

**ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
Y DE ALMACENAMIENTO CONECTADO A LA MICRORRED DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE**



**JOHANA ALEJANDRA ARTEAGA OCAÑA
2130114**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2020**

**ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO
Y DE ALMACENAMIENTO CONECTADO A LA MICRORRED DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE**



JOHANA ALEJANDRA ARTEAGA OCAÑA

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
YURI ULIANOV LÓPEZ CASTRILLÓN
PHD. En Energías Renovables Y Eficiencia Energética**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2020**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electricista

Jaime Quintero Restrepo

Jurado

Ricardo Moreno Chuquen

Jurado

Santiago de Cali, día 28 de mayo de 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, mi madre, mi padre y mi hermano, gracias a ellos por apoyarme en cada decisión y por cada palabra de aliento para culminar otra etapa más en mi vida.

Esta tesis ha requerido de mucho esfuerzo y mucha dedicación, pero lo anterior no hubiese sido posible sin mi director, Yuri Ulianov López Castrillón, Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética, y docente del Departamento de Energética y Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente, mil gracias por permitirme ser su pupila, por su apoyo, consejos, profesionalismo y valiosos aportes durante la ejecución de este proyecto de grado.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	20
3.1.1 Objetivo general.	20
3.1.2 Objetivos específicos.	20
4. MARCO REFERENCIAL	21
4.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN	21
4.2 MARCO TEÓRICO	23
4.2.1 Microrredes eléctricas	23
4.2.2 Fuentes convencionales y no convencionales de energía	24
4.2.2.1 Energía eólica	24
4.2.2.2 Energía hidráulica	25
4.2.2.3 Energía de la biomasa	25
4.2.2.4 Combustible fósil diésel	26
4.2.2.5 Energía solar	26
4.2.3 Sistemas de almacenamiento en una microrred	30
4.2.3.1 Batería de Ión – Litio	30
4.2.3.2 Batería de Plomo – Ácido	31

4.2.3.3 Bateria de Sulfuro de Sodio	31
4.2.3.4 Bateria de Redox de Vanadio	31
4.2.3.5 Bateria de Redox de Zinc – Bromo	32
4.2.3.6 Bateria de Niquel – Cadmio	32
4.2.4 Flujos de potencia	33
4.2.4.1 Técnica Gauss – Seidel	35
4.2.4.2 Técnica Newton – Raphson	35
5. IDENTIFICACIÓN DE LAS ZNI Y MICRORRED DE LABORATORIO	38
5.1 ESCENARIOS DE ESTUDIO DE ZONAS NO INTERCONECTADAS	38
5.1.1 Bahía Málaga, Buenaventura – Valle del Cauca	41
5.1.1.1 Caso de estudio No. 1: Comunidad La Plata	42
5.1.2 Jardines de Sucumbíos, Ipiales – Nariño	44
5.1.2.1 Caso de estudio No. 2: Comunidad Vereda Brisas del Rumiyaco	45
5.1.3 Puerto Toledo, Puerto Rico – Meta	47
5.1.3.1 Caso de estudio No. 3: Comunidad Puerto Toledo	47
5.1.4 Nazareth, Uribí – La Guajira	48
5.1.4.1 Caso de estudio No. 4: Comunidad Nazareth	48
5.1.5 Resumen consumos energéticos y recurso solar por comunidad.	50
5.2 MICRORRED DE LABORATORIO	51
6. SIMULACIONES Y RESULTADOS	54
6.1 SIMULACIÓN SFV Y BATERÍAS EN ZNI (HOMER)	54
6.1.1 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en La Plata	56
6.1.2 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Vereda Brisas de Rumiyaco	58

6.1.3 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Nazareth	61
6.1.4 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Puerto Toledo	63
6.1.5 Contextualización de sistemas solares fotovoltaicos en zonas no interconectadas.	66
6.2 SIMULACIÓN SFV Y BATERÍAS EN MICRORRED (POWERWORLD)	68
6.2.1 Desarrollo de flujos de potencia comunidad La Plata.	75
6.2.2 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Vereda Brisas de Rumiyaco.	76
6.2.3 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Nazareth.	77
6.2.4 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Puerto Toledo.	78
6.2.5 Síntesis de flujos de potencia en microrred eléctrica.	79
7. CONCLUSIONES	87
REFERENCIAS	89
ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema solar fotovoltaico autónomo.	27
Figura 2. Esquema eléctrico de un regulador de carga.	28
Figura 3. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red.	29
Figura 4. Esquema de la microrred para laboratorio.	53
Figura 5. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.	56
Figura 6. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo – La Plata.	57
Figura 7. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiyaco.	59
Figura 8. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo –Vereda Brisas de Rumiyaco.	59
Figura 9. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth	61
Figura 10. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo – Nazareth.	62
Figura 11. Perfil diario en consumo alto y bajo - Puerto Toledo.	64
Figura 12. Esquemas microrredes consumo alto y bajo – Puerto Toledo.	64
Figura 13. Microrred de laboratorio.	69
Figura 14. Microrred para consumo alto en La Plata.	75
Figura 15. Microrred para consumo alto en Vereda Brisas de Rumiyaco.	77
Figura 16. Diseño del sistema de potencia para consumo alto en Nazareth.	78
Figura 17. Sistema eléctrico de potencia para viviendas en Nazareth.	79

Figura 18. Microrred eléctrica de laboratorio conectada a la red.	80
Figura 19. Microrred eléctrica de laboratorio en modo aislado de la red principal.	81
Figura 20. Microrred eléctrica de laboratorio en modo aislado con sistema de almacenamiento.	81
Figura 21. Flujos de potencia en sistema solar autónomo.	82
Figura 22. Flujo de potencia activa y corriente en sistema solar fotovoltaico autónomo con carga.	83
Figura 23. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica total – La Plata.	108
Figura 24. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Vereda Brisas de Rumiyaco.	109
Figura 25. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Nazareth.	110
Figura 26. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Puerto Toledo.	110
Figura 27. Variación de la regulación respecto al área del conductor (#2 AWG).	111
Figura 28. Variación de la regulación respecto al área del conductor (#8 AWG).	112

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de las diversas baterías para almacenamiento de energía eléctrica.	33
Tabla 2. Métodos de simulación.	37
Tabla 3. Caracterización de las Zonas no Interconectadas (ZNI) en Colombia por departamento.	39
Tabla 4. Dimensionamiento de las comunidades étnicas en las Zonas no Interconectadas en Colombia.	40
Tabla 5. Aspectos importantes en las Zonas no Interconectadas.	41
Tabla 6. Caracterización poblacional Bahía Málaga.	42
Tabla 7. Cuadro de Cargas en consumo energético alto para una vivienda en la comunidad de La Plata.	43
Tabla 8. Cuadro de Cargas en consumo energético medio para una vivienda en la comunidad de La Plata.	44
Tabla 9. Cuadro de Cargas en consumo energético bajo para una vivienda en la comunidad de La Plata.	44
Tabla 10. Cuadro de cargas para el consumo energético alto en la comunidad – Vereda Brisas del Rumiyaco.	45
Tabla 11. Cuadro de Cargas del consumo energético medio en la comunidad – Vereda Brisas del Rumiyaco.	46
Tabla 12. Cuadro de cargas en consumo energético bajo para la comunidad – Vereda Brisas del Rumiyaco.	47
Tabla 13. Cuadro de cargas para consumo energético alto en la comunidad de Puerto Toledo.	48
Tabla 14. Cuadro de cargas en consumo energético bajo para zona de Puerto Toledo.	48
Tabla 15. Cuadro de cargas en el consumo energético alto para el corregimiento de Nazareth.	49

Tabla 16. Cuadro de cargas para el consumo energético medio en una vivienda del corregimiento de Nazareth.	50
Tabla 17. Cuadro de cargas en el consumo bajo para el corregimiento de Nazareth en una vivienda.	50
Tabla 18. Caracterización del consumo de energía y recurso energético solar (radiación solar) por vivienda al mes.	51
Tabla 19. Datos de generadores en la microrred de laboratorio.	52
Tabla 20. Caracterización del consumo de energía por vivienda en el día.	55
Tabla 21. Caracterización del consumo energético de comunidades.	55
Tabla 22. Costo total de los sistemas para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.	57
Tabla 23. Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.	58
Tabla 24. Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiyaco.	60
Tabla 25. Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiyaco.	60
Tabla 26. Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth.	62
Tabla 27. Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth.	63
Tabla 28. Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto y bajo – Puerto Toledo.	65
Tabla 29. Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto y bajo – Puerto Toledo.	65
Tabla 30. Consumos energéticos simulados en la herramienta computacional HOMER.	66
Tabla 31. Costos totales anualizados de sistemas fotovoltaicos autónomos.	67

Tabla 32. Clasificación de buses del sistema de potencia (microrred de laboratorio).	70
Tabla 33. Parámetros para las fuentes y carga.	70
Tabla 34. Datos de potencia, factor de potencia y corriente de carga.	72
Tabla 35. Impedancia eficaz de líneas de transmisión.	73
Tabla 36. Porcentaje de caída de tensión del circuito.	73
Tabla 37. Datos eléctricos del transformador eléctrico – 50 kVA.	74
Tabla 38. Cantidades base del sistema eléctrico de potencia.	74
Tabla 39. Cantidades en por unidad de las líneas de transmisión.	75
Tabla 40. Resultados del flujo de potencia para viviendas de La Plata en PowerWorld.	76
Tabla 41. Resultados de flujo de potencia para viviendas de Vereda Brisas de Rumiyaco en PowerWorld.	77
Tabla 42. Resultados de flujo de potencia para viviendas en Nazareth.	78
Tabla 43. Resultados de flujo de potencia para viviendas en Puerto Toledo.	79
Tabla 44. Matriz de admitancia del Sistema Eléctrico de Potencia.	84
Tabla 45. Perfil de carga en consumo energético alto – La Plata.	99
Tabla 46. Perfil de carga en consumo energético medio – La Plata.	99
Tabla 47. Perfil de carga en consumo energético bajo – La Plata.	100
Tabla 48. Perfil de carga en consumo energético alto – Vereda Brisas de Rumiyaco.	100
Tabla 49. Perfil de carga en consumo energético medio – Vereda Brisas de Rumiyaco.	101
Tabla 50. Perfil de carga en consumo energético bajo – Vereda Brisas de Rumiyaco.	101
Tabla 51. Perfil de carga en consumo energético alto – Nazareth.	102

Tabla 52. Perfil de carga en consumo energético medio – Nazareth.	102
Tabla 53. Perfil de carga en consumo energético bajo – Nazareth.	103
Tabla 54. Perfil de carga en consumo energético alto – Puerto Toledo.	103
Tabla 55. Perfil de carga en consumo energético bajo – Puerto Toledo.	104
Tabla 56. Área aproximada en mm² de calibres AWG #12 a #1.	111

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Pasos para seguir en la solución de flujos de potencia.	93
Anexo B. Técnica de solución de flujos de potencia mediante el método Newton – Raphson.	96
Anexo C. Cálculo para cuadros de carga en consumos energéticos por vivienda.	98
Anexo D. Perfiles de carga para consumos energéticos altos, medios y bajos.	99
Anexo E. Cálculo para la regulación de instalaciones eléctricas.	105
Anexo F. Cálculo del costo total anualizado.	106
Anexo G. Costo nivelado de energía.	108
Anexo H. Porcentaje de regulación para conductores calibre AWG #12 a #1.	111

RESUMEN

El análisis de flujos de potencia es un aspecto fundamental para determinar el comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia. En el presente proyecto de grado se realiza el estudio de flujos de carga de una microrred eléctrica de laboratorio utilizando fuentes convencionales y no convencionales de energía como la solar, eólica, hídrica, biomasa y diésel, así como un sistema de almacenamiento. Simultáneamente, la investigación se desarrolló teniendo en cuenta distintas demandas energéticas de cuatro localidades, tomando como fuente primordial de la microrred, el sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento.

El estudio inicio con el diseño de sistemas fotovoltaicos y de almacenamiento en cuatro comunidades pertenecientes a las Zonas No Interconectadas como: La Plata, Vereda Brisas de Rumiyaco, Nazareth y Puerto Toledo, para lo cual se elaboraron cuadros de carga con el fin de establecer la potencia que consume una familia en diferentes consumos domésticos de energía, es decir, altos, medios y bajos. Luego de caracterizar el consumo energético por vivienda en el día, se realizan nuevos perfiles diarios de carga estimando información acerca del tiempo de utilización y un factor de uso para cada carga. Posteriormente, se simulan en la herramienta computacional **HOMER Pro**, todos aquellos sistemas autónomos, considerando ciertos parámetros para el correcto dimensionamiento de estos. Finalmente, se analizan dos factores importantes como, el costo nivelado de energía y exceso de electricidad de cada uno los sistemas con el objetivo de seleccionar la alternativa optima a implementar en la microrred eléctrica.

En segunda instancia, para el diseño de la microrred eléctrica y posterior desarrollo de flujos de carga, se consideran elementos primordiales como; nodos de generación, líneas de transmisión y cargas. Además, se consideran sistemas de almacenamiento en conjunto con la fuente solar. Así mismo, se simularon los flujos de potencia del sistema autónomo conectado a la microrred en el software **PowerWorld** mediante el método matemático Newton – Raphson, considerando como carga la potencia pico por número de viviendas de cada una de las soluciones optimas escogidas según factores en la herramienta de optimización, obteniendo resultados acerca de la potencia activa, reactiva y aparente de cada nodo y líneas de transmisión, así como, matriz jacobiana y de admitancia. Finalmente, se logra establecer la máxima potencia que puede suplir un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento implementado en una microrred eléctrica en Zonas No Interconectadas.

Palabras clave: almacenamiento, autónomo, consumo, carga, energía solar, flujos de potencia, HOMER, microrred, potencia, PowerWorld, regulación.

INTRODUCCIÓN

En el sistema eléctrico convencional, la generación de energía se encuentra concentrada en grandes centrales eléctricas. Frente a este modelo tradicional, gobiernos y planeadores están desarrollando un modelo alternativo que utiliza tecnologías energéticas renovables, como un “sistema de generación eléctrica bidireccional”, en las llamadas microrredes eléctricas (Olivares et al., 2014, pp. 1905-1919). Este sistema, permite a la electricidad distribuirse desde los proveedores hasta el consumidor, haciendo que ambos modelos sean la base para los futuros sistemas eléctricos.

Actualmente, la generación de electricidad proviene de aproximadamente el 75% de recursos fósiles y sólo un 25% (aunque en crecimiento), de renovables. Esto impulsa también el uso de sistemas híbridos y microrredes (REN21, 2018). Al mismo tiempo, las microrredes eléctricas favorecen la integración de las fuentes de generación de tecnologías o fuente renovable, como la energía solar fotovoltaica, entre otras, teniendo como objetivo el ahorro en el recibo de energía eléctrica, al usar recursos propios como el sol o viento, disminuyendo el consumo actual de combustibles en la generación de electricidad, evitando la correspondiente emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera, reducción de pérdidas en las redes de transmisión y distribución, así como de la disminución de costos por reducción en el uso de fósiles y su mantenimiento e incremento de la fiabilidad, debido a la reducción de la demanda pico en la red de distribución. Por otra parte, una microrred se puede identificar como, “una alternativa que puede suministrar energía a más de 1.09 billones de personas, aproximadamente una quinta parte de la población mundial que viven en zonas alejadas de los sistemas eléctricos interconectados” (Shyu, 2014), es decir, zonas no interconectadas. Cabe resaltar que, el artículo 1°, Ley 855 de 2003 del Instituto de planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE), establece que, “para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por Zona no Interconectada a los municipios, corregimientos, localidades, y caseríos no interconectados al Sistema Interconectado Nacional” (Ministerio de minas y energía, 2014, p. 5).

En cuanto a la integración a red, de tecnologías renovables, la Universidad Autónoma de Occidente, cuenta con un sistema solar fotovoltaico conectado a red eléctrica de 450kWp, el cual se desarrolló bajo la coordinación del Grupo de Investigación en Energías, GIEN, con el apoyo de la Rectoría y la Dirección Administrativa y Financiera de la Universidad, en alianza con la Empresa de Energía del Pacífico, EPSA. Este sistema es el de mayor potencia que se encuentra establecido en una institución educativa en Colombia, pues produce el 20% de la energía necesaria para el funcionamiento del Campus universitario.

Simultáneamente, en la Universidad se está diseñando y se va a implementar una microrred eléctrica para laboratorio, así como también el diseño de microrredes eléctricas para zonas no interconectadas. No obstante, antes de realizar la conexión de un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento a una microrred, es necesario conocer el comportamiento de parámetros eléctricos mediante el análisis de flujo de potencia.

En la realización de este trabajo, se tomó como piloto la microrred eléctrica para laboratorio que se va a implementar en la Universidad Autónoma de Occidente, donde se realizará el análisis de los flujos de carga mediante herramientas computacionales de un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento que irán conectado a la microrred, sin embargo, el análisis a desarrollar puede ser aplicable a cualquier sistema de potencia que se encuentre ya existente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El avance en el estudio de las microrredes eléctricas a nivel mundial ha fomentado la planeación de dichos sistemas con visión a su futuro desarrollo. Una de las tecnologías o fuente renovable más importante y la cual cobra más relevancia a nivel mundial, es la energía solar fotovoltaica en donde los “últimos años alcanzó 300GW de capacidad instalada según el reporte REN21” (REN21, 2017). Esta energía limpia o energía verde consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Dicha transformación, se consigue aprovechando las propiedades de los elementos semiconductores mediante las células fotovoltaicas, las cuales se encuentran principalmente fabricadas de silicio.

Actualmente, en la Universidad Autónoma de Occidente se está diseñando y se va a implementar una microrred eléctrica para laboratorio, el cual se encuentra en la planta baja (sótano 2) de la misma, esta microrred irá conectada a un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento. Para dicha implementación, es de gran necesidad conocer el comportamiento de parámetros eléctricos al momento que se proceda a conectar el sistema FV – almacenamiento a la microrred. Debido a ello, se realizan estudios de flujo de potencia o carga, los cuales son análisis numéricos de flujo de energía eléctrica en un sistema interconectado que se utiliza “para el análisis de contingencia, evaluación de seguridad de interrupciones, obteniendo información completa del ángulo, magnitud de la tensión, potencia real, activa y reactiva para cada bus de un sistema de potencia” (Indulkar y Ramalingam, 2008, p. 1).

Por consiguiente, se desea simular los parámetros eléctricos de la conexión de sistemas fotovoltaicos y almacenamiento en diferentes escenarios de carga de zonas no interconectadas (ZNI) mediante la herramienta computacional HOMER, así mismo, se realizará un análisis de flujo de potencia o carga del sistema FV – almacenamiento utilizando el software PowerWorld para complementar los estudios eléctricos previos en la microrred UAO.

2. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo permitirá a la Universidad Autónoma de Occidente, conocer el comportamiento de potencias, que tendrá la conexión del sistema solar fotovoltaico y almacenamiento, conectado a una microrred eléctrica para laboratorio, mediante el estudio de flujo de potencia. Los estudios de flujo de carga serán utilizados para determinar las condiciones de operación del sistema FV – almacenamiento. A partir de los resultados obtenidos, será posible definir propuestas de modificación en el sistema de potencia, con el objetivo de conseguir una operación más confiable, además, estos estudios permitirán determinar la operación en tiempo real de los sistemas que se encuentran ya existentes en ámbitos industriales, comerciales e incluso a comunidades en zonas no interconectadas que obtengan el servicio de energía eléctrica por medio de energías limpias, como la solar fotovoltaica.

Así mismo, aportará al grupo investigador del programa de investigación en microrredes eléctricas llamado “**Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para zonas no interconectadas en Colombia**”. En este programa, ya se definieron criterios, indicadores y modelos de la microrred eléctrica, pero hacen falta análisis del comportamiento de algunos parámetros y variables, que se desean lograr con las simulaciones de sistemas como el FV – almacenamiento. Este proyecto busca identificar el comportamiento de estas tecnologías antes de conectar la microrred real.

Debido a la aplicación del tema y del programa de investigación al cual está ligado el proyecto, uso de fuentes renovables, análisis de sistemas eléctricos, evaluación de generación y demanda energética, diagnóstico integral de una comunidad, se considera que profesional y académicamente, este proyecto de grado permitirá aplicar conocimientos adquiridos en varios cursos de Ingeniería Eléctrica como, sistemas de potencia, energías renovables y circuitos eléctricos.

3. OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo general.

Analizar el comportamiento de un sistema solar fotovoltaico y almacenamiento en la microrred de la Universidad Autónoma de Occidente.

3.1.2 Objetivos específicos.

- Evaluar y caracterizar métodos de simulación de parámetros eléctricos en la conexión de sistemas solares fotovoltaicos y almacenamiento en microrredes.
- Realizar la simulación de sistemas solares fotovoltaicos y almacenamiento para diferentes escenarios de carga de zonas no interconectadas usando la herramienta computacional HOMER.
- Desarrollar el flujo de potencia utilizando el software PowerWorld para el sistema solar fotovoltaico y almacenamiento conectado a la microrred.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

Desde los artículos originales describiendo los algoritmos de los flujos de potencia a mediados de la década de los cincuenta, se han encontrado interminables referencias como trabajos de grado, reportes, simulaciones, entre otros, relacionados con el tema a desarrollar en microrredes eléctricas basados en energías renovables, así como metodologías de diseño de microrredes para zonas no interconectadas, permitiendo establecer conclusiones contundentes en los estudios de los parámetros contemplados.

Para empezar, Izquierdo Franco (2002), en su trabajo de grado estudio de flujos de potencia y análisis de fallas en sistemas eléctricos de distribución radial, presenta un “estudio comparativo para la solución del problema de flujos en sistemas eléctricos de distribución” (p. 4 – 5), los cuales de manera particular presentan una topología radial. Se modelan elementos de los sistemas como generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas, así como elementos de derivación, usando el método Z_{nodal} para evaluar los flujos de potencia, los cuales sirven también para el análisis de fallas. Este trabajo de grado, a pesar de su año de publicación es de vital importancia tenerlo en cuenta pues, permite conocer uno de los tantos métodos que se utilizan para realizar el análisis de flujo de potencia y de fallas en sistemas eléctricos de distribución.

López Castrillón (2016), en su libro energía eólica. Integración a la red eléctrica, estudia “la estabilidad de pequeña señal en sistemas de potencia con alta generación eólica, utilizando dos tipos de turbinas eólicas de inducción: Jaula de Ardilla Squirrel Cage Induction Generators – SCIG y Variable Speed Doubly Fed Induction Generators – DFIG” (p. 15 – 17). En dicho libro, se utilizan herramientas computacionales como MatLab/PSAT, para analizar los distintos tipos de aerogeneradores mencionados anteriormente. Una vez que se realizan los análisis respectivos en cada turbina, se procede a analizar el efecto de aumento de penetración eólica en varias redes eléctricas hasta lograr una estabilidad en las redes. De la misma manera, el trabajo permite conocer el análisis que se llevó a cabo para determinar la estabilidad de sistemas de potencia, integrándose energías renovables, en este caso, eólica a la red eléctrica.

Núñez Palomares y Lozano García (2016) En su informe de control de flujo de energía en una microrred eléctrica basada en energías renovables” presentan “el modelo, simulación y análisis operativo de una microrred eléctrica conformada por fuentes renovables de energía como aerogeneradores” (p.1). En dicho informe, se

explica el comportamiento que tiene un controlador PI tradicional, el cual se encarga de gestionar la potencia que tiene la microrred y el sistema principal. La simulación y el modelo se realizan utilizando la herramienta Simulink del software MatLab, pues establecerá la relación entre los diferentes elementos que se encuentran en el sistema. Este trabajo permite conocer la metodología que se llevó a cabo para algunos de los parámetros antes mencionados y que son parte del proyecto.

Rivera, Urrego, y Arango, (2017), en su artículo despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto inferior y restricciones lineales, muestran “simulaciones de despachos económicos para un sistema con penetración de energías renovables cuando hay variaciones de la velocidad del viento y de radiación solar para diferentes horas del día” (p.1). Para probar y validar la metodología implementada se hace uso de la función f_{mincon} de MatLab. Simultáneamente, para la parte de la simulación toman como base el caso de Software MatPower de 8 nodos, el cual tiene un bajo consumo de potencia, haciendo que las pérdidas no tengan mayor incidencia en el análisis debido a que la demanda es baja, sin embargo, editan las condiciones de uso incrementando la demanda para el sistema de potencia. Este artículo está directamente relacionado con este proyecto de grado, ya que presenta un análisis de potencia real, activa y reactiva, pérdidas en un sistema de potencia teniendo como una de las cargas la fuente de energía solar fotovoltaica, no obstante, en el sistema también se presenta energía eólica.

