

Recibido: 17 febrero 2023
Aceptado: 11 septiembre 2023
Disponible: 18 septiembre 2023

©Instituto Tecnológico Metropolitano
Este trabajo está licenciado bajo
una Licencia Internacional
Creative Commons Atribución
(CC BY-NC-SA)



Evaluación del desempeño de microrredes: una revisión

Performance Evaluation of Microgrids: A Review

 Jersson García-García ¹;
 Juan Rey-López ²;
  German Osma-Pinto ³

¹ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia,
jersson2218419@correo.uis.edu.co

² Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia,
juanmrey@uis.edu.co

³ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia,
gealosma@uis.edu.co

Cómo citar / How to cite

J. García-García, J. Rey-López, G. Osma-Pinto, “Evaluación del desempeño de microrredes: una revisión,” *Tecnológicas*, vol. 26, nro. 58, e2656, 2023, <https://doi.org/10.22430/22565337.2656>

Resumen

En los últimos años, la penetración de generación renovable se ha incrementado significativamente, mejorando la confiabilidad de los sistemas eléctricos y mitigando el impacto ambiental. Esta penetración ha potenciado el uso de microrredes, motivando el estudio a profundidad del desempeño de estos sistemas. No obstante, la cantidad y diversidad de información existente hace dispendioso identificar y comprender de manera integral los aspectos técnicos y las métricas específicas para evaluar el desempeño de las microrredes. Este documento presenta una revisión de estudios sobre el análisis de desempeño de una microrred y facilita identificar qué y cómo realizarlo. La revisión comprende dos etapas. Primero, la identificación de artículos en bases de datos como IEEE Xplore, Scopus y SpringerLink relacionados con el análisis del desempeño de microrredes; y segundo, la definición de capacidades y clasificación de métricas en éstas. En total, se establecieron ocho capacidades, a saber: generación, resiliencia, mantenimiento, comunicación, reconfiguración, operación, control y protección. Asimismo, la revisión permitió la identificación de 87 indicadores. Este acopio de información facilitaría el diseño de planes de evaluación del desempeño de microrredes.

Palabras clave

Evaluación de rendimiento, evaluación técnica, indicador clave de rendimiento, microrredes, nivel de operación.

Abstract

In recent years, the penetration of renewable generation has increased significantly, improving the reliability of electrical systems and mitigating the environmental impact. This penetration has boosted the use of microgrids, motivating the in-depth study of the performance analysis of these systems. However, the amount and diversity of existing information makes it difficult to identify and comprehensively understand the technical aspects and specific metrics to evaluate the performance of microgrids. This document presents a review of studies on performance analysis of a microgrid and facilities to identify what and how to carry out it. The review encompasses two steps. First, the identification of studies in databases such as IEEE Xplore, Scopus, and SpringerLink related to performance analysis of microgrids; and second, the definition of capabilities and classification of metrics in these. In total, eight capabilities were established: generation, resilience, maintenance, communication, reconfiguration, operation, control, and protection. In addition, the review allowed the identification of 87 indicators. This collection of information could facilitate the design of the evaluation plans for the performance of microgrids.

Keywords

Performance evaluation, technical assessment, key performance indicator, microgrids, operation level.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la participación de fuentes de energía renovable en el sistema eléctrico ha impulsado la formulación de iniciativas destinadas a agilizar su integración y elevar la confiabilidad energética. En este contexto, las microrredes eléctricas se presentan como una solución viable que facilita la inclusión de fuentes de energía renovable, disminuye las emisiones de contaminantes y propende por un suministro energético confiable [1], [2].

Una microrred (MR) es un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos con límites eléctricos claramente definidos, que actúan como una entidad controlable. Las MR pueden estar conectadas o no a la red; el primer tipo puede operar tanto en modo conectado a la red como en modo isla [3], [4]. La Figura 1 muestra un esquema general de una microrred conectada a la red con integración de generación renovable.

