

EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE MICRORREDES ELÉCTRICAS AISLADAS POR EL METODO DE ARBOL DE FALLAS

Laura Rocío Landaeta Chinchilla¹, Mario Alejandro Suarez Sierra²
Oscar David Flórez Cediel³

^{1,2} Estudiantes X semestre Ingeniería Eléctrica, miembros del Semillero Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía-SEMLIFAE. Correo electrónico: Irlandaetac@correo.udistrital.edu.co, masuarezs@correo.udistrital.edu.co

³Ing. Electricista, Magister Ing. Eléctrica. Docente Planta Ing. Electrónica, miembro Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía-LIFAE y Director Semillero LIFAE. Correo electrónico: odflorez@udistrital.edu.co.

^{1, 2, 3} Universidad Distrital Francisco José de Caldas, carrera 8 #40-62, Chapinero, Bogotá, Colombia.

RESUMEN

El presente artículo tiene por objeto evaluar la confiabilidad de una microrred aislada con fuentes de generación distribuida, tales como sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas y dispositivos de almacenamiento, teniendo en cuenta el comportamiento estocástico de los recursos renovables. Mediante el modelamiento de las fuentes de generación y utilizando el método de simulación de Montecarlo (SMC) y el análisis de árbol de fallas, se implementa una interfaz gráfica que permite el cálculo de índices de confiabilidad del sistema y, considerando que dependen de la dimensión del mismo, configurada por el número de paneles, turbinas, dispositivos de almacenamiento y tasas de falla de los componentes del mismo. Estas variables serán de libre modificación, de modo que la herramienta le permita al usuario una visualización rápida de los cambios que dichas alteraciones producen en la confiabilidad del sistema

Palabras clave: Análisis árbol de Falla, Generación Estocástica, Microrred aislada, Simulación de Montecarlo.

Recibido: 4 de noviembre de 2014.
Received: November 4th, 2014.

Aceptado: 23 de mayo de 2015.
Accepted: May 23rd, 2015.

RELIABILITY ASSESSMENT OF ELECTRICAL ISOLATED MICROGRID BY THE METHOD OF FAULT TREE

ABSTRACT

The reliability of a microgrid isolated with distributed sources such as photovoltaic systems, wind turbine generation and storage devices, given the stochastic behavior of renewable resources is assessed. By modeling of generation sources and using the Monte Carlo simulation method (SMC) and fault tree analysis, a graphical interface that allows the calculation of reliability indexes of the system is implemented and considering that depend on the size thereof, set by the number of panels, turbines, storage devices and failure rates of the components. These variables will be freely modified, so that the tool will allow the user a quick view of the changes that these variables fluctuations cause in the system reliability.

Keywords: Fault Tree Analysis, Microgrid isolated, Monte-Carlo Simulation, Stochastic Generation

1. INTRODUCCIÓN

La actual situación de agotamiento de los recursos energéticos y los impactos ambientales del calentamiento global, producto del alto crecimiento industrial [1] requieren una infraestructura eléctrica más sostenible cuya principal característica sea el respeto por el medio ambiente, la confiabilidad y la flexibilidad [2] de una nueva red en comparación con el sistema existente.

Las microrredes comprenden sistemas de distribución con recursos de Generación Distribuida (microturbinas, celdas de combustible, paneles fotovoltaicos, etc.), junto con los dispositivos de almacenamiento (condensadores de energía, baterías) y cargas flexibles. Dichos sistemas pueden funcionar de manera no autónoma, interconectado a la red, o de manera autónoma, desconectadas de la red principal. Pueden considerarse como el marco de referencia para promover el desarrollo flexible de la generación con recursos renovables mientras, simultáneamente, reducen los efectos negativos de la fluctuación de energía mejorando así la confiabilidad en los sistemas de distribución. [3]

Teniendo en cuenta que el uso de recursos renovables de generación está aumentando de manera considerable, haciendo muy probable la presencia masiva de generación estocástica en futuras microrredes [4], es preciso la evaluación del impacto operacional de su penetración en los sistemas de potencia y el desarrollo de métodos que representen el comportamiento estocástico de los recursos, [5] ya que a diferencia de una turbina de gas, cuyo recurso es fijo, la salida de un sistema fotovoltaico o un parque eólico es impredecible dada la aleatoriedad de los recursos renovables, condición que genera una mayor incertidumbre [6] en la evaluación de dicho impacto y su efecto en la confiabilidad del sistema. Por tanto, este enfoque de la valoración de la confiabilidad permitirá realizar mejores pronósticos del comportamiento del sistema.