Por último, Garzón-Hidalgo y Saavedra-Montes (2017), en su trabajo metodología de diseño de microrredes para zonas no interconectadas de Colombia, proponen “una metodología para diseñar microrredes en zonas no interconectadas de Colombia” (p.2). Para llevar a cabo el proceso del diseño de microrredes, se obtuvieron diferentes aspectos como: energías renovables y no renovables que se encuentran en Colombia, estimación de perfil de carga, dimensionamiento de los generadores, el diseño de la topología de la microrred y análisis eléctrico. A su vez, en el informe, se escoge la región de Tarora ubicada en una zona no interconectada, en el departamento de la Guajira. A partir de la información obtenida, seleccionan equipos de generación usando el software HOMER. Posteriormente, se realizan cálculos de las tensiones en la microrred a partir de los flujos de potencia utilizando el software Power System Analysis Toolbox, PSAT. El trabajo mencionado es de gran importancia, pues permite una mayor claridad de los aspectos generales que son requeridos al momento de diseñar microrredes, así como los parámetros que se tienen en cuenta para el desarrollo de estas. También se evidencia el uso de herramientas digitales, de las cuales una de ellas será utilizada en el presente proyecto de grado.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Microrredes eléctricas

En cuanto a las microrredes eléctricas se puede decir que:

The term DR island systems, sometimes referred to as *micro grids*, is used for these intentional islands. DR island systems are EPS that: (1) have DR and load, (2) have the ability to disconnect from and parallel with the area EPS, (3) include the local EPS and may include portions of the area EPS, and (4) are intentionally planned, (el término sistemas de islas o DR, a veces denominado microrredes, se usa para estas islas intencionales. Los sistemas de isla DR son sistemas eléctricos de potencia o EPS que: (1) tienen DR y carga, (2) tienen la capacidad de desconectarse y en paralelo con el área EPS, (3) incluyen el EPS local y pueden incluir partes del área EPS, y (4) se planifican intencionalmente. (Standards Coordinating Committee, 2011, p. iv)

Estas, pueden establecerse en diferentes escenarios como, sitios de prueba o laboratorios, es decir, universidades, centros de investigación, centros comerciales, etc. La constitución de una microrred se basa principalmente en el uso de fuentes convencionales; como gas natural, petróleo, carbón mineral e incluso una central hídrica. Las fuentes de energía no convencionales: turbinas hidroeléctricas, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores, también hacen parte de esta constitución, no obstante, al ser dependientes del agua (ríos), sol (radiación solar) y viento (oscilaciones en la velocidad), pueden presentar afectaciones en la generación de la energía eléctrica. Simultáneamente, las microrredes eléctricas constan de parámetros y/o variables que son importantes para su funcionamiento, entre ellos la intensidad, la tensión y las potencias, que podrían ser analizadas mediante técnicas para la gestión de cargas, sistemas de monitorización y el control de flujo de potencia, entre otros. Es importante mencionar que, para el diseño de una microrred se debe incluir un sistema de almacenamiento, los cuales pueden ser “baterías, súper – capacitores, volantes de inercia, sistemas de bombeo, entre otros” (Giraldo Gómez, 2016, pp. 15-16).

De acuerdo a Ramón Ducoy (2012), una de las principales características de las microrredes y que ya se encuentra mencionada en el primer párrafo de este apartado (recursos distribuidos como DR), es que:

Este concepto de generación distribuida engloba la generación de electricidad mediante instalaciones que son suficientemente pequeñas (3kW – 10MW) en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico (pp. 16 – 17).

En relación con las fuentes convencionales y no convencionales de energía y teniendo en cuenta el uso de algunas de ellas en la realización de la microrred para laboratorio como, la solar, eólica, biomasa, diésel e hidráulica, se explicará a continuación el funcionamiento, componentes y demás elementos involucrados en el proceso de generación de energía eléctrica.

4.2.2 Fuentes convencionales y no convencionales de energía

El Instituto tecnológico de Canarias (2008), define las energías renovables como “aquellas cuyo potencial es inagotable, pues provienen de la energía que llega a nuestro mundo de forma continua, debido a la radiación solar o la atracción gravitatoria de la Luna” (p.16). Al mismo tiempo, las energías renovables son recursos abundantes y limpios que no producen emisiones de efecto invernadero ni otros daños que puedan afectar al medio ambiente, como el dióxido de carbono (CO₂). Sin embargo, las energías no renovables como el petróleo, carbón y gas natural, así como también la energía nuclear, producen emisiones de CO₂ y/o residuos tóxicos.

A continuación, se listan los diferentes procesos que hacen uso de los recursos no convencionales para la generación de energía eléctrica al interior de las microrredes.

4.2.2.1 Energía eólica

La energía eólica, en conjunto con la energía solar e hidráulica son fuentes inagotables de donde se puede generar electricidad, esto se debe al aprovechamiento de elementos como el viento, el sol y el agua, respectivamente. Para la generación de la energía cinética del movimiento del viento (aire), en energía eléctrica, se utilizan sistemas de generación eólica, es decir, aerogeneradores, aeroturbinas o turbinas eólicas que se pueden distinguir según la orientación del eje de rotación, orientación respecto al viento, número de palas (aspas: molinos de viento), tipo de torre, zona donde estén instaladas y tipo de generador. La fuerza del viento hace girar las palas que están diseñadas para recoger al máximo la energía, simultáneamente, pueden llegar a medir más de sesenta (60) metros de

longitud cada una y están fabricadas con materiales muy ligeros y resistentes como la fibra de vidrio para facilitar su movimiento. Debido a esto, pueden producir energía incluso cuando los vientos son muy fuertes. Así mismo, las palas se encuentran unidas al aerogenerador a través de un eje de baja velocidad, el cual gira a la misma de las palas. Sin embargo, la velocidad en el eje debe ser aumentada y para lo anterior se conecta un multiplicador de velocidad, para así transferirla al eje motriz que va unido al generador de donde resulta la energía eléctrica.

4.2.2.2 Energía hidráulica

La energía hidráulica, gracias al aprovechamiento de la energía cinética y potencial del agua acumulada en represas o embalses es capaz de generar energía eléctrica, esto se logra por medio de turbinas, que, a su vez, se encuentran establecidas en lo que comúnmente se conoce como Centrales Hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas más comunes, son construidas en los cauces de los ríos en donde el agua, es almacenada en un embalse hecho de piedra apoyado en la montaña. El agua almacenada, cae con fuerza pasando a gran presión por una turbina hidráulica provocando un movimiento rotacional, por lo tanto, la energía cinética de la rotación es transformada en energía eléctrica por medio de los generadores de la sala de máquinas, esta energía eléctrica producida se eleva para que pueda incorporarse a la red y finalmente es transportada con menores pérdidas hasta los puntos de distribución, donde se reduce la tensión hasta los puntos de consumo. De igual manera, el agua utilizada en el proceso retoma el curso natural del río traspasando la central hidroeléctrica.

Otro tipo de centrales hidroeléctricas son las de bombeo, y se caracterizan principalmente para bombear y almacenar.

4.2.2.3 Energía de la biomasa

La biomasa es un tipo de energía procedente del aprovechamiento de la materia orgánica (plantas, animales, etc.), que por medio de procesos termoquímicos y termoeléctricos es convertida en energía eléctrica. A su vez, la biomasa se puede clasificar según la procedencia, en natural (bosques, árboles, matorrales, plantas de cultivo, etc.), residual (paja, serrín, estiércol, residuos de mataderos, basuras urbanas), seca (madera, leña, residuos forestales, restos de la industria maderera y del mueble, etc.) y húmeda (residuos de la fabricación de aceites, lodos de depuradoras, purines, bagazo de caña de azúcar (48%), etc.).

Para producir energía con la biomasa teniendo en cuenta el fin eléctrico y térmico mencionado, se procede a quemar la biomasa en calderas de donde surge un tipo de combustión que, calienta el agua encontrada en las tuberías de las paredes de las calderas convirtiéndola en vapor que, a su vez, pone en movimiento una turbina acoplada a un generador para producir la energía.

Tal y como lo afirma Estructuras bioclimáticas avanzadas (s. f.), los tipos de calderas que se pueden encontrar, son los siguientes:

- Calderas convencionales aptas para biomasa: utilizan combustible combinados.
- Calderas estándar de biomasa: se utilizan para uso doméstico y pueden utilizar materiales que no producen muchas cenizas.
- Calderas mixtas: permiten el uso alternativo de dos combustibles en función de las necesidades de cada situación y precisan un almacenamiento y un sistema de alimentación de la caldera para cada combustible.
- Calderas a condensación: utilizan solo el pellet.

4.2.2.4 Combustible fósil diésel

El Diésel como recurso energético, es un producto de la destilación y purificación (en diversos niveles), del petróleo crudo. Es tal vez el combustible líquido más utilizado en motores de vehículos. La tecnología para convertirlo en energía mecánica y luego eléctrica, se compone básicamente de un primo motor (motor diésel), y el generador eléctrico (Mipoung, Lopes, y Pillay, 2014).

No obstante, en este trabajo, se dará énfasis en la energía solar y sistemas de almacenamiento.

4.2.2.5 Energía solar

La energía solar como fuente inagotable es un desafío para la técnica y la ingeniería, pues es de gran ayuda al momento de querer elevar la calidad de vida de personas que se encuentren ubicados en zonas lejanas del sistema eléctrico convencional.

La radiación es la emisión de ondas electromagnéticas que vienen desde el sol y llegan a la superficie terrestre en forma de rayos solares. De forma simultánea, la transformación de dicha radiación solar en electricidad se logra en las células

fotovoltaicas (de cada panel o módulo solar), o sistemas solares fotovoltaicos, que están compuestas principalmente por semiconductores (silicio cristalino). En otro orden de ideas, al ser una energía no contaminante, proporciona energía a países no industrializados, no obstante, al depender del clima y del número de horas de sol al año, la convierte en una fuente energética intermitente. Su rendimiento energético es bajo, respecto a la eficiencia de una hidroeléctrica. Por su parte, la energía solar por medio de los paneles solares, pueden generar electrificación a viviendas, sistemas de abastecimiento de agua, centros de salud, iluminación, etc., teniendo en cuenta el modo de conexión en que se encuentren, es decir, si son sistemas que no disponen de la red eléctrica o sistemas que generen energía eléctrica a la red. De acuerdo con lo anterior, los sistemas solares fotovoltaicos se clasifican en tres, autónomos, conectados a red e híbridos o cargador /inversor.

- **Sistemas solares fotovoltaicos autónomos.**

Alonso Abella (2005), define a los sistemas solares fotovoltaicos autónomos como “posibles configuraciones que pueden abarcar desde sistemas simples, tales como un generador FV operando un consumo DC, hasta sistemas con almacenamiento y con consumos en DC o en DC + AC” (p.6). Estos sistemas pueden operar en combinación con otras fuentes de energía, ya sean renovables o no; pueden existir sistemas eólico – fotovoltaicos o eólico – diésel – fotovoltaicos, este último para formar sistemas autónomos híbridos. Además, para el funcionamiento del sistema total, tal y como se observa en la figura 1, se requieren de algunos aparatos electrónicos.

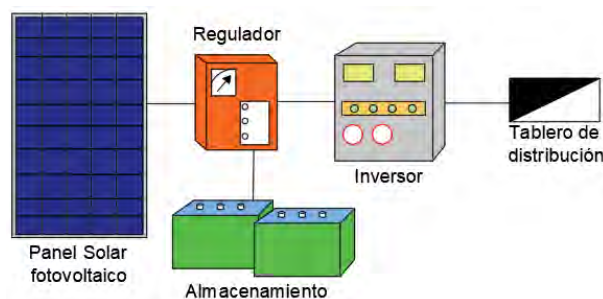


Figura 1. Sistema solar fotovoltaico autónomo.

Componentes del sistema solar fotovoltaico autónomo: regulador, almacenamiento (baterías) e inversor.

Por consiguiente, se da una breve explicación de cada elemento que compone el sistema solar fotovoltaico autónomo.

- Reguladores de carga

En su estudio de sistemas solares fotovoltaicos autónomos el autor Perpiñán Lamigueiro (2018), define a los reguladores de carga, tal y como se puede observar en la figura 2 como, “un equipo electrónico capaz de evitar la sobrecarga y la descarga excesiva de un acumulador cuando se alcanzan determinados umbrales, generalmente determinados por la tensión en bornes de la batería” (pp. 101 – 102).

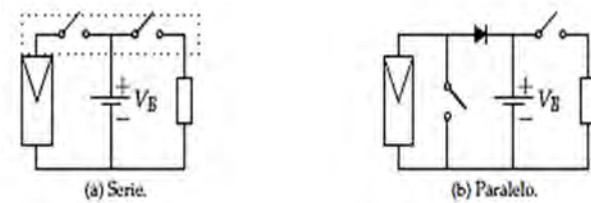


Figura 2. Esquema eléctrico de un regulador de carga.

a) Regulador serie. b) Regulador shunt o paralelo. Tomado de “Energía solar fotovoltaica” (pp. 101 – 102), por O. Perpiñán Lamigueiro, 2018.

- Baterías

De acuerdo a González Santacruz (2015) “las baterías poseen grandes ventajas como su portabilidad, son comercialmente disponibles y relativamente económicas lo que las hace una de las mejores opciones para implementar en sistemas de acumulación de energía” (p.22 - 41). Al mismo tiempo, existe una variedad de baterías, las cuales se diferencian en su estructura física, composición química y modo de funcionamiento. Algunas de las baterías que se encuentran en el mercado son las baterías de plomo ácido, AGM, GEL, estacionarias, litio, entre otras. Cabe resaltar que, las baterías anteriormente mencionadas, tienen compatibilidad con sistemas solares fotovoltaicos. No obstante, se debe tener en cuenta el desplazamiento temporal que existe entre los periodos de generación (día) y el consumo (noche), pues permite la operación de cargas cuando el generador fotovoltaico por sí mismo no genera potencia suficiente para abastecer el consumo.

- Inversor

Otro de los componentes del sistema autónomo es el inversor y se define de la siguiente manera: “equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico (en forma de corriente continua) y adaptarla a las condiciones requeridas según el tipo de cargas, normalmente en corriente alterna y el posterior suministro a la red” (Barberá Santos, s. f., p. 16).

- **Sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red**

Un sistema solar fotovoltaico conectado a la red se compone principalmente de paneles fotovoltaicos. La figura 3, muestra los principales componentes de este sistema y su respectiva conexión.

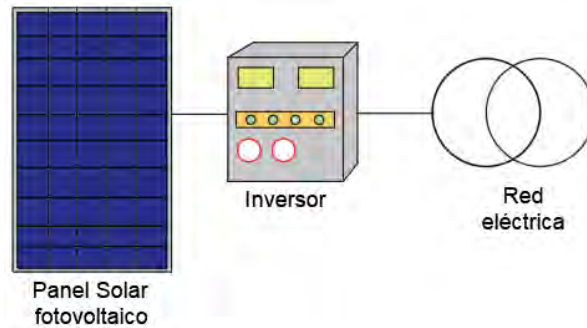


Figura 3. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red.

Elementos principales del sistema (panel fotovoltaico) acompañado del elemento acondicionador que convierte la corriente directa en alterna, el inversor.

Se debe agregar que, para la correcta conexión y desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico de la red, así como también, la protección de las personas que realicen dicho trabajo es necesario tener en cuenta la norma IEEE Std 1547 – 2018 (IEEE, Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces).

- Inversor de conexión a red.

En cuanto a los inversores de conexión a red se puede decir que: “se utilizan para extraer la máxima potencia en corriente continua (DC), paso por paso, del generador fotovoltaico y convertirla en corriente alterna (AC) para poder ser inyectada a la red eléctrica y conseguir un flujo de energía” (Horikoshi, 2009, pp. 50-61).

Finalmente, a diferencia de los sistemas solares fotovoltaicos autónomos, los sistemas conectados a red no cuentan con sistemas de almacenamiento (baterías), esto es debido a que la energía que se produce en horas donde se recibe la radiación electromagnética a partir de Sol, va dirigida directamente a la red eléctrica, mientras tanto, cuando la luz de los rayos solares es insuficiente, la carga es alimentada por la red.

4.2.3 Sistemas de almacenamiento en una microrred

Con respecto a la microrred a implementar en el laboratorio de microrredes eléctricas en la planta baja (Sótano 2) de la Universidad Autónoma de Occidente, se puede decir que será una microrred aislada de la red principal. El funcionamiento de esta se dará a base de fuentes no convencionales y convencionales de energía (hídrica, diésel, módulos fotovoltaicos, aerogeneradores, biomasa). Considerando que las fuentes no convencionales de energía varían enormemente de acuerdo con su localización, es necesario controlar este problema por medio de generadores de combustión interna o acumuladores.

En la actualidad, el sistema de almacenamiento comúnmente utilizado en este tipo de microrredes son las baterías pues, a diferencia de los demás sistemas resultan más económicas siendo la mejor opción en la implementación de sistemas de acumulación de energía (González Santacruz, 2015). Los tipos de baterías se encuentran enseguida.

- Inundadas o húmedas. Esta tecnología, es la mejor en la relación costo – beneficio y la más utilizada en sistemas solares fotovoltaicos; requieren mantenimiento regularmente.
- Selladas. En esta tecnología existen dos tipos diferentes de baterías, la de celda de gel y las de vidrio o AGM (Absorption Glass Mat). Esta batería, al contrario de la inundada o húmeda, no requieren mantenimiento y no emiten gases corrosivos.

No obstante, hoy en día, los tipos de baterías que se encuentran comercialmente disponibles son baterías de: Ión – Litio (Li – Ion), plomo – ácido, sulfuro de Sodio (NaS), redox de Vanadio (VRB), bromuro de zinc (ZnBr), níquel – cadmio (NiCd). Con todo y lo anterior, se realizará una breve descripción de cada tecnología, estudiando principalmente sus ventajas y desventajas y a su vez, las especificaciones técnicas de cada batería mencionada.

Cabe mencionar, que existen otros tipos de sistemas de almacenamiento de energía como: volantes de inercia, condensadores, súper condensadores y superconductores.

4.2.3.1 Batería de Ión – Litio

Según Vega de Kuyper y Ramírez Morales (2014) las baterías de Li – Ion son las mejores empleadas en artefactos como “notebooks, teléfonos celulares, cámaras fotográficas y de video, iPod y otros” (p. 104). **Ventajas:** las baterías de Ión – Litio

(Li- Ion) suelen emplearse en artículos de electrónica de consumo; en el ámbito de la eléctrica, son usadas en la industria del coche eléctrico resultando ser más beneficiosas respecto a otras tecnologías. **Desventajas:** este tipo de batería tiene un costo alto a diferencia de otros tipos de tecnologías similares.

4.2.3.2 Batería de Plomo – Ácido

Las baterías de plomo – ácido, tienen una gran variedad de aplicaciones como: “arranque de motores de combustión de vehículos; otro uso son como fuente energía en algunos vehículos eléctricos, en sistemas de generación fotovoltaicos o como fuente de electricidad en emergencias de centrales telefónicas y eléctricas y en hospitales”(Vega de Kuyper y Ramírez Morales, 2014, p. 103). **Ventajas:** en comparación a las baterías de Li – Ion, las baterías de plomo –ácido tienen la ventaja de ser de bajo costo, a su vez, es muy eficiente en el proceso de descarga. **Desventajas:** es una tecnología que requiere mantenimiento constante, puesto que es necesario la revisión e incluso reposición de los niveles de agua en el electrolito.

4.2.3.3 Batería de Sulfuro de Sodio

Generalmente, es fabricada para trabajar en temperaturas superiores a 300°C. **Ventajas:** en comparación con otras tecnologías, las NaS tienen una respuesta extremadamente rápida, siendo adecuadas en la aplicación de calidad de energía. Un aspecto importante que mencionar respecto a esta batería es que requieren bajo mantenimiento. **Desventajas:** no es adecuada para sistemas de respaldo (UPS).

4.2.3.4 Batería de Redox de Vanadio

En las baterías de flujo – redox, la batería de Redox de Vanadio es la tecnología más desarrollada tecnológicamente. No obstante, los dos tipos de tecnologías se usan para aplicaciones de almacenamiento. **Ventajas:** González Santacruz (2015, p. 37) narra que, la batería VRB posee una gran capacidad de tener una mayor potencia, incluso sin necesitar una recarga, característica que no tienen otras tecnologías de almacenamiento. Además, en estos sistemas no hay tasa de auto descarga diaria, debido a que, cuando los electrolitos no son bombeados, no hay reacción química. **Desventajas:** a diferencia de las demás, esta tecnología presenta una densidad energética muy baja.

4.2.3.5 Batería de Redox de Zinc – Bromo

A comparación de las baterías redox de vanadio, estos sistemas están menos desarrolladas tecnológicamente. También, hace parte de las baterías de flujo al igual que la anteriormente dicha. **Ventajas:** su eficiencia energética es de alrededor de 70 y 75 % y posee una vida útil de 5 a 10 años.

4.2.3.6 Batería de Níquel – Cadmio

Esta batería puede encontrarse de dos formas, una de ellas es la sellada que se utiliza en dispositivos portátiles y la otra tipo húmeda para aplicaciones industriales. **Ventajas:** en comparación con la batería de plomo – ácido, estos sistemas requieren mantenimiento con menor frecuencia. En su estudio González Santacruz (2015) concluyó que una de las ventajas de esta tecnología es: “mantener estados de descarga por periodos largos, siendo más robustas que otras tecnologías al mantener una tensión estable durante ciclos de carga/descarga profundos” (p. 26). **Desventajas:** Para Yang et al (2009), una de las principales desventajas de estos sistemas es:

The main drawback of NiCd batteries is the relatively high cost ($\frac{\$1000}{kWh}$) due to expensive manufacturing process. NiCd batteries also suffer from “memory effect”, where the batteries will only take full charge after a series of full discharges, (el principal inconveniente de las baterías NiCd es el costo relativamente alto ($\sim \frac{\$1000}{kWh}$) debido al costoso proceso de fabricación. Las baterías de NiCd también sufren de “efecto de memoria”, donde las baterías solo se cargarán completamente después de una serie de descarga completas) (p. 297).

En la tabla 1 se encuentran las principales especificaciones técnicas de cada sistema de almacenamiento, sin embargo, se tendrá en cuenta la ventaja que tienen las baterías selladas (gel y AGM), mencionadas en el cuarto párrafo de este literal, para determinar la más adecuada para la microrred a implementar.

Tabla 1

Parámetros de las diversas baterías para almacenamiento de energía eléctrica.

Parámetro	Li - Ion	Plomo - ácido	NaS	VRB	ZnBr	NiCd
Energía Específica	75 a 200	30 a 50	150 a 240	10 a 30	30 a 50	50 a 75
Densidad Energética	200 a 500	50 a 80	150 a 250	16 a 33	30 a 60	60 a 150
Potencia Específica	150 a 315	75 a 300	150 a 230	-	-	150 a 300
Eficiencia	78	90	75 a 100	75 a 85	70 a 75	60 a 83
Auto descarga diaria	0,1 a 0,3	0,1 a 0,3	20	-	-	0,2 a 0,6
Durabilidad	1000 a 10000	500 a 1000	2500	12000+	2000+	2000 a 2500
Vida útil	5 a 15	5 a 15	10 a 15	5 a 10	5 a 10	10 a 20

Nota: Se tiene en cuenta que las medidas de los parámetros son las siguientes: energía específica (Wh/kg); densidad energética (Wh/L); potencia energética (W/kg); eficiencia (%); tasa de auto descarga diaria (%); durabilidad (ciclos); vida útil (años). No se encontraron datos de potencia específica y autodescarga diaria para baterías de Redox de Vanadio y Zinc – Bromo (en paginas confiables) por lo que se reemplazó por un guión. Adaptado de “Operación y gestión de microrredes energéticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energética y ambiental”, por M. Tolón e I. Tamara, 2013, *trabajo fin de maestría*, p. 19 y p.22. Y de “Progress in electrical energy storage system: A critical review” por Yang et al, 2009, p. 308.