En general, los componentes de una MR abarcan fuentes de generación renovables (*e.g.*, solar fotovoltaica, eólica y pequeñas centrales hidroeléctricas), fuentes de generación no renovables (*e.g.*, grupos electrógenos), sistemas de almacenamiento (*e.g.*, baterías, volantes de inercia, supercapacitores o almacenamiento por bombeo), controladores capaces de gestionar la energía y mantener la operación estable y cargas de corriente alterna o corriente continua [5], [6].

Las MR tienen grandes beneficios como mayor eficiencia y menores costos de transmisión, dado que los puntos de generación están más cerca de los centros de consumo lo que resulta en una reducción en las pérdidas de energía. También mejoran la resiliencia y estabilidad de la red eléctrica con la mitigación de variaciones en la tensión y frecuencia; asimismo, permiten mayor acceso a un suministro de energía confiable gracias a la facilidad de implementación en áreas remotas [7], [8].

No obstante, la operación de MR representa importantes retos como: la gestión de energía ante la intermitencia y diversidad de las fuentes de energía, la coordinación de los sistemas de comunicaciones que interconectan los equipos de generación, el almacenamiento de energía y el control de carga. Otros retos importantes son la afectación de la calidad de potencia debida al uso de equipos basados en electrónica de potencia, la coordinación de protecciones por la variación de la corriente en falla y el flujo bidireccional de potencia en el punto de conexión común con la red, entre otros [9], [10].

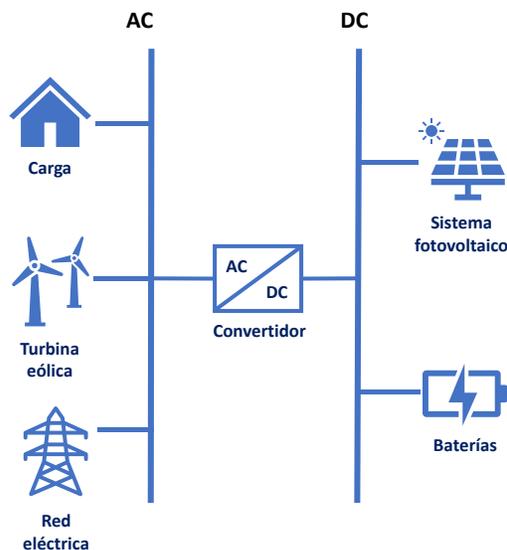


Figura 1. Esquema de microrred. Fuente: elaboración propia.

El estudio de MR permite comprender su funcionamiento y analizar su desempeño y operación. El análisis del desempeño alude a la habilidad para realizar una tarea o capacidad para cumplir objetivos. Las características estudiadas en el desempeño incluyen la capacidad del sistema para satisfacer la demanda, resistir a fallas, mantenerse en un rango adecuado de operación pese a perturbaciones, intercambiar información entre componentes y recuperar su estado inicial luego de un evento, entre otros [11], [12].

Algunos estudios exponen avances sobre el análisis del desempeño de MR. Zhao *et al.* [13] presentan indicadores de evaluación de desempeño considerando las dimensiones de economía, medio ambiente y energía. Uddin *et al.* [14] emplean índices para determinar el nivel de utilización de la MR, la energía capaz de suministrar y los costos asociados a su funcionamiento. Por su parte, Haffaf *et al.* [15] utilizan diversos índices para medir la energía inyectada a la red, la energía suministrada por cada elemento de la MR, la energía autoconsumida y las emisiones ocasionadas.

Por otro lado, la operación hace referencia a la manipulación del sistema para lograr un determinado fin. Su análisis incluye el estudio de variables ante la ejecución de acciones sobre la MR. Una distinción entre el desempeño y la operación es que mientras la operación comúnmente estudia el comportamiento eléctrico de la MR, el desempeño abarca más aspectos, como por ejemplo mantenimiento o comunicaciones. Por ende, el análisis del desempeño se puede apreciar como un estudio global de la MR donde la operación es parte esencial [15], [16].

Respecto a la operación, Ishraque *et al.* [17] presentan indicadores para su evaluación considerando la potencia suministrada por el sistema como la tensión y la fracción renovable. Ibrahim *et al.* [18] comparan el nivel de resiliencia de dos topologías bajo escenarios de falla, teniendo en cuenta métricas como porcentaje de caída de tensión, porcentaje de reducción de carga servida y tiempo transcurrido entre la detección y la recuperación ante un evento.

