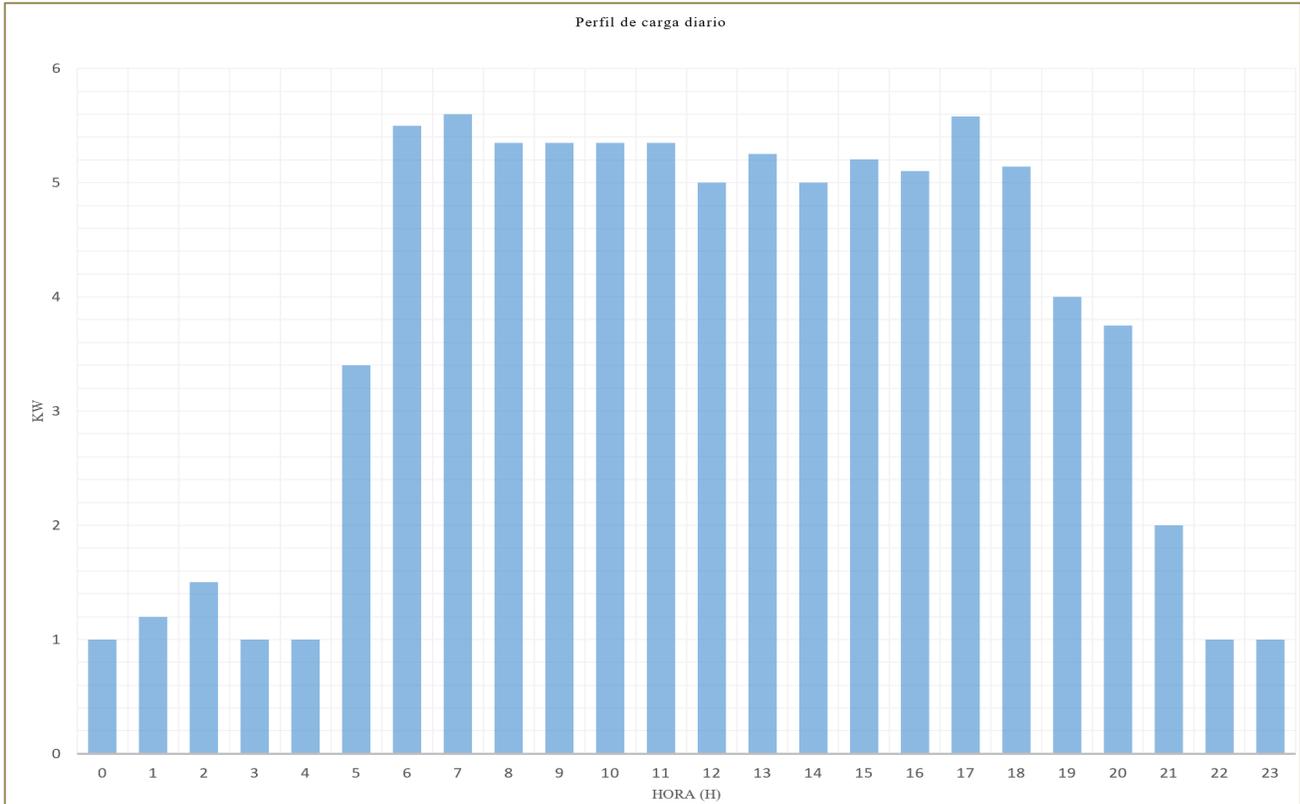


Figura 6. Perfil de carga diario.



Figura 7. Perfil de carga mensual

2.1.3 Datos de recurso energético solar

Una de las diferencias entre la presente propuesta y las que sean señalado anteriormente en base a la misma línea de investigación, es la locación para la cual se va a diseñar la microrred. Por lo tanto, el análisis de los datos de recurso energético solar, los cuales son obtenidos por medio de estaciones meteorológicas y estudios de irradiancia, permitirán determinar si el diseño es factible para otorgar sostenibilidad energética al edificio.

Los datos del recurso energético solar que se considera para el diseño son valores de radiación solar y temperatura para la zona establecida. Esta información se adquirió de datos publicados por la NASA, en donde establece valores de radiación solar promedio e índice de claridad siendo esta, la proporción de la radiación solar que pasa a través de la atmósfera y llega a la superficie [31].

Los datos obtenidos de la irradiancia horizontal solar promedio en la ubicación establecida, los cuales se han presentado en la Tabla 1, permitirán analizar la producción de energía correspondiente a la tecnología solar fotovoltaica siendo factor para la determinación de viabilidad del proyecto en la ubicación establecida.

A raíz de esto, los valores que se han obtenido del campus de la universidad con respecto a la radiación solar diaria se encuentran entre de 3.980 y 4.550kWh/m²/día con una media mensual de 4.25kWh/m²/día, y el índice de claridad se encuentran comprendido entre 0.4, por lo que se muestra una buena disponibilidad de radiación en la superficie.

