

TecnoLógicas

Tecno Lógicas

ISSN: 0123-7799

tecnologicas@itm.edu.co

Instituto Tecnológico Metropolitano

Colombia

Garzón-Hidalgo, Juan D.; Saavedra-Montes, Andrés J.
Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia
Tecno Lógicas, vol. 20, núm. 39, mayo-agosto, 2017
Instituto Tecnológico Metropolitano
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344251476002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia

A design methodology of microgrids for non-interconnected zones of Colombia

Juan D. Garzón-Hidalgo¹ y
Andrés J. Saavedra-Montes²

Recibido: 09 de junio de 2016,
Aceptado: 15 de marzo de 2017

Cómo citar / How to cite

J.D. Garzón-Hidalgo y A.J. Saavedra-Montes, “Una metodología de diseño de micro redes para zonas no interconectadas de Colombia”, *TecnoLógicas*, vol. 20, no. 39, mayo - agosto, 2017.



-
- 1 Ingeniero Electricista, Joven Investigador, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín-Colombia, jdgazonh@unal.edu.co
 - 2 PhD en Ingeniería, MSc en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín-Colombia, ajsaaved@unal.edu.co

Resumen

En este artículo se propone una metodología para diseñar microrredes en zonas no interconectadas de Colombia. El diseño de la microrred se realiza siguiendo la normativa eléctrica colombiana. Las etapas de la metodología son: recolección de información de campo, evaluación de recursos energéticos renovables y no renovables, estimación del perfil de carga, dimensionamiento de los generadores, diseño de la topología de la microrred y análisis eléctrico. Los calibres de los conductores se seleccionan según la NTC 2050. Se presenta un caso de estudio, para el cual se selecciona la región de Taroa, en el Departamento de la Guajira. Taroa está ubicada en una zona no interconectada de Colombia. A partir de información meteorológica de la zona y el análisis de carga, se seleccionan los equipos de generación usando el software HOMER. Las tensiones en la microrred son calculadas a partir de flujos de potencia utilizando el software Power System Analysis Toolbox. Los generadores son representados con modelos reducidos para agilizar el proceso de diseño. Las variaciones de tensión en los nodos de la microrred diseñada están dentro del 3% de la tensión nominal. Este rango de variación está definido en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Los resultados de las simulaciones, utilizando datos reales, evalúan la viabilidad de la metodología propuesta.

Palabras clave

Flujo de carga, metodología de diseño, microrredes autónomas, NTC 2050, RETIE.

Abstract

A methodology for microgrids design in non-interconnected zones of Colombia is proposed in this paper. The microgrid design is carried out following the Colombian electrical normativity. The stages of the methodology are: collection of the field information, evaluation of renewable and nonrenewable resources, load profile estimation, sizing of the generators, design of microgrid topology, and electrical analysis. The size of conductors is selected according to NTC 2050. A study case is presented, where the region of Taroa, in the Department of Guajira, is selected. Taroa is located in a not interconnected zone of Colombia. From meteorological information of the zone and the load analysis, the generation equipment is selected using the software HOMER. The voltages on the microgrid are computed applying power flow analysis using the software Power System Analysis Toolbox. The generators are represented with reduced models to streamline the design. The voltage variations in the buses of the designed microgrid are in the 3% of the nominal voltage. This variation range is defined in Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Simulation results, using actual data, assess the feasibility of the proposed methodology.

Keywords

Power flow, methodology of design, standalone microgrids, NTC 2050, RETIE.

1. INTRODUCCIÓN

Las microrredes eléctricas se han identificado como una alternativa para suministrar energía a más de 1.09 billones de personas en el mundo que aún no cuentan con este servicio y viven en zonas alejadas de los sistemas eléctricos interconectados [1]. En Colombia, la capacidad instalada en las Zonas No Interconectadas (ZNI) está compuesta por generación diésel en un 92% y el 8% restante corresponde a fuentes no convencionales de energía (FNCE) [2]. Esta proporción hace que en las zonas no interconectadas (ZNI) se produzcan emisiones de 0,7326 tCO₂/MWh, las cuales son mayores que las producidas por el Sistema Interconectado Nacional, 0,1506 tCO₂/MWh. Teniendo en cuenta que Colombia produjo 224 millones de toneladas de CO₂ en el 2010 y se ha comprometido con una reducción de las emisiones de CO₂ del 20% con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030, se requieren acciones que lleven al país a la meta propuesta. Teniendo en cuenta los recursos energéticos renovables en Colombia, existe la oportunidad de emplear el concepto de microrredes eléctricas utilizando FNCE para la prestación del servicio de energía eléctrica en las ZNI y asimismo ayudar en la reducción de las emisiones de CO₂ [3]. La energización en estas regiones contribuye a la diversificación de las fuentes de generación dentro de un marco sostenible, impulsando la implementación de la generación distribuida y el desarrollo de las microrredes [4].

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) para las ZNI, ha desarrollado proyectos piloto a través de los denominados centros de innovación, evaluando la implementación de las FNCE y adquiriendo el conocimiento y la experiencia necesarias para la adopción de estas tecnologías, con el fin de cumplir en el 2020 la meta del 30% en la participación de la generación de energía eléctrica correspondiente a las ZNI [2], [4]. Para seguir avanzado en la implementación de

microrredes en ZNI es preciso contar con un procedimiento sistemático para su diseño.

