

Estudio de Viabilidad Técnico-financiera de una Nanorred Móvil para Uso en Campus
Universitario

Francisco Javier Castro Bitar

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería – Área Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Primeramente, a **Dios** por la vida, por su bendición y sabiduría en todo mi camino.

A mi madre **Nancy Bitar** por su amor incondicional, su guía, por llorar en mi sufrimiento y por ser feliz en mi triunfo, por moldear mi corazón, por proporcionarme cada cosa que he necesitado, tus esfuerzos y cuidados son invaluable para mí, te doy las gracias, madre hermosa.

A mi padre por su amor, apoyo y educación, por forjar en mi un espíritu de voluntad, de liderazgo y servicio. A mi abuelo Francisco Castro ya que no pude conocerlo.

A Néstor por su motivación para alcanzar mis anhelos y enseñarme que todo se puede lograr con disciplina, a mi hermano Steven por quererme sin igual y estar para mí siempre, verte crecer me hace infinitamente feliz.

A toda mi familia, a mis tíos Arelis, Claudia, Roberto; mis abuelas, Benita, Ileana, cada acción que hicieron por mi refleja su amor, siempre conté con su apoyo.

A mi otra familia Briceida, Marcela y Brayan, porque siempre nos une lazos fuertes de corazón y lo vivido siempre será un tesoro.

A mis amigos Mellys, Samir, David, Diego, Jara, Eslendy, Astrid, Cristian, Tania, Oscar, Raúl, Wilson, por su paciencia y su consejo, por todos los momentos maravillosos que compartimos, ustedes son partícipes de mis logros, mis mejores deseos para todos y que el tiempo siempre encuentre la manera de reunirnos.

Francisco Javier Castro Bitar

Agradecimientos

Mis agradecimientos inicialmente son para mi director German Alfonso Osma Pinto, por creer en mí, por darme la oportunidad de trabajar y aprender de su capacidad, por su confianza y afecto, por brindarme su orientación para culminar con gran éxito el desarrollo de este trabajo de grado, Dios lo bendiga grandemente.

Al ingeniero Iván Edgardo Jiménez Vargas por su paciencia, su mentoría, por compartir su tiempo y transmitirme su conocimiento.

A mi amigo David Ortega por su ayuda y compromiso.

A mis padrinos por orientarme a ver en esta carrera mi futuro profesional.

A mi Universidad Industrial de Santander por permitirme desarrollar profesionalmente, por ser mi casa de estudio durante este tiempo. A mi Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T por ser el espacio más importante de mi formación, y enseñarme este apasionado camino.

Francisco Javier Castro Bitar (FJ²)

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Especificos.....	13
2 Características técnicas de la nanorred	14
2.1 Descripción del escenario	15
2.2 Estudio de iluminación	17
2.3 Cuadro de cargas.....	17
2.4 Componentes de la nanorred.....	19
3 Dimensionamiento en HOMER Pro de la nanorred	20
3.1 Configuración inicial	21
3.2 Recursos energéticos en la zona	21
3.3 Perfil de carga	22
3.4 Configuración de los componentes	23
3.5 Resultados técnicos	24
3.6 Resultados financieros	27
4 Evaluación de viabilidad técnico-financiera de la nanorred	29
4.1 Indicadores financieros	29
4.2 Indicadores ambientales.....	29

4.3	Indicadores técnicos.....	30
4.4	Criterios de viabilidad.....	30
5	Memorias técnicas y financieras de la nanorred.....	32
5.1	Análisis y definición de la viabilidad de la nanorred.....	32
5.2	Resultados finales	33
6	Conclusiones	35
	Referencias Bibliográficas	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de una nanorred.....	14
Figura 2. Container seleccionado.....	16
Figura 3. Vista de planta interior del container.....	16
Figura 4. Luminaria externa en fachada.	17
Figura 5. Luminarias internas.	17
Figura 6. Configuración de la nanorred requerida.	20
Figura 7. Configuración inicial de la nanorred.	21
Figura 8. Irradiación solar en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander. ..	22
Figura 9. Curva de demanda diaria de la nanorred.	22
Figura 10. Perfil de carga en HOMER Pro.....	23
Figura 11. Parametros de ingreso del sistema PV.....	24
Figura 12. Generación PV anual.....	25
Figura 13. Producción de energía del generador diesel.	26
Figura 14. Información técnica del banco de baterías.	26
Figura 15. Flujo de potencia en el convertidor.	27
Figura 16. Flujo de caja de la nanorred durante su vida útil.....	28
Figura 17. Distribución de los paneles fotovoltaicos de la nanorred móvil.....	33
Figura 18. Distribución eléctrica de la nanorred.....	34
Figura 19. Comportamiento del sistema en un día.	34
Figura 20. Pantalla con parámetros eléctricos de la carga.....	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Elementos a ubicar en el container.	15
Tabla 2. Cuadro de carga de la nanorred.	18
Tabla 3. Corrientes, conductores y protecciones.	18
Tabla 4. Parametros de ingreso de los componentes de la nanorred.	24
Tabla 5. Producción y consumo anual de energía en la nanorred.....	25
Tabla 6. Resumen de costos de la nanorred.....	27
Tabla 7. Parametros financieros de la nanorred.....	28
Tabla 8. Parametro de Emisiones de CO ₂ anuales.....	30
Tabla 9. Criterios de viabilidad de la nanorred.....	31

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Catalago E-Containers

Apéndice B. Distribución arquitectónica de la nanorred móvil

Apéndice C. Informe de DIALux

Apéndice D. Cuadro de cargas

Apéndice E. Reporte simulación HOMER

Apéndice F. Distribución eléctrica de la nanorred

Resumen

Título: Estudio de Viabilidad Técnico-financiera de una Nanorred Móvil para Uso en Campus Universitario*

Autor: Francisco Javier Castro Bitar**

Palabras Clave: Fuentes de energía renovables, HOMER, Nanorred.

Descripción: Este trabajo de grado pretende dimensionar una nanorred móvil (tipo container) para uso en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la ciudad de Bucaramanga, además, analizar técnico-financieramente la viabilidad de su implementación, todo esto mediante el uso de la herramienta computacional que ofrece la compañía HOMER Energy.

Se recolectará información técnica identificando los recursos energéticos disponibles en la zona, estimando el perfil de la carga a atender, los elementos que conforman la nanorred, considerando generación fotovoltaica, el uso de un banco de baterías y de un grupo electrógeno, entre otros. Luego, se realizará el dimensionamiento de la nanorred utilizando el software HOMER Pro.

Se analizará y definirá la viabilidad de la nanorred diseñada con los resultados entregados por la herramienta computacional teniendo en cuenta los criterios propuestos en el trabajo de grado previo de la E3T titulado “Análisis de la viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER”, dirigido por el MSc. German Alfonso Osma Pinto; asociándolos a su potencial implementación como nanorred móvil (tipo container) para uso en el campus universitario, considerando las soluciones de nanorredes móviles diseñadas por la empresa estadounidense Sesame Solar, con el propósito de promover el uso de fuentes no convencionales de energía renovable en el país.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: MSc. German Alfonso Osma Pinto.