Tabla 1. Datos de irradiancia horizontal global solar

Mes	Índice de Claridad	Radiación Solar Diaria (kWh/m ² /día)
Enero	0.41	4.14
Febrero	0.418	4.35
Marzo	0.433	4.55
Abril	0.425	4.33
Mayo	0.428	4.12
Junio	0.433	4.02
Julio	0.454	4.27
Agosto	0.451	4.46
Septiembre	0.413	4.27
Octubre	0.409	4.24
Noviembre	0.425	4.3
Diciembre	0.4	3.98
Promedio	0.42	4.25

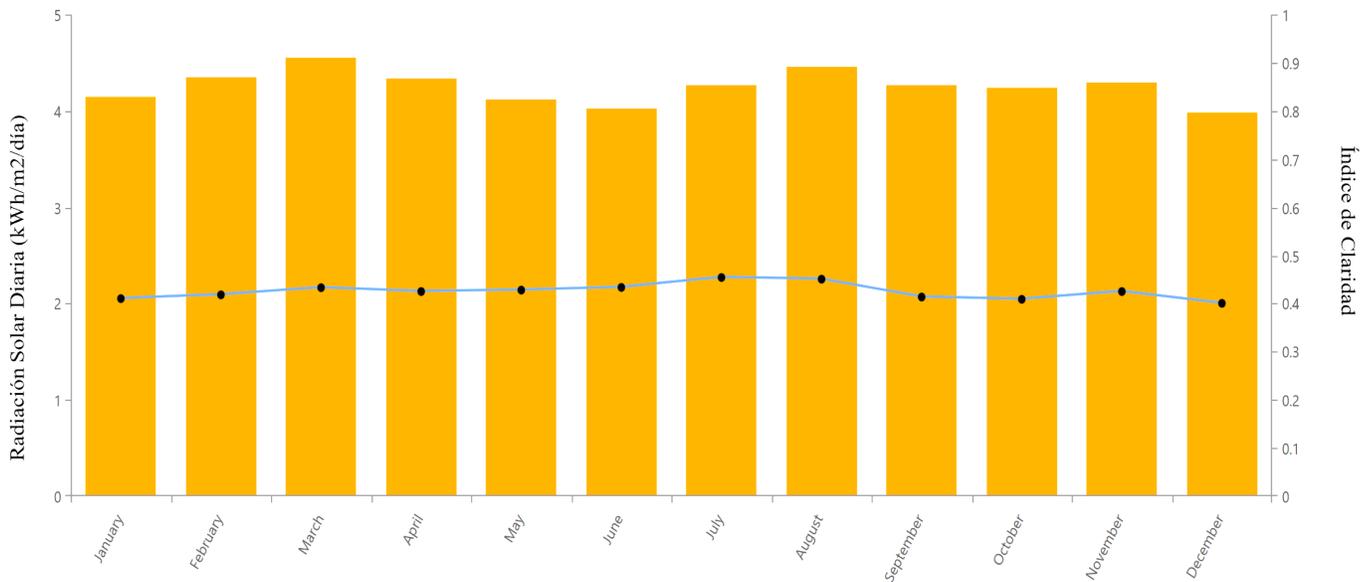


Figura 8. Irradiancia horizontal global solar promedio mensual.

2.1.4 Modelo propuesto en HOMER

El modelo de la microrred híbrida aislada consta de un generador diésel, una batería, un fotovoltaico y un convertidor. La energía fotovoltaica y las baterías se enlazará a la barra DC, mientras que el generador a diésel y la carga se conecta a la barra de AC. El convertidor se encuentra conectado entre las dos barras AC y DC. Además, se considera baterías y un generador a diésel cual su función es como elemento de reserva.

Para la implementación de la tecnología solar fotovoltaica, se establece costos de inversión, y de operación y mantenimiento, por lo cual, se investigó el precio que existe en el mercado con respecto a los módulos solares con células monocristalinas para hacer una estimación de capital [32]. Por lo tanto, se ha fijado un costo de 0.36\$/Wp, el cual establece la plataforma comercial pvXchange como el costo promedio en el mercado de los módulos solares [33]. Este valor permitirá realizar el análisis técnico-económico con respecto a los modelos de paneles para implementar en la microrred. Por consiguiente, se plantea utilizar el modelo SW460M-144 de marca Hefei Sunway Solar Energy Tech Co Ltd., de potencia de 460W cada panel [34]. Evaluando la cantidad de módulos con respecto al costo promedio de estos, se estima un costo aproximado de USD 9500.00 como inversión en paneles además considerando gastos con respecto a la instalación para el arreglo fotovoltaico. Estos costos, se basaron en un análisis económico de proyectos previamente expuestos con características técnicas similares al presente caso de estudio [35]. Las especificaciones técnicas correspondiente al panel solar implementado se muestran en Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas-económicas de PV Solar