En [5] los autores proponen un método basado en el análisis geográfico de los recursos renovables para identificar lugares con potencial energético para construir microrredes en Colombia. El método propuesto debe ser extendido hasta el diseño de la topología y además se requiere una evaluación de la viabilidad del método a través de análisis eléctrico. En [6] los autores proponen un método de diseño de microrredes basado en simulaciones. El método propuesto utiliza datos reales en las simulaciones para proponer opciones de diseño específicas de la microrred. El método de diseño de microrredes no incluye el diseño de los alimentadores ni los requerimientos gubernamentales de la región de Okinawa para construir sistemas eléctricos. Desde este punto de vista, el método aporta en la etapa de dimensionamiento de las fuentes, pero debe ser extendido incluyendo los requerimientos de la región donde se construye la microrred. En [7] un estudio de viabilidad de una microrred aislada basada en paneles fotovoltaicos, generadores eólicos y baterías es presentado. El estudio de viabilidad se enfoca en la evaluación técnico-económica del diseño de la microrred. El software HOMER es empleado para hacer la evaluación. El estudio de viabilidad no incluye requerimientos técnicos locales para diseñar la topología de la microrred. En [8] el autor presenta el diseño de microrredes rurales basadas en fuentes renovables en Brasil. El autor aplica la metodología de diseño a un caso de estudio basado en una granja agrícola. La metodología incluye la selección de los equipos de generación y hace una estimación de la carga. Esta metodología puede ser extendida incluyendo estudios eléctricos y teniendo en cuenta la regulación eléctrica del país anfitrión. En [9] los autores proponen el diseño óptimo de una microrred aislada basada en fuentes renovables y un sistema de almacenamiento. Los

autores validan el método de diseño propuesto a través de simulaciones y análisis de sensibilidad; sin embargo, el método de diseño no incluye criterios o requerimientos de un sistema de regulación gubernamental. Según los autores de [2] y [10] en Colombia existen 11 microrredes en operación. En [2] los autores confirman que en Colombia actualmente no existe regulación técnica para la construcción de microrredes. Igualmente, los autores citan el código eléctrico colombiano como la normativa que debe ser seguida cuando se construye cualquier sistema eléctrico en Colombia. Partiendo del análisis de la literatura científica se evidencia la necesidad de una metodología de diseño de microrredes para ser aplicada en las ZNI colombianas y que tenga en cuenta la normativa existente.

El objetivo principal de este artículo consiste en proponer, aplicar y evaluar la viabilidad una metodología de diseño de microrredes en ZNI de Colombia. En la metodología se destaca la explotación de fuentes renovables presentes en la ZNI seleccionada. La cantidad de recursos disponibles en la zona se obtiene de información pública; esta condición permite que cualquier persona pueda evaluar la cantidad de recursos presentes en la zona de interés. Adicionalmente, la metodología considera su aplicación en Colombia, por lo tanto, la estimación del perfil de carga y el dimensionamiento del calibre de los conductores se realiza con base en el código eléctrico colombiano, NTC 2050. Asimismo, la evaluación de las variaciones de la tensión nominal en los nodos se observó según las condiciones impuestas por la resolución 091 de 2007 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Otro aspecto relevante de la metodología consiste en el uso de software libre o en demostración; por ejemplo, el dimensionamiento de las fuentes de generación se realizó utilizando el software HOMER en su periodo de prueba y el análisis eléctrico de la microrred se realizó con simulaciones en el software PSAT. El uso de modelos equivalentes para

representar las cargas y fuentes de generación es otra característica que se destaca de la metodología, puesto que el uso de modelos simplificados acelera la validación de las topologías eléctricas consideradas. Finalmente, para evaluar la viabilidad de la metodología de diseño, ésta se aplica en un caso de estudio para el cual se seleccionó una ZNI de Colombia. Los resultados obtenidos demuestran que la metodología de diseño es viable.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: inicialmente se describe la metodología de diseño de microrredes. Luego se define un caso de estudio sobre el cual se aplica la metodología propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones del artículo.

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en este artículo está compuesta de seis etapas y consiste en una extensión de la metodología presentada en [5].

2.1 Recolectar información de la ZNI

Se debe disponer de información específica de la ZNI que puede ser adquirida a través de: visitas a la zona para registrar el comportamiento de las diferentes variables en un período de tiempo, consulta de fuentes confiables tales como el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), IPSE, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Renewable Energy Laboratory (NREL), etc. o estimaciones que produzcan un grado de incertidumbre razonable en los casos en que no se disponga de información precisa. El método de generación de energía eléctrica dependerá de la disponibilidad de recursos en la ZNI, pro-

curando la utilización mayoritaria de recursos renovables [11]. La información preliminar que debe ser recolectada para el diseño de la microrred es la siguiente:

Condiciones de la carga: número de usuarios, ubicación y distancia entre usuarios, área promedio de vivienda, área disponible para instalación de generadores y almacenadores y aplicación del servicio de energía.

Condiciones de la zona: temperatura ambiente mínima, máxima y promedio, altura sobre el nivel del mar, densidad de descargas atmosféricas, resistividad aparente del terreno, identificación de ambientes salinos, identificación de ambientes húmedos y usos del suelo.

Condiciones económicas: disponibilidad de apoyos gubernamentales (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas, FAZNI, IPSE), índice de necesidades básicas insatisfechas y condiciones de acceso.

Recursos renovables: irradiación solar promedio mensual y condiciones de registro, velocidad de viento promedio mensual y condiciones de registro, potencial hídrico, producción de biomasa, potencial oceánico y potencial geotérmico.

Recursos no renovables: diésel, gasolina y carbón.

2.2 Estimar perfiles de carga

Aplicando los procedimientos establecidos en el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050), se calcula la demanda máxima a partir del análisis de carga por usuario y las cargas especiales o de uso común que se tengan en cuenta según el uso del suelo y la aplicación del servicio eléctrico. Una vez estimado el valor de demanda máxima de la totalidad de usuarios, se calcula la curva de carga según el tipo de servicio, aplicando los factores de demanda (Fd) para usuarios en ZNI [12]. Estos valores se expresan como porcentajes de la

carga máxima. El resultado obtenido debe escalarse de manera que el promedio de consumo de energía por usuario sea aproximadamente 92 kWh/mes como mínimo [4].

2.3 Dimensionar los elementos que conforman la microrred

Las fuentes de generación de una microrred aislada deben atender la totalidad de la carga con una adecuada capacidad en reserva, con el fin de alcanzar una disponibilidad y fiabilidad razonable del suministro [11]. A partir de la información obtenida en las dos primeras etapas, se puede estimar la capacidad para cada tipo de generación que participe en la microrred. En este paso es recomendable utilizar herramientas o metodologías que ayuden a la selección óptima de tales elementos de la microrred [5].

2.4 Definir la topología para la microrred

Según las características del terreno, el área disponible, la distribución y magnitud de las cargas, se define la topología de la red. Esto incluye la ubicación y distribución de los equipos de generación, configuración y trazado de la red de distribución, longitudes de ramales, niveles de voltaje, calibre de conductores y toda la información que sea necesaria para elaborar un diagrama unifilar de la red para asimismo modelarla y simularla.