4.2.4 Flujos de potencia

Uno de los análisis comúnmente utilizados en sistemas de potencia, es el cálculo de flujo de carga o flujo de potencia como tradicionalmente es llamado. Para (Gonzalez, 2016) “para planificar, diseñar y verificar la operación de sistemas de potencia, se requiere de tales cálculos para analizar el rendimiento en régimen permanente del sistema de potencia” (p. 1 – 2). A su vez, el control de flujo de potencia es un elemento importante en las microrredes que presentan generación distribuida a partir de fuentes no convencionales de energía. Las soluciones de los flujos de potencia son realizadas mediante herramientas computacionales diseñadas específicamente para este propósito, donde se pueden encontrar

algunas conocidas como PowerWorld definido por la empresa de la siguiente manera:

A powerful, industry – leading load flow analysis engine and a best – in – class, user – friendly graphical interface. It is remarkably easy to get “up and running” on the PowerWorld platform, yet its specialized features and tools offer almost endless possibilities for in – depth analysis and visualization of complex large – scale power systems, (un potente motor de análisis de flujo de carga líder en la industria y una interfaz gráfica de lo mejor en su clase y fácil de usar. Es muy fácil ponerse en marcha en la plataforma PowerWorld, pero sus funciones y herramientas especializadas ofrecen posibilidades casi infinitas para el análisis y la visualización en profundidad de sistemas de energía complejos a gran escala) (PowerWorld CORPORATION, s. f.)

Y NEPLAN® definido como: “una herramienta de alta gama para análisis de sistemas de potencia para aplicaciones en sistemas de transmisión, distribución, generación, industriales, energías renovables, Smart Grid y es usado en más de 110 países” (NEPLAN®, s. f.). Además de los dos programas mencionados, otro software para análisis de sistemas de potencia en cuanto a la integración de energías convencionales es DIgSILENT® y se define como,

A software and consulting Company providing engineering in the field of electrical power systems for transmission, distribution, generation and industrial plants. In addition, DIgSILENT has a particular interest in the fields of simulation and grid integration of renewable energies, (una compañía de software y consultoría que brinda servicios de ingeniería en el campo de los sistemas de energía eléctrica para plantas de transmisión, distribución, generación e industriales. Además, DIgSILENT tiene un interés particular en los campos de simulación e integración de redes de energía renovable.) (DIgSILENT, s. f.)

Por otro lado, existen muchos métodos básicos que son de amplio uso en la industria de hoy para el análisis de los flujos de potencia entre los cuales se pueden encontrar el método de Gauss – Seidel y método de Newton – Raphson. Sin embargo, entre las dos técnicas mencionadas, la preferida y usada por la mayoría de las herramientas computacionales es la técnica de Newton - Raphson. La información principalmente que se obtiene del estudio de flujos de potencia y resolviendo las técnicas mencionadas es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y las potencias real y reactiva que fluyen en cada línea. No obstante,

se puede obtener más información adicional, a través de resultados que brindan los programas computacionales que usan las compañías eléctricas.

4.2.4.1 Técnica Gauss – Seidel

La técnica Gauss – Seidel, es un método iterativo, es decir, se debe trabajar por medio de iteraciones hasta encontrar una solución adecuada o un error considerablemente pequeño. En él se obtienen variables como voltajes y potencias, esto con el fin de determinar el sentido de los flujos de carga en el sistema eléctrico, por otro lado, se obtienen los valores de las pérdidas por transmisión y potencias activas y reactivas de generadores y cargas.

Díaz, Villafuerte Salcedo, Sánchez, y Cervantes (2012) definen el método iterativo de Gauss como

Un método mucho más simple, que utiliza la siguiente ecuación:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{S_i^*}{y_{ii}V_i^{*(k)}} - \sum_{j=1, i \neq j}^n \frac{y_{ij}}{y_{ii}} V_j^{*(k)} \quad \text{para } i = 1, n \quad \text{Ecuación 1}$$

Con el método iterativo de Gauss – Seidel, la ecuación anterior, se modifica a la forma:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{S_i^*}{y_{ii}V_i^{*(k)}} - \sum_{i < j}^n \frac{y_{ij}}{y_{ii}} V_j^{*(k+1)} - \sum_{i > j}^n \frac{y_{ij}}{y_{ii}} V_j^{*(k)} \quad \text{para } i = 1, n \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde k es el contador de iteraciones, n el número de nodos, y el nodo 1 puede ser el compensador o Slack.

4.2.4.2 Técnica Newton – Raphson

Método para resolver ecuaciones no lineales a través de iteraciones sucesivas que se acercan a la solución de las ecuaciones. El método de Newton Raphson resuelve el problema $y = f(x)$ en donde se inicia con una suposición (condición inicial) de la solución, para ir mejorando hasta encontrar la solución de la ecuación.

Ahora bien, para la solución de las iteraciones sucesivas se obtiene la ecuación general:

$$x(i + 1) = x(i) + J^{-1}(i)\{y - f[x(i)]\} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde, $J(i)$ es la matriz jacobiana representada como una matriz de $n \times n$ cuyos elementos son derivadas parciales del vector f con respecto a x .

$$J(i) = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Nota: Las ecuaciones anteriores (3 y 4) son tomadas del libro *Glover, J. D., Overbye, T. J., y Sarma, M. S. (2017). POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN (p. 341).*

Algunos de los métodos mencionados anteriormente, son utilizados en diferentes investigaciones, sin embargo, el más empleado es el **método de Newton – Raphson**, tal y como se indica en la tabla 2.

En síntesis, el método de Newton – Raphson cuenta con ciertas características, las cuales hacen que sea el más utilizado en el análisis de sistemas de potencia, entre ellas podemos encontrar que, garantiza convergencia a la solución si el punto inicial (condición inicial) está relativamente cerca al punto de solución; resuelve menos iteraciones que otras técnicas para la solución de flujos de potencia (Díaz et al., 2012, pp. 46-47) y es utilizado en la mayoría de herramientas computacionales como el que se utilizará en el presente proyecto. Por lo cual, se hará uso del método de Newton – Raphson para realizar el análisis de flujos de potencia mediante el software PowerWorld y teniendo en cuenta la profundización dada en los anexos A y B.

Tabla 2

Métodos de simulación.

TÍTULO	AUTOR	SOFTWARE					MÉTODO	
		Power World	MatLab	DigSILENT	ETAP	PSCAD	Gauss - Seidel	Newton - Raphson
Power flow study for a microgrid by using matlab and powerworld simulator	Ahmet NUR - Asim KAYGUSUZ	x	x				x	
Microgrid Power Flow Study in Grid - Connected and Islanding Modes under Different Converter Control Strategies	Shuhui Li, Julio Proano y Dong Zhang	x						x
Power System Analysis of a Microgrid using ETAP	Sneha Kulkarni y Sunil Sontakke				x			x
Power Flow Analysis using Power World Simulator	Umair Shahzad	x						x
A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG	Faisal Mumtaz, M.H. Syed, Mohammed Al Hosani, H.H. Zeineldin					x		x
Optimization active and reactive power flow for PV connected to grid system using Newton Raphson method	Refdinal Nazir, Kiki Kanada, Syaffi y Prima Coveria		x					x

5. IDENTIFICACIÓN DE LAS ZNI Y MICRORRED DE LABORATORIO

En el siguiente capítulo y como parte de la metodología, se identifican cuatro localidades pertenecientes a las Zonas no Interconectadas ubicadas en el pacífico, sur, oriente y norte de Colombia, planteando diferentes escenarios de carga (consumo/demanda), con el fin de determinar la potencia total consumida por familia en consumos altos, medios y bajos. No obstante, el análisis y evaluación de cada localidad a tratar, se plantea con el estudio llevado a cabo en el trabajo “metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas” realizado por ingenieros electricistas, en compañía del programa de Investigación en Energías GIEN de la Universidad Autónoma de Occidente. Posteriormente analizadas las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia y las comunidades por localidad escogidas, se procederá a realizar una simulación de sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento usando una herramienta computacional (HOMER), considerando ciertos elementos que puedan suplir con la energía total demandada en cada comunidad.

En contraste con lo anterior, se identificará la microrred de laboratorio ubicada en el sótano 2 (planta baja) de la Universidad Autónoma de Occidente, en donde se desarrollará y analizará el flujo de potencia mediante la técnica Newton – Raphson usando el software PowerWorld de un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento, evaluando parámetros eléctricos como la potencia activa y reactiva del sistema de potencia.

5.1 ESCENARIOS DE ESTUDIO DE ZONAS NO INTERCONECTADAS

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) plantea que las ZNI están conformadas por 17 departamentos (criterio cobertura rural), equivalentes al 52% del territorio nacional colombiano caracterizado por, 90 municipios, 20 territorios especiales biodiversos y fronterizos, y 39 cabeceras municipales (5 capitales departamentales) que hacen parte de las 1448 localidades de las zonas no interconectadas. Por otra parte, en algunos departamentos se encuentran diferentes comunidades étnicas habitantes de dichas ZNI como: indígenas, afrocolombianos, población ROM (gitana) y raizales (Ministerio de minas y energía, 2014, p. 7). La tabla 3, presenta datos referidos a la cantidad de lugares pertenecientes a las ZNI por departamento y la tabla 4, cifras de las comunidades étnicas en las ZNI.

Tabla 3**Caracterización de las Zonas no Interconectadas (ZNI) en Colombia por departamento.**

Departamento	Cantidad
Amazonas	61
Antioquia	43
Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	2
Bolívar	2
Caquetá	47
Casanare	3
Cauca	128*
Chocó	307*
Guainía	73
Guaviare	34
La Guajira	2
Meta	36
Nariño	552*
Putumayo	35
Valle del Cauca	33
Vaupés	54
Vichada	36

Nota: Los datos con un asterisco (*) representa a los departamentos con mayor cantidad de localidades pertenecientes a las zonas no interconectadas (ZNI) con respecto a las demás. Adaptado de “Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia”, por Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), 2014, Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>

Tabla 4

Dimensionamiento de las comunidades étnicas en las Zonas no Interconectadas en Colombia.

Comunidad étnica	Porcentaje de población	Población	Total, en ZNI
Indígenas	3,4%	1.378.884	842.059
Afrocolombianos	10,6%	4.311.757	950.295
Población ROM (Gitana)	0,01%	4.832	122
Raizales	56,98%	40.201	-

Nota: Los datos referidos a la población, son cifras dadas por el Departamento Administrativo Nacional Estadístico (DANE) en el 2005. Por otra parte, no se obtuvieron datos del total de población en zonas no interconectadas en Colombia de la comunidad étnica Raizales. Adaptado de “Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia”, por Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), 2014, Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>

En el presente documento, se tendrán en cuenta 4 localidades estudiadas en el trabajo de grado previamente dicho en el inicio del apartado, las cuales a su vez, fueron escogidas por el grupo de investigación de la Universidad Autónoma de Occidente bajo el proyecto denominado “Generación y Suministro de Energía Eléctrica Sostenible para Zonas no Interconectadas en Colombia” (Gaviria Cataño y Gómez Leal, 2018). Las localidades estudiadas se encuentran establecidas en la región pacífica, sur, oriente y norte de Colombia, en donde Bahía Málaga, Buenaventura en el Valle del Cauca, Jardines del Sucumbíos en Ipiales – Nariño, Puerto Toledo en Puerto Rico – Meta y Nazareth en Uribí – La Guajira, hacen parte de las Zonas no Interconectadas de Colombia. No obstante, antes de realizar el estudio se tornó importante tener en cuenta algunos parámetros como los indicados en la tabla 5 para el posterior análisis en las Zonas no interconectadas.

Tabla 5

Aspectos importantes en las Zonas no Interconectadas.

Parámetro	Característica
Localización geográfica	Ubicación - Altitud
Población	Número de Habitantes, Número de Viviendas, Etnia
Consumos energéticos	Electrodomésticos, Procesos laborales
Economía local	Actividades Económicas
Acceso	Terrestres, marítimo, aéreo
Recursos energéticos	Sol, Agua, Viento, Biomasa

Nota: De “Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas”, por F.A. Gaviria y J. C. Gómez, 2018, Trabajo de grado, p. 60.

Después de analizados los parámetros más importantes en las Zonas no Interconectadas (ZNI), se procede entonces a evaluar las 4 localidades previamente dichas, con el propósito de determinar las potencias energéticas de cada una de ellas. No obstante, la simulación (Software HOMER) y el estudio a realizar será para una comunidad de cada región en donde se obtendrán datos como, el recurso energético solar, es decir, radiación solar, actividades económicas, cuadro de cargas de un hogar tipo en consumos energéticos altos, medios y bajos, teniendo en cuenta el consumo de energía por vivienda.

5.1.1 Bahía Málaga, Buenaventura – Valle del Cauca

Bahía Málaga, se encuentra ubicada en la parte media del Pacífico colombiano en el municipio de Buenaventura, Departamento del Valle del Cauca. Es refugio de una inmensa diversidad de fauna y flora (animales y plantas), así como también, de especies corales, tiburones, rayas, en el ámbito marino. Esta localidad cuenta con 4 comunidades, las cuales en conjunto con las autoridades ambientales de los Parques Nacionales Naturales de Colombia, logran que esta zona sea un área protegida comprendida por 47.094 hectáreas lo que equivale a 137.34 millas náuticas cuadradas (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2016). Las comunidades son: La Plata, La Sierpe, Mangaña, Miramar.

Un estudio realizado por Lopez y Gaviria Cataño (2018, p. 4) en donde se evalúa el recurso energético y posterior identificación poblacional de cada comunidad perteneciente a Bahía Málaga, muestra el número de viviendas, habitantes promedio por vivienda y el tipo de comunidad étnica a la que pertenece

cada comunidad. A continuación, se presenta las características mencionadas con anterioridad a manera de datos en la tabla 6, escogiendo la comunidad de “La Plata” para el respectivo estudio.

Tabla 6

Caracterización poblacional Bahía Málaga.

	La Plata	La Sierpe	Mangaña	Miramar
Número de Viviendas	70	30	22	31
Habitantes promedio / Vivienda	5	5	6	5
Etnia	Afro	Afro	Afro	Afro

Nota: Identificación poblacional de comunidades en la zona pacífica Bahía Málaga. De “Análisis multicriterio y simulación de una microrred aislada para electrificación rural en Colombia usando HOMER”, por Y. López, 2018, *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/327350794_Analisis_multicriterio_y_simulacion_de_una_microrred_aislada_para_electrificacion_rural_en_Colombia_usando_HOMER

5.1.1.1 Caso de estudio No. 1: Comunidad La Plata

En la Comunidad de La Plata, región de Bahía Málaga, la extracción de piangua, pesca, corte de madera, ecoturismo, casería y agricultura son una de las principales actividades económicas que realizan sus habitantes para el sustento humano, simultáneamente, el consumo mensual en cada vivienda de la comunidad es aproximadamente $65.40 \frac{kWh}{mes}$ (Lopez y Gaviria Cataño, 2018, p. 5). Por otra parte, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en su atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia determina que la ración solar global en toda la región de Bahía Málaga tiene un promedio de entre 3.0 y 4.0 kWh/m²/día (IDEAM, s. f.), no obstante, dentro de esta región se encuentra ubicada, especialmente en la zona de Juanchaco, una estación hidrometeorológica del IDEAM que registro datos de radiación solar entre los meses de junio de 2005 y Julio de 2013 que, la radiación global diaria en la zona de bahía balaga puede variar entre 2.80 y 3.70 kWh/m²/día, obteniendo así un promedio de 3.23 kWh/m²/día, lo cual determina que la zona es un lugar apropiado para la instalación de plantas de generación fotovoltaica.

De igual modo, para el cálculo de un sistema de generación fotovoltaica (módulos solares) y de almacenamiento (baterías), en el cual se pueda identificar la potencia total consumida por familia, el consumo energético total por vivienda en el día y al mes, y posterior selección de equipos que suplan dicho consumo, se debe realizar un cuadro de cargas de un hogar tipo simulando en él, el tipo de carga, cantidad, potencia, tiempo de uso y energía. Por lo anterior, se considera que una vivienda dentro de la comunidad tendrá un consumo alto, medio y bajo y sus cálculos para el respectivo resultado, se pueden observar en el Anexo C.

- Consumo energético alto.

El cuadro de cargas establecido en la tabla 7, representa la potencia que consumirá una familia (vivienda) de la Plata para un consumo energético alto. Es importante mencionar que, para la realización de cada cuadro de cargas es necesario tener presente el consumo mensual por cada vivienda en la comunidad y la cantidad de horas al día en el que cuentan con energía eléctrica.

Tabla 7

Cuadro de Cargas en consumo energético alto para una vivienda en la comunidad de La Plata.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	1	0,2
Iluminación	8	0,1	0,8	1	0,8
Refrigeración	1	0,3	0,3	1	0,3
Refrigeración*	1	0,4	0,4	2	0,8
Totales		1	1,7	5	2,1
Potencia total consumida por familia (kW)					1,7
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)					2,1
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					63

- Consumo energético medio

Se modifica el consumo energético en medio (tabla 8), considerando una menor cantidad de bombillos.

Tabla 8

Cuadro de Cargas en consumo energético medio para una vivienda en la comunidad de La Plata.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	2	0,4
Iluminación	5	0,1	0,5	1	0,5
Refrigeración*	1	0,2	0,2	2	0,4
Totales		0,5	0,9	5	1,3
Potencia total consumida por familia (kW)					0,9
Consumo energético medio total vivienda (kWh/día)					1,3
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					39

- Consumo energético bajo

En esta parte (tabla 9), se disminuye la potencia de cada una de las cargas, pero se mantiene el tiempo de uso de ellas.

Tabla 9

Cuadro de Cargas en consumo energético bajo para una vivienda en la comunidad de La Plata.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	2	0,06	0,12	2	0,24
Televisor	1	0,1	0,1	1	0,1
Refrigeración*	1	0,2	0,2	2	0,4
Totales		0,36	0,42	5	0,74
Potencia total consumida por familia (kW)					0,42
Consumo energético bajo total vivienda (kWh/día)					0,74
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					22,2

5.1.2 Jardines de Sucumbíos, Ipiales – Nariño

Jardines de Sucumbíos en Ipiales, es el corregimiento más lejano de este municipio y se encuentra ubicado en los límites con el departamento de Putumayo; alrededor de siete mil (7.0000) habitantes hacen parte del corregimiento (Radio Ipiales Caracol, 2013). La zona cuenta con trece (13) veredas como: Alto de Amarradero, Argentina, Brisas del Gavilán, Brisas del Rumiyaco, El empalme, Fronteras de Amarradero, Jardines de Sucumbíos, La Playa, Libertad, Paraíso de Sapoyaco,

Ranchería, San José de los Pinos y Santa Lucía; se caracterizan principalmente por tener cultivos de arroz, plátano, maíz y pimienta, con el fin de su sustento diario. De lo anterior y para el respectivo estudio de los diferentes consumos energéticos, se selecciona la comunidad dada por el grupo de investigación denominada “Brisas del Rumiyaco, en donde el número total de viviendas es de 51.

5.1.2.1 Caso de estudio No. 2: Comunidad Vereda Brisas del Rumiyaco

Según INGELEC S.A.S.(s. f.) citado por Gaviria Cataño y Gómez Leal (2018, p. 64), establece que “para la energización de cada una de las viviendas en la vereda Brisas del Rumiyaco, se proyecta un consumo de 1kVA determinado para cargas de 1 televisor, 1 equipo de sonido, 1 nevera y 5 bombillos”. Considerando lo anterior y el consumo de cada vivienda en el mes $\left(37.69 \frac{kWh}{mes}\right)$, se realiza el respectivo cuadro de cargas para diferentes consumos energéticos (alto, medio y bajo). Por otro lado, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en su atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia determina que la radiación solar global en la zona tiene un promedio de entre 3.0 y 3.5 kWh/m²/día (IDEAM, s. f.)

- Consumo energético alto.

La tabla 10, representa el cuadro de cargas para un consumo energético alto en una vivienda para la zona de la vereda Brisas del Rumiyaco en Jardines de Sucumbíos.

Tabla 10

Cuadro de cargas para el consumo energético alto en la comunidad – Vereda Brisas del Rumiyaco.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	1	0,2
Iluminación	5	0,1	0,5	1	0,5
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	1	0,1
Refrigeración	1	0,2	0,2	1	0,2
Totales		0,6	1	4	1
Potencia total consumida por familia (kW)					1
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)					1
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					30

- Consumo energético medio.

En el consumo energético medio en una vivienda de la comunidad, se obtienen las mismas cargas, televisor, iluminación, equipo de sonido y nevera, con la misma cantidad que el consumo alto, sin embargo, se modifica la potencia de los puntos de iluminación, considerando bombillos ahorradores, y televisor, lo anterior se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11

Cuadro de Cargas del consumo energético medio en la comunidad – Vereda Brisas del Rumiaco.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,1	0,1	1	0,1
Iluminación	5	0,06	0,3	1	0,3
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	1	0,1
Refrigeración	1	0,2	0,2	1	0,2
Totales		0,46	0,7	4	0,7
Potencia total consumida por familia (W)					0,7
Consumo energético medio total vivienda (kWh/día)					0,7
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					21

- Consumo energético bajo.

Se modifica el consumo energético (tabla 12), teniendo el mismo parámetro de la tabla anterior (11) en cuanto a la iluminación, es decir, bombillos ahorradores, pero con menos puntos, además, se establece una nevera de menor potencia.

Tabla 12

Cuadro de cargas en consumo energético bajo para la comunidad – Vereda Brisas del Rumiayaco.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,1	0,1	1	0,1
Iluminación	4	0,06	0,24	1	0,24
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	1	0,1
Refrigeración	1	0,1	0,1	1	0,1
Totales		0,36	0,54	4	0,54
Potencia total consumida por familia (W)					0,54
Consumo energético bajo total vivienda (Wh/día)					0,54
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					16,2

5.1.3 Puerto Toledo, Puerto Rico – Meta

5.1.3.1 Caso de estudio No. 3: Comunidad Puerto Toledo

Puerto Toledo, es una comunidad perteneciente al municipio de Puerto Rico – Meta, la cual cuenta con una planta de energía que funciona con combustible Diésel, brindando cuatro (4) horas de energía al día a la comunidad. En esta zona, se encuentra un total de 220 viviendas, donde el consumo mensual por vivienda según el Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonia Colombiana (SIAT - AC, s. f.) citado por Gaviria Cataño y Gómez Leal (2018, p. 70), es de $5.03 \frac{kWh}{mes}$. No obstante, en el estudio de los diferentes escenarios en la comunidad será para consumos altos, considerando un valor menor o igual al dado por el SIAT – AC, y un consumo bajo.

De acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, en su atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia determina que la radiación solar global en el departamento del Meta, considerando la ubicación de la localidad Puerto Toledo, tiene un promedio de entre 4.0 y 4.5 kWh/m²/día (IDEAM, s. f.)

- Consumo energético alto.

La tabla 13, representa el cuadro de cargas para un consumo energético alto en una vivienda para la zona de Puerto Toledo, Puerto Rico – Meta.

Tabla 13

Cuadro de cargas para consumo energético alto en la comunidad de Puerto Toledo.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,01	0,03	1	0,03
Refrigeración	1	0,1	0,1	1	0,1
Otro	1	0,01	0,01	2	0,02
Totales		0,12	0,14	4	0,15
Potencia total consumida por familia (kW)					0,14
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)					0,15
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					4,5

- Consumo energético bajo.

En comparación al consumo energético alto, la cantidad de iluminación (bombillos) se disminuye, así como del tiempo utilizado de “otra” carga la cual puede ser un cargador de móvil, entre otros, con el fin de tener una energía consumida total en la vivienda, menor, tal y como se indica en la tabla 14.

Tabla 14

Cuadro de cargas en consumo energético bajo para zona de Puerto Toledo.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	2	0,01	0,02	1	0,02
Refrigeración	1	0,1	0,1	1	0,1
Otro	1	0,01	0,01	1	0,01
Totales		0,12	0,13	3	0,13
Potencia total consumida por familia (W)					0,13
Consumo energético bajo total vivienda (Wh/día)					0,13
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					3,9

5.1.4 Nazareth, Uribí – La Guajira

5.1.4.1 Caso de estudio No. 4: Comunidad Nazareth

Nazareth es un corregimiento ubicada en la alta Guajira, en el parque Nacional Macuira. Cuenta con muy pocas horas de luz al día, entre cinco de la tarde y diez de la noche, es decir, cuentan con solo cinco (5) horas para el uso de aparatos

eléctricos, provenientes de una planta eléctrica que funciona con ACPM. La población habitante en este corregimiento es en su mayoría pertenecientes a la comunidad indígena (etnia Wayuu) (EL HERALDO, 2013).