Especificaciones PV Solar	
Potencia Máxima (Pmax)	460Wp
Coefficiente de Temperatura	-0.41
Corriente de cortocircuito (Isc)	11.54 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	50 V
Eficiencia [%]	20.82
Temperatura de Operación [°C]	45±2
Vida útil [años]	25
Cantidad	44
Costos	
Capital [USD]	9500.00
O&M [USD/AÑO]	20.00

Los costos por considerar para el inversor es de aproximadamente USD 3500.00, valor promedio en el mercado según [36] para el modelo Symo 20.0-3-M el cual tiene características técnicas que se ajustan al modelo propuesto. Las especificaciones del convertidor a implementarse se muestran en Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones Convertidor Fronius Symo 20.0-3-M

Especificaciones Convertidor Fronius Symo 20.0-3-M	
Capacidad Total [kW]	20
MPP rango de voltaje [Vmpp min - Vmpp max]	420 - 800 V
Distorsión armónica total [%]	1,3
AC corriente salida [Iac nominal]	28,9 A
Eficiencia [%]	97.90
Costos	
Capital [\$]	3500.00
O&M [\$/año]	20.00

La implementación de generador a diésel para el modelo el cual su función es como unidad de reserva, será elemental para el análisis económico en donde se comparará que tecnología es viable para el sistema.

Por otra parte, al igual que la anterior tecnología, se indica un costo de capital de aproximadamente USD 5000.00 según se establece en [37], [38], dando como costo promedio de un generador un valor de USD 4000.00 y el costo de instalación alrededor de USD 1000.00. Con respecto a los costos de operación y el mantenimiento, no se consideró para el estudio debido que estos varían con el tiempo considerando la duración del proyecto, por lo que es difícil predecir las tendencias financieras futuras.

En el modelamiento de la microrred además de tener un generador como elemento de reserva, en la actualidad, existe diversos tipos de tecnologías que son orientadas al almacenamiento de energía tales como baterías, volantes de inercia o supercondensadores. Como beneficios al incorporar unidades de almacenamiento, estas permiten la reducción de combustibles fósiles, que además suma beneficios técnicos en la mejora de eficiencia en las unidades de generación. Por consiguiente, se incorporó la tecnología de almacenamiento de baterías modelo SBS XC 580 de marca EnerSys PowerSafe diseñada con tecnología de placas delgadas de plomo puro (TPPL) debido a que son capaces de manejar altas tasas de descarga y carga que, además, se la consideran libres de

mantenimiento. Las especificaciones de las baterías a implementarse se muestran en Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones de batería EnerDyd PowerSafe SBS XC 780

Especificaciones batería EnerSys PowerSafe SBS XC 780	
Voltaje nominal [V]	12
Capacidad Nominal [kWh]	10.7
Capacidad Nominal [Ah]	893
Eficiencia [%]	97
Corriente máxima de carga [A]	780
Corriente máxima de descarga [A]	1500

2.2 Evaluación Económica

Posterior a establecer el modelo de microrred para el sitio establecido, para el análisis económico que determine la viabilidad del proyecto, se toma en cuenta una serie de métricas económicas como el COE, el NPC del sistema, costo operativo y costos de operación/mantenimiento (O&M).

Como principal métrica a analizar es el costo nivelado de Energía (COE), el cual especifica la relación entre el gasto total anual de electricidad del sistema y la energía total utilizable generada representada mediante la ecuación (1).

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

Donde *COE* representa el costo nivelado de Energía en \$/kWh, 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.

La importancia del costo nivelado de energía es debido a que influye en la planificación de inversión y permite comparar diferentes métodos de generación de electricidad [39]. Según los datos publicados de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), un costo nivelado de energía de un sistema de energía solar en promedio para el año 2020 fue de 0.057 (\$/kWh) siendo el valor la fuente de electricidad más barata con respecto a la eólica, siendo uno de los factores por la cual se implementó la tecnología solar fotovoltaico en la microrred [40]. En el caso de estudio presente, esta métrica permite buscar si la implementación de un

sistema de panel solar fotovoltaico alcanza un punto de equilibrio respecto a los costos.

Los costos en los que incurre el sistema durante su vida útil, el algoritmo de optimización HOMER realiza un análisis comparativo respecto a las tecnologías determinando un menor costo actual total neto (NPC), el cual involucra a cargos de operación, ingresos e instalación de alguna componente en particular. Además, se incluye cargos que existen de mantenimiento y servicio, o costos de combustible para la tecnología a implementarse [41].

A raíz de estas métricas, se debe resaltar gastos de servicio y mantenimiento que van a ocupar para la operación de la microrred solar fotovoltaica, por ende, se realiza un análisis del costo operacional el cual se basa en la diferencia entre el valor del costo total anualizado que incluye: un costo actual neto, tasa de descuento real anual, la vida útil del proyecto y factor de recuperación de capital; respecto a costos iniciales de capital por un factor de recuperación de capital, representado mediante la ecuación (2).

$$C_{OP} = C_{AT} - C_{AC} \quad (2)$$

Donde C_{OP} representa el costo operativo en \$/año, C_{AT} es el costo total anualizado expresado en \$/año, y C_{AC} representa el costo de capital anualizado total expresada en \$/año.