Para identificar características que conlleven a un mejor rendimiento de las MR, resulta esencial conocer cómo se puede evaluar su nivel de desempeño [19]. De esta manera, esta valoración se convierte en una herramienta para la toma de decisiones en las etapas de planificación y operación, mediante la comparación de soluciones ante diversos escenarios [12], [14], [20].

Con el fin de contribuir al ámbito del estudio de operación y desempeño de microrredes, este artículo presenta hallazgos a partir de una revisión de la literatura. En particular, su enfoque se centra en la exhaustiva revisión de métricas e indicadores empleados en el rendimiento de estos sistemas. Estas métricas ayudan en la descripción de características y la comprensión del funcionamiento; asimismo, miden el rendimiento respecto a parámetros de operación y requisitos establecidos por normatividad [13], [14], [21].

A pesar de que la literatura ofrece indicadores para evaluar el rendimiento global de las microrredes, es escasa en cuanto a aspectos específicos como se observa en la Sección 3.1. Para abordar esta brecha, el artículo propone una clasificación de métricas en capacidades como generación, operación, control, resiliencia, comunicación, mantenimiento, reconfiguración y protección. La clasificación de cada elemento facilita conocer los factores particulares de su funcionamiento y, así, analizar con mayor profundidad una determinada característica [4], [22].

Dentro de su contenido, el artículo detalla una serie de etapas fundamentales para la evaluación del desempeño, tal como se ejemplifica en la Sección 3.2. Estas etapas han sido identificadas a partir de diversos documentos de referencia y abarcan aspectos como la selección de indicadores, la definición de valores de referencia, la realización de simulaciones o experimentos y, finalmente, la cuantificación de los indicadores. Estos pasos ofrecen tanto una base para evaluar el desempeño general como también pueden servir como guía para la

evaluación de otros aspectos técnicos, capacidades específicas y factores particulares que puedan requerir un análisis detenido.

El documento está estructurado como sigue: la Sección 2 describe la metodología de revisión de estudios, la Sección 3 presenta generalidades del desempeño de MR; la Sección 4 expone las capacidades técnicas a evaluar en una MR junto con sus indicadores; la Sección 5 aborda la discusión sobre los trabajos identificados y, finalmente, la Sección 6 corresponde a las conclusiones de la revisión.

2. METODOLOGÍA DE REVISIÓN

La metodología de revisión consiste en búsqueda de información (Sección 2.1) y selección de estudios (Sección 2.2), tal como muestra la Figura 2, donde N es el número de estudios encontrados.

2.1 Búsqueda

La fase de búsqueda de estudios comprende dos pasos: la identificación y recopilación de estudios relevantes y la definición de palabras clave y ecuaciones de búsqueda [5], [23]. En esta fase se identificaron 1 623 artículos en las bases de datos relacionados con el estudio del desempeño de microrredes.

2.1.1 Identificación y recopilación de estudios relevantes

- *Definición de criterios de búsqueda:* Se establecen criterios específicos para identificar estudios científicos relacionados con el análisis del desempeño de microrredes. Estos criterios se centran en títulos que aborden directamente el análisis del desempeño o que contengan palabras clave relevantes.
- *Herramientas de búsqueda:* Se emplean herramientas para la búsqueda como Scopus y Google Scholar. Scopus permite acceder a una amplia gama de publicaciones de bases de datos destacadas (IEEE, ELSEVIER, MDPI y Springer), mientras que Google Scholar proporciona acceso a una amplia diversidad de fuentes académicas.