Abstract

Title: Technical-financial Feasibility Study of a Mobile Nanogrid for Use in University Campus*

Author: Francisco Javier Castro Bitar**

Key Words: Renewable energy sources, HOMER, Nanogrid.

Description: This degree work aims to size a mobile nanogrid (container type) for use in the main campus of the Industrial University of Santander, located in the city of Bucaramanga, in addition, to analyze technically-financially the viability of its implementation, all this through the use of the computational tool offered by HOMER Energy.

Technical information will be collected identifying the energy resources available in the area, estimating the profile of the load to be served, the elements that make up the nanogrid, considering photovoltaic generation, the use of a battery bank and a generator set, among others. Then, the sizing of the nanogrid will be done using the HOMER Pro software.

The viability of the nanogrid designed with the results delivered by the computational tool will be analyzed and defined, taking into account the criteria proposed in the previous degree work of the E3T entitled "Technical-economic viability analysis of the implementation of microgrids, using the HOMER computer tool", directed by the MSc. German Alfonso Osma Pinto; associating them with their potential implementation as a mobile nanogrid (container type) for use on the university campus, considering the mobile nanogrid solutions designed by the US company Sesame Solar, with the purpose of promoting the use of non-conventional sources of renewable energy in the country.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: MSc. German Alfonso Osma Pinto.

Introducción

Los objetivos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo reconocen que se debe equilibrar la sostenibilidad medio ambiental, económica y social (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015). Dado los dramáticos efectos del cambio climático es urgente tomar medidas con el fin de abordar las necesidades de los países en desarrollo sobre adaptación e inversión del crecimiento bajo en carbono ya que el sector energético creará más puestos de trabajo enfocados a energías sostenibles (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015). Es pertinente invertir en fuentes de energía limpia como la eólica, solar y termal, mejorar la productividad energética, expandir la infraestructura y la tecnología para estimular el crecimiento y ayudar al medio ambiente (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015). En Colombia se crea la Ley 1715 de 2014 con el objeto de promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente de carácter renovable, en el sistema energético nacional (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2019).

Las microrredes como sistemas de interconexión de cargas eléctricas con fuentes de generación distribuida que incorporan fuentes no convencionales de energía renovable pueden estar presentes en el Sistema Interconectado Nacional, grupo de casas, empresas o edificios, significando grandes beneficios como la generación de energía limpia, ahorro en la factura (autoconsumo), disminución de consumo de energía eléctrica y un impacto ambiental positivo al reducir emisiones de CO₂ (Celsia S.A. E.S.P., 2018).

Una nanorred es un dominio único de potencia: voltaje, capacidad, confiabilidad, administración y precio. Las nanorredes incluyen almacenamiento interno; la generación local

opera como un tipo especial de nanorred. La microrred puede ser tan simple como una red de nanorredes, sin ninguna entidad central (Greentechmedia, 2014).

Con el propósito de acelerar la adopción de fuentes de energía renovables y distribuidas, HOMER Energy ha trabajado en la optimización económica y de ingeniería de las microrredes con sus softwares de diseño como estándar mundial en la toma de decisiones para el ámbito de las microrredes, HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) optimiza el diseño de microrredes identificando tecnologías y considerando varias opciones para minimizar el riesgo del proyecto y los costos de energía (HOMER Energy, 2019).

Dada la problemática global presentada, entendiendo las microrredes-nanorredes como una posible solución e identificando la herramienta computacional de HOMER Energy como una de las mejores para su diseño y optimización, se pretende dimensionar una nanorred móvil (tipo container) para uso en el campus universitario de la Universidad Industrial de Santander y analizar su viabilidad técnico-financiera a partir del uso de la herramienta computacional HOMER Pro.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis de viabilidad técnico-financiero de una nanorred móvil para uso en campus universitario a partir del uso de la herramienta computacional de HOMER Pro.

1.2 Objetivos Específicos

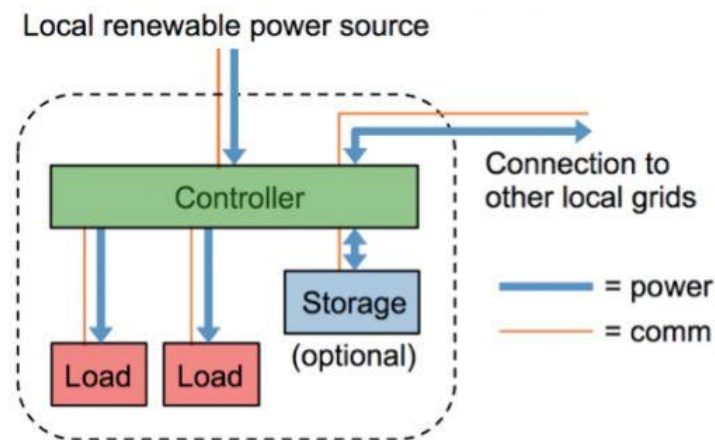
- Identificar características técnicas de la nanorred requerida, considerando las nanorredes móviles diseñadas por la empresa estadounidense Sesame Solar.
- Dimensionar la nanorred a partir del uso del software HOMER Pro.
- Evaluar criterios de viabilidad técnico-financiera de la nanorred según la metodología de indicadores propuesta en un trabajo de grado previo.
- Elaborar la memoria técnica y financiera del dimensionamiento de la nanorred con los resultados obtenidos de las simulaciones.

2 Características técnicas de la nanorred

Las nanorredes representan pequeñas microrredes, que normalmente sirven a un solo edificio o una sola carga (Stanev, Vacheva, & Hinov, 2016), con un dominio único de energía a un voltaje y capacidad determinada, estas incluyen generación local y almacenamiento interno como lo muestra la figura 1.

Figura 1.

Esquema de una nanorred.



Fuente: (Greentechmedia, 2014)

Algunas de las principales ventajas de las nanorredes son:

- Mayor calidad y confiabilidad de la energía.
- Reducción de las pérdidas de transmisión y distribución al tener generación y almacenamiento de energía en el sitio.
- Adopción acelerada de fuentes de energía distribuidas y renovables (Stanev, Vacheva, & Hinov, 2016).

2.1 Descripción del escenario

Una aplicación de las nanorredes son los container móviles fabricados por la empresa estadounidense Sesame Solar diseñados para suministrar energía sin conexión a la red, utilizadas para oficinas móviles, respuesta a emergencias, educación, agricultura, en la industria y la milicia; se requiere poca capacitación para su operación y poco mantenimiento (Sesame Solar, 2019).

Considerando lo anterior, se pretende dimensionar una nanorred móvil tipo container para uso en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia; con un propósito académico, promoción de las fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER), brindar un espacio para sala de estudio y un puesto de carga para vehículos eléctricos de dos ruedas. Los componentes que se ubicarán en el container móvil se pueden apreciar en la tabla 1.

Tabla 1.

Elementos a ubicar en el container.