Los calibres de conductores se determinarán según la corriente máxima esperada de salida de cada equipo de generación, incluido el factor de seguridad, de 125% establecido en la NTC 2050. El calibre de conductor de la red de distribución no deberá tener una capacidad de corriente menor a la sumatoria de las corrientes nominales de los generadores, incluido el factor de seguridad.

2.5 Realizar análisis eléctrico

El análisis eléctrico de la red ante la variación de la carga y la generación a lo largo del día indicará la viabilidad operativa del diseño inicial. Para ello se realiza un análisis de tensiones en estado estable, evaluando el flujo de potencia en cada período u hora de servicio, sobre uno o varios días que representen el comportamiento de las fuentes y la demanda a lo largo del año.

Los calibres de conductores no deberán ser menores a los calculados en la sección anterior. Según lo establece la resolución CREG 091 de 2007 en el artículo 33 referente a la calidad del servicio en las ZNI [12], la magnitud de la tensión deberá mantenerse dentro de $\pm 10\%$ de la tensión nominal en los bornes de generación y la frecuencia dentro de $\pm 1\%$ de su valor nominal. En conformidad con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), debe garantizarse que la regulación de voltaje al final de cada acometida de usuario final no supere el 3%.

2.6 Realizar ajustes

Con los resultados obtenidos en los flujos de potencia se determina la viabilidad operativa de la microrred. Si las caídas de voltaje superan el límite establecido deberá aumentarse el calibre de los conductores. Para el cálculo del flujo de potencia se introduce el modelo del generador slack en la simulación. La función de este elemento es evaluar la capacidad de generación determinada inicialmente. Si el generador slack absorbe potencia activa, se asume como un excedente de potencia que irá al sistema de almacenamiento. La cantidad de energía excedente determinará si es necesario redimensionar la capacidad de almacenamiento. Si el generador slack entrega potencia activa a la red, deberá compararse su aporte con la capacidad nominal de los generadores convencionales que hagan parte del diseño, tales como los

generadores que utilizan diésel, gasolina, carbón, etc., para determinar si la demanda de energía adicional puede ser asumida por el conjunto de generadores definidos, o, por el contrario, deberá recalcularse la capacidad de generación. Si el promedio de la potencia entregada por el nodo slack, en cada hora, supera el 10 % de la potencia nominal de los generadores despachables, deberá aumentarse la capacidad de generación. Debe cumplirse la condición (1):

$$\frac{\sum_{i=1}^n P_{slack_i}}{n} < 1.1 \sum P_{nom_{Desp}} \quad (1)$$

Donde:

n: Número de horas de servicio

P_{slack} : Potencia activa de salida generador slack

$P_{nom_{Desp}}$: Potencia nominal generadores despachables

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología de diseño, en el cual se destacan las entradas y salidas más relevantes de cada etapa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para aplicar la metodología de diseño se selecciona una ubicación en la cual existen recursos renovables y no se cuenta con interconexión al sistema eléctrico. Taroa, ubicada en las coordenadas $12,4^\circ$ de latitud con $-71,6^\circ$ de longitud, en el departamento de La Guajira, ver Fig. 2. Se definen la cantidad, ubicación y tipo de cargas que serán alimentadas por la microrred.

3.1 Recolección de información

Las condiciones de la carga son las siguientes: 20 usuarios, dispersión promedio 64.5 m, área promedio de vivienda de 35 m², servicio tipo residencial, 24 horas de servicio al día. Las condiciones de la zona: Temperatura promedio 30 °C, máxima 42

°C, altura 11 m.s.n.m., zona costera y baja probabilidad de inundación. Las condiciones económicas para esta región son COP 67.090 millones definidos en el FAZNI [13] y el índice de necesidades básicas insatisfechas es 91.92% [14]. El diésel se define como un recurso no renovable disponible. La información de irradiación solar y velocidad de viento se obtiene desde la base de datos e información Surface Meteorology and Solar Energy de la NASA [15], ver Tablas 1 y 2 respectivamente. La resolución de la base de datos es de 0.001° de longitud (aproximadamente 111.12 m) y 0.001° de latitud (aproximadamente 111.12

m), es decir, que la información reportada por la base de datos corresponde a un área de 12347.65 m². Una vez se calcule la potencia de los generadores eólicos, generadores fotovoltaicos y almacenadores en la etapa de dimensionamiento de los elementos de la microrred, esa cantidad de potencia reportada puede ser llevada a la topología de la microrred de forma concentrada o repartida en el área de interés. El criterio para seleccionar generadores repartidos o concentrados dependerá de la disponibilidad del terreno para instalar los generadores.