El enfoque que realiza esta métrica económica con respecto al costo de capital anualizado total se considera un costo de capital inicial que hace referencia al costo total instalado de la tecnología a implementarse al comienzo del proyecto. El costo total instalado promedio ponderado según IRENA, la capacidad global de los proyectos encargados en 2020 fue de aproximadamente 883 (\$/kW), un 81% más bajo que en 2010 y un 13% más bajo que en 2019 [42]. Los factores en que estos costos se han visto en descenso son por factores con respecto a ganancias en innovación y mejoras tecnológicas que implementan el recurso solar [40].

Estas métricas económicas que se han establecido permitirán comprobar qué configuración entre las tecnologías empleadas en el diseño es la más factible con

respecto a los costos, buscando proporcionar sostenibilidad energética al edificio.

3. Resultados y discusión

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en el proceso de simulación del modelo de la microrred bajo especificaciones técnicas-económicas incorporados en el software HOMER, para realizar el análisis de factibilidad para la implementación del proyecto.

En la Figura 9, se muestra el modelo de la microrred a implementarse en el bloque C del campus sur de la Universidad Politécnica Salesiana.

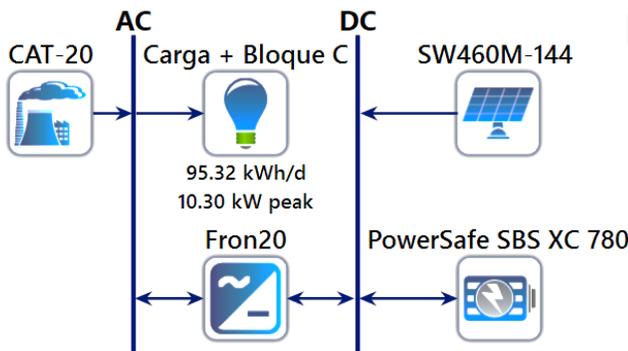


Figura 9. Diseño de microrred. Fuente: Software Homer Pro.

Posterior a tener el diseño de la microrred, se procedió a realizar la simulación mediante el algoritmo de optimización de HOMER, en donde se obtuvieron las múltiples configuraciones de tecnologías a emplear relacionando costos e información técnica de las tecnologías orientado a la energía producida para cada una. Los resultados obtenidos en el proceso de simulación, se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la optimización del modelo implementado

		CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
Tecnologías	Tecnología/SW460M-144 (kW)	20	20		
	Tecnología/CAT-20 (kW)	16	16	16	16
	Tecnología/PowerSafe SBS XC 780	13			1
	Tecnología/Fron20 (kW)	10.333	4.5		0.33
	Tecnología/Despacho	LF	CC	CC	LF
Costos	Costo/COE (\$)	0.3549795	0.7963859	0.8717526	0.8804916
	Costo/NPC (\$)	159659.7	358191.8	392089.5	396020.1
	Costo/Operación (\$/yr)	8752.753	26703.06	29943.07	30049.22
	Costo/Capital Inicial (\$)	46508.33	12987.5	5000	7558.333
Sistema	Sistema/Total Combustible (L/yr)	4151.015	14940.38	16810.14	16807.97
	Sistema/Elec Prod (kWh/yr)	39145.36	66025.8	43380.48	43373.25
	Excedente (%)	8.94%	47.10%	19.80%	19.80%
Tecnología/CAT-20 (kW)	CAT-20/Horas	2460	8749	8760	8760
	CAT-20/Producida (kWh)	10283.38	37163.83	43380.48	43373.25
	CAT-20/Combustible (L)	4151.015	14940.38	16810.14	16807.97
	CAT-20/Combustible Costo (\$/yr)	7264.276	26145.67	29417.75	29413.96
	Tecnología/SW460M-144 (Capital Costo (\$))	7200	7200		
Tecnología/SW460M-144 (Producción)	SW460M-144/Producción	28861.97	28861.97		
	PowerSafe SBS XC 780/Autonomía (hr)	24.54263			1.887895
Tecnología/PowerSafe SBS XC 780/Rendimiento anual (kWh/yr)		12050.77			7.498088

Mediante el proceso de simulación, se determinó que el costo NPC para el caso 1, donde tiene como configuración todas las tecnologías como el generador, panel solar fotovoltaico, convertidor y el banco de baterías, es menor en comparación al resto de casos siendo este el más viable para el proyecto como se muestran en la Figura 10.