El artículo contextualiza en la sección 2 algunos índices utilizados en la evaluación de confiabilidad en sistemas de distribución y expone las propuestas realizadas para microrredes aisladas. La sección 3 explica la metodología aplicada en el análisis estocástico del recurso eólico y solar. La sección 4 presenta los modelos matemáticos de los componentes del sistema. La sección 5 explica la

metodología del árbol de falla y la utilización del Método de Simulación de Montecarlo (MSM) en la generación aleatoria de eventos no deseados. La sección 6 detalla la configuración del escenario en estudio y expone la herramienta desarrollada para la evaluación de confiabilidad del mismo. La sección 7 presenta las simulaciones y resultados obtenidos a partir de las cuales se generan conclusiones en la sección 8.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Índices de confiabilidad para microrredes

La Norma IEEE 1366-2001 define una serie de índices [7] utilizados ampliamente en la evaluación de la confiabilidad de los sistemas de distribución de energía. Estos índices se diferencian, de forma general, en dos grandes grupos: Índices de usuario e Índices del sistema. El primer grupo representa todos aquellos momentos sin suministro eléctrico, mientras que el segundo, evalúa la capacidad que posee el sistema para recuperarse por alguna anomalía y entregar toda la energía presupuestada [8], pero ambos con el objetivo principal de representar cualitativamente la calidad del servicio suministrado. Es así como por ejemplo, en Colombia, la resolución 070 de la CREG de 1998 establece los índices de confiabilidad DES (Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio) y FES (Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio) [9] como normas para verificar la calidad de la prestación del servicio de energía.

En la actualidad, los estudios en microrredes aisladas giran en torno a los sistemas de control de operación autónoma [10], por lo cual el estudio de la evaluación de la confiabilidad de los mismos es un tópico poco desarrollado y con alcances limitados. [11] [12] Sin embargo, y teniendo en cuenta la creciente aplicación de las microrredes, es necesario proponer nuevos índices que describan las distintas características específicas de estos sistemas y de las fuentes renovables de generación distribuida. Algunos autores han desarrollado propuestas que contemplan diversos aspectos influyentes en la evaluación de confiabilidad y rendimiento de una microrred, basándose principalmente en índices clásicos como el SAIDI, SAIFI, CAIDI y ENS (Energía no Suministrada). [8] [13]. Estas nuevas métricas evalúan, por ejemplo, la confiabilidad de una

microrred en modo isla considerando la tasa y duración media de la transición de modo interconectado a modo isla, la probabilidad de operación aislada, el tiempo medio anual de operación isla, entre otros.[8] También evalúan los índices que reflejan el estado de las fuentes de generación distribuida y las características de la carga de una microrred especificando la capacidad total instalada, la capacidad total de almacenamiento, la capacidad disponible de almacenamiento y el índice de penetración de las energías renovables en el sistema, este último de importante consideración pues calcula porcentualmente la demanda cubierta por las fuentes renovables de generación.[8] Finalmente, proponen los índices basados en el cliente, que reflejan las condiciones de utilización y suministro de las fuentes de generación para el diseño de microrredes, como por ejemplo, la tasa promedio de generación producida por un cliente, el costo promedio de generación producida por el cliente, energía comprada, energía vendida, y otros más [8].

2.2 Análisis estocástico del recurso

Dado que la energía producida por fuentes de generación basadas en recurso eólico y solar, es de naturaleza impredecible y con una mayor variabilidad respecto a otras tecnologías de generación distribuida [14]; esta característica demanda el desarrollo de procedimientos que permitan estimar el comportamiento estocástico de dichos recursos y así calcular la potencia que podrían generar estas fuentes en una microrred en particular.

Velocidad del Viento

La expresión que modela comportamiento aleatorio de la velocidad del viento es la función de densidad de probabilidad de Weibull [15] en (1):

$$p_{(v)} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Donde v representa la variable velocidad del viento, c , correspondiente al parámetro de escala en m/s, determina la velocidad promedio anual del viento en el lugar de medición la cual no es constante año tras año, y k , correspondiente al parámetro de forma, indica el grado de dispersión de los registros. Ambos parámetros son obligatorios para establecer la frecuencia con la que se manifiesta una determinada velocidad del viento. A partir de esta ecuación se define una función de

confiabilidad, o función de probabilidad acumulada de Weibull (2), que permitirá obtener los parámetros de forma y escala en función de la misma [16]. Seguidamente debe aplicarse el método de regresión lineal para relacionar dichas variables con la ecuación punto pendiente de una recta [17] como puede detallarse en (3), (4), (5):