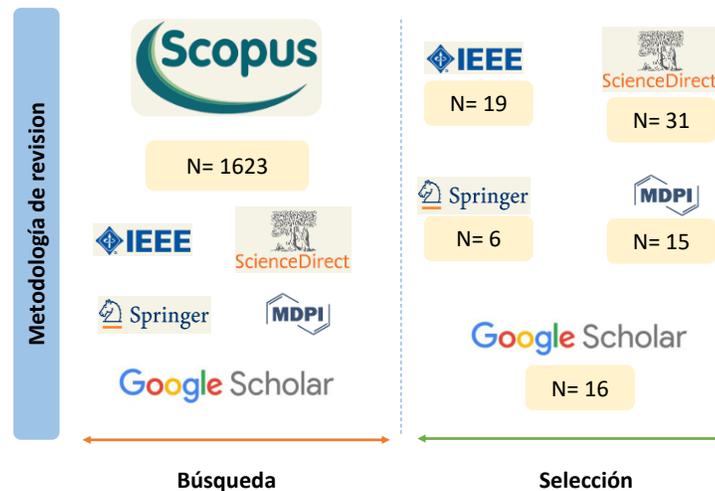


Figura 2. Metodología aplicada para la revisión de literatura. Fuente: elaboración propia.

2.1.2 Definición de las palabras clave y ecuaciones de búsqueda

- *Selección de palabras clave:* Se eligen palabras clave específicas que reflejen el enfoque del análisis del desempeño de microrredes. Las palabras clave seleccionadas en este estudio incluyen "performance analysis of microgrid", "microgrid assessment", "microgrid evaluation" y "performance indicators of microgrid".
- *Estructura de búsqueda en Scopus:* Se diseña una ecuación de búsqueda para Scopus utilizando la lógica booleana. La ecuación se estructura como "primera palabra" AND "segunda palabra" AND "tercera palabra", optimizando la precisión y relevancia de los resultados.

La Figura 3 presenta los temas más relevantes relacionados con el estudio de MR en los últimos años, tales como: fuentes de energía renovable, control, optimización, análisis de estabilidad, inversores eléctricos, celdas fotovoltaicas, generación de potencia y gestión de energía, entre otros.

2.2 Selección

La fase de selección y análisis de estudios de desempeño y métricas está conformada por 3 pasos: selección de estudios, análisis de estudios seleccionados y extracción de información y clasificación de métricas [8], [24]. La ejecución de esta etapa resultó en la selección de 87 artículos.

2.2.1 Selección de estudios

Los estudios que cumplen con los criterios de inclusión son seleccionados para su posterior análisis. Estos criterios se basan en la relación directa con el análisis del desempeño y las palabras clave definidas.

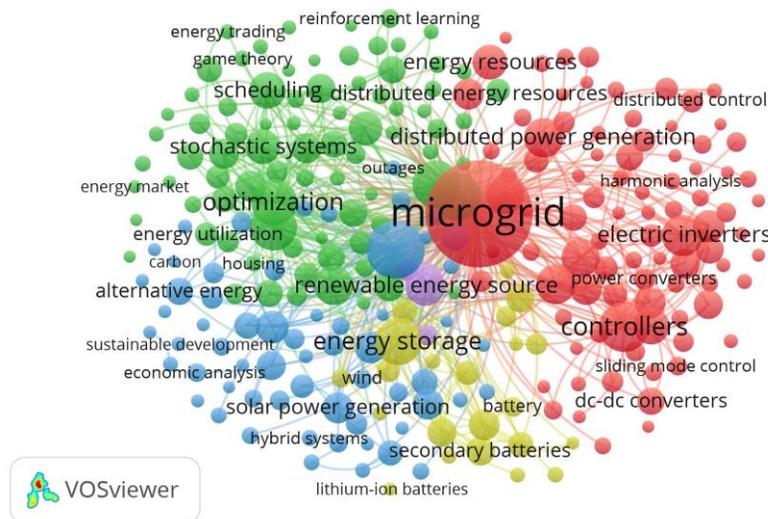


Figura 3. Temas relacionados con el estudio de MR. Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Análisis de estudios seleccionados

- *Evaluación de finalidad y contenido*: Implica la revisión de la finalidad y el contenido de cada estudio mediante la lectura detallada del resumen (abstract). Esto permite obtener una comprensión inicial de la contribución y enfoque de cada estudio en relación con el análisis del desempeño.
- *Lectura exhaustiva*: Consiste en realizar una lectura minuciosa de cada documento seleccionado para la identificación y extracción de información específica relacionada con las capacidades y métricas de evaluación abordadas en cada estudio.