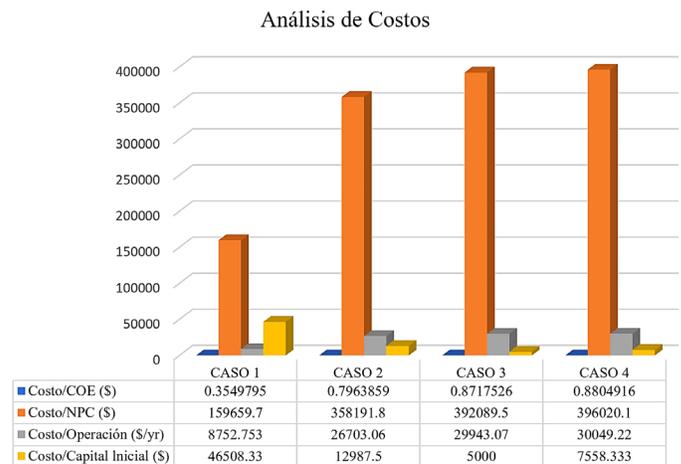


Figura 10. Resultados de costos para cada configuración de tecnologías.

Se puede determinar que costos asociados al NPC involucra al costo de capital, reposición, operación y mantenimiento, combustible y el de salvamento. Para especificar a detalle los costos asociados se ilustra en la Figura 11, en donde se puede observar cómo el costo del panel solar únicamente presenta costos de inversión inicial y un valor mínimo de operación anual, mientras que generador presenta un costo anual correspondiente al

combustible de aproximadamente USD 7,264.28, considera que el precio es de combustible es de USD 1,75. A raíz de esto, se llegó a determinar que al variar el costo de combustible este influirá directamente al costo anualizado, y al costo actual neto, por lo que incoportar únicamente un generador a diésel para abastecer la demanda no es factible en el proyecto como se puede representar en la Figura 12.

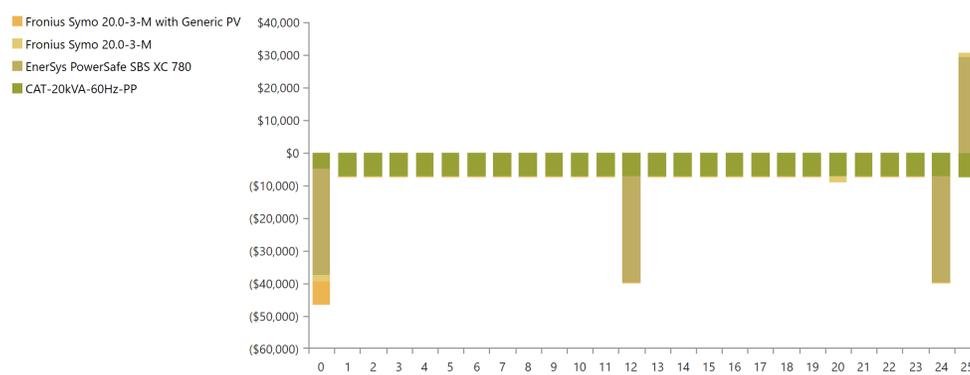


Figura 11. Flujo de costos anual del caso 1.

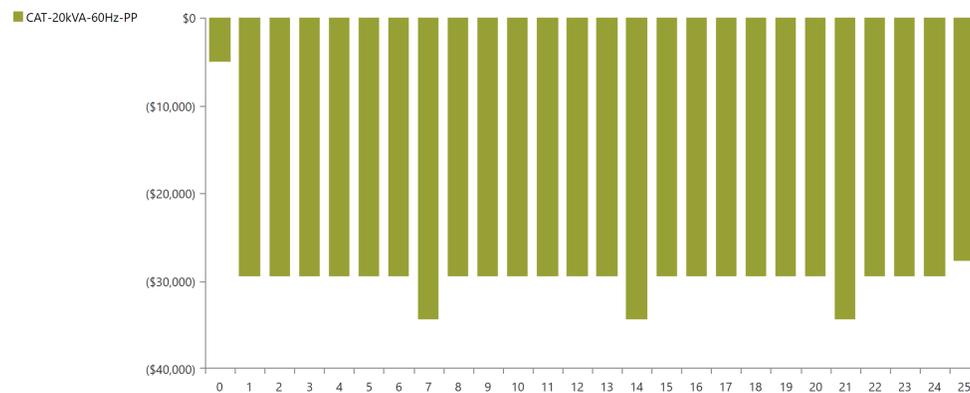


Figura 12. Flujo de costos anual del caso 3 (generador a diésel - CAT-20kVA-60Hz-PP)

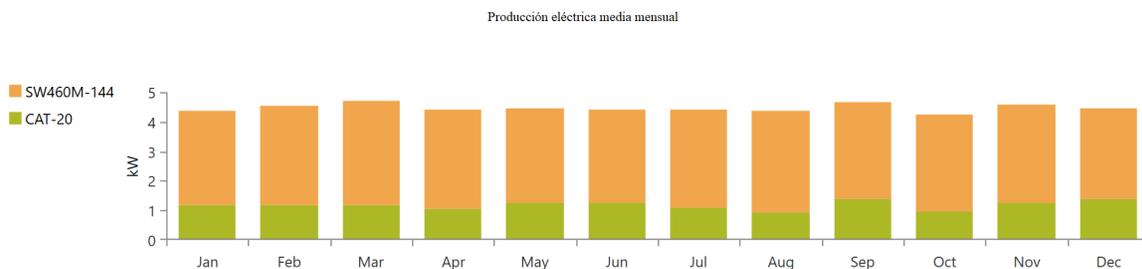


Figura 13. Potencia eléctrica media mensual correspondiente al caso óptimo.