$$p_i(v \leq v_i) = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \quad (2)$$

$$y_i = \text{Ln}[-\text{Ln}(1 - p_i)] \quad (3)$$

$$x_i = \text{Ln}(v_i) \quad (4)$$

$$a = -k \text{Ln}(c) \quad (5)$$

$$b = k$$

Una vez hallados los valores del parámetro de forma y el parámetro de escala podrá aplicarse el método de la transformada inversa el cual utiliza números aleatorios con distribución uniforme para generar variables aleatorias con una distribución específica, en el caso de la velocidad de viento, con distribución Weibull. [18]

Para el presente estudio, el proceso de generación de valores aleatorios de velocidad de viento partió desde el análisis estadístico que se realizó a 1460 mediciones registradas por la estación meteorológica del Aeropuerto El Dorado en la ciudad de Bogotá, correspondientes cada una de ellas al promedio diario de velocidad, desde el año 2010 al 2013; una vez hallados los valores del parámetro de forma y de escala de la respectiva distribución de probabilidad, se utilizan estos, como parámetros representativos de la zona, en la generación de valores aleatorios de velocidad. La cantidad total de valores generados es igual a 21600 y corresponden a velocidades por minuto durante 14 días aproximadamente. Las velocidades aleatorias para 14 días se muestran en la figura 1. Los valores aleatorios para un solo día también son detallados por la figura 2. El histograma de frecuencias se detalla en la figura 3.

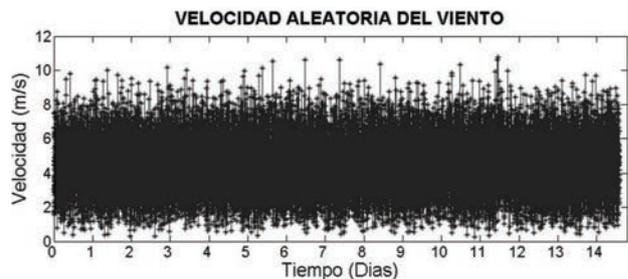


Figura 1. Velocidades aleatorias de viento para 14 días

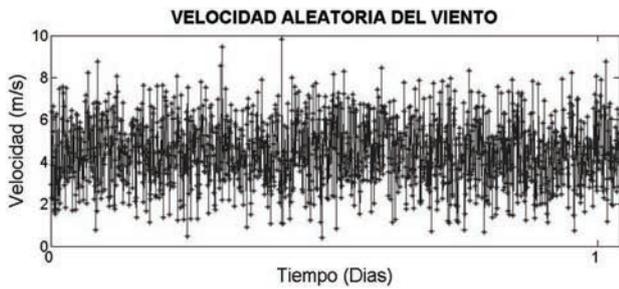


Figura 2. Velocidades aleatorias de viento para 1 día.

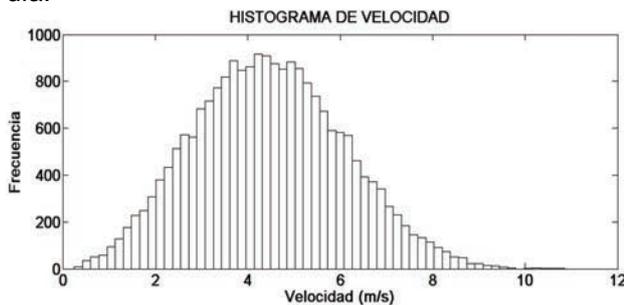


Figura 3. Histograma de frecuencias de velocidades

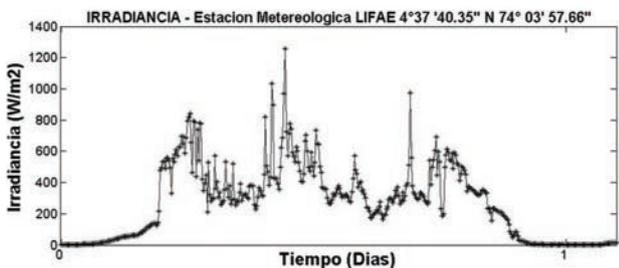


Figura 4. Irradiancia/min en el periodo de 5:00 a 17:00 horas durante 1 día.