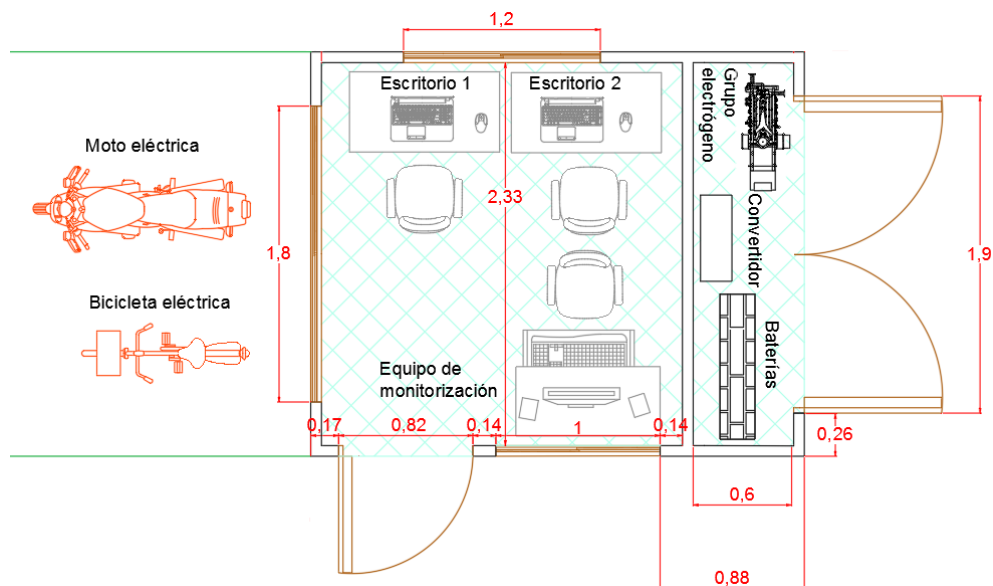
Elemento	Cantidad
Escritorio de estudio	2
Equipo de monitorización	1
Luminarias	7
Tomacorrientes	6
Puesto de carga bicicleta eléctrica	2
Puesto de carga motociceta eléctrica	1
Container	1

Se considerará el container oficina sencilla 10 FT (ver catalogo en apéndice A) fabricado por la empresa nacional E-Containers el cual se muestra en la figura 2.

Figura 2.*Container seleccionado.*

Fuente: (E-containers, 2019)

Se diseñó la nanored requerida con la información mencionada anteriormente como se muestra en la figura 3 (plano en detalle en el apéndice B).

Figura 3.*Vista de planta interior del container.*

2.2 Estudio de iluminación

Con el fin de conocer la cantidad de luminarias requeridas se realizó un estudio de iluminación en DIALux (informe en el apéndice C), se halló la necesidad de instalar 3 luminarias internas resultado del estudio y 4 luminarias externas por criterio propio apoyado con el software.

Figura 4.

Luminaria externa en fachada.



Figura 5.

Luminarias internas.



2.3 Cuadro de cargas

El cuadro de cargas (apéndice D) ofrece una visión clara, amplia y rápida del circuito de la instalación eléctrica que se diseña, en la tabla 2 se muestra la distribución de circuitos de la

nanorred definiendo los elementos, potencias y cantidades ; además, de las corrientes por circuitos, el sobredimensionamiento según el criterio de la NTC 2050, conductores y protecciones (tabla 3).

Tabla 2.

Cuadro de carga de la nanorred.

Cto No.	Luminarias			Tomacorrientes								
	Luminaria		Uso	Monitorización		Bicicleta	Moto					
	Interna	Externa	General			Eléctrica	Eléctrica					
	16		38	180		180	250	400				
1	3	48	4	152	0	0	0	0				
2		0		0	4	720	0	0				
3		0		0	2	360	0	0				
4		0		0		0	2	500	0			
5		0		0		0	0	1	400			
6												
7												
8												
Total	3	48	4	152	4	720	2	360	2	500	1	400

Tabla 3.

Corrientes, conductores y protecciones.

Cto No.	Total (kW)	Corriente (A)	I para el Cálculo del Conductor NTC 2050	Cálculo del Conductor	Protección	Observaciones
1	0,20	1,67	2,08	12	1X15A,10 kA	Iluminación
2	0,72	6,00	7,50	12	1X15A,10 kA	Tomacorriente
3	0,36	3,00	3,75	12	1X15A,10 kA	Tomacorriente
4	0,50	4,17	5,21	12	1X15A,10 kA	Tomacorriente
5	0,40	3,33	4,17	12	1X15A,10 kA	Tomacorriente
6						Reserva
7						Reserva
8						Reserva
Total	2,18	18,17	22,71	12	1X30A,10 kA	General

2.4 Componentes de la nanorred

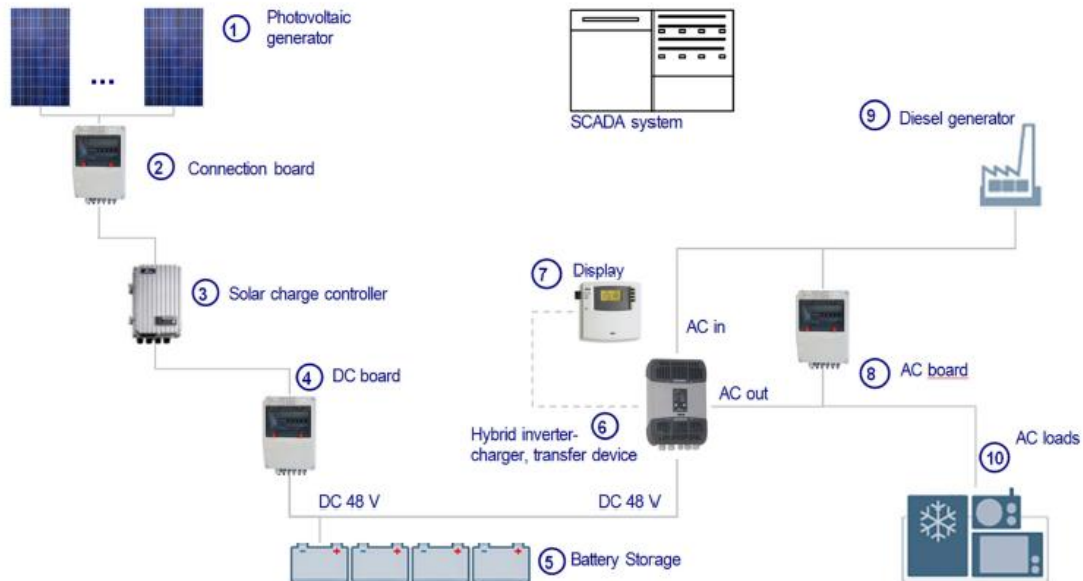
Los elementos que conforman la nanorred son los siguientes:

- **Sistema fotovoltaico:** Representan la parte más prometedora de la generación distribuida de una nanorred debido a su amplia aplicabilidad, costo de inversión admisible, producción de energía predictiva y segura (Stanev, Vacheva, & Hinov, 2016).
- **Grupo electrógeno:** La utilización de los grupos electrógenos proporciona una fuente energética de respaldo que entra en funcionamiento cuando sea necesario, disminuyendo drásticamente el almacenamiento en baterías (Moreno Romero, 2020).
- **Banco de baterías:** Es el conjunto de baterías conectadas para logran un nivel de tensión y una capacidad de almacenamiento de energía requerida.
- **Convertor:** Es un inversor híbrido, cargador y dispositivo de conmutación de transferencia que funciona como administrador de energía programable con interfaz de comunicación y capacidad para integrar flujos de información a un sistema de control SCADA (Stanev, Vacheva, & Hinov, 2016).
- **Cargas AC:** La potencia eléctrica requerida para el funcionamiento de uno o varios equipos eléctricos.