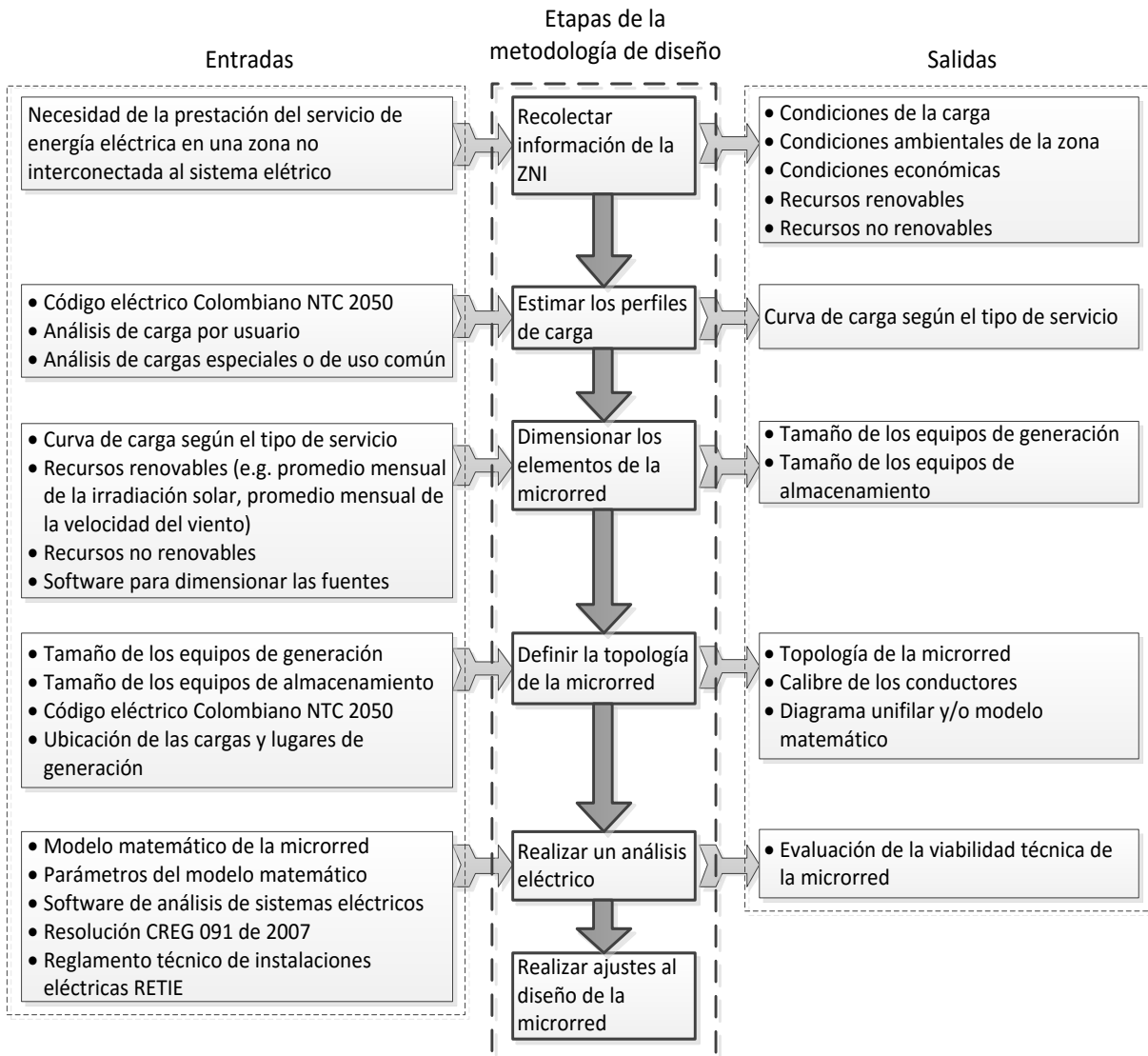


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología de diseño de la microrred. Fuente: Autores.



Fig. 2. Ubicación geográfica de Taroa. Fuente: Google Earth.

Tabla 1. Irradiación solar horizontal global promedio mensual.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
[kWh/m ² /día]	5,86	6,51	7,02	6,92	6,72	7,00	7,13	7,17	7,17	6,66	5,99	5,39
Claridad	0,68	0,69	0,69	0,65	0,63	0,66	0,68	0,68	0,65	0,63	0,64	0,65

Fuente: NASA Surface meteorology, Solar Energy database 2015.

Tabla 2. Velocidad de viento promedio mensual a 10m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
[m/s]	8,75	9,08	8,85	7,41	6,50	7,56	7,74	6,64	5,43	5,14	6,08	7,88

Fuente: NASA Surface meteorology, Solar Energy database 2015.

El software HOMER es utilizado para obtener el número de fuentes de generación y unidades de almacenamiento optimizando el costo económico inicial de la microrred. Este programa construye los perfiles diarios de velocidad de viento e irradiación solar, a partir de los valores promedio, que se presentan en las Tablas 1 y 2.

3.2 Estimación perfil de carga

El consumo máximo se calcula según uno de los procedimientos propuestos en la NTC 2050, a partir del supuesto de área promedio de vivienda y el consumo por usuario (kVAusuario), el cual equivale a la

suma de las cantidades presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo del consumo por usuario según NTC 2050.

Circuito	Potencia [VA]
Alumbrado y tomacorrientes	1.120
Para pequeños artefactos	1.500
Para zona de ropas	1.500
Potencia total por usuario ($VA_{usuario}$)	4.120

Fuente: Autores.

Donde el valor del circuito de alumbrado y tomacorrientes de 1.120 VA se obtiene de multiplicar el área promedio por la densidad de la carga sugerida en la NTC, 35 m² x 32 VA/m². La demanda máxima total se calcula como (2):

$$kVA_{Total} = F_p \cdot F_{Div} \cdot \#usuarios \cdot kVA_{usuario} \quad (2)$$

El Donde F_p es el factor de pérdidas, asumido como 10 %, F_{Div} es el factor de diversidad establecido en la NTC 2050, Tabla 220-32, 0.38 para 20 usuarios y $kVA_{usuario}$ equivale a la demanda por usuario. La demanda total estimada en la microrred equivale a (3):

$$kVA_{Total} = 1,10 \cdot 0,38 \cdot 20 \cdot 4,12 = 34,44 \text{ kVA} \quad (3)$$

Este valor se utiliza para dimensionar inicialmente los equipos de generación a través de HOMER. El perfil de carga para 24 horas de servicio presentado en la Tabla 4, se calcula aplicando a la demanda máxima total los factores correspondientes definidos en la referencia [12].

Este perfil de carga se escala usando HOMER para obtener una demanda promedio por usuario de 92 kWh/mes, obteniendo una demanda máxima total de 4,74 kW para el total de la microrred y una demanda promedio de 2,56 kW.

3.3 Dimensionamiento de los elementos que conforman la microrred

En la Tabla 5 se muestran los equipos de generación seleccionados mediante simulación en el software HOMER, con una vida útil del proyecto de 20 años y los costos que se muestran en la Tabla 6.

3.4 Topología

La configuración de la red dependerá de las características de los equipos de generación y la disposición física de los elementos del sistema. Se considera una configuración monofásica de corriente alterna con una tensión de 120 V para la microrred. Se concentran los equipos de generación en un barraje principal, al cual se integran los paneles fotovoltaicos y los bancos de baterías a través de convertidores de potencia DC/AC, ver Fig. 3. A partir de la corriente nominal de los equipos de generación, incluyendo el factor de seguridad, se seleccionan los calibres de conductor según la Norma NTC 2050, Tabla 310-16. Los calibres y parámetros de los conductores se presentan en la Tabla 7.