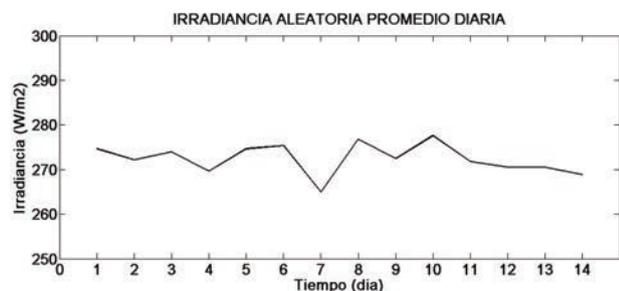


Figura 5. Irradiancias aleatorias promedio diarias.

Radiación Solar

A diferencia del viento, la irradiancia no puede modelarse bajo una sola y única función de densidad de probabilidad pues posee un comportamiento impredecible, afectado por fenómenos meteorológicos como lluvias, vientos,

nubes, etc., que no permiten predecirlo de manera determinística.

Aunque en [19] se determinan funciones de densidad de probabilidad para cada hora, la mayoría de estas funciones no permiten determinar de forma analítica el comportamiento de la irradiación, ya que el proceso para llegar a la variable aleatoria no puede realizarse. La única función que permite hacer este despeje analítico es la función Weibull, pero corresponde solo a 3 franjas horarias del día.

Con el fin de considerar una aproximación de valores aleatorios de irradiación solar, se utilizaron 12249 mediciones de irradiación horaria durante 15 días, registradas por la estación meteorológica del Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía-LIFAE en la franja horaria comprendida entre las 5:00 y las 17:00 horas, ver Figura 4, para obtener un valor promedio de irradiación y a partir de este generar 14 valores aleatorios con distribución normal que representen la posible irradiación promedio diaria a presentarse, ver figura 5. [6]

2.3 Modelos matemáticos de los componentes del sistema

Un acercamiento que permite incorporar la generación estocástica en la evaluación de confiabilidad de microrredes es simulando la salida de potencia de los diferentes generadores usando el método de Simulación de Montecarlo. Por esto, debe realizarse un adecuado modelamiento matemático de los componentes del sistema para obtener unos resultados simulados acertados.

Panel fotovoltaico.

El modelo del panel fotovoltaico calcula la salida de potencia generada considerando valores de irradiación y temperatura [20], como sigue en (6):

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} (1 + k(T_c - T_r)) \text{ Watts} \quad (6)$$

Donde P_{PV} corresponde a la salida de potencia en Watts con Irradiancia G_{ing} , P_{stc} corresponde a la potencia máxima en condiciones estándar de Evaluación (CEE), G_{ing} es la irradiación medida, G_{stc} es la irradiancia CEE, k corresponde al coeficiente de temperatura de la potencia, T_c la

temperatura de la celda y T_r la temperatura de referencia.

Turbina Eólica. La salida de potencia generada por una turbina eólica puede ser modelada [21] por el siguiente conjunto de ecuaciones en (7):

$$\begin{cases} PW = 0 & V < V_{ci} \\ PW = a \cdot V^3 - b \cdot Pr & V_{ci} < V < V_{co} \\ PW = Pr & V_{cr} < V < V_{co} \\ PW = 0 & V > V_{co} \end{cases} \text{ Watts (7)}$$

Donde $a = \frac{Pr}{V_r^3 - V_{ci}^3}$ y $b = \frac{V_{ci}^3}{V_r^3 - V_{ci}^3}$

PW corresponde a la salida de potencia en watts, V equivale a la velocidad de viento en cada instante, Pr corresponden a la potencia nominal de la turbina, V_r es la velocidad nominal de la turbina y V_{cin} y V_{cout} corresponden a la velocidad de corte y de salida de la turbina.

Batería o Dispositivo de Almacenamiento. El SOC (State of charge, por sus siglas en inglés) se define como el porcentaje de la capacidad disponible con respecto a la capacidad nominal de una batería [22]. El modelo matemático que calcula el estado de carga de los dispositivos de almacenamiento está dado [23] por las siguientes ecuaciones en (8):

$$SOC = \frac{C_r}{C_N} \times 100\% = \begin{cases} SOC_0 + \frac{\eta_{ch} \cdot I_e \cdot \Delta t}{C_N} \\ SOC_0 - \frac{I_e \cdot \Delta t}{C_N \cdot \eta_{dis}} \end{cases} \% \quad (8)$$

Donde SOC corresponde al estado de carga de la batería en porcentaje, C_r es la capacidad disponible, C_n es la capacidad nominal. SOC_0 es la capacidad inicial de carga, el cual podrá asumirse, η_{ch} es la eficiencia de carga, η_{dis} es la eficiencia de descarga, I_e es la corriente de carga y descarga y t es el tiempo de carga y descarga.