En la figura 6 se muestra una de las configuraciones de nanorredes más utilizadas, esta se adaptó según los requerimientos de la nanorred en estudio. Adicionalmente a los elementos descritos anteriormente debe existir un sistema de control para gestionar el suministro de energía a la carga y monitorizar los parámetros eléctricos de la nanorred, pero esto no hace parte del alcance de este trabajado de investigación.

Figura 6.

Configuración de la nanorred requerida.



Nota: Esquema adaptado de (Stanev, Vacheva, & Hinov, 2016)

3 Dimensionamiento en HOMER Pro de la nanorred

Se entiende por dimensionar determinar el tamaño de algo, para el caso de esta nanorred se traduce en determinar la potencia y cantidad de cada uno de los elementos que la conforman con el propósito de suplir la demanda eléctrica. Enseguida, se presentan los pasos del dimensionamiento utilizando HOMER Pro.

3.1 Configuración inicial

Inicialmente se ingresa al software información básica del proyecto como nombre, autor, ubicación, vida útil y descripción; así mismo se definen los parámetros financieros como la tasa de inflación y la tasa de descuento (ver figura 7).

Figura 7.

Configuración inicial de la nanorred.

Name: Nanorred Móvil E3T UJS

Author: Francisco Javier Castro Bitar (2144695)

Description: Nanorred móvil (tipo container) para uso en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Santander, Colombia.

Discount rate (%): 8,00

Inflation rate (%): 2,00

Annual capacity shortage (%): 0,00

Project lifetime (years): 25,00

Cl. 9 #26a14, Bucaramanga, Santander, Colombia (7°8,3'N, 73°7,3'W)

Location Search

(UTC-05:00) Bogotá, Lima, Quito, ▾

Consulting Services
Let HOMER Energy perform your analyses for you.

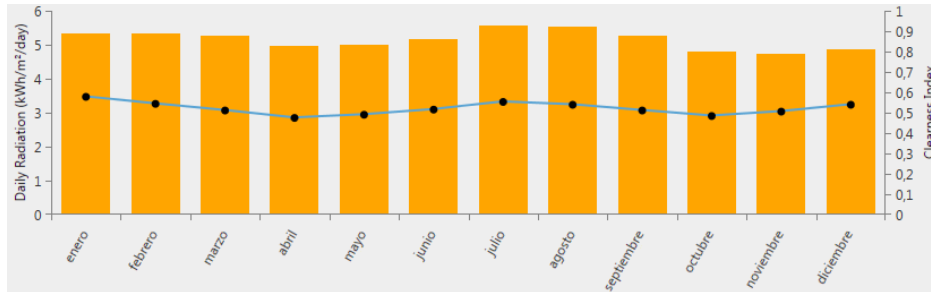
3.2 Recursos energéticos en la zona

Al ingresar la ubicación exacta de la nanorred, el software permite descargar los datos de irradiación solar diaria promedio por mes de la base de datos de la NASA o en su defecto importarlos manualmente, esto mismo ocurre para la temperatura, velocidad del viento, entre otros.

Las figuras 8 muestra la irradiación solar en Bucaramanga.

Figura 8.

Irradiación solar en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander.

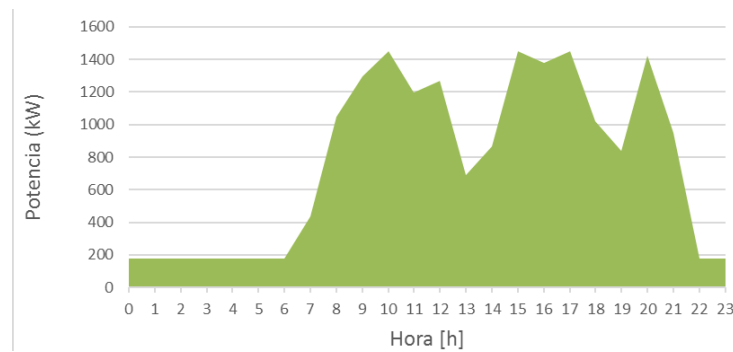


3.3 Perfil de carga

Una vez realizado el cuadro de carga se estimó una curva de demanda (ver apéndice D) pronosticando los posibles consumos horarios como lo muestra la figura 9.

Figura 9.

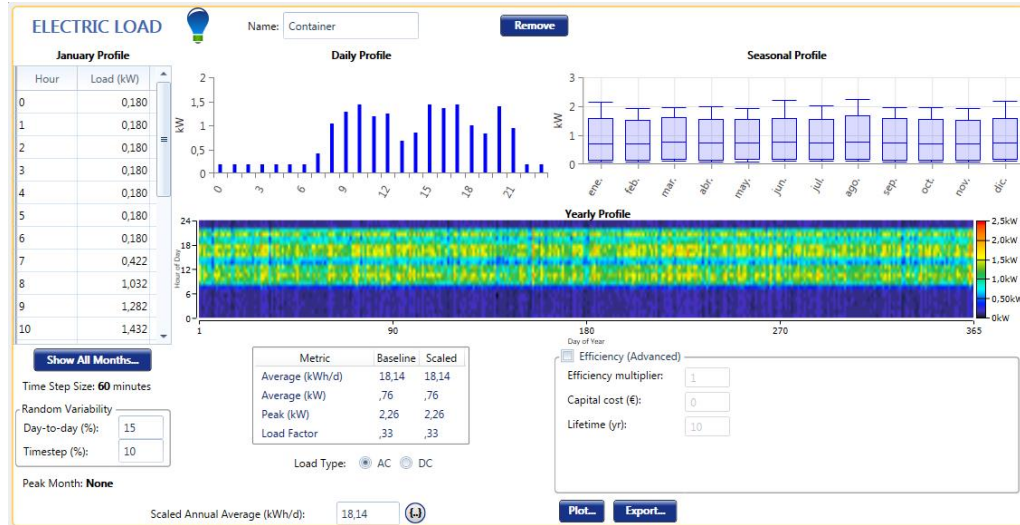
Curva de demanda diaria de la narorred.



En HOMER Pro existen perfiles predeterminados según el tipo de usuario pero ninguno se ajusta a la carga modelada, por ende, se ingresaron los datos manualmente como lo muestra la figura 10.

Figura 10.

Perfil de carga en HOMER Pro.



3.4 Configuración de los componentes

Para modelar los componentes de la nanorred en HOMER Pro se ingresan parámetros técnicos y financieros como el capital, reemplazo, operación y mantenimiento asociados a la cantidad de elementos o su capacidad de potencia. Cabe resaltar que el proceso de dimensionamiento requiere múltiples simulaciones partiendo de un escenario genérico de los elementos, utilizando el HOMER Optimizer se conocen las capacidades instaladas y cantidades que satisfacen la demanda. Con el objetivo de cumplir los requerimientos de la nanorred se simula hasta encontrar la configuración más óptima a causa de las restricciones del espacio y los criterios de viabilidad bajo los que se desea evaluar.