Tabla 4. Perfil de carga diario. Fuente: Autores.

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
[kVA]	18,25	17,22	16,3	15,84	15,50	15,84	18,60	20,66	22,39	24,80	25,14	26,52
Período	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
[kVA]	26,86	25,83	23,42	22,73	22,39	22,73	28,24	34,44	33,41	29,62	25,14	20,66

Tabla 5. Sistema de generación de la microrred. Fuente: Autores.

Sistema	Producción [kWh/año]	Fracción [%]
Fotovoltaico, 5 kW	9.658	33,82
Generador Diesel, 5,3 kW	9.794	34,30
Turbina Windera S, 3,2 kW	9.105	31,88
Total	28.556	100,00

Tabla 6. Costos netos en US\$ de la microrred. Fuente: Autores.

Generador	Inversión [US]	Reemplazo [US]	O&M [US]	Salvamento [US]	Total [US]
Fotovoltaico	15.000	0	646	0	15.646
Eólico	15.000	4.782	1.939	0	21.721
Diésel	2.650	4.744	5.007	41.067	53.468
Baterías	4.900	10.058	904	0	15.862
Total	37.550	19.584	8.496	41.067	106.697

Tabla 7. Calibres y parámetros de los conductores utilizados en la microrred. Fuente: Autores.

Generador	Calibre del conductor AWG	Parámetros	
		R Ω /km	L mH/km
Diésel	4	1,044	0,252
Eólico	8	2,64	0,253
Fotovoltaico	6	1,66	0,253
Baterías	6	1,66	0,253
Sistema de distribución	2x2/0	0,523	0,247

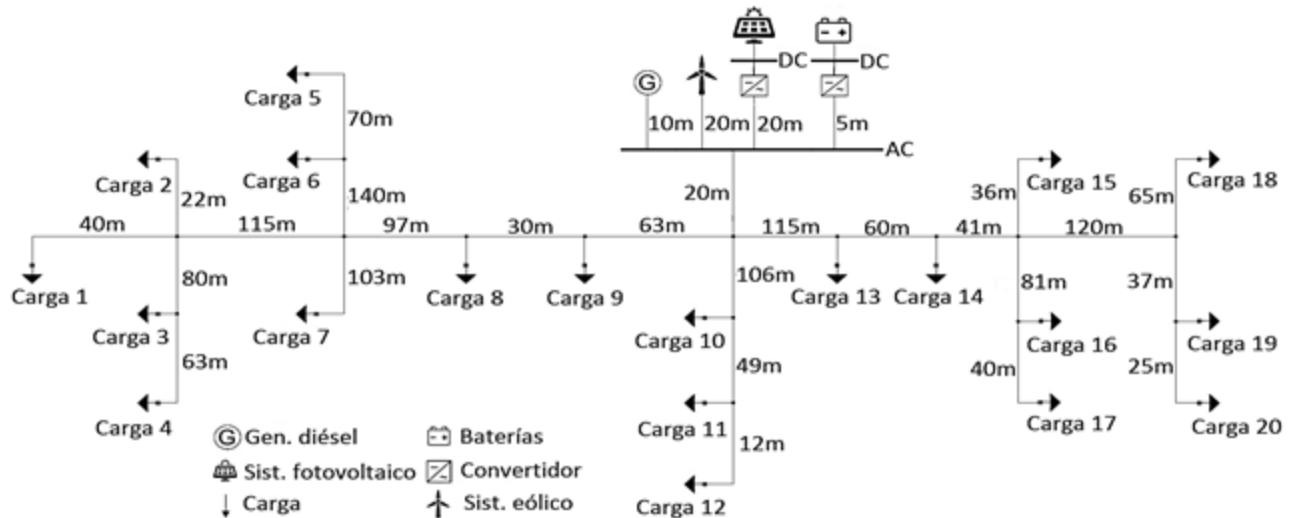


Fig. 3. Topología de la microrred diseñada. Fuente: Autores.

3.5 Realizar análisis eléctrico

Con el análisis eléctrico de la red, se verifica que la caída de tensión en los puntos de derivación de las cargas no supere el límite establecido. La simulación en el software HOMER arroja información hora a hora de la potencia entregada por cada una de las fuentes y la potencia demandada por la totalidad de la carga. A partir de esa información se generan perfiles de demanda para cada carga individual, de tal manera que la totalidad de la demanda se distribuya aleatoriamente en el sistema. Tanto los generadores como las cargas se modelan en el software PSAT como elementos de potencia constante. Se considera un factor de potencia unitario para las cargas y los generadores.

Las reactancias de las líneas de distribución representan la única demanda de potencia reactiva del sistema. Se utiliza el modelo de nodo slack como un elemento adicional en la simulación, el cual es utili-

zado para verificar la capacidad de los equipos de generación propuestos. Este nodo también suple la demanda de reactivos. La magnitud de la participación del nodo slack es el factor que permite determinar si la capacidad de generación especificada es suficiente para cubrir la demanda en condiciones reales, sin nodo slack. Con los datos de generación y demanda se calcula un flujo de carga por cada hora del día, verificando el valor de las tensiones en los nodos de carga a lo largo del día. Para representar el comportamiento de la red ante diferentes condiciones de operación se seleccionan los datos de dos de los días simulados en el software HOMER, con diferentes condiciones de viento e irradiación solar.

Para el día 1 se toman los datos de un día del mes de julio, en el cual se presentan niveles de irradiación solar y velocidades de viento favorables. Para el día 2 se toman los datos de un día correspondiente al mes de febrero, en el que se presentan

condiciones menos favorables comparadas con el día 1.

En la Fig. 4, se muestran los perfiles de generación total e individual y la curva de demanda total del sistema del día 1.

Durante el día 1 se presenta una alta participación de las fuentes no convencionales. Este comportamiento indica un adecuado dimensionamiento de las fuentes y en la cual la generación diésel cumple su función de respaldo junto con el sistema de almacenamiento. En la Fig. 5 se muestran los perfiles de tensión en bornes de los generadores durante el día 1.