2.4 Análisis de árbol de falla y método de simulación de Montecarlo

El árbol de fallas es un diagrama lógico que muestra las interrelaciones entre un fallo crítico (falla general), definido previamente, y las causas de dicho fallo, que pueden ser ambientales, por

error humano, por hechos asociados a la misma vida útil del sistema o por fallos en los componentes. [24]

Se utilizó la metodología de árbol de falla para precisar la ocurrencia de eventos no deseados. El sistema completo se dividirá en módulos, cada uno de ellos con fallas características. A partir de este punto, se consideraran las posibles fallas de los componentes del sistema y los eventos que estas causan en los módulos de generación de potencia, analizando, por medio del diagrama esquemático, la ocurrencia de estos, tal como se ilustra en la figura 6.

Los eventos de falla del sistema son falla en el módulo fotovoltaico, falla en el módulo eólico y falla en el módulo de las baterías. Si ocurre una falla en cualquiera de estos módulos de generación, se provocara un evento que, aunque afecta el sistema pues no se aporta la generación del módulo despejado, no representa un evento que desencadene falla en el mismo.

La simulación de Montecarlo es utilizada tanto en modelos determinísticos como estocásticos y se aplica de manera generalizada en la evaluación de redes con sus respectivas distribuciones de probabilidad las cuales representan parámetros aleatorios importantes. [25]

Para el caso del sistema eólico y fotovoltaico, y teniendo en cuenta que son escasas las referencias con datos reales de instalaciones en operación, se asume [26] que la tasa de falla del panel fotovoltaico tiene una distribución exponencial, al igual que el regulador, el módulo de las baterías y el generador eólico. Para el inversor y el cableado se maneja una distribución de probabilidad exponencial y uniforme, respectivamente. En la tabla 1 se detallan las tasas de falla de los componentes, las cuales serán usadas para el análisis de confiabilidad. Dada la poca disponibilidad de información respecto a la tasa de reparación de instalaciones con generación eólica y fotovoltaica, y considerando que esta se afectara por la disponibilidad de repuestos, facilidad de acceso a la zona de falla y mantenimiento, se asumirán valores suficientemente altos.

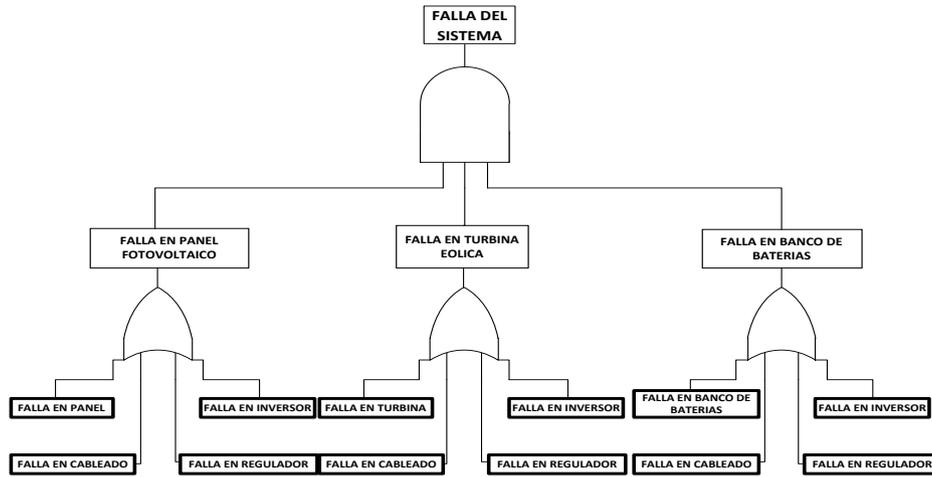


Figura. 6. Diagrama de Árbol de fallas del sistema en estudio

Tabla 1. Tasas de falla y distribuciones de probabilidad de componentes del sistema.

COMPONENTE	TASA DE FALLA
Panel fotovoltaico	0,0018
Generador eólico	0,0035
Batería	0,2
Inversor	0,0013
Regulador	0,03
Cableado	0,0005

Usando el método de simulación de Montecarlo y considerando el análisis de árbol de fallas, una lista de eventos no deseados es creada para cada componente de forma separada, puesto que los n componentes del sistema tendrán un único y propio comportamiento estocástico. De manera detallada el proceso se describe por el siguiente conjunto de pasos:

Paso 1. Generar 1000 números aleatorios con distribución normal los cuales corresponden a 1000 eventos por cada componente del sistema. Entonces como se generan 1000 eventos se tienen 1000 iteraciones que el sistema debe correr.