Según el IPSE (s.f.), en el corregimiento de Nazareth se encuentra una “totalidad de 143 viviendas”, donde el consumo de energía mensual por comunidad es de $27.2 \frac{kWh}{mes}$ (Gaviria Cataño & Gómez Leal, 2018, p. 67).

- Consumo energético alto

En el siguiente cuadro de cargas (tabla 15), se observa el alto consumo energético que puede tener una vivienda en la comunidad de Nazareth en la Guajira. Las cargas, están determinadas para cumplir un consumo menor o igual al establecido anteriormente.

Tabla 15

Cuadro de cargas en el consumo energético alto para el corregimiento de Nazareth.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	4	0,1	0,4	1	0,4
Televisor	1	0,1	0,1	2	0,2
Refrigeración	1	0,2	0,2	1	0,2
Otro	1	0,1	0,1	1	0,1
Totales		0,5	0,8	5	0,9
Potencia total consumida por familia (kW)					0,8
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)					0,9
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					27

- Consumo energético medio.

En el consumo energético medio (tabla 16), se mantienen las mismas cargas, pero disminuyendo puntos de iluminación, así como también, la potencia de estos y el electrodoméstico (nevera). Se conservan las horas de operación para cada carga.

Tabla 16

Cuadro de cargas para el consumo energético medio en una vivienda del corregimiento de Nazareth.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,06	0,18	1	0,18
Televisor	1	0,1	0,1	1	0,1
Refrigeración	1	0,1	0,1	2	0,2
Otro	1	0,1	0,1	1	0,1
Totales		0,36	0,48	5	0,58
Potencia total consumida por familia (W)					0,48
Consumo energético medio total vivienda (Wh/día)					0,58
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					17,4

- Consumo energético bajo.

Por último, se modifica la potencia (tabla 17) de las cargas denominado como “otro”, en donde pueden ser aparatos electrónicos como, cargadores de celular, radio – equipo de sonido, entre otros. Al mismo tiempo, se hace un cambio en bombillos por ahorradores fluorescente.

Tabla 17

Cuadro de cargas en el consumo bajo para el corregimiento de Nazareth en una vivienda.

Cargas	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,02	0,06	1	0,06
Televisor	1	0,1	0,1	1	0,1
Nevera	1	0,1	0,1	2	0,2
Otro	1	0,01	0,01	1	0,01
Totales		0,23	0,27	5	0,37
Potencia total consumida por familia (W)					0,27
Consumo energético bajo total vivienda (Wh/día)					0,37
Energía consumida total vivienda (kWh/mes)					11,1

5.1.5 Resumen consumos energéticos y recurso solar por comunidad.

Mediante la siguiente tabla 18, se muestra el consumo energético total, es decir, alto, medio y bajo, de una vivienda por comunidad. Además, se determina la

radiación solar de cada una de las localidades, con el fin de poder realizar la simulación de sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento, en el software HOMER. Es importante mencionar también que, los cuadros de cargas son simulaciones de diferentes cargas que pueden encontrarse en cada hogar, estableciendo que el consumo de energía en cada vivienda es diferente.

Tabla 18

Caracterización del consumo de energía y recurso energético solar (radiación solar) por vivienda al mes.

Comunidad	Radiación Solar	Consumo vivienda	Consumo energético alto	Consumo energético medio	Consumo energético bajo
	(kWh/m²/día)	(kWh/mes)	(kWh/mes)	(kWh/mes)	(kWh/mes)
La Plata	3,23	65,4	63	39	22,2
Vereda Brisas de Rumiayaco	3,0 - 3,5	37,69	30	21	16,2
Nazareth	5,0 - 5,5	27,2	27	17,4	11,1
Puerto Toledo	4,0 - 4,5	5,03	4,5		3,9

5.2 MICRORRED DE LABORATORIO

En cuanto a la microrred de laboratorio se puede decir que, es una microrred que se compone de diferentes emuladores de energías renovables de las cuales se pueden encontrar, la energía solar, hidráulica, eólica y energía de la biomasa. Sin embargo, la microrred no solo se compone de fuentes no convencionales de energía, sino también, de energías convencionales como el combustible diésel. Todas las energías mencionadas anteriormente, pueden ser encontradas en las diferentes comunidades que se han establecido como casos de estudios en el anterior apartado, no obstante, solo se da importancia a la energía solar fotovoltaica y baterías como fuente de almacenamiento de esta. Esta microrred para laboratorio se diseñará y simulara en la herramienta computacional PowerWorld considerando todos los elementos que la componen, tales como, datos de los generadores de fuente de energía, cargas, transformador, red principal, líneas de distribución, los cuales, son parámetros importantes al momento de desarrollar y analizar flujos de potencia.

Por su parte, la microrred de laboratorio implementada en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente en el laboratorio de Microrredes Eléctricas, planta baja (sótano 2), tiene un esquema inicial como el que se presenta en la figura

4. No obstante, el diseño que se establecerá para el estudio de flujos de potencia será totalmente diferente al de la inicial.

Otro rasgo importante de la microrred es la capacidad (potencia) por fuente energía convencional y no convencional, así como, el de almacenamiento; la tabla 19, indica a manera de datos, nivel de potencia de cada uno de los generadores que la componen.

Tabla 19

Datos de generadores en la microrred de laboratorio.

Eólica	Diésel	Biomasa	Hídrica	Solar	Baterías (Almacenamiento)
4 kW	6,4 kW	4 kW	4 kW	4 kW	5,4 kWh

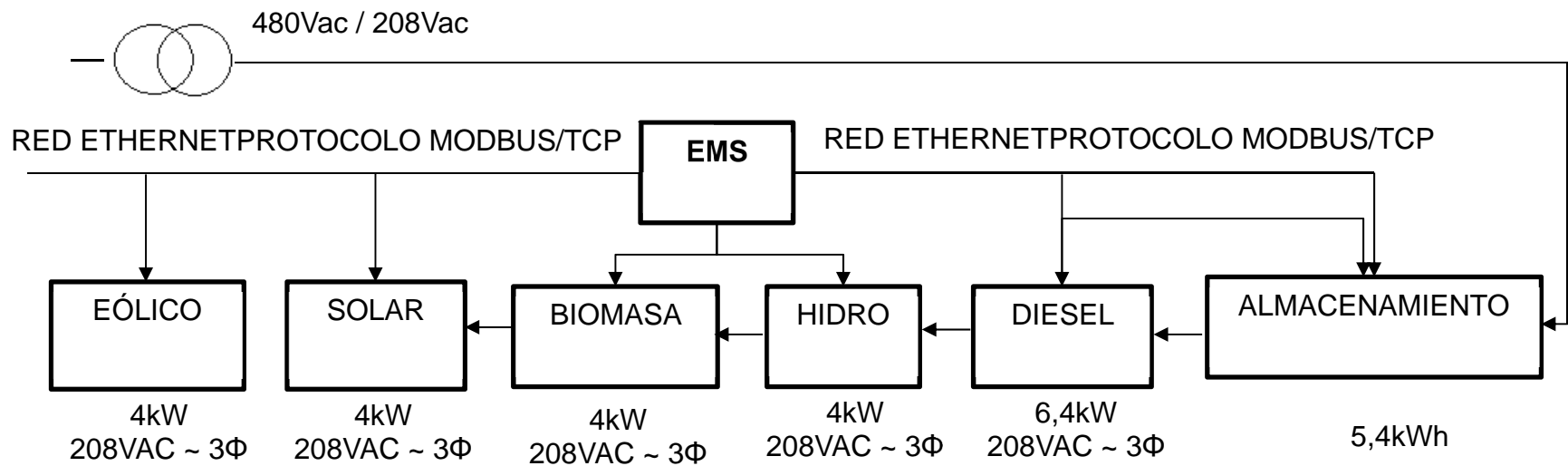


Figura 4. Esquema de la microrred para laboratorio.

Tomado del Programa de Investigación “Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para Zonas no Interconectadas de Colombia” (p.89), por L. Yuri, C. Héctor y P. Johnny.

6. SIMULACIONES Y RESULTADOS

La herramienta computacional **Optimización híbrida de múltiples recursos energéticos** (HOMER, por sus siglas en inglés) es un software que puede resultar útil a la hora de diseñar sistemas o proyectos que integren energías renovables, las cuales son fundamentales al momento del planteamiento de microrredes eléctricas en zonas que se encuentran aisladas del Sistema Interconectado de Potencia, las denominadas ZNI (Zonas no Interconectadas). Para el diseño y expansión de sistemas de potencia como las microrredes eléctricas, es necesario el desarrollo de estudios que permitan establecer las condiciones en las que se encuentra el sistema, es por eso que se utilizan diferentes tipos de análisis como: análisis de fallas de cortocircuito, estudios de estabilidad (transitorio y estado estable), despacho económico, entre otros, no obstante, una de las herramientas más importantes que involucra análisis numérico y que es la base fundamental en sistemas de potencia es el flujo de carga o flujo de potencia como comúnmente es llamado. De acuerdo con lo anterior, y para la obtención de resultados en cuanto a flujos de potencia en una microrred eléctrica, se hace uso del software PowerWorld.

En este capítulo, se indican todas aquellas simulaciones realizadas en el software HOMER teniendo en cuenta las localidades de Zonas no Interconectadas identificadas en el capítulo anterior “Identificación de las ZNI y microrred de laboratorio”, sin embargo, y como se ha dicho en diferentes ocasiones en el presente documento, la energía solar será la fuente no convencional primaria a evaluar. Se establecerán elementos importantes para la construcción del sistema de potencia tales como, módulos fotovoltaicos, baterías e inversores, considerando que son sistemas autónomos. Por su parte, en la microrred eléctrica para laboratorio se observarán diferentes fuentes convencionales y no convencionales de energía ya establecidas en el apartado anterior “Microrred de laboratorio”, donde se determinaron todos aquellos aspectos y elementos que componen la microrred. El software PowerWorld realizará el análisis numérico por medio del método Newton – Raphson y permitirá visualizar resultados de potencias aparentes, activas y reactivas en cada generador, así como, la matriz de admitancia (Y_{bus}), y matriz jacobiana del flujo de potencia.

6.1 SIMULACIÓN SFV Y BATERÍAS EN ZNI (HOMER)

Una de las características más fundamentales para tener en cuenta en la simulación de sistemas de potencia aislados, son los datos respectivos del consumo de energía residencial en el día. Es por esto que, para un análisis más profundo, se crearán tres diferentes escenarios de demanda energética, alto, medio y bajo, en base a las consideraciones del consumo de carga simulada indicados en la tabla 20.

Tabla 20***Caracterización del consumo de energía por vivienda en el día.***

Comunidad	Consumo vivienda	Consumo energético alto	Consumo energético medio	Consumo energético bajo
	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)
La Plata	2,18	2,1	1,3	0,74
Vereda Brisas de Rumiyaco	1,26	1	0,7	0,54
Nazareth	0,91	0,9	0,58	0,37
Puerto Toledo	0,17	0,15		0,13

De igual manera, se presenta el consumo energético por comunidad en el día y al mes (tabla 21), considerando el número total de viviendas y treinta días (30), respectivamente. En cuanto al consumo de la comunidad en kWh/día se puede decir que, es el resultado del consumo de una vivienda al día (tabla 20) por el número de viviendas por comunidad.

Tabla 21***Caracterización del consumo energético de comunidades.***

Comunidad	Número de viviendas por comunidad	Consumo comunidad	Consumo comunidad
		(kWh/día)	(kWh/mes)
La Plata	70	152,6	4578,00
Vereda Brisas de Rumiyaco	51	64,26	1927,8
Nazareth	143	130,13	3903,90
Puerto Toledo	220	37,4	1122

Simultáneamente, para la simulación de los sistemas solares fotovoltaicos y baterías, es necesario tener presente el capital (\$), remplazo (\$), y operación y mantenimiento (\$/año) de todos los equipos que se utilicen, ya sean módulos fotovoltaicos, inversores y baterías o de otras fuentes de generación de energía como, energía hidráulica, eólica, generadores diésel, entre otras, con el fin de estimar un costo total del ciclo de vida del proyecto que permita a la herramienta computacional HOMER establecer entre muchas opciones el mejor diseño a implementar.

A continuación, se presenta la simulación de los sistemas solares fotovoltaicos y baterías de cada vivienda por consumo.

6.1.1 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en La Plata

Cabe mencionar que antes de proceder con la simulación de los sistemas de potencia, es importante establecer datos acerca del Recurso de Irradiación Global Solar – GHI por sus siglas en inglés. HOMER, permite descargar esta información de la base de datos de meteorología de superficie y energía solar de la NASA

En la figura 5 se presenta el perfil diario de los sistemas para consumo alto, medio y bajo de una vivienda en la Plata, de acuerdo con la carga (kW) utilizada en las veinticuatro (24) horas del día.

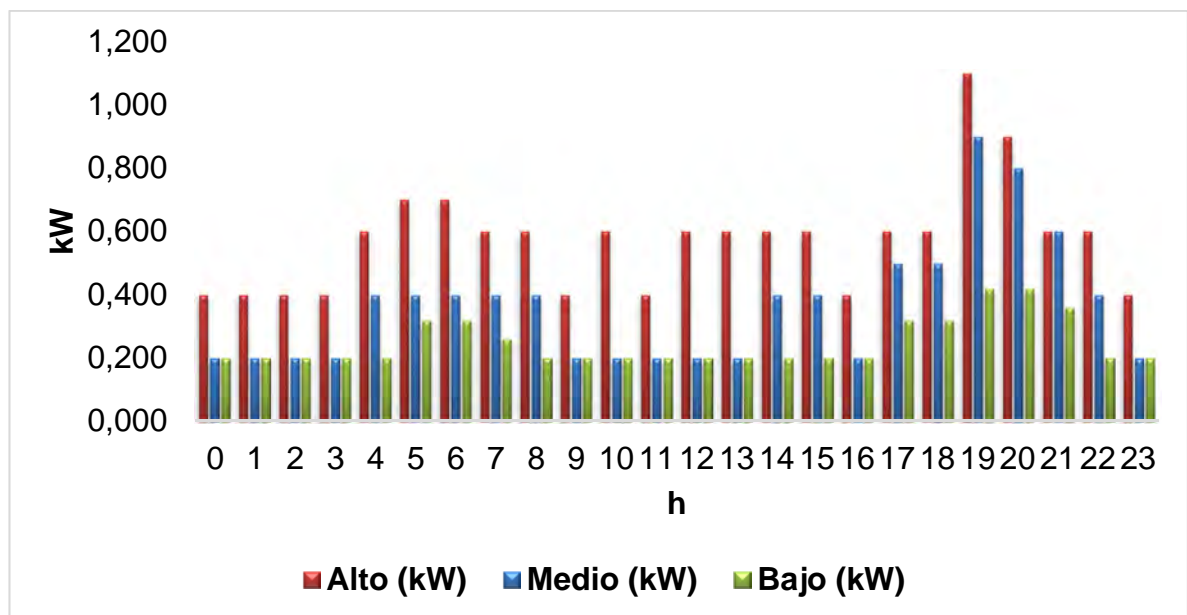


Figura 5. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.

Consumo energético alto, medio y bajo para viviendas en la Comunidad de la Plata.

Los esquemas de los sistemas de potencia se presentan en la figura 6. Por su parte, en la tabla 22 y 23 se obtienen datos como el capital, costo de remplazo, operación y mantenimiento, para cada uno de los equipos, así como, el costo de energía, costo de operación y consumos eléctricos de las microrredes.

Nota: Todos los valores se dan en dólares (US Dollar (\$)), teniendo en cuenta que pueden ser elementos importados.

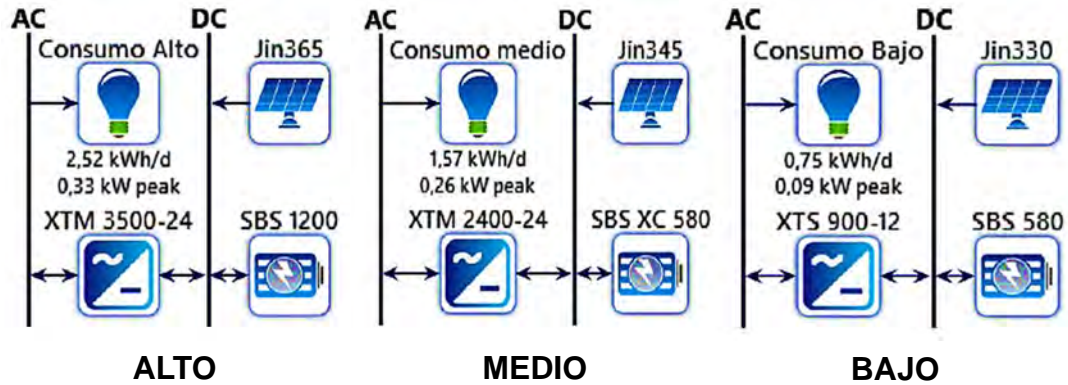


Figura 6. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo – La Plata.

Diseño de los sistemas de potencia en consumo energético alto, medio y bajo con sus respectivos elementos (módulos, inversor y baterías) para una vivienda en la comunidad de La Plata. Tomado de HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 22

Costo total de los sistemas para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.

Capital Dólar (\$)	Reemplazo Dólar (\$)	O&M Dólar (\$)	Valor restante Dólar (\$)	Total, Dólar (\$)	COE Dólar (\$)	Costo operacional Dólar (\$)
Alto						
\$3.513,00	\$1.205,00	\$2.074,00	-\$ 179,79	\$6.612,00	\$0,52	\$224,00
Medio						
\$3.002,00	\$1.105,00	\$2.005,00	-\$ 181,39	\$5.930,61	\$0,75	\$212,00
Bajo						
\$1.801,00	\$682,05	\$1.867,00	-\$ 102,15	\$4.248,00	\$1,12	\$177,00

Nota: Los valores negativos, según HOMER, es el valor restante en un componente del sistema de energía al final de la vida del proyecto. Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 23

Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – La Plata.

	Alto		Medio		Bajo	
	Producción					
Ítem	kWh/año	%	kWh/año	%	kWh/año	%
PV	1042	100	656	100	314	100
Total	1042	100	656	100	314	100
	Consumo					
AC Carga Primaria	919	100	575	100	273	100
DC Carga Primaria	0	0	0	0	0	0
Total	919	100	575	100	273	100
	Cantidad					
Exceso de electricidad	71,6	6,87	47,5	7,24	23,9	7,62
Capacidad de almacenamiento	0	0	0	0	0	0
Fracción renovable		100		100		100

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

6.1.2 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Vereda Brisas de Rumiyaço

En la figura 7 se presenta el perfil diario de los sistemas para los consumos energéticos estudiados en una vivienda de la comunidad Vereda Brisas de Rumiyaço en Jardines de Sucumbíos. Simultáneamente, el diseño de las microrredes para esta comunidad se indica en la figura 8. Por otro lado, la tabla 24 y 25 dan información acerca del costo total del sistema y parámetros eléctricos.

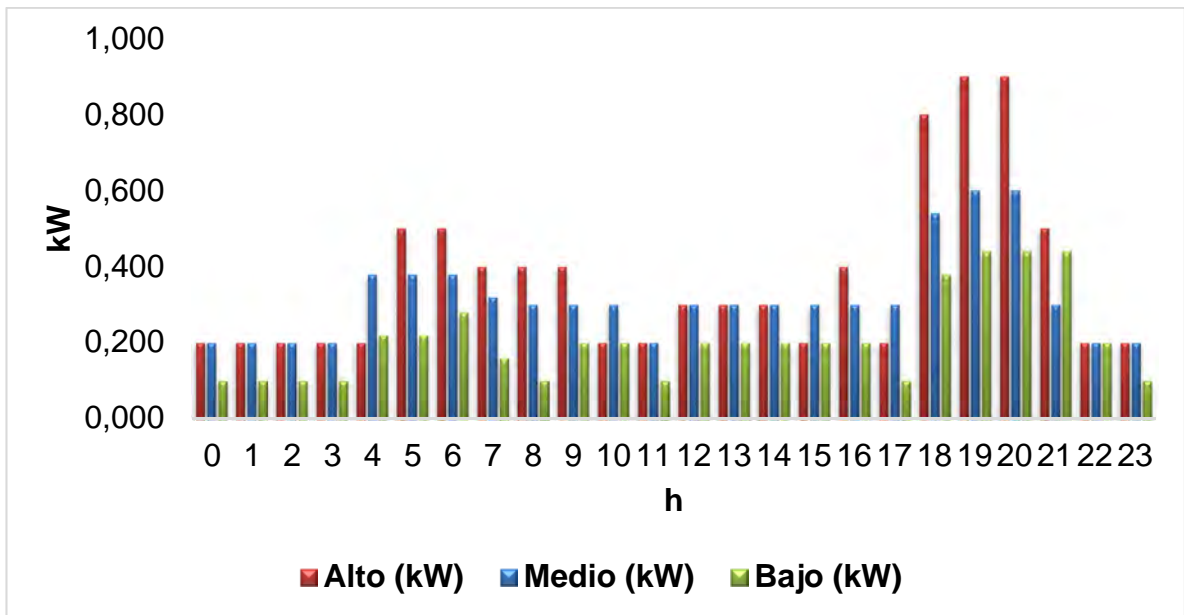


Figura 7. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiayaco.

Consumo energético alto, medio y bajo para viviendas en la Comunidad Vereda Brisas de Rumiayaco.

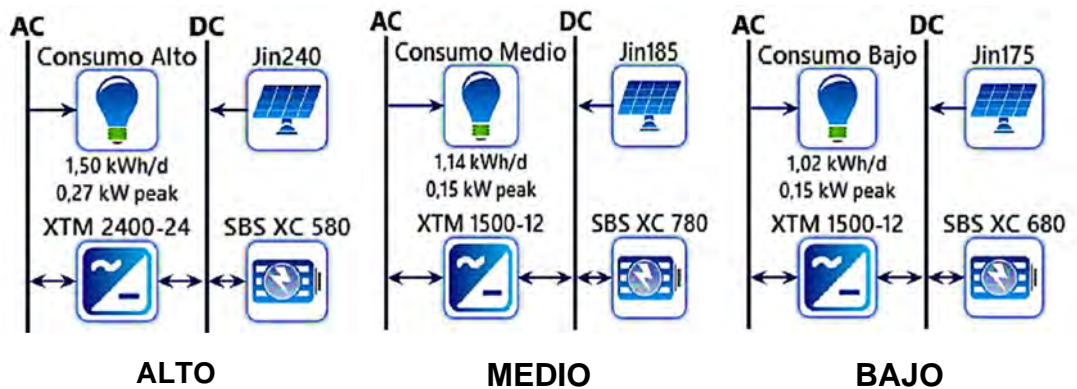


Figura 8. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo –Vereda Brisas de Rumiayaco.

Diseño de los sistemas de potencia en consumo energético alto, medio y bajo con sus respectivos elementos (módulos, inversor y baterías) para una vivienda en la comunidad de Vereda Brisas de Rumiayaco. Tomado de HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 24

Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiyo.

Capital Dólar (\$)	Reemplazo Dólar (\$)	O&M Dólar (\$)	Valor restante Dólar (\$)	Total, Dólar (\$)	COE Dólar (\$)	Costo operacional Dólar (\$)
Alto						
\$3.001,00	\$1.105,00	\$2.005,00	-\$ 181,00	\$ 5.930,00	\$0,79	\$212,00
Medio						
\$3.006,00	\$1.210,00	\$1.936,00	-\$ 190,00	\$5.962,00	\$1,04	\$214,00
Bajo						
\$3.006,00	\$1.210,00	\$1.936,00	-\$ 190,00	\$5.962,00	\$1,15	\$214,00

Nota: Los valores negativos, según HOMER, es el valor restante en un componente del sistema de energía al final de la vida del proyecto. Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 25

Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – Vereda Brisas de Rumiyo.

	Alto		Medio		Bajo	
Producción						
Ítem	kWh/año	%	kWh/año	%	kWh/año	%
PV	603	100	464	100	436	100
Total	603	100	464	100	436	100
Consumo						
AC Carga Primaria	548	100	416	100	374	100
DC Carga Primaria	0	0	0	0	0	0
Total	548	100	416	100	374	100
Cantidad						
Exceso de electricidad	26,4	4,37	20,5	4,42	36,9	8,46
Capacidad de almacenamiento	0	0	0	0	0	0
Fracción renovable		100		100		100

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

6.1.3 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Nazareth

En la figura 9 se muestra el perfil diario de los sistemas para los consumos altos, medios y bajos de viviendas de la comunidad Nazareth. Al mismo tiempo, el diseño establecido en la herramienta computacional HOMER se indica en la figura 10; el costo total y parámetros eléctricos de estas microrredes se presentan en las tablas 26 y 27, respectivamente.