Las variaciones de tensión en bornes de generadores indican una dependencia notable entre la magnitud de la tensión y la disponibilidad del recurso de generación en las fuentes renovables. Esto sugiere que elementos sub-dimensionados para los recursos disponibles pueden presentar problemas operativos cuando el recurso alcance altos niveles.

Para analizar las variaciones de tensión en los nodos de carga de la microrred, se seleccionan tres nodos que representan las diferentes distancias entre los nodos de carga y el nodo de generación, ver Fig. 3. Los nodos seleccionados corresponden a la Carga 9, la cual se considera una carga cercana, 83 m, a la Carga 15, la cual se

encuentra a una distancia media, 293 m, y a la Carga 4, la cual se encuentra alejada del nodo de generación, 468m. En la Fig. 6, se presentan los perfiles de tensión en los nodos de las cargas seleccionadas. Estos perfiles corresponden a la variación de las fuentes de generación reportada el día 1, ver Fig. 4

Las Fig. 6.a), 6.b) y 6.c) muestran que, a mayor distancia entre el nodo de carga y el nodo de generación, las variaciones de tensión son mayores. Este resultado se explica debido al aumento de la impedancia cuando se aumenta la distancia del nodo que se analiza. Si para alguna topología evaluada de la microrred, la variación de tensión está por fuera de los límites permitidos, sistemas de control de voltaje y compensadores de reactivos deberán ser ubicados en puntos lejanos de la red. Sin embargo, para la topología propuesta, la elección del calibre de conductor mantiene la regulación de tensión dentro del límite establecido, aún en los puntos más alejados de los generadores

En la Fig. 7, se muestran los perfiles de generación total e individual y la curva de demanda total del sistema del día 2. En este caso se presentan condiciones climáticas menos favorables a la participación de las fuentes renovables.

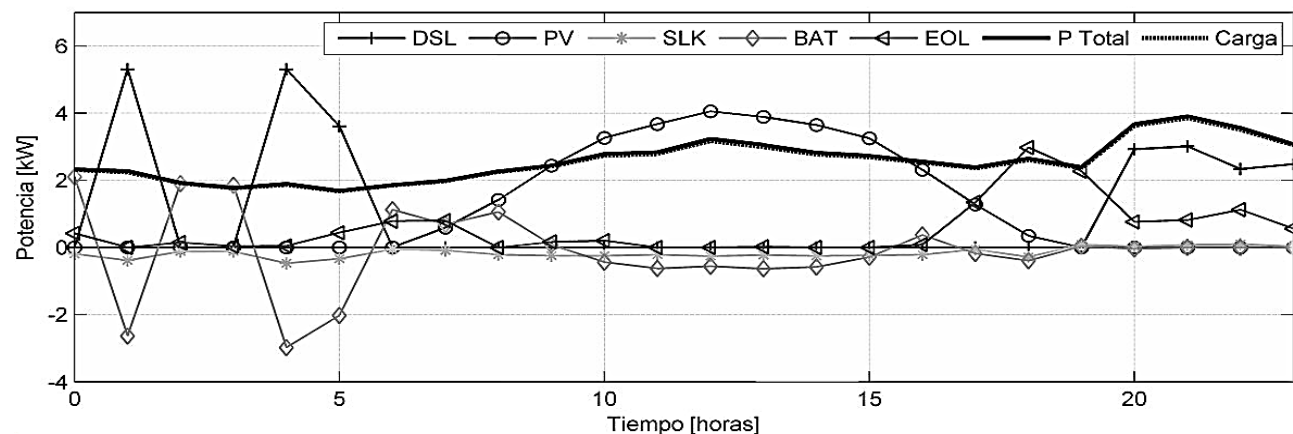


Fig. 4. Perfiles de generación y demanda del día 1. DSL: Diésel. PV: Fotovoltaico. BAT: Baterías. EOL: Eólico. Fuente: Autores

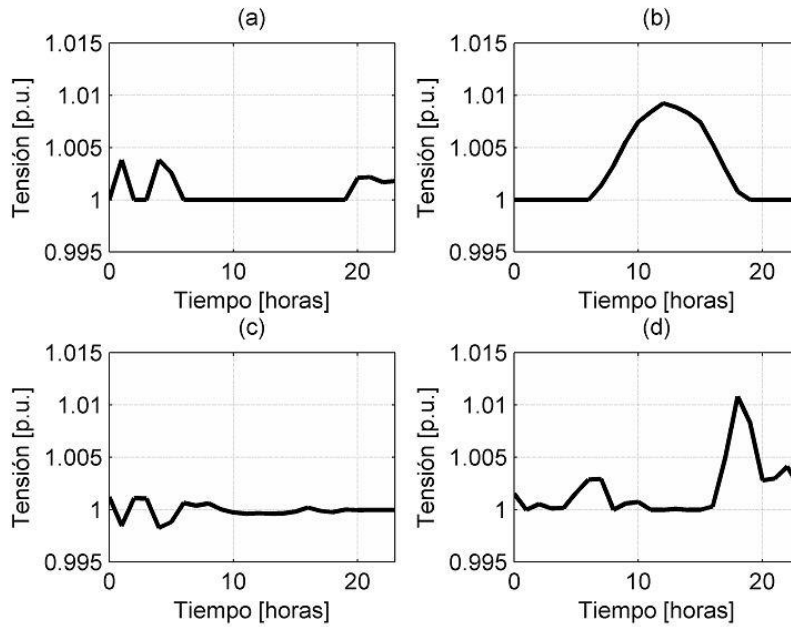


Fig. 5. Perfiles de tensión de los generadores del día 1. a) Diésel, b) Fotovoltaico, c) Almacenamiento, d) Eólico. Fuente: Autores