Paso 2. Convertir los números aleatorios uniformemente distribuidos en correspondientes valores de tiempos de falla, usando las tasas de falla de cada componente y su respectiva distribución de probabilidad.

Paso 3. Basados en el conjunto de listas generadas para cada componente, construir una matriz de estado que representara, para cada iteración, el tiempo durante el cual el sistema permanece en

operación. Adicional, esta matriz nos permitirá conocer el tiempo durante el cual los módulos funcionan sin presentar falla.

Pasos 4. Considerando el total de iteraciones, calcular el tiempo total en operación y la energía no suministrada.

2.5 Descripción del problema

Para el presente estudio, se dispondrá de una microrred típica constituida por sistemas de generación fotovoltaica, eólica y dispositivos de almacenamiento, configurada en topología anillo ya que brinda mejores índices de confiabilidad que la topología radial [5]. Los datos de las especificaciones de los componentes del sistema, necesarios para el modelamiento matemático, estarán relacionados en las fichas del fabricante de los módulos de la microrred que los grupos de Investigación LIFAE-GCEM planean construir, la cual dispone de paneles de 50 watts pico de generación, aerogeneradores de eje horizontal con potencia nominal de 50 watts pico y baterías con capacidad nominal de 12V-166 Ah.

Para realizar simulaciones de la operación de la microrred en estudio, se construyó una interfaz gráfica en MATLAB que contiene cada uno de los módulos de evaluación y demás variables utilizadas por el algoritmo, es decir, las que corresponden a la salida de potencia y su respectiva variación estocástica y al comportamiento aleatorio de las tasas de falla de los componentes siendo Las salidas calculadas por la interfaz gráfica corresponden a de funcionamiento, energía no suministrada, y teniendo en cuenta las nuevas métricas, se calculara la capacidad instalada, la potencia total

generada por las fuentes renovables de generación y la capacidad disponible por el módulo de las baterías. La herramienta desarrollada también permite generar las gráficas respectivas de cada prueba las cuales describen el comportamiento del recurso renovable y la potencia que genera dicho recurso.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Se realizaron varias configuraciones modificando la cantidad de paneles y turbinas que podría conformar un sistema, esto con el fin de evaluar las variaciones que pudieran presentarse en los resultados.

Asumiendo una instalación compuesta por 5 turbinas y 4 paneles fotovoltaicos, con potencia instalada de 450 W (Ver Tabla 2 y Figura 7), y teniendo en cuenta el recurso eólico modelado y los registros solares durante 14 días para la ciudad de Bogotá, la interfaz nos arroja una velocidad promedio de 4.46 m/s y una radiación promedio de 304,96 W/m², con la cual se obtiene una potencia promedio generada de 380,29 W. Ver figura 8.

Escenario 1 de simulación

Tabla 2. Componentes de Escenario 1

Componente	Potencia Generación (w)	Cantidad	Carga Instalada (w)
Turbina	50	5	250
Panel	50	4	200
CARGA TOTAL INSTALADA (w)			450
Batería	12 v	166 Ah	2000

Para el tiempo de funcionamiento sin falla del sistema y el tiempo de reparación se obtuvieron los valores de 3360,4 años y 2327,1 horas, respectivamente, los cuales expresan un posible funcionamiento del sistema del 99,9921% y una posible falla del 0,007904%. El resultado para la Energía No Suministrada fue de 250,166 W/h al año.

Asumiendo igual cantidad de turbinas y paneles, por ejemplo una turbina y un panel, se tiene una potencia instalada de 100 W (Ver Tabla 3), una potencia generada de 82,4355 W, 9737,2 años de funcionamiento sin falla, 127,1226 horas de reparación, y 58,6803 W/h al año de Energía no Suministrada. En la Tabla 4 se muestran en detalle los resultados para ambas configuraciones.