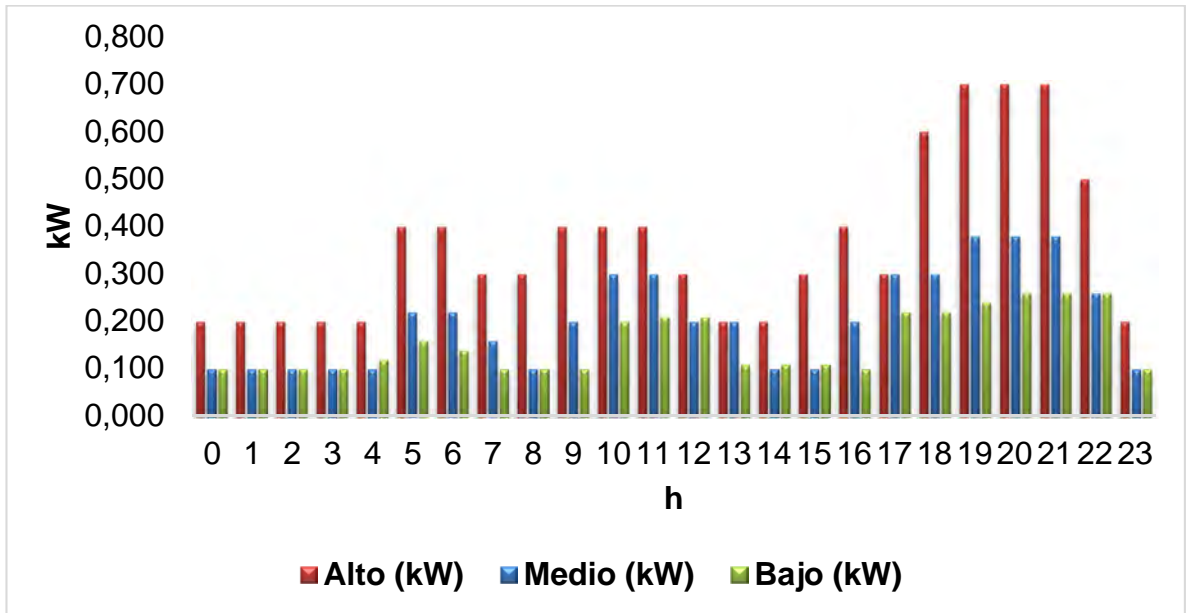


Figura 9. Perfil diario en consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth

Consumo energético alto, medio y bajo para viviendas en la Comunidad Nazareth.

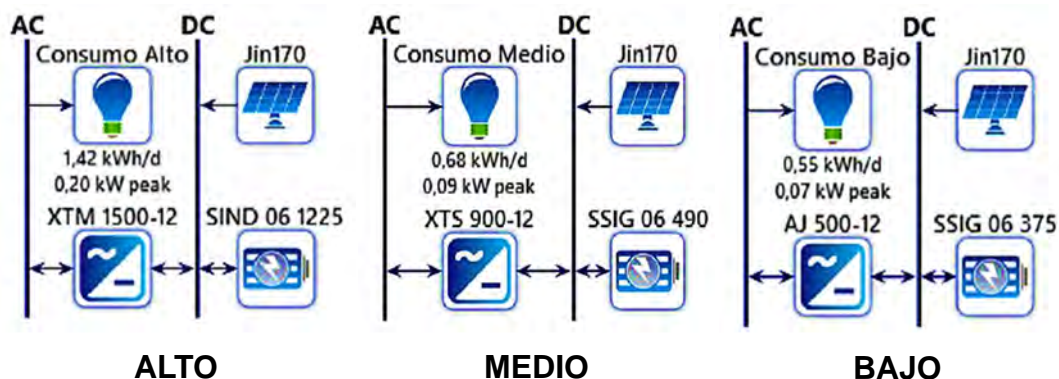


Figura 10. Esquemas microrredes consumo alto, medio y bajo –Nazareth.

Diseño de los sistemas de potencia en consumo energético alto, medio y bajo con sus respectivos elementos (módulos, inversor y baterías) para una vivienda en la comunidad de Nazareth. Tomado de HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 26

Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth.

Capital Dólar (\$)	Reemplazo Dólar (\$)	O&M Dólar (\$)	Valor restante Dólar (\$)	Total, Dólar (\$)	COE Dólar (\$)	Costo operacional Dólar (\$)
Alto						
\$3.302,00	\$1.126,00	\$2.005,00	-\$ 185,97	\$6.247,03	\$0,87	\$213,00
Medio						
\$2.097,00	\$690,00	\$1.936,00	-\$ 123,40	\$4.599,60	\$1,33	\$181,00
Bajo						
\$1.445,00	\$376,00	\$1.936,00	-\$ 76,00	\$3.681,00	\$1,33	\$162,00

Nota: Los valores negativos, según HOMER, es el valor restante en un componente del sistema de energía al final de la vida del proyecto. Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 27

Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo – Nazareth.

	Alto		Medio		Bajo	
	Producción					
Ítem	kWh/año	%	kWh/año	%	kWh/año	%
PV	628	100	314	100	314	100
Total	628	100	314	100	314	100
	Consumo					
AC Carga Primaria	518	100	249	100	201	100
DC Carga Primaria	0	0	0	0	0	0
Total	518	100	249	100	201	100
	Cantidad					
Exceso de electricidad	12,3	1,96	14,3	4,55	71,8	22,9
Capacidad de almacenamiento	0	0	0	0	0	0
Fracción renovable		100		100		100

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

6.1.4 Sistema Solar Fotovoltaico y baterías en Puerto Toledo

Un esquema de los perfiles de carga para cada uno de los consumos energéticos estudiados anteriormente se ilustra en la figura 11, sin embargo, no se realiza simulación de un sistema solar fotovoltaico en consumo energético medio debido a que, la demanda energética en esta comunidad es baja. De igual modo, la figura 12 representa el diseño realizado de las microrredes, el costo total y parámetros de los sistemas se puede observar en las tablas 28 y 29, respectivamente.

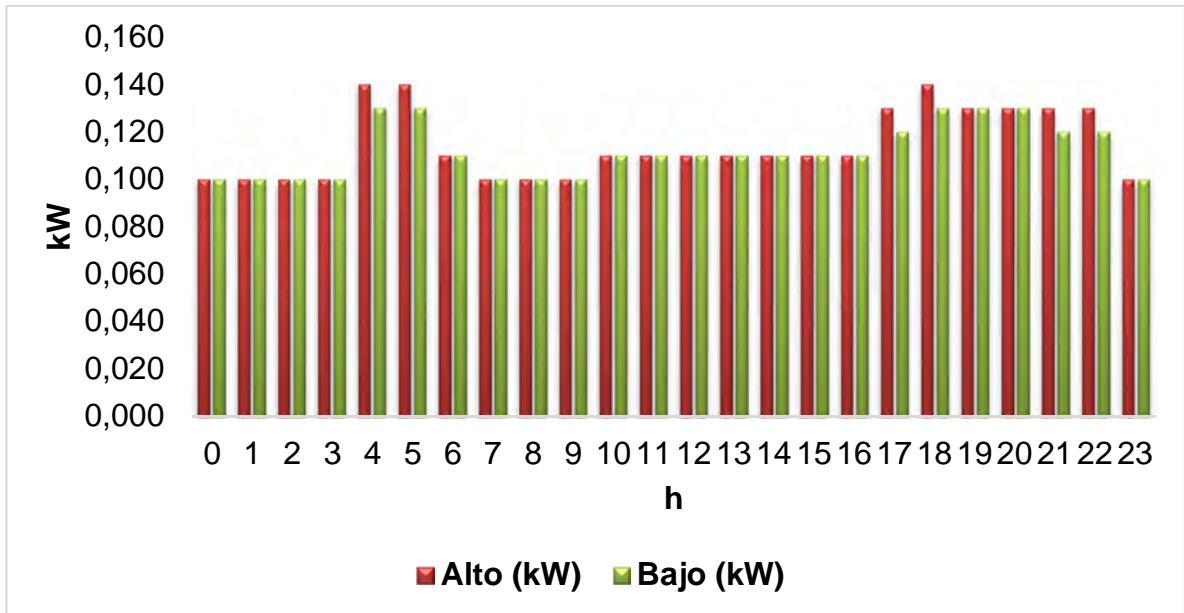


Figura 11. Perfil diario en consumo alto y bajo - Puerto Toledo.

Consumo energético alto y bajo para una vivienda de la comunidad de Puerto Toledo - Puerto Rico – Meta.

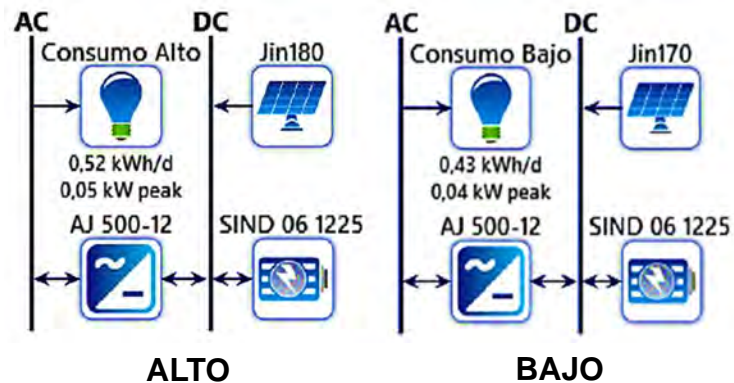


Figura 12. Esquemas microrredes consumo alto y bajo – Puerto Toledo.

Diseño de los sistemas de potencia en consumo energético alto y bajo con sus respectivos elementos (módulos, inversor y baterías) para una vivienda en la comunidad de Puerto Toledo. Tomado de HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 28

Costo total de los Sistema para viviendas en consumo energético alto y bajo – Puerto Toledo.

Capital Dólar (\$)	Reemplazo Dólar (\$)	O&M Dólar (\$)	Valor restante Dólar (\$)	Total, Dólar (\$)	COE Dólar (\$)	Costo operacional Dólar (\$)
Alto						
\$1.443,00	\$319,00	\$1.936,00	-\$ 81,00	\$3.617,00	\$1,38	\$157,00
Bajo						
\$1.442,00	\$319,00	\$1.936,00	-\$ 82,00	\$3.615,00	\$1,68	\$157,00

Nota: Los valores negativos, según HOMER, es el valor restante en un componente del sistema de energía al final de la vida del proyecto. Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Tabla 29

Parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto y bajo – Puerto Toledo.

	Alto		Bajo	
Producción				
Ítem	kWh/año	%	kWh/año	%
PV	231	100	221	100
Total	231	100	221	100
Consumo				
AC Carga Primaria	190	100	155	100
DC Carga Primaria	0	0	0	0
Total	190	100	155	100
Cantidad				
Exceso de electricidad	7,3	3,16	30	13,6
Capacidad de almacenamiento	0	0	0	0
Fracción Renovable		100		100

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

6.1.5 Contextualización de sistemas solares fotovoltaicos en zonas no interconectadas.

Mediante la tabla 30, se pueden determinar los diferentes consumos energéticos estudiados para cada comunidad, así como los realizados en la herramienta computacional HOMER Pro. Los datos obtenidos por el software definen el consumo que puede tener cada vivienda de acuerdo con los diferentes perfiles de carga desarrollados en el presente capítulo, pues así, se dimensionara el sistema solar fotovoltaico autónomo correspondiente que supla de energía eléctrica a la vivienda las veinticuatro (24) horas del día, no obstante, para establecer el sistema de potencia que supla dicha carga se deben tener presente ciertas consideraciones previas antes de llevar a cabo el dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red y/o autónomas.

Tabla 30

Consumos energéticos simulados en la herramienta computacional HOMER.

Comunidad	Consumo alto	HOMER	Consumo medio	HOMER	Consumo bajo	HOMER
	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)	(kWh/día)
La Plata	2,1	2,52	1,3	1,57	0,74	0,75
Vereda Brisas de Rumiyaco	1	1,50	0,7	1,14	0,54	1,02
Nazareth	0,9	1,42	0,58	0,68	0,37	0,55
Puerto Toledo	0,15	0,52			0,13	0,43

Entre los conceptos fundamentales para una correcta instalación fotovoltaica se encuentran: el número de horas de sol pico o HPS, el cual, se obtiene por medio de la irradiación del lugar de instalación (medido en Wh/m^2), y la potencia instantánea por unidad de superficie, es decir, $1000 W/m^2$. Es importante mencionar que, el dato de irradiación, así como el de temperatura, es obtenido por medio del software HOMER Pro una vez se ingresa el sitio de instalación. Otros de los aspectos importantes para tener en cuenta son: la estimación de consumo, cargas en corriente alterna (AC), número de módulos necesarios para suplir la carga, dimensionado del sistema de almacenamiento (baterías) y potencia del inversor. Después de realizado el diseño de sistemas de generación fotovoltaica, autónomos para este caso, la variable primordial a tener presente es el costo nivelado de energía (COE para HOMER Pro), debido a que es una herramienta útil que permite tener un conocimiento de una de las variables más importantes de un proyecto de energía, puesto que, permite comparar diferentes tecnologías de energías como la solar, eólica, hídrica, entre muchas opciones, incluso entre ellas mismas, y siempre teniendo en cuenta la vida útil del proyecto, por lo que se consideró veinticinco (25)

años a los sistemas solares fotovoltaicos autónomos de todas las regiones estudiadas. Este costo se mide en kilowatt – hora (\$/kWh) y resulta ser básico en el estudio de diferentes posibilidades de reducción de costos en sistemas de grande y pequeña generación de energía eléctrica. Por su parte, HOMER Pro, realiza de manera automática el costo nivelado de electricidad, utilizando el costo total anualizado del sistema – C_{TA} (\$/año) – y la carga eléctrica total generada al año – C_{ET} (kWh/año). La ecuación 5, determina el cálculo final para el costo energético nivelado.

$$COE = \frac{C_{TA} (\$/año)}{C_{ET} (kWh/año)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Al mismo tiempo, para el desarrollo del cálculo del costo nivelado de electricidad de cada uno de los diferentes sistemas diseñados, se hace uso de los costos totales anualizados indicados en la tabla 31, los cuales, son ofrecidos por la herramienta computacional HOMER, tanto en su interfaz, como en los reportes generados una vez se finalice el diseño del sistema. Por otro lado, los resultados de la carga eléctrica total generada al año (AC Carga Primaria), se pueden encontrar en las tablas “**parámetros eléctricos de los sistemas para consumo energético alto, medio y bajo**”, en donde también, se puede determinar la cantidad en porcentaje de la producción, consumo y cantidad de cada consumo energético (alto, medio y bajo) de donde resulta que, tanto la fuente convencional de energía (solar fotovoltaico) como el consumo de carga primaria AC y fracción renovable, suplirán el 100% de la energía demandada de cada escenario. A su vez, la fracción (%) del exceso de electricidad al año corresponde a la relación entre el exceso de electricidad total (kWh/año) y la producción eléctrica de la fuente de energía total del sistema (kWh/año).

Tabla 31

Costos totales anualizados de sistemas fotovoltaicos autónomos.

	Alto	Medio	Bajo
	(USD/año)		
La Plata	478,48	428,87	307,21
Vereda Brisas de Rumiyaco	428,86	431,12	431,15
Nazareth	451,79	332,64	266,18
Puerto Toledo	261,55		261,42

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por cada uno de los reportes de HOMER Pro Microgrid Analysis Tool.

Por su parte, el costo nivelado de energía de cada uno de los sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento encontrado en tablas denominadas como: **“costo total de los sistemas para viviendas en consumo energético alto, medio y bajo”** para las cuatro comunidades pertenecientes a Zonas no Interconectadas representa el mínimo valor en kWh al cual se puede vender la energía producida del sistema, a su vez, el costo energético incluye todos aquellos costos anualizados (dados en la tabla 31), de los cuales el costo de capital, costo de operación y mantenimiento, costo de reemplazo, etc., hacen parte. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la tasa de descuento real (ver anexo F), la cual, se obtiene a partir de ciertos factores de entrada como la tasa de descuento nominal y tasa de inflación esperada, por lo que se considera un 9% y 3,62%, respectivamente, para el cálculo de los costos anualizados. Se debe agregar que, los datos mencionados son asumidos de acuerdo con casos de análisis donde se comparan diferentes tecnologías como carbón, gas, diésel, solar, eólica e hidro para la generación de energía eléctrica y son ingresados en la interfaz de la herramienta computacional HOMER Pro. Ahora bien, en el anexo G se pueden observar gráficos que indican que, a mayor carga eléctrica total que se genere al año, menor será el costo nivelado de energía y viceversa; algo semejante ocurre con la capacidad instalada, puesto que a menor consumo energético se tenga, el costo normalizado, como también es llamado, aumenta. Lo anterior, permite comparar el costo de instalar y operar sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento en consumos energéticos altos, medios y bajos para cada una de las comunidades de las ZNI, como es el caso. Otro punto del análisis en cuanto al costo nivelado y que se puede tener presente en la evaluación de esta variable para el diseño y estudio futuro de sistemas con fuentes convencionales y no convencionales de energía integradas, es la tasa de descuento real ya mencionada, en donde, una tasa de descuento real baja, genera un LCOE menor.

Finalmente, el costo nivelado de electricidad, en conjunto con el exceso de electricidad, resultan esenciales al momento de seleccionar la mejor opción, es por esto que, el sistema solar fotovoltaico autónomo diseñado para el consumo energético alto en todas las comunidades, en comparación con el consumo medio y bajo, es la alternativa óptima a implementar en la microrred eléctrica considerando la potencia pico como carga en cada uno de los nodos del sistema.

6.2 SIMULACIÓN SFV Y BATERÍAS EN MICRORRED (POWERWORLD)

Para el análisis de flujo de potencia, la microrred de laboratorio es modelada a partir de un conjunto de siete nodos, conectados entre sí por medio de cinco líneas de transmisión y un transformador. Además, se cuenta con generadores que simulan las diferentes fuentes convencionales y no convencionales de energía, así como, un sistema de almacenamiento y la red principal. También, se cuenta con la

información sobre las cargas conectadas a los nodos del sistema, tal y como se observa en la figura 13. Para la simulación, se incluyó información total de la tensión nominal de cada uno de los nodos, líneas de transmisión (resistencias, reactancias, susceptancias y longitud), generadores (potencia activa y reactiva), transformador (capacidad, tensión primaria y secundaria, corriente nominal, grupo de conexión, entre otros), red principal (potencia aparente) y sistema de almacenamiento (potencia activa y reactiva). En cuanto a los nodos del sistema, es importante mencionar que, cada uno de ellos se clasifica en diferentes variables, es decir, nodos de carga, generación y referencia.

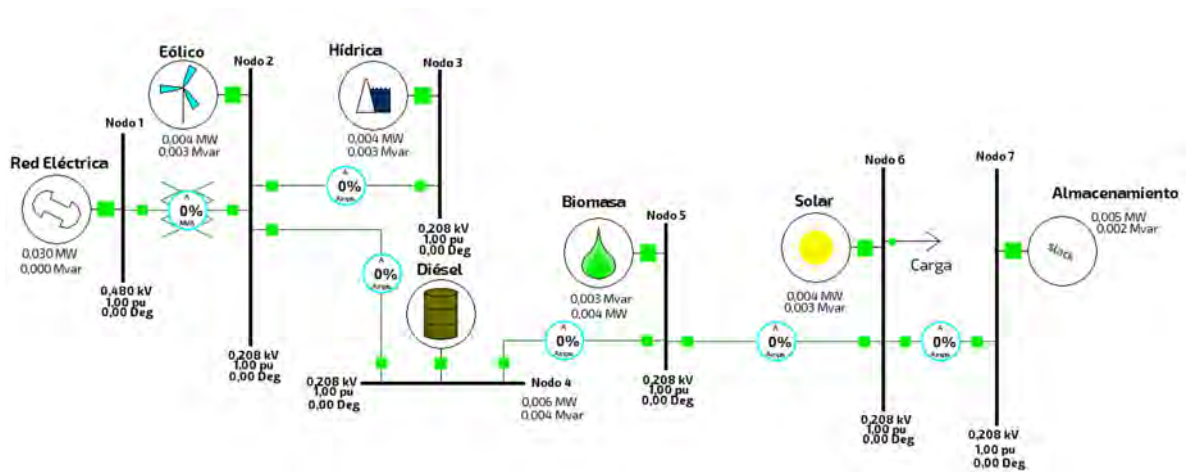


Figura 13. Microrred de laboratorio.

Diseño de la microrred de laboratorio con sus componentes; generadores, red principal, cargas, transformador, sistema de almacenamiento y líneas de transmisión. Elaboración propia en software PowerWorld.

En la tabla 32, se observa la clasificación de cada uno de los buses que compone el sistema, en donde los nodos 1, 4 y 7 se clasifican en nodo de referencia (Slack), puesto que, se asocian a barras grandes, entre otras palabras, cuentan con mayor generación de potencia activa en el sistema de potencia (tabla 33). Esta observación se relaciona también con el funcionamiento de la microrred, debido a que puede ser operada en dos modos distintos, conectada a la red principal y aislada de la misma; es por esto que, el generador diésel conectado al nodo 4, se comporta también como un nodo de referencia en caso de existir algún problema en la red principal.

Tabla 32***Clasificación de buses del sistema de potencia (microrred de laboratorio).***

Nombre	Tipo	Voltaje nominal (kV)
Nodo 1	Slack	0,480
Nodo 2	PQ	0,208
Nodo 3	PQ	0,208
Nodo 4	Slack	0,208
Nodo 5	PQ	0,208
Nodo 6	PQ	0,208
Nodo 7	Slack	0,208

Tabla 33***Parámetros para las fuentes y carga.***

Componente	Bus conectado	Potencia
Biomasa	Nodo 5	4 kW - 3kVar
Diésel	Nodo 4	6,4 kW - 4,80 kVar
Eólica	Nodo 2	4 kW - 3kVar
Hídrica	Nodo 3	4 kW - 3kVar
Red eléctrica	Nodo 1	30 kW
Sistema de almacenamiento	Nodo 7	5,4 kW - 2,62 kVar
Solar	Nodo 6	4 kW - 3kVar
Carga	Nodo 7	Variable

Ahora bien, en los sistemas eléctricos de potencia, las líneas de transmisión resultan ser uno de los componentes más indispensables al momento de diseñarlos, pues se encargan de transportar la potencia desde las centrales de generación, las cuales, en este caso son fuentes de generación convencionales y no convencionales de energía renovable, no obstante, para el diseño total del sistema de potencia, se torna importante establecer la longitud de la línea, debido a que, se pueden clasificar en líneas cortas, longitud menor a los 80 km, medias, entre 80 y 240 km, y largas, mayor a 240 km. En cuanto a la microrred eléctrica, se consideraron líneas de transmisión cortas de alrededor de 0,3 km (300 m) y 0,03 km (30 m), para la interconexión de 5 generadores (diésel – eólico – hídrico – diésel – biomasa – solar) y 2 generadores (solar – almacenamiento), respectivamente. Cabe resaltar que, en la microrred eléctrica de laboratorio, no se encuentran establecidas líneas de transmisión, por lo que se determinó una distancia corta dependiendo de la fuente de energía con la que cuente cada comunidad. Por el contrario, la distancia (no medida) entre el generador solar y el sistema de almacenamiento se delimita según sistemas solares fotovoltaicos autónomos instalados en viviendas de pequeñas dimensiones.