Los parámetros mostrados a continuación corresponden a la configuración más óptima. En la figura 11 se muestra el sistema fotovoltaico, adicionalmente se presenta los parámetros de ingreso de todos los componentes de la nanorred en la tabla 4.

Figura 11.

Parametros de ingreso del sistema PV.

The screenshot displays the configuration window for a PV system in HOMER Pro. The 'Name' is 'Generic flat plate PV' and the 'Abbreviation' is 'PV'. The 'Properties' section on the left lists: Name: Generic flat plate PV, Abbreviation: PV, Panel Type: Flat plate, Rated Capacity (kW): 3.87, Manufacturer: Generic, and a note: 'This is a generic PV system.' The main configuration area includes: Capacity (kW): 0,430; Capital (\$): 619,000.00; Replacement (\$): 619,000.00; O&M (\$/year): 100,000.00; Lifetime (time in years): 25,00; and Derating Factor (%): 80,00. On the right, 'Capacity Optimization' is set to 'Search Space' with a list of values including 3,87 kW. The 'Electrical Bus' is set to 'DC'.

Tabla 4.

Parametros de ingreso de los componentes de la nanorred.

Elemento	Parametro Financiero				Parametro Técnico		
	Capacidad	Capital \$	Reemplazo \$	O&M \$			
Sistema Fotovoltaico	0,430 kW	619.000	619.000	100.000	Vida Util (Años)		
					25		
Generador Diésel	1 kW	1.309.833	1.309.833	105	Combustible \$		
					2.500,00		
Convertidor	1 kW	4.216.000	4.216.000	0,0	Vida Util	Capacidad Relativa	Eficiencia
					15 años	100 %	95 %
Batería	1 kWh	712.810	712.810	100.000	10 años	SOC Inicial	SOC Mínimo
						100 %	40 %

3.5 Resultados técnicos

Después de realizada la simulación, HOMER Pro muestra resultados de la participación de cada fuente de generación para abastecer la carga (ver tabla 5). La capacidad de potencia nominal y los resultados de comportamiento en un período de un año del sistema fotovoltaico, generador

diesel, banco de baterías y convertidor de energía se muestran en las figuras 12, 13, 14 y 15, respectivamente.

Tabla 5.

Producción y consumo anual de energía en la nanorred.

Producción y Consumo		kWh/año	%
Producción	PV	5.863	65,8
	Generador Diesel	3.053	34,2
	Total	8.916	100
Consumo	Carga Primaria AC	6.620	100
	Carga Primaria DC	0	0
	Total	6.620	100

Figura 12.

Generación PV anual.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	3,87	kW
Mean Output	0,669	kW
Mean Output	16,1	kWh/d
Capacity Factor	17,3	%
Total Production	5.863	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	3,73	kW
PV Penetration	88,6	%
Hours of Operation	4.343	hrs/yr
Levelized Cost	227	\$/kWh

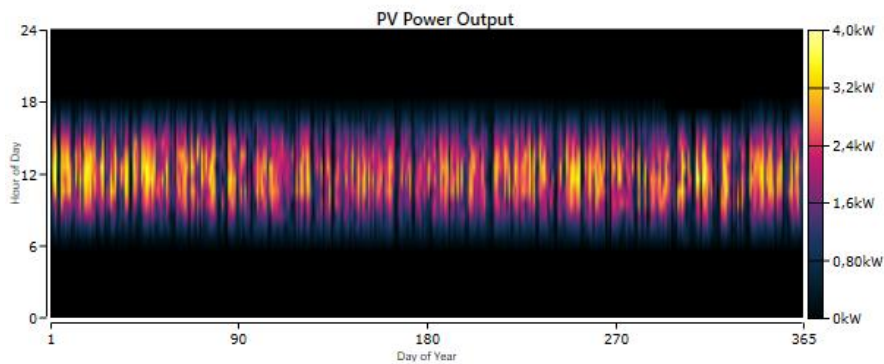


Figura 13.

Producción de energía del generador diesel.

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	2.218	hrs/yr
Number of Starts	780	starts/yr
Operational Life	6,76	yr
Capacity Factor	13,9	%
Fixed Generation Cost	687	\$/hr
Marginal Generation Cost	682	\$/kWh

Quantity	Value	Units
Electrical Production	3.053	kWh/yr
Mean Electrical Output	1,38	kW
Minimum Electrical Output	0,625	kW
Maximum Electrical Output	2,50	kW

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	1.016	L
Specific Fuel Consumption	0,333	L/kWh
Fuel Energy Input	10.002	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	30,5	%



Figura 14.

Información técnica del banco de baterías.

Quantity	Value	Units
Batteries	6,00	qty.
String Size	2,00	batteries
Strings in Parallel	3,00	strings
Bus Voltage	24,0	V

Quantity	Value	Units
Autonomy	4,77	hr
Storage Wear Cost	996	\$/kWh
Nominal Capacity	6,00	kWh
Usable Nominal Capacity	3,60	kWh
Lifetime Throughput	4.800	kWh
Expected Life	3,84	yr

Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	431	\$/kWh
Energy In	1.398	kWh/yr
Energy Out	1.119	kWh/yr
Storage Depletion	0,508	kWh/yr
Losses	280	kWh/yr
Annual Throughput	1.251	kWh/yr

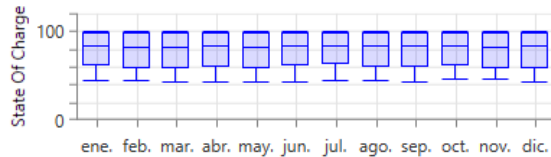
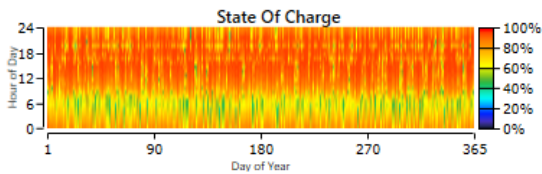
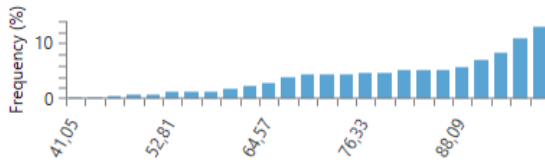
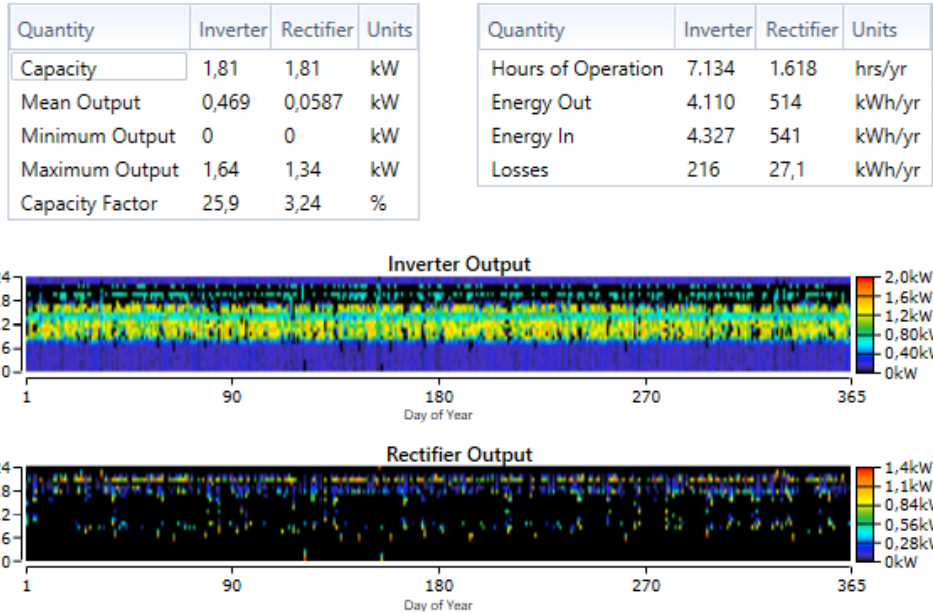