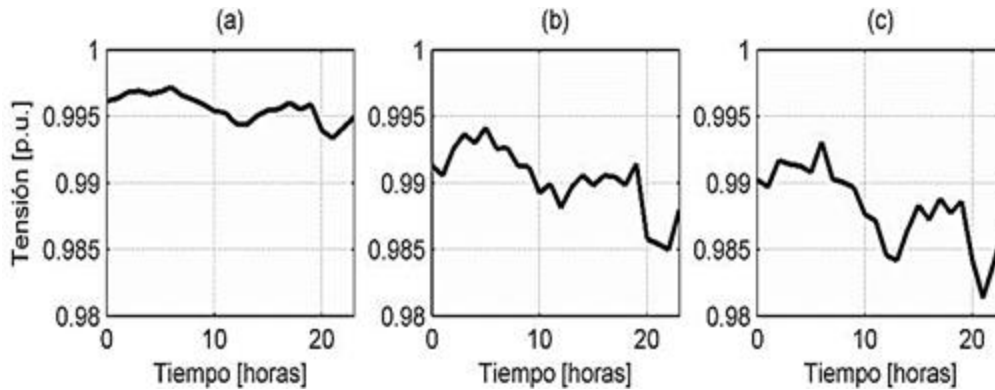


Fig. 6. Perfiles de tensión en las cargas correspondientes al día 1. a) Carga cercana, b) Carga a distancia promedio y c) carga lejana. Fuente: Autores

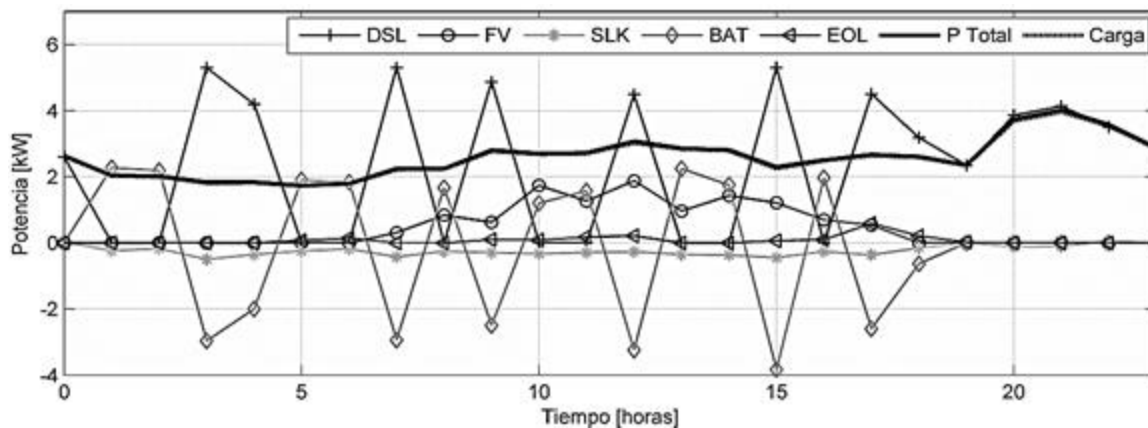


Fig. 7. Perfiles de generación y demanda del día 2. Fuente: Autores.

La alta participación del generador diésel se debe a que se restringe la operación del generador a bajos niveles de carga, por lo tanto, cuando se requiere un aporte mínimo del generador diésel, este se ve forzado a entregar una potencia mayor a la requerida y el sistema de almacenamiento debe absorber esta energía excedente. Este comportamiento será menos notable a medida que aumente el tamaño de la microrred y se requiera de generadores de mayor capacidad. En la Fig. 8 se muestran los perfiles de tensión en los bornes de los generadores correspondientes al día 2.

El comportamiento de la tensión en los generadores eólico y fotovoltaico presenta menores variaciones comparado con el día 1, mientras el comportamiento de la tensión a la salida del generador diésel y las baterías presenta cambios durante la mayor parte del día, contrario a lo ocurrido en el día 1. Los niveles de voltaje en bornes de generadores dependen directamente de la demanda de potencia. Este comportamiento indica la necesidad de implementar esquemas de control para mantener la tensión dentro de los límites establecidos ante variaciones importantes de carga.

En la Fig. 9, se muestran los perfiles de voltaje a lo largo del día 2 para las mismas cargas.

Aunque se presentan mayores variaciones de tensión en los generadores respecto al día 1, los perfiles de tensión en las cargas no presentan diferencias considerables respecto al día 1 y se mantienen dentro de los límites requeridos. Esto se debe a que la variación de la tensión respecto a la distancia depende en mayor medida de los niveles de corriente en la red de distribución.

3.6 Realizar ajustes

Los resultados iniciales indican que las tensiones en el sistema se encuentran dentro de los límites establecidos en los puntos de carga y generación. La participación del

nodo slack indica que el previo dimensionamiento de los equipos de generación es adecuado para suplir la demanda de energía pronosticada. En consecuencia, el diseño inicial no requiere ajustes referentes a especificaciones técnicas. Por lo tanto, la selección de calibre y configuración de conductores, capacidad de generación, capacidad de almacenamiento y topología de red, se consideran aptas para las condiciones de operación deseadas.

4. CONCLUSIONES

Se presenta una metodología de diseño de microrredes eléctricas en zonas no interconectadas de Colombia. La metodología es propuesta para llevarse a cabo en seis etapas. Las etapas, estimación de la carga y diseño de la topología de la red eléctrica, están propuestas con base en la normativa colombiana, las etapas restantes pueden ser ajustadas y aplicadas para diseñar microrredes en cualquier ubicación. Se evalúa la viabilidad de la metodología diseñando una microrred con datos reales de irradiación solar, vientos y apoyos gubernamentales para la región de Taroa en el Departamento de la Guajira. La metodología utiliza el software HOMER para dimensionar las fuentes de generación y el software PSAT para hacer el análisis eléctrico de la microrred propuesta. Los resultados que se obtienen utilizando estos programas pueden ser obtenidos con programas diferentes que suplan el mismo análisis. Los voltajes obtenidos en los nodos de carga y en los nodos de generación a lo largo de dos días representativos de los 365 días del año se encuentran en el rango aceptado por la normativa colombiana. El comportamiento de las tensiones muestra la viabilidad de aplicar la metodología propuesta.