De igual modo, un aspecto fundamental al momento de dimensionar los conductores eléctricos o líneas de transmisión a implementar en una instalación eléctrica es el porcentaje de caída de tensión, denominado también por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) como, porcentaje de regulación, en donde, el valor máximo de caída de tensión es del 3%. Sin embargo, para obtener un dato correspondiente a este porcentaje, es necesario contar con información acerca de la corriente de carga, factor de potencia y de la impedancia eficaz de los conductores. Por lo cual, la ecuación 6 representa el porcentaje de caída de tensión.

$$\%Regulación = \frac{\Delta V}{V_r} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Por otra parte, la Norma técnica Colombiana - NTC 2050 (1998) en la nota 2 de la tabla 9 establece que,

La impedancia eficaz (Z_{ef}) se define como ($R \cos \theta + X \sin \theta$), siendo “ θ ”(theta) el ángulo del factor de potencia del circuito. Multiplicando la corriente por la impedancia eficaz se obtiene un valor bastante aproximado de la caída de tensión entre fase y neutro. Los valores de (Z_{ef}) de la tabla solo son válidos a factor de potencia de 0.85. Para cualquier otro factor de potencia, la (Z_{ef}) se calcula a partir de los valores de R y X_L dados en esa tabla, mediante la siguiente formula:

$$Z_{ef} = R \cos \theta + X_L \sin(\text{arcos } fp) \quad \text{Ecuación 7}$$

Considerando un factor de potencia de 0,9 en cada una de las cargas de los consumos energéticos altos diseñados en la herramienta computacional HOMER, y en vista de que la generación de potencia de cada fuente de energía renovable es de 4 kW, se establece que la carga debe ser menor o igual a la potencia que entrega cada componente. Por lo tanto, se limita una cantidad de viviendas para obtener una potencia cercana a la anteriormente dicha. Se debe agregar que, la herramienta computacional PowerWorld en algunos casos, requiere de unidades de potencia en MW/Mvar/MVA, por lo que se realiza la conversión de los resultados, teniendo en cuenta que 1 kW equivale a 0,001 MW. En la tabla 34, se observa la información correspondiente a la potencia activa y reactiva, y corriente de cada una de las cargas.

Tabla 34**Datos de potencia, factor de potencia y corriente de carga.**

Comunidad	No., de viviendas	Potencia activa (MW)	Factor de potencia	Corriente (A)
La Plata	12	0,00396	0,9	12,21
Vereda Brisas de Rumiayaco	14	0,00378		11,66
Nazareth	19	0,00380		11,66
Puerto Toledo	79	0,00395		12,19

Con el fin de conocer el valor correspondiente al porcentaje de caída de tensión, es necesario calcular también la impedancia eficaz (Z_{ef}) del circuito (anexo E), por lo que, se escoge un valor de $R = 0,623 \frac{\Omega}{km}$ y $X_L = 0,187 \frac{\Omega}{km}$ para la conexión de los generadores diésel – eólica – hídrica – diésel – biomasa – solar. Simultáneamente, para los generadores solar – sistema de almacenamiento, el valor de R y X_L son, $2,56 \frac{\Omega}{km}$ y $0,213 \frac{\Omega}{km}$, respectivamente. Se debe agregar que, los valores anteriormente dados corresponden a calibres AWG #2 y #8, y son obtenidos de acuerdo con los gráficos presentados en el anexo H, en donde se observa que el porcentaje de caída de tensión para el conductor #2 es del 1,96% y 0,73% para el #8, siendo estos menores al valor máximo de caída de tensión establecido por la Norma Técnica Colombiana – NTC 2050. Así mismo, la variación de la regulación con el área del conductor (mm^2) para la conexión de generadores solar – sistema de almacenamiento (figura 23 – anexo H), indica que, a partir del calibre #12 en adelante el porcentaje de regulación es menor al determinado, no obstante, con conductores #12 y #10 el sistema de almacenamiento no entrega potencia suficiente para suplir de energía a la carga, por lo que se seleccionan los valores de resistencia eléctrica y reactancia inductiva del calibre #8 en la conexión del sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento.

Acorde con lo anterior el resultado de la impedancia eficaz se indica a continuación en la tabla 35. Por otro lado, la caída de tensión fase – fase se muestra en la tabla 36.

Tabla 35

Impedancia eficaz de líneas de transmisión.

R	X	Factor de potencia	Cos φ	Sen φ	$Z_{ef} \left(\frac{\Omega}{km} \right)$
0,623	0,187	0,9	0,9	0,44	0,642
2,56	0,213				2,397

Tabla 36

Porcentaje de caída de tensión del circuito.

$Z_{ef} \left(\frac{\Omega}{km} \right)$	$\Delta V_{fase-neutro}$	$\Delta V_{fase-fase}$	%
0,642	2,35	4,07	1,96
2,387	0,87	1,51	0,73

Un aspecto fundamental en el campo de los sistemas eléctricos de potencia, son los sistemas en por unidad (p.u.), por lo que, las cantidades eléctricas como tensiones, impedancias, corrientes y potencias en la herramienta computacional PowerWorld, son ingresados de tal manera. No obstante, el software genera de manera automática la cantidad en por unidad de los voltajes base e impedancia base del sistema de potencia, una vez se ingrese el dato de potencia base, la cual, en este caso tiene un valor de 0,1 MVA dado que la generación de potencia, es decir de cada fuente, es relativamente baja. Mediante la ecuación 8 se establece la impedancia base de cada nodo, teniendo en cuenta la tensión primaria y secundaria del transformador implementado en la microrred (tabla 37) y la potencia base ingresada, dando como resultado la información dada en la tabla 38.

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}$$

Ecuación 8

Tabla 37

Datos eléctricos del transformador eléctrico – 50 kVA.

Número	4346	Clase de transformador	Seco
Capacidad nominal	50 kVA	NBA AT/BT	1,1/1 kV
# Fases	3	Clase de aislamiento	H
Tipo de refrigeración	AN	Temperatura de aislamiento	180 °C
Tensión primaria	480 V	Tensión secundaria	208 V
Corriente primaria	65,61 A	Corriente secundaria	138,79 A
Tensión C.C. (°C)	6,18%	Frecuencia	60 Hz
Masa total	310 kg	Grupo de conexión	DYN5
Año	2018	Año NTC3654	2003

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por la placa del transformador eléctrico – Transformadores de Colombia S.A. (TRACOL).

Tabla 38

Cantidades base del sistema eléctrico de potencia.

Nodo	Potencia base (MVA)	Voltaje base (kV)	Impedancia base (Ω)	Admitancia base (S)
1	0,10	0,480	2,304	0,434028
2 a 7		0,208	0,432640	2,31139

Para obtener una cantidad en por unidad de las impedancias, tanto resistencias como reactancias de las líneas de transmisión, se establece que los valores dados en la tabla 35 de R y X son las cantidades reales de las líneas, que, a su vez, son datos básicos al momento de calcular la parte imaginaria de la admitancia, la susceptancia (B).

Tabla 39

Cantidades en por unidad de las líneas de transmisión.

Bus de origen	Bus objetivo	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
Eólico	Hídrica	0,431999	0,129669	0,637391
Eólico	Diésel	0,431999	0,129669	0,637391
Diésel	Biomasa	0,431999	0,129669	0,637391
Biomasa	Solar	0,431999	0,129669	0,637391
Solar	Almacenamiento	0,177515	0,014770	0,465488

A continuación, se presentan el desarrollo de flujos de potencia para cada consumo energético alto considerando dos casos, primero, la generación de la fuente no convencional de energía solar sin carga y segundo, generación del sistema de almacenamiento supliendo la potencia necesaria para la carga.

6.2.1 Desarrollo de flujos de potencia comunidad La Plata.

La figura 14 presenta el modelo de la microrred eléctrica con una carga correspondiente a 3,96 kW para el consumo energético alto en la comunidad de la Plata, representando a las doce (12) de las setenta (70) viviendas que se encuentran en la comunidad.

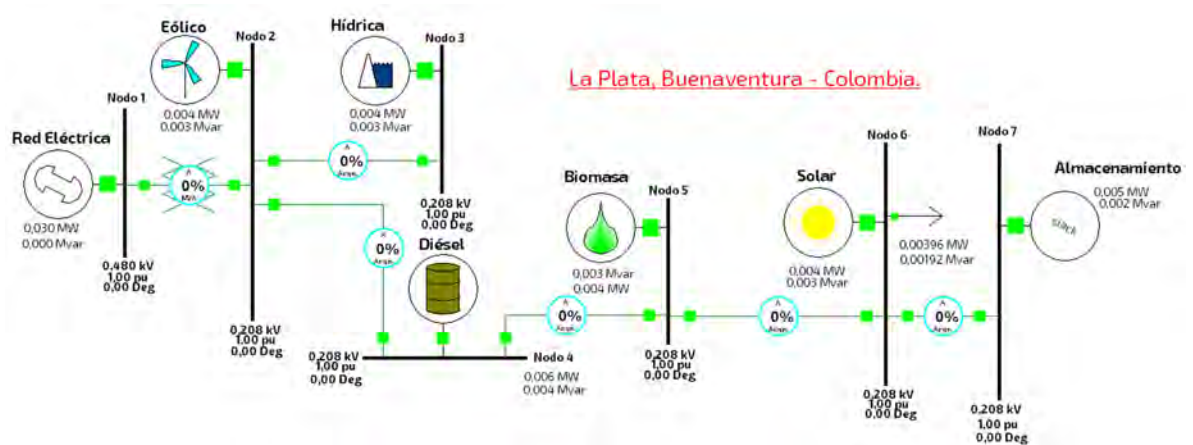


Figura 14. Microrred para consumo alto en La Plata.

Diseño de una microrred para consumo energético de doce viviendas en la comunidad de la Plata con fuentes de generación de energía renovable.

Una vez realizado el flujo de potencia en la herramienta computacional PowerWorld con el método Newton – Raphson, se obtienen los siguientes valores (tabla 40) tanto en la generación de fuente solar sin carga, como de la generación de potencia del sistema de almacenamiento con carga.

Tabla 40

Resultados del flujo de potencia para viviendas de La Plata en PowerWorld.

Generación de fuente solar sin carga					
Línea		Potencia en buses y líneas			Corriente línea
Desde	Hasta	MW	Mvar	MVA	A
Generador solar		0,004	0,003	0,005	
Almacenamiento		-0,003	-0,001	0,00316	13,74
Sistema de almacenamiento con carga					
Almacenamiento		0,005	0,002	0,00538	
Carga		0,004	-0,002	0,0045	12,47

6.2.2 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Vereda Brisas de Rumiyaco.

En la figura 15 se indica la simulación de la microrred eléctrica con una carga diferente, es decir, 3.78 kW para el consumo energético alto en la comunidad de Vereda Brisas de Rumiyaco, donde catorce (14) de las cincuenta y un (51) viviendas, representan esta carga. Simultáneamente, en la tabla 41 se da información acerca de los resultados de flujos de potencia del sistema eléctrico.

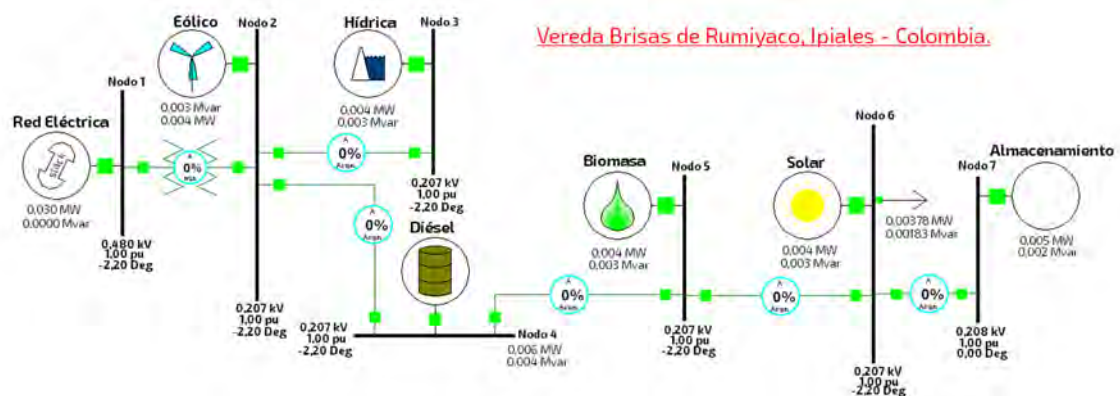


Figura 15. Microrred para consumo alto en Vereda Brisas de Rumiayaco.

Diseño de una microrred para consumo energético de catorce viviendas en la comunidad de Vereda Brisas de Rumiayaco con sistema solar autónomo.

Tabla 41

Resultados de flujo de potencia para viviendas de Vereda Brisas de Rumiayaco en PowerWorld.

Generación de fuente solar sin carga					
Línea		Potencia en buses y líneas			Corriente línea
Desde	Hasta	MW	Mvar	MVA	A
Generador solar		0,004	0,003	0,005	
	Almacenamiento	-0,003	-0,001	0,00316	13,74
Sistema de almacenamiento con carga					
Almacenamiento		0,005	0,002	0,00538	
	Carga	0,00378	-0,00183	0,0042	11,70

6.2.3 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Nazareth.

En la figura 16 se muestra el diseño del sistema de potencia para el consumo alto de 19 de las 143 viviendas que se encuentran en la comunidad. Al mismo tiempo, el desarrollo del flujo de potencia de este escenario se presenta en las tablas 42.

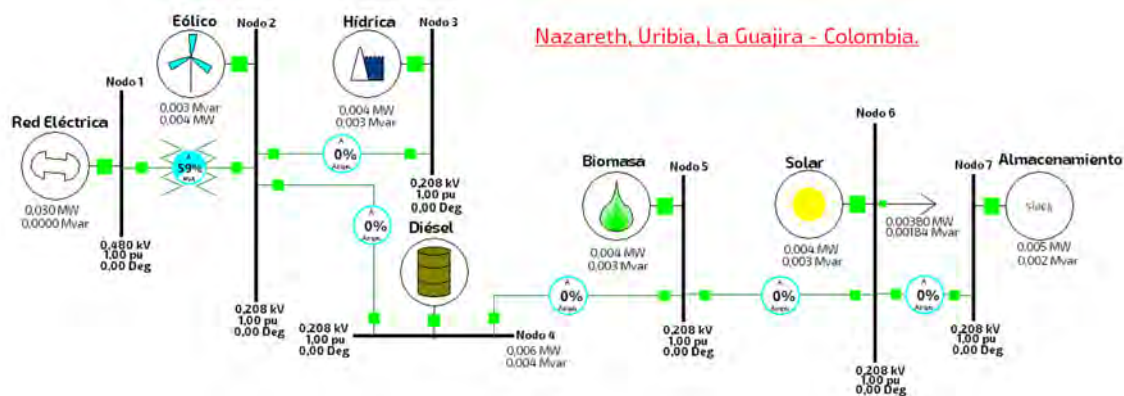


Figura 16. Diseño del sistema de potencia para consumo alto en Nazareth.

Microrred eléctrica para consumo energético de 19 viviendas en la comunidad de Nazareth con sistema solar fotovoltaico autónomo.

Tabla 42

Resultados de flujo de potencia para viviendas en Nazareth.

Generación de fuente solar sin carga					
Línea		Potencia en buses y líneas			Corriente línea
Desde	Hasta	MW	Mvar	MVA	A
Generador solar		0,004	0,003	0,005	
	Almacenamiento	-0,003	-0,001	0,00316	13,74
Sistema de almacenamiento con carga					
Almacenamiento		0,005	0,002	0,00538	
	Carga	0,0038	-0,00184	0,00422	11,77

6.2.4 Desarrollo de flujos de potencia comunidad Puerto Toledo.

A continuación, se muestra la simulación del sistema eléctrico de potencia para 79 viviendas en la comunidad de Puerto Toledo, con una carga 3.95 kW.

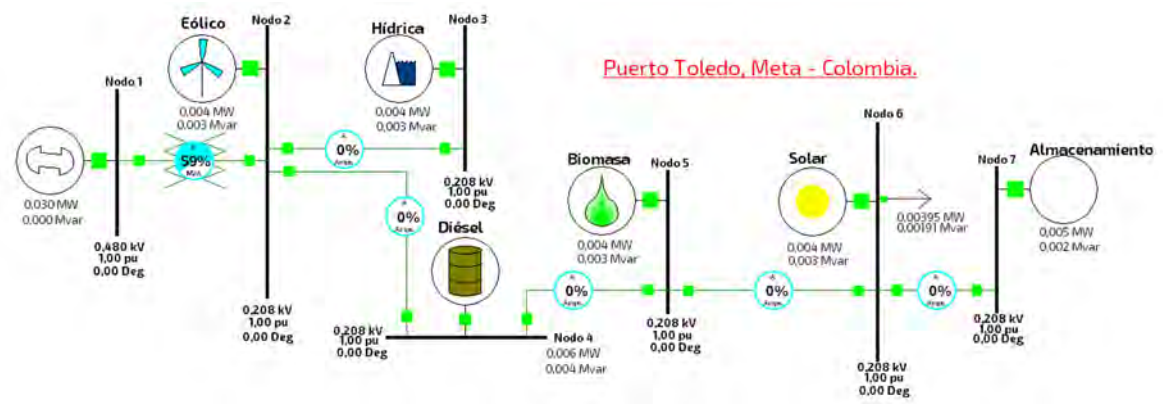


Figura 17. Sistema eléctrico de potencia para viviendas en Nazareth.

Simulación de flujos de potencia de una microrred eléctrica para consumo energético alto de 79 viviendas en la comunidad de Nazareth con sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento.

Tabla 43

Resultados de flujo de potencia para viviendas en Puerto Toledo.

Generación de fuente solar sin carga						
Línea		Potencia en buses y líneas Corriente línea				
Desde	Hasta	MW	Mvar	MVA	A	
Generador solar		0,004	0,003	0,005		
	Almacenamiento	-0,003	-0,001	0,00316	13,74	
Sistema de almacenamiento con carga						
Almacenamiento		0,005	0,002	0,00538		
	Carga	0,00395	-0,00191	0,00439	12,24	

6.2.5 Síntesis de flujos de potencia en microrred eléctrica.

El estudio de flujos de carga o de potencia, resulta ser una de las técnicas más fundamentales al momento de analizar un sistema eléctrico de potencia. Tal es el caso de la microrred eléctrica de laboratorio donde se simularon diferentes escenarios de carga para los consumos energéticos altos modelados inicialmente en la herramienta computacional HOMER Pro, no obstante, estas cargas dependiendo del número de viviendas a simular, son cercanas a la potencia activa proveniente de cada generador (eólico, hídrico, biomasa y solar), por lo que se obtiene de las cuatro cargas, un promedio igual a 3,87 kW, consumo que se puede suplir de cualquier fuente de generación convencional y no convencional de energía

en la microrred eléctrica de laboratorio sin necesidad de tener un nodo de referencia o “Slack”.

No obstante, se analizó el comportamiento de la microrred eléctrica teniendo en cuenta la potencia promedio obtenida de la potencia total de consumos energéticos altos en viviendas de las comunidades de Zonas No Interconectadas, considerando primero dos modos distintos de funcionamiento.

- **Conectada a la red**, de donde resulta una disminución en la potencia de la carga de alrededor de $0,46\text{ kW}$, es decir, una diferencia de $3,41\text{ kW}$ respecto a la inicial (figura 18), esto se debe a la longitud que presentan las líneas, puesto que, según el diseño de la microrred en el software PowerWorld, entre la conexión de la red eléctrica y la carga se encuentran tres líneas de transmisión con longitud de $0,300\text{ km}$ cada una, por lo que el flujo de potencia entre estas resulta ser bastante pequeño. Por su parte, se puede identificar que los voltajes en por unidad ($p.u.$) de los nodos 2 al 6 se encuentran por debajo de 0.9 p.u. , estableciendo que, la microrred en condiciones reales no podrá operar debido a que la tensión no es suficiente para mantener el sistema de potencia.

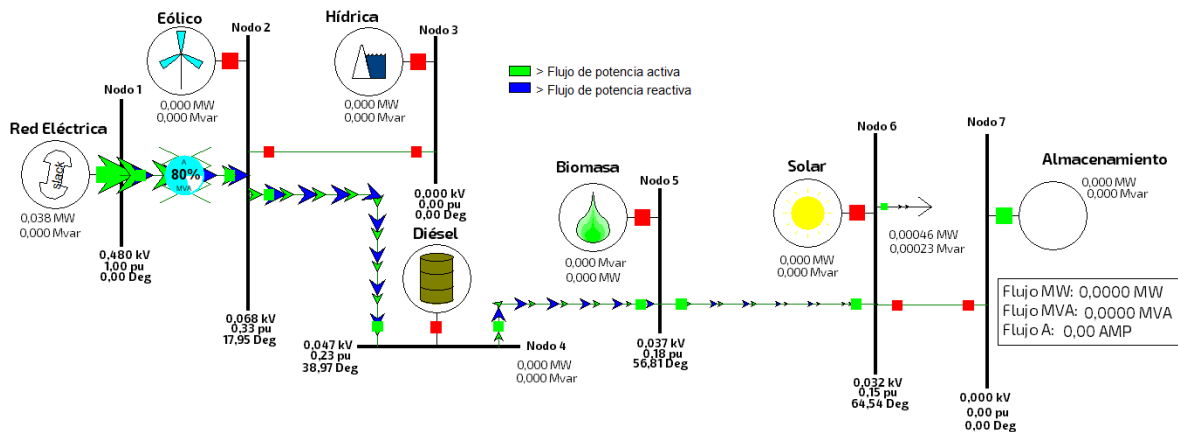


Figura 18. Microrred eléctrica de laboratorio conectada a la red.

Simulación de flujos de potencia de la microrred eléctrica de laboratorio conectada a la red con carga de $0,19\text{ kW}$.

- Cuando la microrred funciona en **modo aislado** de la red principal, el generador que debe responder rápidamente ante los cambios en el consumo de la microrred, deberá ser la fuente diésel, debido a que, cuenta con una alta potencia activa después de la red principal, lo que lo hace ser el principal generador para suministrar de potencia suficiente a la carga conectada al nodo 6. Al mismo tiempo, cuando el generador diésel es el único en suministrar de potencia a la carga, se puede

observar (figura 19) que este aumenta su energía hasta 33 kW. Por lo tanto, para eliminar este problema de variación de generación se realiza la conexión del sistema de almacenamiento, generando una disminución en la potencia del generador hasta 10 kW. También se puede observar en la figura 20 que, tanto el sistema de almacenamiento como la carga, ofrecen y reciben, respectivamente, la potencia indicada en la figura 4.

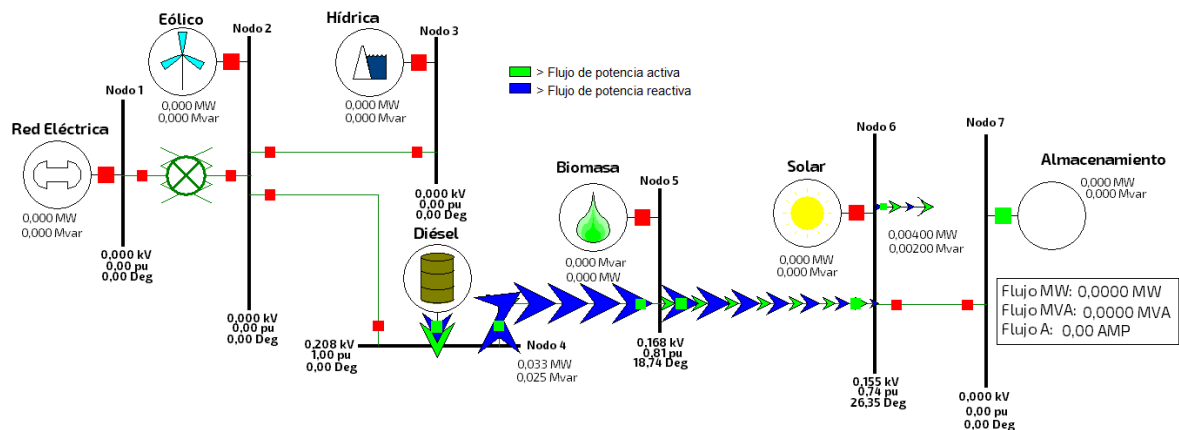


Figura 19. Microrred eléctrica de laboratorio en modo aislado de la red principal.

Simulación de flujos de potencia de la microrred eléctrica de laboratorio funcionando en modo aislado de la red principal.