Además, hay que considerar que las baterías que se implementaron en el modelo presentaron un aumento con respecto a los costos totales, debido a que para el modelo empleado se establece una vida útil de 12 años, por lo que conllevará reemplazar esta tecnología cada cierto tiempo. Desde el análisis económico, se pudo observar que es factible el implementar baterías en vez de tener únicamente tecnologías como los generadores ya que conlleva a reducir el uso de estos. Los costos de capital inicial cuando se emplea esta tecnología son reducidos en comparación a la penetración de energías renovables, pero que a largo plazo conllevará a reducir costos de operación y actual neto.

Por consiguiente, para la implementación de la microrred en el campus sur de la Universidad Politécnica Salesiana, es viable en temas de sostenibilidad y técnico-económicos la primera configuración de tecnologías (Caso 1). Debido a que, en los otros casos de estudio, además de poseer elevados costos totales debido al uso único de un generador a diésel por el tema del costo de combustible, también conlleva a tener factores contaminantes en debido a la gran cantidad de emisiones de óxido de nitrógeno afectando a gran medida el medio ambiente.

4. Conclusiones

- La simulación correspondiente del modelo del sistema híbrido aislado del primer escenario, se estableció que es necesario la incorporar un banco de baterías para el almacenamiento de electricidad y un generador diésel como funcionen como reserva, lo cual conlleva a un aumento de los costos NPC y COE. Para el costo actual neto (NPC), se obtuvo un valor de USD 15969.7, y para el costo nivelado de energía (COE) de USD 0.3549795. Por lo tanto, relacionando con los otros casos de configuración de tecnologías, para el sitio seleccionado, con los recursos disponibles, el modelo híbrido es económicamente viable.
- Se demostró que al variar el costo de combustible este influirá directamente con al costo anualizado y al total NPC, por lo que incorporar únicamente un generador a diésel tal como el caso 3, donde el costo actual neto es de USD 392089.5 y el costo nivelado de energía (COE) de USD 0.8717526, no

es factible por el tema económico ya que con respecto al primer caso se triplicó estos costos.

- Se involucró una metodología basada en 5 etapas estructurada en la estimación de la carga del campus, estimación de los parámetros técnico-económicos, síntesis de los recursos energéticos renovables disponibles localmente a través de la optimización de costos asociados a tecnologías utilizando el software HOMER que conlleve a encontrar la alternativa menos costosa y la que, al mismo tiempo otorgue un mayor grado de sostenibilidad para el lugar establecido.
- La ventaja de la presente propuesta es que permite direccionar a una análisis técnico-económico que agrupe información sobre la producción de energía anual, la penetración del recurso energético renovable, el costo nivelado de energía, costo de operación y el costo actual neto del sistema, los cuales permitan determinar la factibilidad y búsqueda de alternativas asociadas a tecnologías para un óptimo levantamiento de una microrred.
- Como trabajos complementarios a realizarse a futuro, se plantea para fines de análisis implementar un modelo híbrido optimizado conectado a la red diseñado con la incorporación del recurso energético eólico y solar mediante el pronóstico de la demanda mediante un modelo de regresión de tipo adaptativa multivariable.