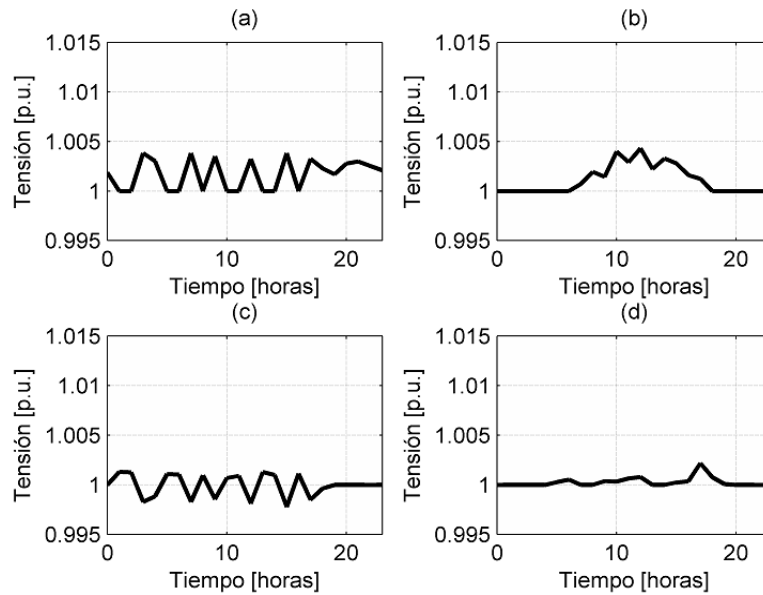


Fig. 8. Perfiles de tensión de los generadores día 2. a) Diésel, b) Fotovoltaico, c) Almacenamiento, d) Eólico. Fuente: Autores.

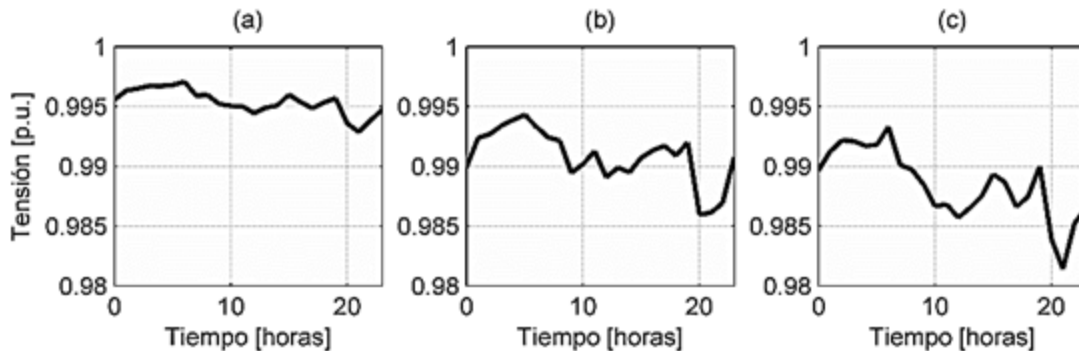


Fig. 9. Perfiles de tensión de las cargas el día 2. a) Carga más cercana, b) Carga distancia promedio, c) carga lejana. Fuente: Autores.

Por otro lado, existen etapas que serán agregadas a la metodología y consisten en el diseño del sistema de gestión de energía eléctrica, el sistema de comunicaciones, el diseño de redes de uso final y el diseño óptimo de los conductores. Adicionalmente, la etapa de análisis eléctrico puede ser abordada con estudios de cortocircuito para diseñar el sistema de protecciones, estudios de calidad de la potencia para evaluar el impacto de la distorsión armónica y estudios de pérdidas eléctricas para seleccionar óptimamente los conductores. Finalmente, una vez que la metodología se consolide en el diseño de microrredes residenciales, otra etapa que se puede ser

agregada al diseño de las mismas consiste en considerar la aplicación de la microrred, ya sea residencial, comercial, industrial o militar.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Nacional de Colombia, a través de los proyectos Microrred-26861 y GESMICRO-30773 y por Colciencias (Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas) a través de una beca-pasantía del programa Jóvenes Inves-

tigadores - Convocatoria 645-2014, el proyecto MicroRENIZ-25439 con código 1118-669-46197 y una beca de doctorado 095-2005.

6. REFERENCIAS

- [1] C. W. Shyu, "Ensuring access to electricity and minimum basic electricity needs as a goal for the post-MDG development agenda after 2015," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 19, pp. 29–38, 2014.
- [2] E. E. Gaona, C. L. Trujillo, and J. A. Guacaneme, "Rural microgrids and its potential application in Colombia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 125–137, Nov. 2015.
- [3] R. S. C. Ximena Barrera, Roberto Gómez, *El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21*, 2nd ed. Santiago de Cali: WWF-Colombia, 2015.
- [4] U. de P. M. E.-U. Ministerio de Minas y Energía, *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013 - 2017*, 1st ed. Bogotá D.C., Colombia: Strategy Ltda., Legis S.A., 2014.
- [5] C. A. Juan Ramón Camarillo-Peñaranda, Andrés Julián Saavedra-Montes and Ramos-Paja., "Selección de lugares para instalar micro-redes en Colombia," *CIDET*, vol. 10, pp. 9–19, 2014.
- [6] K. Tanaka and K. Maeda, "Simulation-based design of microgrid system for a resort community," in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 28–34.
- [7] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island," *Appl. Energy*, vol. 121, pp. 149–158, May 2014.
- [8] M. F. Z. Souza, "On rural microgrids design - a case study in Brazil," in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, 2015, pp. 160–164.
- [9] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, "Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system," *Appl. Energy*, vol. 160, pp. 728–736, Dec. 2015.
- [10] I. de P. y P. de S. E. para las Z. N. I.-I. Ministerio de Minas y energía, "Planes de Acción 2014," Bogotá D.C., Colombia, 2014.
- [11] J. Driesen and F. Katiraei, "Design for distributed energy resources," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 30–40, May 2008.
- [12] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS - CREG, "Resolución CREG091-2007," *Diario Oficial No. 46.881 de 24 de enero de 2008*, 2007. [Online]. Available: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/0816582ddafcf8110525785a007a6fa4?OpenDocument&Highlight=0,NoResolucionCREG091-2007>. [Accessed: 20-Jun-2001].
- [13] U. de P. M. E.-U. Ministerio de Minas y Energía, "Resultados PIEC 2013-2017," Strategy Ltda., Legis S.A., Bogotá D.C., Colombia, 2012.
- [14] Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas - DNP, "Inversiones y finanzas públicas," Bogotá D.C., Colombia, 2015.
- [15] NASA, "Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Data and Information." [Online]. Available: https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse_table. [Accessed: 20-Jun-2005].