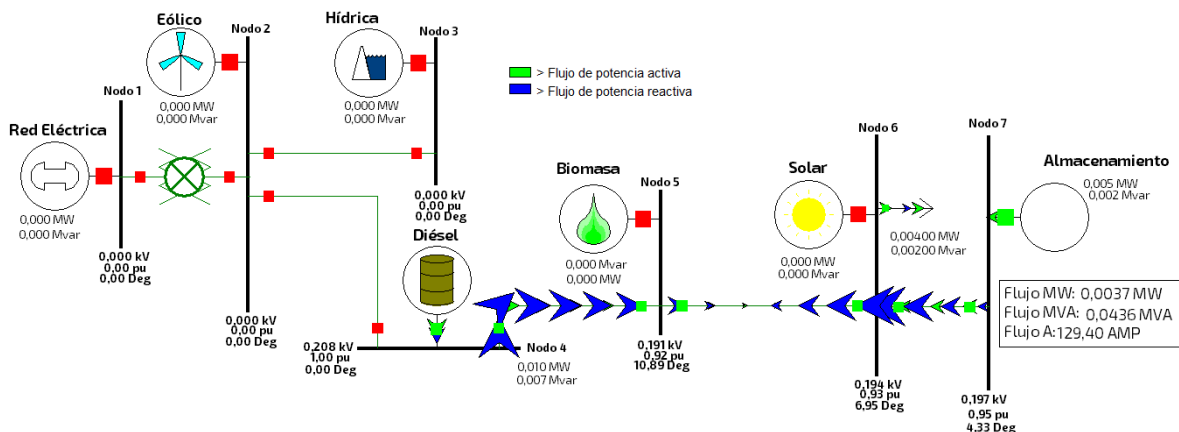


Figura 20. Microrred eléctrica de laboratorio en modo aislado con sistema de almacenamiento.

Simulación de flujos de potencia de la microrred eléctrica de laboratorio en modo aislado con sistema de almacenamiento.

Acorde con lo anterior, se puede decir que, la microrred eléctrica es capaz de funcionar en modo aislado, dando la máxima potencia a la carga, sin embargo, y teniendo en cuenta que las comunidades solo cuentan con 4 y 5 horas de energía eléctrica provenientes de una planta diésel, se considera fundamental estudiar el comportamiento del sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento que se encuentra conectado a la microrred eléctrica.

- En la figura 21 se presenta el comportamiento que tiene un sistema solar fotovoltaico autónomo cuando la generación de fuente solar, el cual, en la herramienta computacional simularía un módulo fotovoltaico, inyecta de energía útil al sistema de almacenamiento por medio de una línea, que en este caso sería el conductor de calibre #8. Simultáneamente, se puede observar que el flujo de potencia activa y reactiva, en la línea es de $0,004 MW$ y $0,003 Mvar$, respectivamente, con una corriente de $13,74 A$, en donde el sistema de almacenamiento solo absorbe $3kW$ de los $4 kW$ que suministra la fuente solar. Recordemos que, la carga representa viviendas en comunidades de Zonas No Interconectadas, y que sus cargas requieren solo de energía útil para ser aprovechada en la realización de las diferentes actividades humanas.

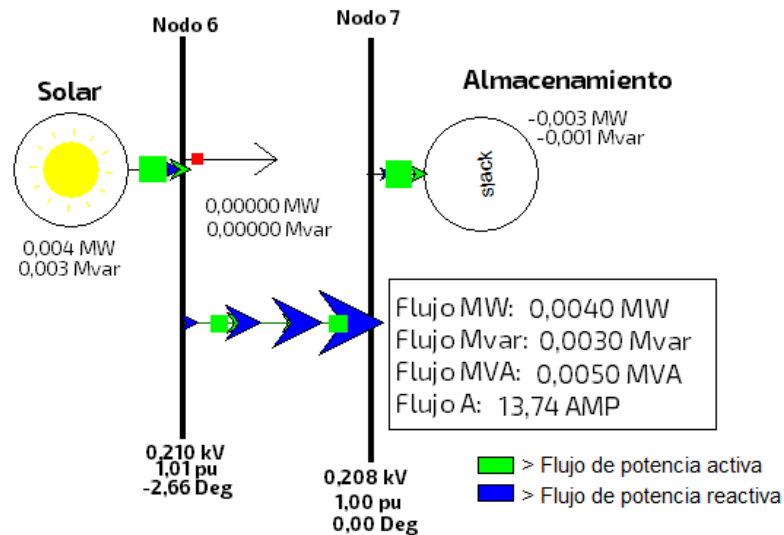


Figura 21. Flujos de potencia en sistema solar autónomo.

Simulación de flujos de potencia activa y corriente en sistema solar fotovoltaico autónomo sin carga.

- Por el contrario, la figura 22 presenta el comportamiento que tiene el sistema solar fotovoltaico cuando se utiliza el sistema de almacenamiento (simulado como baterías) para satisfacer la carga en horas donde hay ausencia del sol. Se observa

que, el flujo de potencia activa en este caso es igual al anterior haciendo el sistema eficiente, a su vez, el sistema de almacenamiento suministra potencia suficiente para alimentar la carga del consumo energético alto de cualquier comunidad. Cabe mencionar que, las comunidades no tienen un alcance a la red de distribución eléctrica, por lo que, estos sistemas solares fotovoltaicos autónomos son la mejor solución óptima para implementar en viviendas de comunidades que se encuentren en las Zonas No Interconectadas de Colombia.

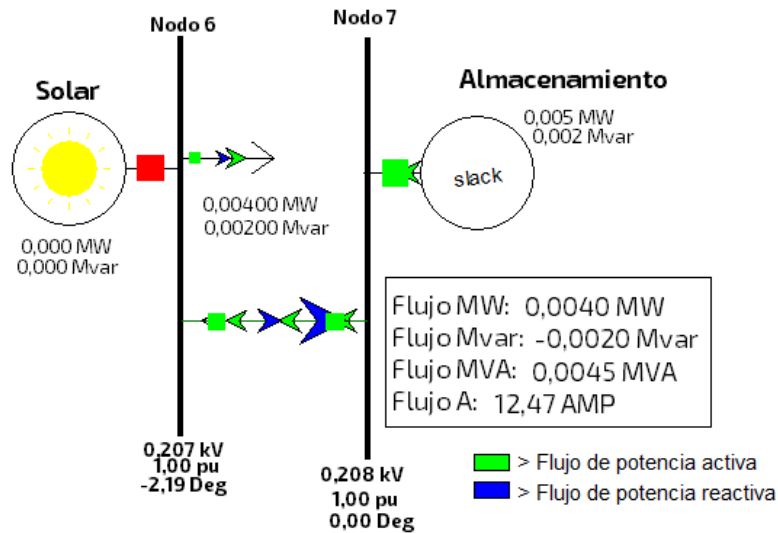


Figura 22. Flujo de potencia activa y corriente en sistema solar fotovoltaico autónomo con carga.

Simulación de flujos de potencia activa y corriente en sistema solar fotovoltaico con carga.

Así mismo, los resultados dados en la simulación determinan que la solución de la matriz de admitancia (Y_{bus}) del sistema eléctrico de potencia (sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento) según PowerWorld en su interfaz, es la indicada en la tabla 44. De igual modo, la matriz de admitancia (Y_{bus}) debe construirse a partir de los datos de entrada de la línea (ver tabla 39), es importante mencionar que, el sistema cuenta con una sola línea, referente a la conexión ente el generador solar y el sistema de almacenamiento, y dos nodos, por lo cual, los elementos de Y_{bus} se resuelve de la siguiente manera.

- **Elementos diagonales**

$Y_{kk} \rightarrow$ Suma de admitancias conectada al nodo k .

$$Y_{66} - Y_{77} = \frac{1}{R_{67} + jX_{67}} + \frac{jB_{67}}{2}$$

$$Y_{66} - Y_{77} = 5,59 - j0,23 = 5,59 \angle -2,38^\circ$$

- **Elementos fuera de la diagonal**

$Y_{kn} \rightarrow$ -(Suma de admitancias conectadas entre los nodos k y n) $k \neq n$

$$Y_{67} - Y_{77} = \frac{-1}{R_{67} + jX_{67}}$$

$$Y_{66} - Y_{77} = 5,59 + j0,47 = 5,61 \angle 175,24^\circ$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 5,59 - j0,23 & -5,59 + j0,47 \\ -5,59 + j0,47 & 5,59 - j0,23 \end{bmatrix}$$

Tabla 44. Matriz de admitancia del Sistema Eléctrico de Potencia.

Número	Nombre	Nodo 6	Nodo 7
6	Nodo 6	5,59 - j0,23	-5,59 + j0,47
7	Nodo 7	-5,59 + j0,47	5,59 - j0,23

Nota: Elaboración propia a partir de la información dada por el software PowerWorld.

En relación con lo anterior se puede decir que, la matriz de admitancia es indispensable en la solución de flujos de potencia, puesto que con esta se calculan voltajes, ángulos, potencias activas, reactivas y aparentes de cada uno de los nodos, así como también, la matriz jacobiana del Sistema Eléctrico de Potencia.

A continuación, se presentan los cálculos realizados (datos prácticos) siguiendo los pasos del anexo A para la solución de los flujos de potencia del Sistema Solar Fotovoltaico y de Almacenamiento.

- **Voltaje y ángulo nodo 6 (V_6^1) – Generación de fuente solar sin carga.**

Considerando que el nodo 6 es de tipo PQ (bus de carga), el flujo de potencia calcula V_6 y δ_6 .

$$V_6^1 = \frac{1}{Y_{66}} \left[\frac{P_6 + jQ_6}{V_6^0} - Y_{67}V_7 \right]$$

$$V_6^1 = \frac{1}{5,59\angle -2,38^\circ} \left[\frac{0,05\angle -36,87^\circ}{1\angle 0^\circ} - 5,61\angle 175,24^\circ * 1\angle 0^\circ \right] = 1,01\angle -2,65^\circ \text{ p. u.}$$

- **Voltaje y ángulo nodo 6 (V_6^1) – Sistema de almacenamiento con carga.**

$$V_6^1 = \frac{1}{Y_{66}} \left[\frac{P_6 + jQ_6}{V_6^0} - Y_{67}V_7 \right]$$

$$V_6^1 = \frac{1}{5,59\angle -2,38^\circ} \left[\frac{0,045\angle 153,43^\circ}{1\angle 0^\circ} - 5,61\angle 175,24^\circ * 1\angle 0^\circ \right] = 1,0\angle -2,21^\circ \text{ p. u.}$$

- **Potencia activa y reactiva nodo 7 (P_7) – Generación de fuente solar sin carga.**

Teniendo en cuenta que, el nodo 7 es el bus Slack, su voltaje y ángulo de entrada son típicamente de 1.0 p.u y 0° , respectivamente; el flujo de potencia calcula P_7 y Q_7 .

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k||V_j|(G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j))$$

$$P_7 = [(1,0 * 5,59 \cos(0) - 0,23 \sin(0)) + (1,01 * (-5,59 \cos(2,64) + 0,47 \sin(2,64)))]$$

$$P_7 = -0,03 \text{ p. u}$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k||V_j|(G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j))$$

$$Q_7 = [(1,0 * 5,59 \sin(0) + 0,23 \cos(0)) + (1,01 * (-5,59 \sin(-2,21) - 0,47 \cos(-2,21)))]$$

$$Q_7 = -0,01 \text{ p. u}$$

- **Potencia activa y reactiva nodo 7 (P_7) – Sistema de almacenamiento con carga.**

$$P_7 = [(1,0 * 5,59 \cos(0) - 0,23 \sin(0)) + (1,0 * (-5,59 \cos(2,21) + 0,47 \sin(2,21)))]$$

$$P_7 = 0,05 \text{ p.u}$$

$$Q_7 = [(1,0 * 5,59 \sin(0) + 0,23 \cos(0)) + (1,0 * (-5,59 \sin(-2,64) - 0,47 \cos(-2,64)))]$$

$$Q_7 = 0,02 \text{ p.u}$$

Finalmente, y analizando los datos conseguidos de corriente de línea, potencias activas y reactivas, y voltajes por la herramienta computacional PowerWorld, se determina que son muy cercanos a los valores experimentales obtenidos en la tabla 34, es decir, están por debajo de 2% lo cual indica una confiabilidad en el modelo del sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento conectado a la microrred.

7. CONCLUSIONES

En el presente documento se desarrolló el flujo de carga de un sistema solar fotovoltaico y almacenamiento (sistema autónomo) a una microrred eléctrica de laboratorio que primero, evaluó diferentes documentos investigativos relacionados con el tema tratado en sistemas eléctricos de potencia. Estos, se analizaron con el objetivo de identificar que software entre MatLab, ETAP, PSCAD, PowerWorld, DlgSILENT, y métodos como Newton – Raphson y Gauss – Seidel utilizaban para dar solución a los modelos de flujo de carga AC en cualquier red de potencia.

La caracterización de las diferentes investigaciones permitió establecer que el método iterativo más utilizado en el análisis numérico del problema del flujo de carga es el algoritmo Newton – Raphson, que, a su vez, en conjunto con la herramienta computacional PowerWorld, software para análisis del flujo de potencia altamente efectivo capaz de resolver eficientemente sistemas de hasta 250.000 buses, son capaces de resolver una de las técnicas más importantes en el campo de los sistemas de potencia.

Por otro lado, se realizó la simulación de sistemas solares fotovoltaicos considerando tiempo ($\frac{h}{día}$), uso ($\frac{día}{sem}$) y factor de uso (%) de diferentes cargas CA utilizadas en viviendas de las 4 localidades que se encuentran aisladas del Sistema Interconectado de Potencia para distintos tipos de consumos energéticos altos, medios y bajos, de donde resultó que, el pico más alto en kW de 3 comunidades se presenta principalmente entre las 18 y 20 horas de la noche.

Se obtuvo que para cada una de las comunidades pertenecientes a Zonas no Interconectadas de Colombia, el sistema del consumo energético alto es la solución factible para la implementación de sistemas autónomos en las viviendas de cada comunidad.

El diseño de los sistemas solares fotovoltaicos autónomos en la herramienta computacional HOMER Pro permite concluir que, la radiación solar en una comunidad, estimación de consumo, cargas AC, módulos fotovoltaicos, inversores, baterías, etc., no son los únicos factores para tener en cuenta en el dimensionamiento e implementación de estos en viviendas ubicadas en las Zonas No Interconectadas de Colombia. El costo nivelado de energía (LCOE) y exceso de electricidad, han mostrado (según simulaciones realizadas) ser los datos más fundamentales en un proyecto de energía con energías renovables integradas.

Se determinó que el costo nivelado de electricidad o COE en cada consumo energético resulta ser inversamente proporcional a la carga eléctrica – $C_{ET} (kWh/año)$ – puesto que, a medida que el costo nivelado en cada consumo energético aumenta, la carga eléctrica total generada al año, disminuye.

Para el análisis de flujos de potencia, se modeló un sistema solar fotovoltaico autónomo conectado a la microrred eléctrica de laboratorio compuesta de fuentes convencionales y no convencionales de energía como; hídrica, biomasa, eólica y diésel, así como un sistema de almacenamiento, red principal y líneas de transmisión, de donde se infiere que, tanto el generador solar como el sistema de almacenamiento, logran suministrar de potencia activa máxima a la carga establecida de cada consumo energético alto por comunidad.

A su vez, el desarrollo de flujos de potencia de la microrred eléctrica de laboratorio conectada a la red permitió concluir que, el sistema eléctrico de potencia no podrá operar en estas condiciones debido a los bajos niveles de tensión.

Se considero evidente la importancia de conocer el valor máximo de caída de tensión en cada una de las líneas de transmisión de la microrred eléctrica de laboratorio, pues aparte de ofrecer un funcionamiento confiable, se cumple con una de las normas más fundamentales en instalaciones eléctricas como lo es la Norma Técnica Colombia – NTC 2050.

Por su parte, se evidencio que la conexión de sistemas de almacenamiento (baterías) en microrredes eléctricas cuando estas se encuentran en modo aislado de la red principal, son necesarios para mantener el balance energético y niveles de tensión iniciales del sistema eléctrico de potencia.

Finalmente, este trabajo de grado aporta información fundamental al programa de investigación en microrredes eléctricas “**Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para Zonas No Interconectadas en Colombia**”, puesto que permite determinar por medio de los flujos de potencia, el comportamiento real que puede tener un sistema solar fotovoltaico y de almacenamiento conectado ya sea a una vivienda, comunidad en general de las ZNI o a una microrred eléctrica de laboratorio.

REFERENCIAS

- Alonso Abella, M. (2005). Sistemas fotovoltaicos. *SAPT Publicaciones Técnicas, SL.*, 1-59. Recuperado de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf
- Barberá Santos, D. (s. f.). Introducción a la energía fotovoltaica. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70271/fichero/02+INTRODUCCIÓN+A+LA+ENERGÍA+FOTOVOLTAICA%252FIntroducción+a+la+Energía+Fotovoltaica.pdf>
- Díaz, R. V., Villafuerte Salcedo, R. A., Sánchez, E. M., & Cervantes, J. M. (2012). Métodos Numéricos En El Proceso Enseñanza-Aprendizaje De Flujos De Potencia. *Revista Internacional de Educación en Ingeniería*, 5(1), 45-53. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=77781769&lang=es&site=ehost-live>
- DIGSILENT. (s. f.). DIGSILENT Power System Software & Engineering. Recuperado de <https://www.digsilent.de/en/>
- EL HERALDO. (2013). “Somos la tierra del olvido”, dicen en Nazareth, en la Alta Guajira. Recuperado 8 de mayo de 2019, de <https://www.elheraldo.co/la-guajira/somos-la-tierra-del-olvido-dicen-en-nazareth-en-la-alta-guajira-129168>
- Estructuras bioclimáticas avanzadas. (s. f.). La biomasa: producir energía con un sistema ecológico. Recuperado de <http://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/>
- Garzón-Hidalgo, J. D., & Saavedra-Montes, A. J. (2017). *Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia A design methodology of microgrids for non-interconnected zones of Colombia*. 20(39). Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v20n39/v20n39a03.pdf>
- Gaviria Cataño, F. A., & Gómez Leal, J. C. (2018). *Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas*.

- Giraldo Gómez, W. D. (2016). *Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada*. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/53470/1/1017168710.2016.pdf>
- González Santacruz, C. A. (2015). *Análisis técnico de los diferentes tipos de baterías comercialmente disponibles para su integración en el proyecto de una microrred aislada*. Universidad distrital francisco José de caldas, Bogotá.
- Horikoshi, I. (2009). *Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red*. Universidad Carlos III de Madrid.
- IDEAM. (s. f.). Atlas Interactivo - Radiación IDEAM. Recuperado 7 de mayo de 2019, de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Indulkar, C. S., & Ramalingam, K. (2008). Load flow analysis with voltage-sensitive Lloads. *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2008.4745151>
- INGELEC S.A.S. (s. f.). Estudio energización Nariño. Recuperado 8 de mayo de 2019, de <http://www.ingelec.com.co/portal/index.php/16-la-empresa/44-ingelec-s-a-s>
- Instituto tecnológico de Canarias. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética* (1.ª ed.). Recuperado de www.renovae.org,
- Izquierdo Franco, J. (2002). *Flujos de potencia y analisis de fallas en sistemas electricos de potencia*.
- López Castrillón, Y. U. (2016). *Energía eólica. Integración a la red eléctrica*. Santiago de Cali.
- Lopez, Y., & Gaviria Cataño, F. A. (2018). *Análisis multicriterio y simulación de una microred aislada para electrificación rural en Colombia usando HOMER*.

- Ministerio de minas y energía. (2014). *Soluciones energética para las zonas no interconectadas de Colombia IPSE*. Recuperado de <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>
- Mipoung, O. D., Lopes, L. A. C., & Pillay, P. (2014). Potential of type-1 wind turbines for assisting with frequency support in storage-less diesel hybrid mini-grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2297-2306. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2273474>
- NEPLAN®. (s. f.). NEPLAN | La Empresa. Recuperado de <https://www.neplan.ch/escompany/?lang=es>
- Norma técnica Colombiana - NTC 2050. (1998). *CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO - NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2050*.
- Núñez Palomares, J. J., & Lozano García, J. M. (2016). Control de flujo de energía en una micro-red eléctrica basada en energías renovables. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1240-1244.
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., ... Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1905-1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2016). Parques Nacionales - Parque Nacional Natural Uramba Bahía Málaga. Recuperado 30 de abril de 2019, de <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/region-pacifico/parque-nacional-natural-uramba-bahia-malaga/>
- Perpiñán Lamiguerio, O. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. Recuperado de <https://github.com/oscarperpinan/esf>
- PowerWorld CORPORATION. (s. f.). Solutions for Industry. Recuperado de <https://www.powerworld.com/solutions>

- Radio Ipiiales Caracol. (2013). Jardines de Sucumbíos busca ser Municipio Especial. Recuperado 8 de mayo de 2019, de <https://www.radioipiales.co/2013/03/jardines-de-sucumbios-busca-ser-municipio-especial/>
- Ramón Ducoy, F. J. (2012). *Implantación de energías renovables en un planta de producción de amoniaco*. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5145/fichero/Portada.pdf>
- REN21. (2017). *REN21. Renewables 2017-global status report, Paris, REN21 Secretariate; 2017*. Recuperado de www.ren21.net/gsr
- REN21. (2018). *REN21. Renewables 2018-global status report, Paris, REN21 Secretariate; 2018*. <https://doi.org/978-3-9818911-3-3>
- Rivera, S., Urrego, R., & Arango, D. (2017). Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales. *Ingeniería y Ciencia*, 13(25), 123-152. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.25.5>
- Shyu, C.-W. (2014). Ensuring access to electricity and minimum basic electricity needs as a goal for the post-MDG development agenda after 2015. *Energy for Sustainable Development*, 19, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.005>
- SIAT - AC. (s. f.). Consumo de energía eléctrica por habitante CEH. Recuperado 8 de mayo de 2019, de <http://siatac.co/web/guest/445>
- Standards Coordinating Committee. (2011). *IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems sponsored by the IEEE standards coordinating committee 21 on Fuel Cells, photovoltaics, dispersed generation, and energy storage IEEE stan.*
- Vega de Kuyper, J. C., & Ramírez Morales, S. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables aplicaciones* (1.ª ed.). Ciudad de México.
- Yang, W., Cong, T. N., Ding, Y., Chen, H., Tan, C., & Li, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291-312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>

ANEXOS

Anexo A. Pasos para seguir en la solución de flujos de potencia.

Para la solución de flujos de potencia, se debe tener un diagrama de línea simple de un sistema de potencia, del cual se pueden obtener datos de entrada, como los de bus, líneas de transmisión y transformadores. Una vez analizado el sistema de potencia y sus datos de entrada, se realiza la matriz de admitancia (Y_{bus}), que realiza el trabajo de analizar todas las admitancias del sistema, teniendo en cuenta que esta matriz será siempre de $n \times n$, donde "n" es el número de nodos del sistema.

La matriz de admitancia se presenta en la ecuación 9.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & -Y_{13} \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} \\ -Y_{31} & -Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 9}$$

Luego de implementar la matriz de admitancia, se obtienen los parámetros primarios que son necesarios a la hora de realizar un análisis de los flujos de potencia en un sistema de potencia. Estos parámetros son la potencia aparente y corriente; las ecuaciones de cada una se establecen en 10 y 11, respectivamente.

Potencia neta inyectada nodo k

$$S_k = V_k I_k^* \quad \text{Ecuación 10}$$

Dado que:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad \text{Ecuación 11}$$

Entonces, reemplazando la ecuación 11 en la ecuación 10, la potencia inyectada en el nodo k (potencia aparente) quedaría de la forma en la que se muestra la ecuación 14.

$$S_k = V_k \left(\sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right)^* = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn}^* V_n^* \quad \text{Ecuación 12}$$

Las ecuaciones en el equivalente real e imaginario se observan desde la ecuación 13 hasta 15; donde 13 es la suma vectorial de las potencias activas y reactivas, 14 representa el elemento de la matriz de admitancias de barra y 15 los voltajes de barra del sistema dado en coordenadas polares.

$$S_k = P_k + jQ_k \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Y_{kn} = Y_{kn} e^{j\theta_{kn}} = G_{kn} + jB_{kn} \quad k, n = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_n = V_n e^{j\theta_{kn}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Las ecuaciones del flujo de carga (potencia aparente, real y reactiva) son las que se muestran en las ecuaciones 11 hasta 20. Es importante mencionar que, para lograr el resultado de la potencia aparente es necesario reemplazar las ecuaciones 13, 14 y 15 en la ecuación 12, de donde finalmente se obtiene la ecuación 16.

Ecuaciones de potencia.

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})} \quad \text{Ecuación 16}$$

Teniendo en cuenta las partes reales e imaginarias de la ecuación anterior, la potencia real y reactiva quedan de la siguiente forma.