Figura 15.

Flujo de potencia en el convertidor.



3.6 Resultados financieros

HOMER Pro presenta un conjunto de datos detallando la información financiera de la nanorred con el propósito de evaluar la viabilidad de su implementación. En la tabla 6 se muestra un resumen por tipo de costo con flujos de efectivo como valor presente de cada componente.

Tabla 6.

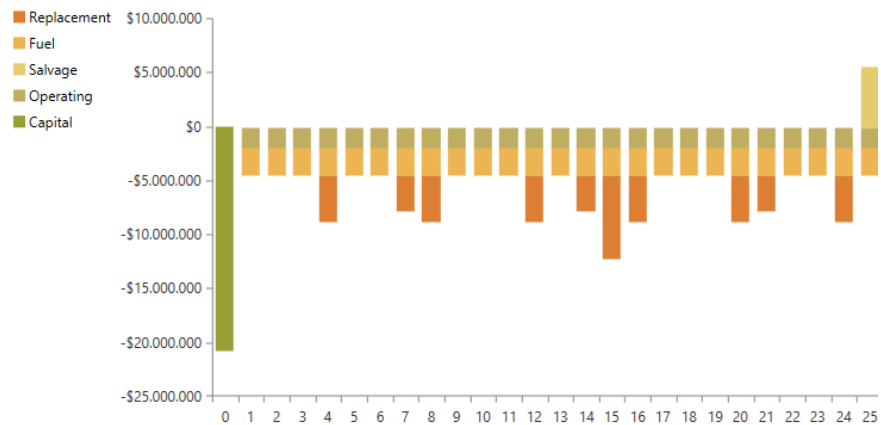
Resumen de costos de la nanorred.

Componente	Capital	Reemplazo	O&M	Combustible	Salvado	Total
Banco de baterías	4,27 M	12,76 M	7,75 M	0	-0,497 M	24,3 M
Sistema fotovoltaico	5,57 M	0	11,63 M	0	0	17,2 M
Generador diesel	3,27 M	4,76 M	7,52 M	32,85 M	-0,238	48,18 M
Convertidor	7,64 M	3,24 M	0	0	-0,610 M	10,27 M
Sistema	20,76 M	20,76 M	26,92 M	32,85 M	-1,35 M	99,95 M

El flujo de caja muestra de forma gráfica o tabular los costos anuales de la nanorred según su tipo durante toda su vida útil. En la figura 16 se observa una inversión inicial (capital) y al final un salvamento producto de la venta de los equipos que aún no han culminado su ciclo de vida.

Figura 16.

Flujo de caja de la nanorred durante su vida útil.



En la tabla 7 se muestran los indicadores financieros de la nanorred diseñada, estos se presentan gracias a una comparación económica entre el caso de estudio y un caso base: sistema alimentado únicamente por un generador diesel.

Tabla 7.

Parámetros financieros de la nanorred.

Parametro	Valor
Valor presente (\$)	51.936.880
Valor anual (\$/año)	4.017.545
Retorno de la inversión (%)	26,5
Tasa interna de retorno (%)	32,6
Recuperación simple (años)	2,81
Amortización con descuento (años)	3,29
Costo presente neto (\$)	99.952.890
Costo de la energía (\$)	1.167,88

El reporte final de la nanorred simulada generado por el software HOMER Pro se presenta en el apéndice E.

4 Evaluación de viabilidad técnico-financiera de la nanorred

Un criterios de viabilidad hace referencia a aquel que se vuelve indispensable para que un proyecto se pueda realizar considerando múltiples enfoques como la parte ambiental, social, técnica, financiera y regulatoria; unos criterios se enfocan en el valor de un objeto por sus cualidades y otros permiten ser evaluados numéricamente (Escudero Paredes, Muñoz Blanco, Sarmiento Barrera, & Valencia Correa, 2020).

Se estudiarán solo los parametros técnicos y financieros suministrados por la herramienta computacional HOMER, asociados a la evaluación de los criterios de viabilidad aplicables a la nanorred móvil aislada (NG-off grid).

4.1 Indicadores financieros

Tasa interna de retorno: 32,6%

Recuperación simple: 2,81 años

Costo nivelado de energía COE: 1.167,88

4.2 Indicadores ambientales

Ahorro de combustible fósil: Se refiere a la cantidad de combustible fósil que se puede ahorrar al usar en menos medida las fuentes de energía fósiles. El combustible consumido en el caso base es 2953 L; mientras que en el caso de estudio, 1016 L. El ahorro de combustible se halla así:

$$\frac{\text{Combustible_C_Base} - \text{Combustible_C_Estudio}}{\text{Combustible_C_Base}} = \frac{2953 - 1016}{2953} \times 100 = 65,59\%$$

Emisiones: Se obtienen directamente de los resultados de las simulaciones realizadas con el software HOMER, en unidades de kg/año (ver tabla 8). Para obtener el porcentaje de emisiones se realiza la siguiente fórmula.

$$\frac{\text{Dioxido_de_Carbono_Estudio}}{\text{Dioxido_de_Carbono_Base}} \times 100 = \frac{2661}{7737} \times 100 = 34,39\%$$

Tabla 8.

Parametro de Emisiones de CO₂ anuales.

Caso	Emisión
Base	7.7331 kg/año
Estudio	6.661 kg/año

4.3 Indicadores técnicos

Grado de autosuficiencia: Es la relación entre la capacidad de generación del sistema energético y la carga máxima de consumo. Por tanto, se debe satisfacer la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Capacidad de generación}}{\text{Consumo de la carga}} \geq 1 \rightarrow \frac{8916}{6620} \geq 1,35$$

Valor esperado de pérdida de carga días/año: No fue posible modelar el LOLE porque el parametro inicial de escasez de capacidad anual aplica cuando las microrredes son aisladas y sin generador diesel, por ende el valor es de 0 días/año.