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

E.G., D.G. y F.Q. 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] N. U. Rueda, “Descarbonización y Acción Climática,” Cámara Comer. Bogotá, pp. 1–49, 2021.
- [2] D. G. Groves et al., “The Benefits and Costs Of Decarbonizing Costa Rica’s Economy: Informing the Implementation of Costa Rica’s National Decarbonization Plan under Uncertainty,” IDB, pp. 1–9, 2020.
- [3] M. K. Islam, J. M. Akanto, M. Zeyad, and S. M. M. Ahmed, “Optimization of Microgrid System for Community Electrification by using HOMER Pro,” IEEE Reg. 10 Humanit. Technol. Conf. R10-HTC, vol. 2021-September, 2021, doi: 10.1109/R10-HTC53172.2021.9641615.
- [4] A. J. Martínez-Peralta, B. F. Chere-Quiñónez, L. E. Charcopa-Paz, T. J. Orobio-Arboleda, and C. A. Alcívar-Vallejo, “Configuración del diseño óptimo de un sistema de energía híbrido solar-eólica conectado a la red utilizando el software HOMER,” Dominio las Ciencias, vol. 8, no. 2, pp. 469–479, May 2022, doi: 10.23857/DC.V8I2.2766.
- [5] R. H. Lasseter and P. Paigi, “Microgrid: A conceptual solution,” PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf., vol. 6, pp. 4285–4290, 2004, doi: 10.1109/PESC.2004.1354758.
- [6] L. H. S. Santos, J. A. A. Silva, J. C. Lopez, N. B. Arias, M. J. Rider, and L. C. P. Da Silva, “Integrated optimal sizing and dispatch strategy for microgrids using HOMER Pro,” 2021 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. - Lat. Am. ISGT Lat. Am. 2021, Sep. 2021, doi: 10.1109/ISGTLATINAMERICA52371.2021.9543015.
- [7] J. P. Muñoz-Vizhñay, M. V. Rojas-Moncayo, and C. R. Barreto-Calle, “Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador,” Ingenius, no. 19, pp. 60–68, 2018, doi: 10.17163/ings.n19.2018.06.
- [8] P. Benalcázar, J. Lara, and M. Samper, “Distributed Photovoltaic Generation in Ecuador: Economic Analysis and Incentives Mechanisms,” IEEE Lat. Am. Trans., vol. 18, no. 3, 2020.
- [9] B. Petrovich, S. L. Hille, and R. Wüstenhagen, “Beauty and the budget: A segmentation of residential solar adopters,” Ecol. Econ., vol. 164, no. May, p. 106353, 2019, doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.106353.
- [10] J. Barco- Jiménez, A. Córdoba, E. Escobar-Rosero, A. Pantoja, and E.F. Caicedo-Bravo, “Optimal sizing of a grid - connected microgrid and operation validation using HOMER Pro and DIgSILENT,” Sci. Tech., vol. 27, no. 01, pp. 28–34, 2022.
- [11] A. O. Rousis, D. Tzelepis, I. Konstantelos, C. Booth, and G. Strbac, “Design of a hybrid ac/dc microgrid using homer pro: Case study on an islanded residential application,” Inventions, vol. 3, no. 3, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/inventions3030055.
- [12] A. Singh, P. Baredar, and B. Gupta, “Computational Simulation & Optimization of a Solar, Fuel Cell and Biomass Hybrid Energy System Using HOMER Pro Software,” Procedia Eng., vol. 127, pp. 743–750, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.408.
- [13] M. K. Deshmukh and A. B. Singh, “Modeling of energy performance of stand-alone SPV system using HOMER pro,” Energy Procedia, vol. 156, no. September 2018, pp. 90–94, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.100
- [14] S. Jin, H. Kim, T. H. Kim, H. Shin, K. Kwag, and W. Kim, “A Study on Designing Off-grid System Using HOMER Pro - A Case Study,” IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag., vol. 2019-Decem, pp. 1851–1855, 2019, doi: 10.1109/IEEM.2018.8607423.
- [15] F. A. Barrozo Budes, G. Valencia Ochoa, L. G. Obregon, A. Arango-Manrique, and J. R. Núñez Álvarez, “Energy, Economic, and Environmental Evaluation of a Proposed Solar-Wind Power On-grid System Using HOMER Pro®: A Case Study in Colombia,” Energies, pp. 1–19, 2020.
- [16] N. R. E. NREL Laboratory, “HOMER. Innovation for our energy future,” NREL, p. 2, 2004.
- [17] R. L. Dash, L. Behera, B. Mohanty, and P. Kumar Hota, “Cost and sensitivity analysis of a microgrid using HOMER-Pro software in both grid connected and standalone mode,” 2018 Int. Conf. Recent Innov. Electr. Electron. Commun. Eng. ICRIEEECE 2018, pp. 3444–3449, 2018, doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009218.
- [18] J. L. Godoy, M. Schierloh, and J. Vega, “Evaluación económica de microrredes eléctricas con generación renovable,” Energías Renov., vol. 2019-Agost, pp. 2–11, 2019.
- [19] N. Umar, B. Bora, C. Banerjee, and B. S. Panwar, “Comparison of different PV power simulation softwares: case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant,” Int. J. Eng. Sci. Invent., vol. 7, no. 7, pp. 11–24, 2018.
- [20] X. Song, Y. Huang, C. Zhao, Y. Liu, Y. Lu, Y. Chang, and J. Yang, “An approach for estimating solar photovoltaic potential based on rooftop retrieval from remote sensing images,” Energies, vol. 11, no. 11, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113172.
- [21] H. Zsiborács, N. H. Baranyai, A. Vincze, I. Háber, and G. Pintér, “Economic and Technical Aspects of Flexible Storage Photovoltaic Systems in Europe,” Energies, vol. 11, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061445.
- [22] R. Dávila, D. A. Vallejo, R. Soria, and F. Ordoñez, “Evaluation of the technical and economic potential of solar photovoltaic technology for electrical microgeneration in Quito Metropolitan District residential sector” Rev. Técnica “energía,” no. 17, pp. 80–91, 2020.
- [23] G. K. T. M and K. R. M. Vijaya Chandrakala, “Techno-Economic Analysis for the Profitability of Residential PV Battery System,” 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798004.