Escenario 2 de simulación

Tabla 3. Componentes de Escenario 2

Componente	Potencia Generación (w)	Cantidad	Carga Instalada (w)
Turbina	50	1	50
Panel	50	1	50
CARGA TOTAL INSTALADA (w)			450
Batería	12 v	166 Ah	2000

Resultados

Tabla 4. Resultados de la Simulación

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
Cantidad de Turbinas	5	1
Cantidad de Paneles	4	1
Potencia instalada	450 W	100 W
Potencia media generada	333.24 W	82,4355 W
% Funcionamiento	99,9921	99,9914
% Falla	0,007904	0,008553
Energía No Suministrada	219,281 Wh/año	58,6803 Wh/año

Para un sistema compuesto únicamente por turbinas (se asumieron solo 5 turbinas), se obtuvieron resultados de 9407,7 años de funcionamiento sin falla, 130,8101 horas de reparación y 0,238499 W/h de Energía no Suministrada al año. Para el caso de un sistema compuesto únicamente por paneles fotovoltaicos (se asumieron solo 5 paneles fotovoltaicos) se obtuvieron resultados de 10138 años de funcionamiento sin falla, 127,4263 horas de reparación y 4,7093 W/h de Energía no Suministrada al año.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta computacional para la evaluación de la confiabilidad en una microrred considerando la influencia significativa del comportamiento estocástico de los recursos eólico y solar, y con la cual se puede obtener información útil y a tener en cuenta en la toma de decisiones del planeamiento de microrredes.

Según resultados obtenidos, la implementación de sistemas híbridos ofrecería mejores índices de confiabilidad respecto a instalaciones netamente

fotovoltaicas, o eólicas, ya que, a pesar que los sistemas eólicos proporcionan un mayor tiempo de funcionamiento y por lo tanto un menor valor de ENS respecto los sistemas fotovoltaicos, la operación combinada de ambos permite un mejor aprovechamiento de los recursos presentes en una región.

eólicas y fotovoltaicas en operación, deben generarse estudios adecuados que consideren aspectos específicos como las condiciones ambientales, características del sitio de instalación, condiciones de acceso a la zona, etc., y así obtener valores semejantes al comportamiento real de estos parámetros, de modo que se logre mejores resultados con la herramienta.

Dada la escasa información que existe alrededor de las tasas de falla y reparación de instalaciones



Figura 7. Escenario 1 de estudio

Confiabilidad en Microrredes

Generador velocidad de viento

Alpha

Beta Predeterminado

Configuración del Sistema

Cantidad de Turbinas

Cantidad de Paneles

Banco de Baterías Sí No

Modulo Panel Fotovoltaico

Lambd	<input type="text" value="0.0018"/>	<input type="text" value="0.03"/>	<input type="text" value="0.0013"/>	<input type="text" value="0.0005"/>
T. Recup	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="20"/>
	G	R	I	C

Modulo Turbina Eolica

Lambd	<input type="text" value="0.0035"/>	<input type="text" value="0.03"/>	<input type="text" value="0.002"/>	<input type="text" value="0.0005"/>
T. Recup	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="20"/>
	T	R	I	C

Modulo Banco de Baterias

Lambd	<input type="text" value="0.2"/>	<input type="text" value="0.03"/>	<input type="text" value="0.002"/>	<input type="text" value="0.0005"/>
T. Recup	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="20"/>
	B	R	I	C

Resultados

Velocidad m/s

Radiacion W/m²

Potencia Instalada W

Potencia Generada W

Estado de Carga %

Potencia W

Funcionamiento %

Falla %

ENS W/h

Figura 8. Interfaz gráfica para evaluación de confiabilidad en una microrredes

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está soportado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico-CIDC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, proyecto de investigación "Prototipo de una Microrred Eléctrica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas PME-UD".