4.4 Criterios de viabilidad

A continuación se establece los criterios de viabilidad técnica y financiera según el trabajo de grado previo “Análisis de la viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER”. Se adaptó la tabla 10 del trabajo mencionado para establecer los criterios de viabilidad para la nanorred aislada, los cuales se presentan en la tabla 9.

Tabla 9.*Criterios de viabilidad de la nanorred.*

Criterios de viabilidad Para NG off-grid			
Indicadores financieros	Criterios financieros	Valor	Concepto
<i>Tasa interna de retorno</i>	TIR > 11,8% Aceptable	32,6	Aceptable
	TIR = 11,8% Indiferente		
	TIR < 11,8% Rechazado		
<i>Recuperación simple (sobre vida útil de MG)</i>	PRI < 40% Aceptable	2,81/25=11,24%	Aceptable
	PRI = 40% Indiferente		
	PRI > 40% Rechazado		
<i>Costo nivelado de energía</i>	Menor costo posible de COE	1.167,88 (Estudio) <1.774,73 (Base)	Aceptable
Indicadores ambientales	Criterios ambientales	Valor	Concepto
<i>Fracción de energías renovables</i>	FER > 60% Aceptable	53,9 %	Rechazado
	FER < 60% Rechazado		
<i>Ahorro de combustible</i>	AH > 15% Aceptable	65,59%	Aceptable
	AH < 15% Rechazado		
<i>Emisiones</i>	E < 40% Aceptable	34,39%	Aceptable
	E > 40% Rechazado		
Indicadores técnicos	Criterios técnicos	Valor	Concepto
<i>Grado de autosuficiencia</i>	GA ≥ 1 Aceptable	1,35	Aceptable
	GA < 1 Rechazado		
<i>Valor esperado de pérdida de carga días/año</i>	LOLE ≤ 0,1 Aceptable	0 días / año	Aceptable
	LOLE > 0,1 Rechazado		
<i>Número de ciclos de descarga profunda al 90% de la batería</i>	# > 400 Aceptable	340	Rechazado
	# < 400 Rechazado		
<i>Autonomía de las baterías off-grid en horas</i>	A ≥ 4 Aceptable	4,77 h	Aceptable
	A < 4 Aceptable		

5 Memorias técnicas y financieras de la nanorred

5.1 Análisis y definición de la viabilidad de la nanorred

Los resultados financieros de HOMER Pro después de terminar la simulación, contienen principalmente resumen de costos, indicadores financieros y flujos de caja durante la vida útil del proyecto. Es importante recordar que todo esto se calcula respecto a un caso base para hacer una comparación entre la configuración diseñada y dicho escenario. En el apartado de resumen de costos los valores positivos representan un costo y los negativos, el dinero recuperado; caso contrario como se presentan en el flujo de caja pues los egresos tienen signo negativo y los ingresos, signo positivo. La comparación económica nos muestra los indicadores financieros que reflejan la salud financiera del proyecto. No obstante, el costo presente neto (NPC) representa todos los costos del sistema diseñado sumando los flujos de efectivo, descontando totales en cada año operación del proyecto. HOMER optimiza en función de este parametro financiero pues busca el menor costo, considerando la combinación de múltiples recursos energéticos. Con los parametros financieros al igual que con los parametros técnicos se forman criterios de viabilidad como los presentados en la tabla 9.

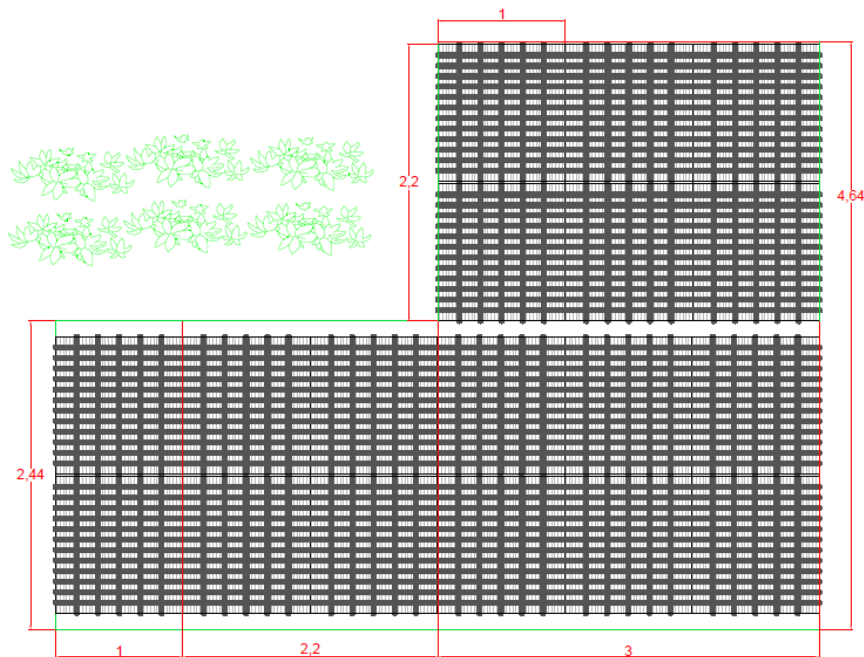
Se evidencia que de los 10 criterios establecidos para evaluar la viabilidad de nanorredes aisladas la diseñada en el presente trabajo de grado cumple con 8 de ellos, es decir un 80% de conformidad con los requerimientos financieros, técnicos y ambientales para su potencial implementación. Además, sin despreciar los indicadores que no cumplen pero están cerca a los umbrales definidos, por ejemplo, la fracción renovable que aunque debe ser mayor al 60%, el proyecto cuenta con un 53,9%, es decir, la penetración renovable sigue siendo significativa.

5.2 Resultados finales

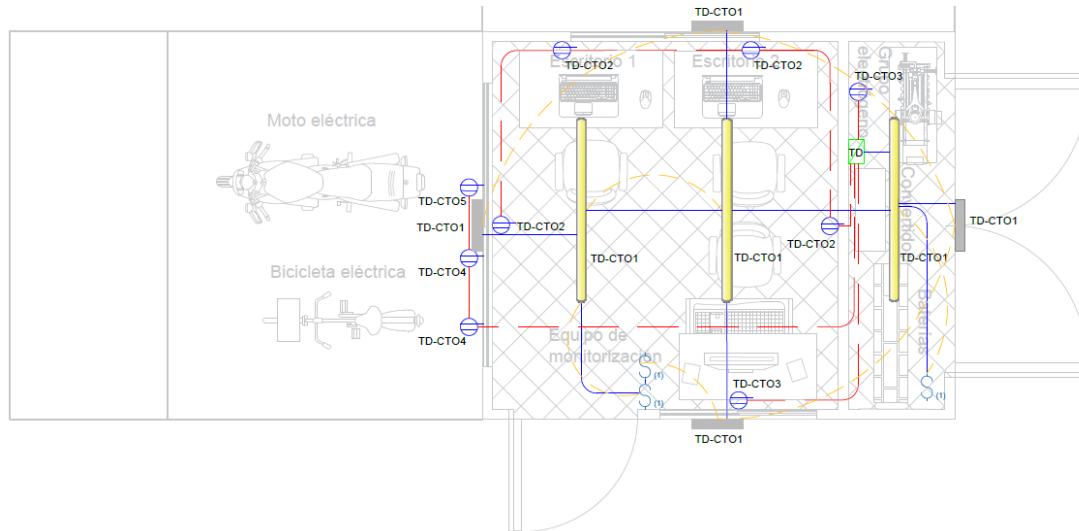
Como resultado del dimensionamiento y atendiendo a las restricciones de área del container, se determinó mediante el dimensionamiento en HOMER Pro un sistema fotovoltaico de 3,87 kW 9 Paneles FV de 430 W (ver figura 17), un grupo electrógeno de 2,5 kW, un banco de baterías de 6 kWh (3,6 kWh usable) y un convertidor de 1,81 kWh. La arquitectura del sistema se puede apreciar en el reporte final de la nanorred simulada presentado en el apéndice E.