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ecuación 18}$$

No obstante, cuando el elemento de la matriz de impedancia (Y_{kn}) se expresa en coordenadas rectangulares entonces, las ecuaciones anteriores se escriben como:

Potencia real en la red

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n)] \quad \text{Ecuación 19}$$

Potencia reactiva en la red

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n) - B_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n)] \quad k = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ecuación 20}$$

El nodo k observado en las ecuaciones 19 y 20 es el que se analiza, donde n se encuentra conectado a este. Para el análisis, se debe tener en cuenta que el nodo referencia o nodo Slack, del cual su voltaje (V_1) en la mayoría de los sistemas de potencia es de 1.0 en por unidad y su ángulo (δ_1) de cero grados, la inyección de potencia activa y reactiva no son especificadas, a su vez, respalda las pérdidas de potencia del sistema para la solución inicial del flujo de potencia. Otros de los nodos que se encuentran en el sistema son: PV o bus controlado por voltaje, donde P_k y V_k son datos de entrada, Q_k y δ_k son calculados por medio de los flujos de potencia; nodo de carga o PQ en donde P_k y Q_k son datos de entrada, el flujo de potencia calcula V_k y δ_k .

Anexo B. Técnica de solución de flujos de potencia mediante el método Newton – Raphson.

En otro orden de ideas, las soluciones del flujo de potencia mediante el método de Newton – Raphson se basa en las ecuaciones 17 y 18 o también de la forma en la que se encuentran 19 y 20. Por lo tanto, y teniendo en cuenta 17 y 18, los vectores f , y y x , se resuelven de la siguiente manera, donde los términos P, Q y V son valores dados en por unidad (p.u.) y el ángulo (δ) en radianes. A su vez, δ_1 y V_1 son valores conocidos (definidos previamente), es decir, son datos derivados del nodo Slack. Las ecuaciones siguientes, son tomadas del libro *Glover, J. D., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2017). POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN (pp. 350-356).*

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ \vdots \\ P_N \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix}; f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2(x) \\ \vdots \\ P_N(x) \\ Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_N(x) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

Entonces, las ecuaciones 17 y 18 tienen la siguiente forma:

$$y_k = P_k = P_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$y_{k+N} = Q_k = Q_k(x) = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad k = 2, 3, \dots, N \quad \text{Ecuación 23}$$

Por lo tanto, la matriz jacobiana de la ecuación 21 basada en las ecuaciones anteriores, será la siguiente.

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^{P\delta} & J_{12}^{PV} \\ J_{21}^{Q\delta} & J_{22}^{QV} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 5}$$

De acuerdo con la ecuación 17, las derivadas parciales fuera de la diagonal son las siguientes, es decir, $n \neq k$

$$J^{P\delta} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = V_k Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$J^{PV} = \frac{\partial P_k}{\partial V_n} = V_n Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 26}$$

Sin embargo, las derivadas parciales de la diagonal: $n = k$

$$J^{P\delta} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 27}$$

$$J^{PV} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 28}$$

Las derivadas parciales fuera de la diagonal de la ecuación 18, se observan a continuación.

$$J^{Q\delta} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -V_k Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 29}$$

$$J^{QV} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 30}$$

Y las derivadas parciales de la diagonal: $n = k$

$$J^{Q\delta} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 31}$$

$$J^{QV} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \quad \text{Ecuación 32}$$

Después de realizar cada cálculo con las ecuaciones descritas anteriormente, se procede a ejecutar la primera iteración teniendo en cuenta la siguiente ecuación.

$$x(i+1) = \begin{bmatrix} \delta(i+1) \\ V(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 6}$$

Anexo C. Cálculo para cuadros de carga en consumos energéticos por vivienda.

Cálculo de consumo por carga:

$$\textit{Potencia total [kW]} = \textit{Cantidad} * \textit{Potencia de la carga [W]} \quad \text{Ecuación 7}$$

Cálculo de energía por carga:

$$E \left[\frac{\textit{kWh}}{\textit{día}} \right] = P * t \quad \text{Ecuación 8}$$

Anexo D. Perfiles de carga para consumos energéticos altos, medios y bajos.

Tabla 45

Perfil de carga en consumo energético alto – La Plata.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	6	1	80%	0,160
Iluminación	8	0,1	0,8	4	1	100%	0,533
Refrigeración	1	0,3	0,3	11	1	95%	0,523
Refrigeración*	1	0,4	0,4	24	1	60%	0,960
Totales		1	1,7				
Potencia total consumida por familia (kW)							1,7
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							2,2
Total, de energía requerida (kWh/día)							2,52

Tabla 46

Perfil de carga en consumo energético medio – La Plata.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	8	1	80%	0,213
Iluminación	5	0,1	0,5	8	1	100%	0,667
Refrigeración*	1	0,2	0,2	24	1	60%	0,480
Totales		0,5	0,9				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,9
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							1,4
Total, de energía requerida (kWh/día)							1,57

Tabla 47

Perfil de carga en consumo energético bajo – La Plata.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	2	0,06	0,12	3	1	100%	0,060
Televisor	1	0,1	0,1	8	1	80%	0,107
Refrigeración*	1	0,2	0,2	24	1	60%	0,480
Totales		0,36	0,4				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,4
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,6
Total, de energía requerida (kWh/día)							0,75

Tabla 48

Perfil de carga en consumo energético alto – Vereda Brisas de Rumiayaco.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,2	0,2	7	1	80%	0,187
Iluminación	5	0,1	0,5	7	1	100%	0,583
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	3	1	55%	0,028
Refrigeración	1	0,2	0,2	24	1	60%	0,480
Totales		0,6	1,0				
Potencia total consumida por familia (kW)							1,0
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							1,3
Total, de energía requerida (kWh/día)							1,48

Tabla 49

Perfil de carga en consumo energético medio – Vereda Brisas de Rumiyaço.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,1	0,1	10	1	80%	0,133
Iluminación	5	0,06	0,3	7	1	100%	0,350
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	3	1	40%	0,020
Refrigeración*	1	0,2	0,2	24	1	60%	0,480
Totales		0,46	0,7				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,7
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							1,0
Total, de energía requerida (kWh/día)							1,14

Tabla 50

Perfil de carga en consumo energético bajo – Vereda Brisas de Rumiyaço.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Televisor	1	0,1	0,1	9	1	70%	0,105
Iluminación	4	0,06	0,24	8	1	100%	0,320
Equipo de sonido	1	0,1	0,1	3	1	40%	0,020
Refrigeración*	1	0,2	0,2	24	1	55%	0,440
Totales		0,46	0,6				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,6
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,9
Total, de energía requerida (kWh/día)							1,02

Tabla 51

Perfil de carga en consumo energético alto – Nazareth.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	4	0,1	0,4	8	1	100%	0,533
Televisor	1	0,1	0,1	10	1	95%	0,158
Refrigeración	1	0,2	0,2	24	1	60%	0,480
Otro	1	0,1	0,1	7	1	50%	0,058
Totales		0,5	0,8				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,8
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							1,2
Total, de energía requerida (kWh/día)							1,42

Tabla 52

Perfil de carga en consumo energético medio – Nazareth.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,06	0,18	7	1	100%	0,210
Televisor	1	0,1	0,1	8	1	80%	0,107
Refrigeración	1	0,1	0,1	24	1	60%	0,240
Otro	1	0,1	0,1	8	1	25%	0,033
Totales		0,36	0,5				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,5
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,6
Total, de energía requerida (kWh/día)							0,68

Tabla 53

Perfil de carga en consumo energético bajo – Nazareth.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,02	0,06	9	1	100%	0,090
Televisor	1	0,1	0,1	11	1	80%	0,147
Refrigeración	1	0,1	0,1	24	1	60%	0,240
Otro	1	0,01	0,01	7	1	25%	0,003
Totales		0,23	0,3				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,3
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,5
Total, de energía requerida (kWh/día)							0,56

Tabla 54

Perfil de carga en consumo energético alto – Puerto Toledo.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	3	0,01	0,03	9	1	100%	0,045
Refrigeración	1	0,1	0,1	24	1	95%	0,380
Otro	1	0,01	0,01	13	1	100%	0,022
Totales		0,12	0,1				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,1
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,4
Total, de energía requerida (kWh/día)							0,52

Tabla 55

Perfil de carga en consumo energético bajo – Puerto Toledo.

Cargas CA	Cantidad	Potencia (kW)	Consumo por carga (kW)	Tiempo (h/día)	Uso (día/sem)	Uso (%)	Energía (kWh/día)
Iluminación	2	0,01	0,02	9	1	100%	0,030
Refrigeración	1	0,1	0,1	24	1	80%	0,320
Otro	1	0,01	0,01	7	1	100%	0,012
Totales		0,12	0,1				
Potencia total consumida por familia (kW)							0,1
Consumo energético alto total vivienda (kWh/día)							0,4
Total, de energía requerida (kWh/día)							0,42

Anexo E. Cálculo para la regulación de instalaciones eléctricas.

La caída de tensión se calcula mediante las siguientes formulas:

- Para circuitos trifásicos:

$$\Delta V_{fase-fase} = \sqrt{3} * \Delta V_{fase-neutro} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\Delta V_{fase-neutro} = Z_{ef} * L * I \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

ΔV → Es la caída de tensión en Voltios (V).

L → Es la longitud del circuito en km.

I → Es la corriente del circuito en Amperios (A).

Z_{ef} → Es la impedancia eficaz en *ohm/km*.

$\Delta V_{fase-fase}$ → Caída de tensión fase a fase en Voltios (V)

$\Delta V_{fase-neutro}$ → Caída de tensión fase y neutro en Voltios (V).

Por lo tanto, la regulación de tensión o porcentaje de caída de tensión se define como:

$$\% \text{ Regulación} = \frac{\Delta V}{V_r} * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

Cabe mencionar que, la variable ΔV presentada en la ecuación anterior, es el resultado obtenido de la ecuación 36, es decir, la caída de tensión fase a fase en voltios (V). **Nota:** Las ecuaciones anteriores, son tomadas del boletín técnico de CENTELSA, C. de energía y telecomunicaciones S. A. (2005). *RETIE: Regulación de tensión en instalaciones eléctricas - Boletín Técnico, marzo.*

Anexo F. Cálculo del costo total anualizado.

La tasa de descuento real según HOMER Pro se calcula de la siguiente manera.

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

i' → Tasa de descuento nominal (%).

i → Tasa de descuento real (%).

f → Tasa de inflación esperada (%).

La tasa de descuento nominal y de inflación esperada es la misma para todos los sistemas por lo que la tasa de descuento real es del 5,19%. Para el costo total anualizado se utiliza la siguiente ecuación.

$$C_{TA} = F_{RC}(i, V_p) * C_{NPCA} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

C_{TA} → Costo total anualizado del sistema (\$/año).

F_{RC} → Factor de recuperación de capital.

V_p → Vida útil del proyecto (años).

C_{NPCA} → Costo presente neto total (\$). (El valor total del sistema).

Por su parte, el factor de recuperación de capital es una relación utilizada para el cálculo de un valor presente de una anualidad, así:

$$F_{RC}(i, V_p) = \frac{i(1+i)^{V_p}}{(1+i)^{V_p} - 1}$$

Ecuación 41

Anexo G. Costo nivelado de energía.

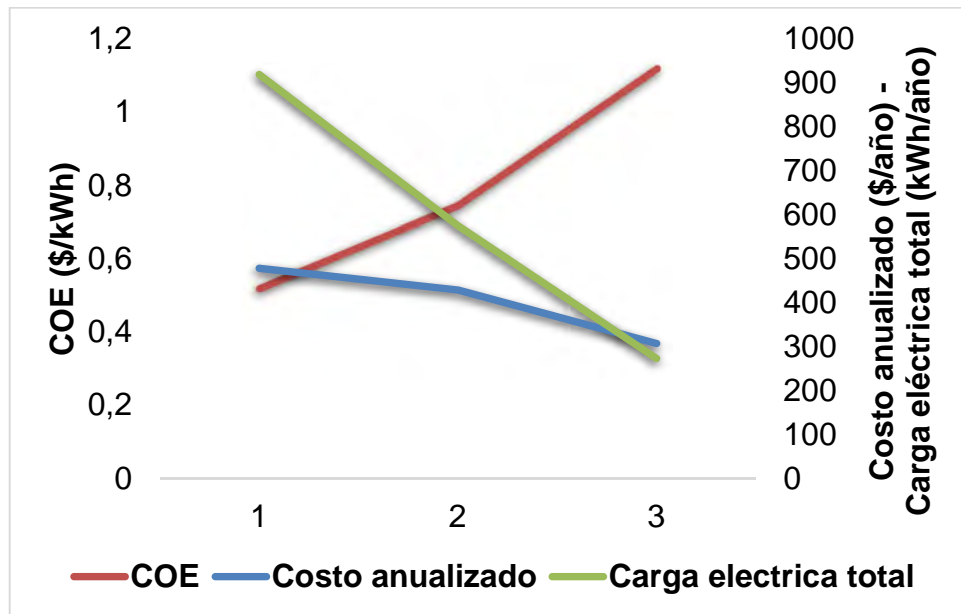


Figura 23. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica total – La Plata.

Variación del costo nivelado de energía respecto al costo anualizado y carga eléctrica total de consumos energéticos altos (1), medios (2), y bajos (3), en comunidad de La Plata.

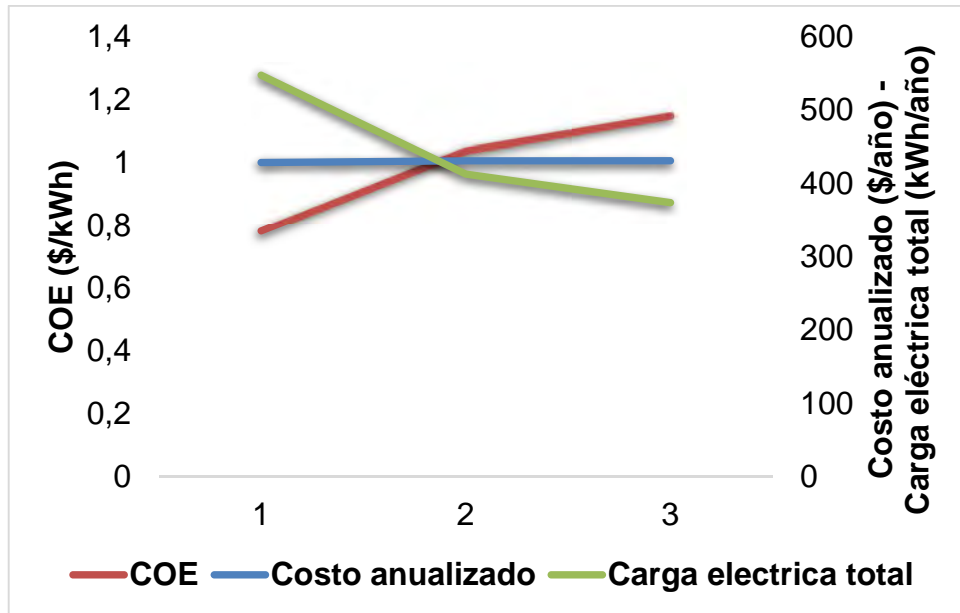


Figura 24. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Vereda Brisas de Rumiaco.

Variación del costo nivelado de energía respecto al costo anualizado y carga eléctrica de consumos energéticos altos, medios y bajos para una vivienda en comunidad de Vereda Brisas de Rumiaco.

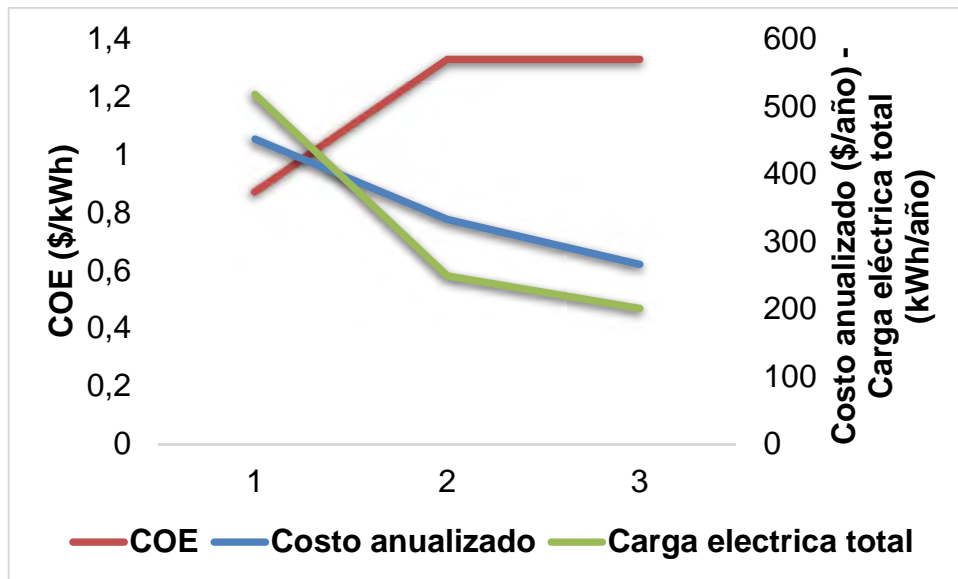


Figura 25. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Nazareth.

Variación del costo nivelado de energía respecto al costo anualizado y carga eléctrica de consumos energéticos altos, medios y bajos para una vivienda en comunidad de Nazareth.

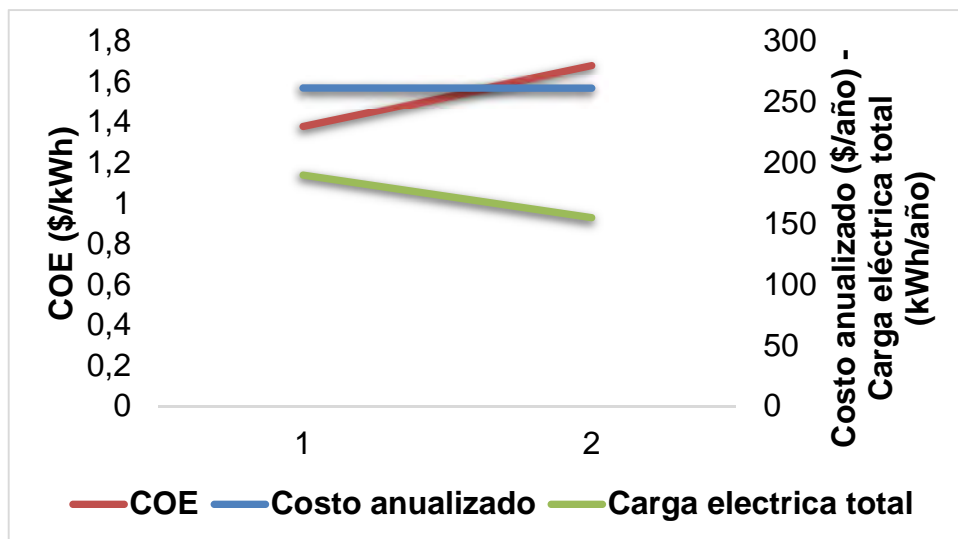


Figura 26. Relación entre costo anualizado y carga eléctrica – Puerto Toledo.

Variación del costo nivelado de energía en consumos energéticos altos y bajos para una vivienda en comunidad de Puerto Toledo

Anexo H. Porcentaje de regulación para conductores calibre AWG #12 a #1.

Tabla 56

Área aproximada en mm² de calibres AWG #12 a #1.

Calibre	Área aprox. (mm ²)
12	3,3
10	5,3
8	8,4
6	13,3
4	21,2
2	33,6
1	42,4

Nota: Los valores correspondientes al área aproximado de cada uno de los calibres, son tomados del simulador técnico de CENTELSA - Cables de energía y telecomunicaciones S.A. SIMULADOR TÉCNICO - Diámetro y área de los alambres en AWG. Recuperado de <http://www.centelsa.com/simulador/>

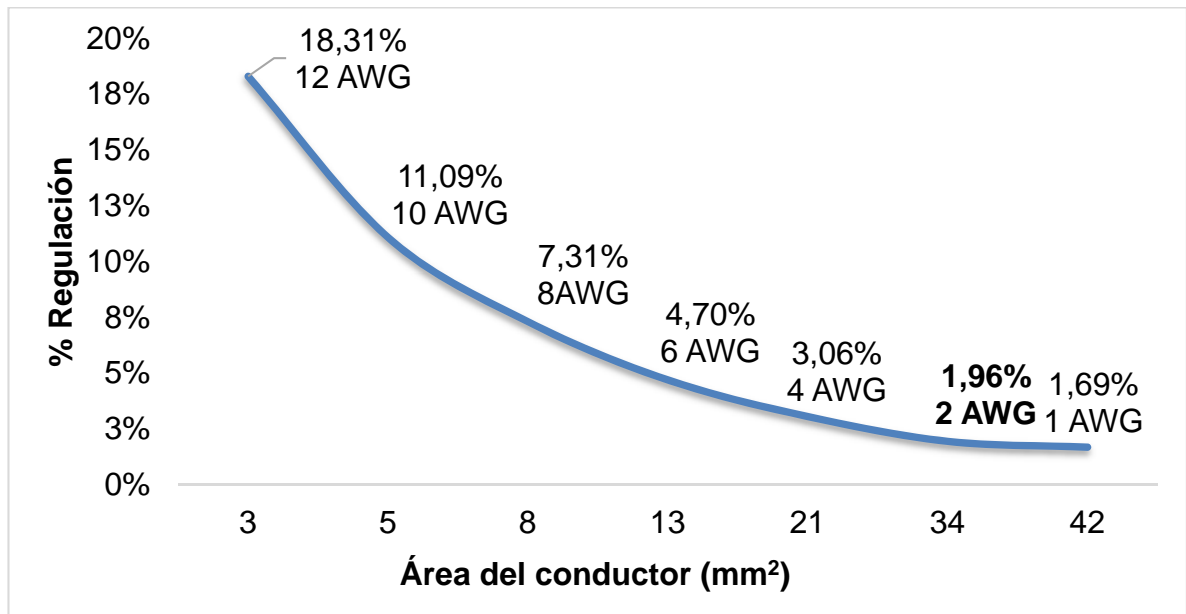


Figura 27. Variación de la regulación respecto al área del conductor (#2 AWG).

Porcentaje de regulación para calibres #12 a #1 teniendo en cuenta longitud de línea (300 m) en la conexión de generadores diésel – eólica – hídrica – diésel – biomasa – solar.

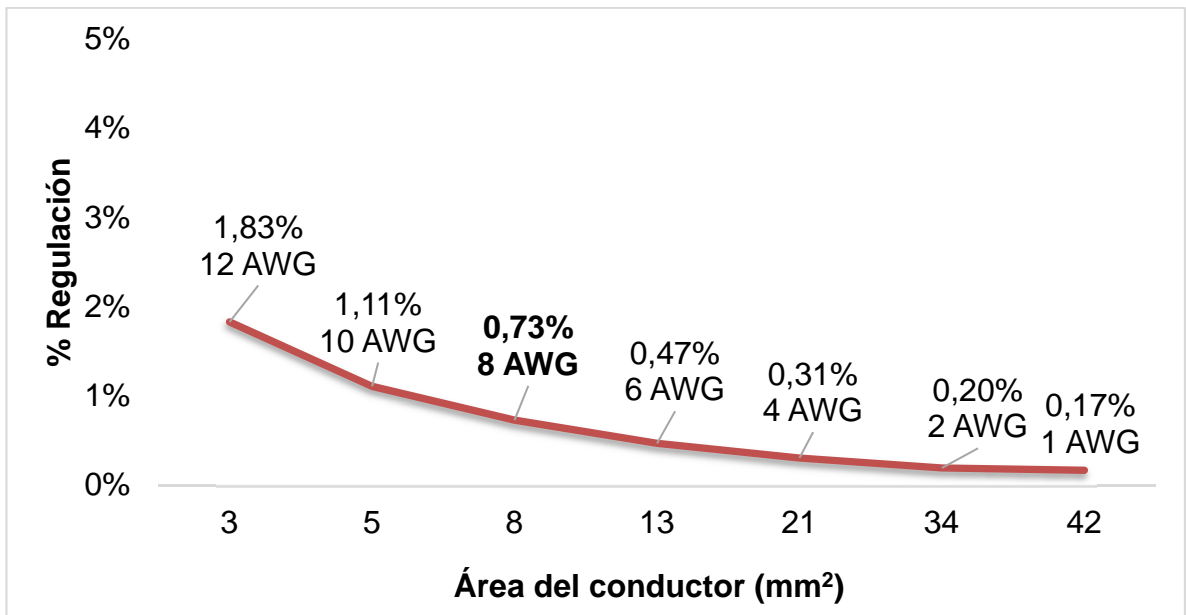


Figura 28. Variación de la regulación respecto al área del conductor (#8 AWG).

Porcentaje de regulación para conexión de generadores solar – almacenamiento con longitud de línea de 30 m.