- [24] X. Serrano-Guerrero, D. Álvarez-Lozano, and S. F. L. Romero, "Influence of local climate on the tilt and orientation angles in fixed flat surfaces to maximize the capture of solar irradiation: A case study in Cuenca-Ecuador," 2019 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2019, no. Ropec, 2019, doi: 10.1109/ROPEC48299.2019.9057102.
- [25] Á. Ordóñez, E. Sánchez, L. Rozas, R. García, and J. Parra-Domínguez, "Net-metering and net-billing in photovoltaic self-consumption: The cases of Ecuador and Spain," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, no. June, p. 102434, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102434.
- [26] S. Díaz, "Evaluación del potencial solar para obtención de energía eléctrica en la ciudad de Quito," UDLA, 2018.
- [27] J. Cevallos-Sierra and J. Ramos-Martin, "Spatial assessment of the potential of renewable energy: The case of Ecuador," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. August 2017, pp. 1154–1165, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.015.
- [28] F. Amoroso et al., "Simulation of an off-grid solar system to provide reliable energy access to the Island Community of Bellavista in Ecuador," 2020 IEEE Andescon, Andescon 2020, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272119.
- [29] R. Rituraj, S. Ali, and A. R. Varkonyi-Koczy, "Modeling of a Microgrid System with Time Series Analysis using HOMER Grid Software and it's Prediction using SARIMA Method," doi: 10.31219/OSF.IO/WKHAC.
- [30] J. P. Muñoz, M. Cárdenas, and J. Heredia, "Segmentación de clientes residenciales con fines de autoabastecimiento fotovoltaico mediante índices de rentabilidad en Ecuador," vol. 18, no. 2, pp. 32–43, 2022.
- [31] M. K. Islam, J. M. Akanto, M. Zeyad, and S. M. M. Ahmed, "Optimization of Microgrid System for Community Electrification by using HOMER Pro," *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, R10-HTC*, vol. 2021-September, 2021, doi: 10.1109/R10-HTC53172.2021.9641615.
- [32] K. Yon, M. C. Alvarez-Herault, B. Raison, K. Khon, V. Vai, and L. Bun, "Microgrids planning for rural electrification," 2021 IEEE Madrid PowerTech, *PowerTech 2021 - Conference Proceedings*, Jun. 2021, doi: 10.1109/POWERTECH46648.2021.9494966.
- [33] G. Ali, H. H. Aly, and T. Little, "Using HOMER software to investigate, size and apply renewable energy sources in a convention center in Sabratha, Libya," 3rd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, *ICECCE 2021*, Jun. 2021, doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514156.
- [34] R. L. Dash, L. Behera, B. Mohanty, and P. Kumar Hota, "Cost and sensitivity analysis of a microgrid using HOMER-Pro software in both grid connected and standalone mode," 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics and Communication Engineering, *ICRIEECE 2018*, pp. 3444–3449, 2018, doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009218.
- [35] M. A. Hossain, R. K. Chakraborty, M. J. Ryan, and H. R. Pota, "Energy management of community energy storage in grid-connected microgrid under uncertain real-time prices," *Sustain Cities Soc*, vol. 66, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102658.
- [36] S. Mehta and P. Basak, "A case study on PV assisted microgrid using HOMER pro for variation of solar irradiance affecting cost of energy," *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India International Conference*, Feb. 2020, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112894.
- [37] M. Boussetta, R. Elbachtiri, M. Khanfara, and K. Elhammoumi, "Performance analysis and power evaluation of Hybrid off-grid System," *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, pp. 1130–1134, Jul. 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983942.
- [38] L. H. S. Santos, J. A. A. Silva, J. C. Lopez, N. B. Arias, M. J. Rider, and L. C. P. da Silva, "Integrated optimal sizing and dispatch strategy for microgrids using HOMER Pro," 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, *ISGT Latin America 2021*, Sep. 2021, doi: 10.1109/ISGTLATINAMERICA52371.2021.9543015.
- [39] A. O. Rousis, D. Tzelepis, I. Konstantelos, C. Booth, and G. Strbac, "Design of a hybrid ac/dc microgrid using homer pro: Case study on an islanded residential application," *Inventions*, vol. 3, no. 3, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/inventions3030055.
- [40] R. L. Dash, L. Behera, B. Mohanty, and P. Kumar Hota, "Cost and sensitivity analysis of a microgrid using HOMER-Pro software in both grid connected and standalone mode," 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics and Communication Engineering, *ICRIEECE 2018*, pp. 3444–3449, 2018, doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009218.
- [41] L. Kruitwagen, K. T. Story, J. Friedrich, L. Byers, S. Skillman, and C. Hepburn, "A global inventory of photovoltaic solar energy generating units," *Nature* 2021 598:7882, vol. 598, no. 7882, pp. 604–610, Oct. 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03957-7.