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Jidong Wang., Zhiqing Sun., Yue Zhou., Jiaqiang Dai., Optimal dispatching model of Smart Home Energy Management System, Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE, pp.1-5, 21-24 May 2012.
- [2]. Boynuegri, A.R. Yagcitekkin, B., Baysal, M., Karakas, A., Uzunoglu, M., Energy management algorithm for smart home with renewable energy sources, Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013 Fourth International Conference on, IEEE vol., no.. pp. 1753 - 1758, 13-17 May 2013, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635883
- [3]. Nikos Hatziaargyriou., Microgrids: Architectures and Control, John Wiley & Sons, Wiley-Press IEEE, 340 pages, March 2014, ISBN: 978-1-118-72068.
- [4]. P. Bernstein, Alternative Energy: Facts, Statistics, and Issues, Oryx Press, 208 pages, 2001, ISBN-10: 1573562483
- [5]. Yokoyama, R., Nimura, T., Saito, N., Modeling and evaluation of supply reliability of microgrids including PV and wind power, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , vol., no., pp.1,5, 20-24 July 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596651.
- [6]. Kennedy, S., Reliability evaluation of islanded microgrids with stochastic distributed generation, Power & Energía Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, vol., no., pp.1, 8,26-30, July 2009, doi: 10.1109/PES.2009.5275731.
- [7]. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366-1998) , vol., no., pp.1,50, May 14 2004, doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94548.
- [8]. S. Wang. , Z. Li., L. Wu. , M. Shahidehpour and Z. Li., New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 28, No. 3, August 2013, doi:10.1109/TPWRS.2013.2249539.
- [9]. Resolución 70 de 1998, Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, Bogotá, 28 de Mayo de 1998. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=10480>.
- [10]. Piagi, P., Lasseter, R.H., Autonomous control of microgrids, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, vol., no., pp.8 pp. 0-0 0 doi: 10.1109/PES.2006.1708993.
- [11]. Patra, S.B., Mitra, J., Ranade, S.J., Microgrid architecture: a reliability constrained approach, Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, vol., no., pp.2372, 2377 Vol. 3, 12-16 June 2005, doi: 10.1109/PES.2005.1489500
- [12]. Sun, Y., Bollen, M.H.J., Ault, G.W., Probabilistic Reliability Evaluation for Distribution Systems with DER and Microgrids, Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on, vol., no., pp.1, 8, 11-15 June 2006, doi: 10.1109/PMAPS.2006.360214
- [13]. Costa, P.M., Matos, M.A., Reliability of distribution networks with microgrids, Power Tech, 2005 IEEE Russia, vol., no., pp.1,7, 27-30 June 2005, doi: 10.1109/PTC.2005.4524611.
- [14]. AlMuhaini, M., Heydt, G., Evaluating future power distribution system reliability including distributed generation, PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE, vol., no., pp.1,1, 27-31 , July 2014, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939107
- [15]. Atwa, Y.M., El-Saadany, E.F., Reliability Evaluation for Distribution System With Renewable Distributed Generation During Islanded Mode of Operation, Power Systems, IEEE Transactions on , vol.24, no.2, pp.572,581, May 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016458
- [16]. Álvarez Castañeda William., Martínez Tejada Laura., Aplicación de la ecuación de Weibull para determinar potencial eólico en Tunja-Colombia,

Ingenio Magno ISSN: 2145-9282, v.4 fasc.1 p.27 - 31, Noviembre 2013

[17]. Rodríguez C. Néstor., Estudio de pre factibilidad de un sistema híbrido (eólico-fotovoltaico) en la sabana de Bogotá para el suministro eléctrico a cargas de iluminación en invernaderos, Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2012.

[18]. Raúl Coss Bú., Simulación: un enfoque práctico, Editorial Limusa, 158 páginas, México, 1996, ISBN: 9681815068, 9789681815066

[19]. Hernández M. Johan., Trujillo R. Cesar., Modelamiento de la irradiancia y la temperatura ambiente utilizando funciones de probabilidad, Tecnura, Vol. 18, No. 39, pp 128-137, Marzo, 2014.

[20]. Mohamed, F.A., Koivo, H.N., Online Management of MicroGrid with Battery Storage Using Multiobjective Optimization, Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on, vol., no., pp.231, 236, 12-14 April 2007, doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380118.

[21]. Chedid, R., Akiki, H., Rahman, S., A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems, Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.13, no.1, pp.76,83, Mar 1998, doi: 10.1109/60.658207.

[22]. Khalid Al-Begain., Dieter Fiems., Jean-Marc Vincent., Analytical and stochastic modeling of battery cell dynamics, 19th International Conference, ASMTA 2012,. Proceedings, Springer, 303 pages, France, June 4-6, 2012, ISBN 3642307825, 9783642307829

[23]. Jidong Wang., Zhiqing Sun., Yue Zhou., Jiaqiang Da., Optimal dispatching model of Smart Home Energy Management System, Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE , vol., no., pp.1,5, 21-24 May 2012, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303266

[24]. Barbosa C. Carlos. A, "Implementación del método de árbol de fallas para la confiabilidad de subestaciones de alta tensión modelado en Matlab", Universidad de la Salle, Bogotá, 2008.

[25]. Díaz Villar Pablo, "Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: aplicación a la

electrificación rural", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Abril, 2013.

[26]. Xifan Wang., Hui-Zhu Dai., Thomas, R.J., Reliability Modeling of Large Wind Farms and Associated Electric Utility Interface Systems," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol.PAS-103, no.3, pp.569, 575, March 1984, doi: 10.1109/TPAS.1984.318746