Figura 17.

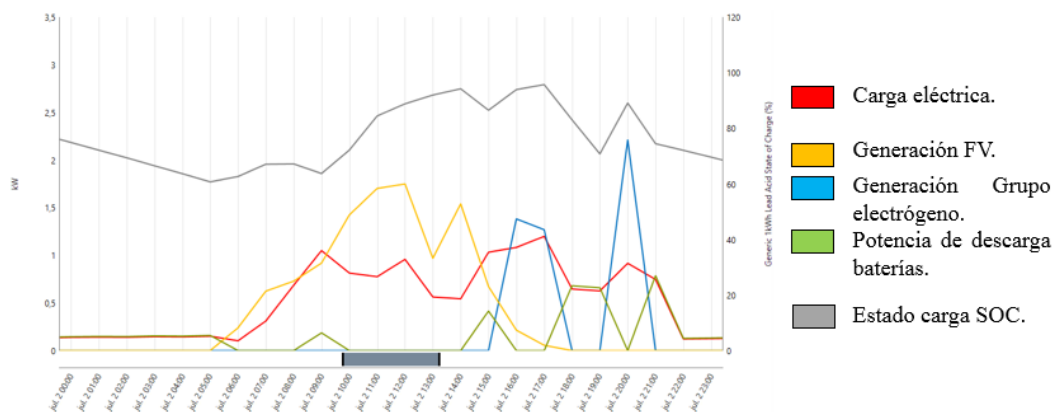
Distribución de los paneles fotovoltaicos de la nanorred móvil.



En la figura 18 se aprecia la distribución de los equipos eléctricos (ver apéndice F) como las luminarias internas y externas, tomacorrientes para alimentar vehículos eléctricos de dos ruedas y las cargas internas del salón de estudio.

Figura 18.*Distribución eléctrica de la nanorred.*

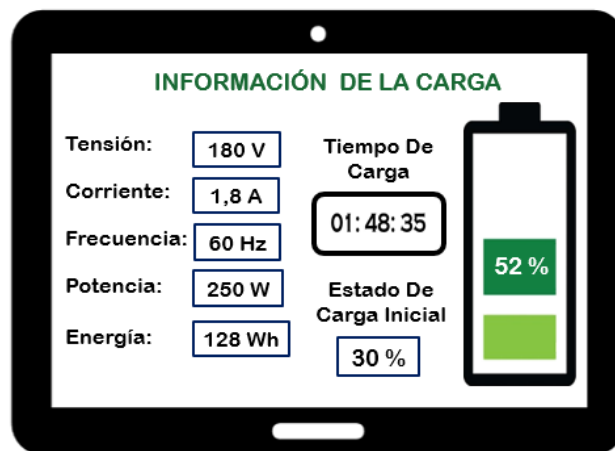
Mediante las gráficas que permite analizar el programa de HOMER Pro en los resultados de la nanorred seleccionada, se puede identificar la generación de cada componente del sistema, la carga eléctrica y el estado de carga durante un período de tiempo específico (ver figura 19).

Figura 19.*Comportamiento del sistema en un día.*

Se pretende que los usuarios tengan información del estado de carga del vehículo eléctrico (de dos ruedas) alimentado por la nanorred, mediante una pantalla como lo muestra la figura 20.

Figura 20.

Pantalla con parámetros eléctricos de la carga.



6 Conclusiones

En este trabajo de investigación se evidencian las etapas del dimensionamiento de una microrred desde la recolección de información para describir el escenario en el que se implementará, el propósito que cumplirá, su ubicación, potenciales recursos energéticos, sus componentes para determinar la carga eléctrica que se atenderá. La experiencia de dimensionar la nanorred en HOMER Pro enriquece las habilidades ingenieriles al simular los diferentes sistemas o recursos energéticos con el propósito de hallar una solución óptima, gracias a sus algoritmos predictivos de generación eléctrica.

Comprender los parámetros financieros y técnicos permite realizar un análisis del comportamiento del sistema bajo determinados escenarios y evaluar su viabilidad para garantizar una óptima operación del sistema en caso de ser implementado.

La nanorred diseñada fue evaluada bajo criterios de viabilidad (ver tabla 9), cumpliendo con el 80% de estos, lo que muestra que su implementación es factible.

Referencias Bibliográficas

- Celsia S.A. E.S.P. (23 de Abril de 2018). *Estas 8 empresas optaron por la energía solar fotovoltaica*. Recuperado el 14 de Octubre de 2020, de <https://blog.celsia.com/estas-7-organizaciones-optaron-por-la-energia-solar-fotovoltaica/>
- E-containers. (2019). *Oficina sencilla 10 ft*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de <https://storage.googleapis.com/cdn-econtainer-co/pdfs/fichas-tecnicas/oficinas-sencillas/oficinas-sencillas.pdf>
- Escudero Paredes, I., Muñoz Blanco, Y., Sarmiento Barrera, A., & Valencia Correa, F. (2020). *Análisis de la viabilidad técnico-económica de la implementación de microrredes, a partir del uso de la herramienta computacional HOMER*. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Greentechmedia. (11 de Agosto de 2014). *Nanogrids: The Ultimate Solution for Creating Energy-Aware Buildings?* Recuperado el 22 de Noviembre de 2020, de <https://www.greentechmedia.com/articles/read/nanogrids-the-ultimate-solution-for-creating-energy-aware-buildings>
- HOMER Energy. (2019). *About HOMER Energy LLC*. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de <https://www.homerenergy.com/company/index.html>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2019). *Energías Renovables No Convencionales*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>
- Moreno Romero, C. A. (2020). *Análisis multivariable de microrredes eléctricas en instalaciones reales mediante la herramienta Homer Pro*. España. Recuperado el 18 de Diciembre de 2020, de <http://hdl.handle.net/10017/41427>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Objetivo 13: Acción por el clima.*

Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de
<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Objetivo 7: Energía asequible y no*

contaminante. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de
<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible.*

Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de
<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Sesame Solar. (2019). *About Sesame Solar.* Recuperado el 25 de Noviembre de 2020, de

<https://www.sesame.solar/#About>

Stanev, R., Vacheva, G., & Hinov, N. (Septiembre de 2016). A power electronic smart load controller for nanogrids and autonomous power systems. *XXV International Scientific Conference Electronics (ET)*. doi:10.1109/ET.2016.7753485