2.2.3 Extracción de información y clasificación de métricas

- *Identificación de características de desempeño*: A partir de la lectura detallada, se extrae información sobre los diversos aspectos del desempeño abordados en cada estudio, tales como: generación, operación, control, resiliencia, comunicación, mantenimiento, reconfiguración y protección.
- *Clasificación de métricas*: Las métricas utilizadas en cada estudio son identificadas y agrupadas según su relación con las diversas capacidades de la microrred. Esta clasificación permite una comprensión estructurada de las métricas empleadas para el análisis de cada elemento del desempeño.

3. GENERALIDADES DEL DESEMPEÑO DE MICRORREDES

El análisis del desempeño tiene como finalidad valorar las características técnicas de la MR, establecer qué tan bien realiza una tarea y si puede cumplir con los objetivos esperados. El estudio resulta útil para conocer cómo responde el sistema a escenarios como la variabilidad de los recursos energéticos, los cambios repentinos en la carga, las fallas eléctricas, la conexión y desconexión de un componente y demás situaciones posibles de operación que pueden poner en riesgo el rendimiento del sistema. Para realizar este análisis se utilizan métricas que describen el comportamiento de la MR [14], [15] de aspectos como los mostrados por la Figura 4. Esta sección presenta indicadores utilizados para el estudio del desempeño de MR (Sección 3.1) y la descripción del procedimiento general que aplican diversos estudios (Sección 3.2).

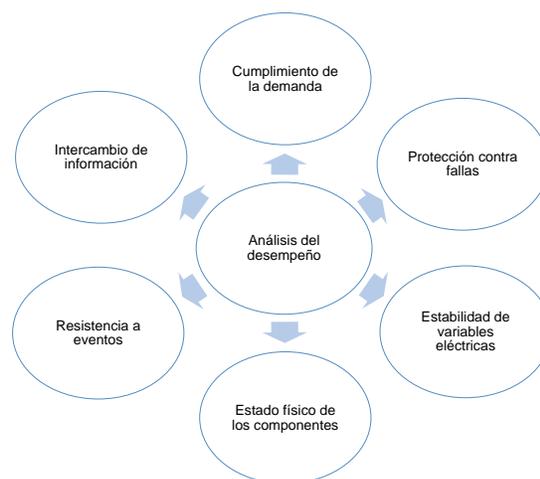


Figura 4. Aspectos considerados en el análisis del desempeño. Fuente: elaboración propia.

3.1 Métricas para el estudio del desempeño

Los indicadores son métricas que permiten medir el nivel de rendimiento de un sistema y facilitar la interpretación de su funcionamiento. Estas métricas pueden ser usadas tanto en la planificación de MR, relacionada con la búsqueda de la mejor solución de diseño, como en la operación, para conocer el estado de un componente o todo el sistema e inferir sobre potenciales ajustes [11], [12], [25].

La evaluación del desempeño consiste en determinar la efectividad de la MR para cumplir objetivos definidos a partir del análisis de indicadores [14]. La Tabla 1 lista diversos indicadores utilizados. Algunos estudios emplean herramientas de simulación que cuantifican de los indicadores de interés; en caso de no ser posible, éstas suministran los datos para que en una etapa posterior puedan ser calculados.

Algunos de estos indicadores (*e.g.*, probabilidad de pérdida de carga, carga no satisfecha, autoproducción eléctrica y costos de operación y mantenimiento) pueden ser empleados como restricciones en el proceso de dimensionamiento con el fin de garantizar condiciones específicas [34], [35]. También permiten analizar el comportamiento de variables del sistema en un periodo de tiempo y ante diversos escenarios de operación.

3.2 Evaluación del desempeño de microrredes

La evaluación del desempeño de una MR permite conocer el estado y el nivel de cumplimiento de determinados objetivos planteados o de parámetros fijados por las normas técnicas. Los resultados obtenidos son las características físicas y eléctricas de la MR, la identificación de los aspectos con mayor y menor rendimiento y carencias del sistema [19], [20].

Algunos indicadores son utilizados para determinar cuáles características del sistema permiten obtener mayor rendimiento, siendo tomado como criterio para emitir un juicio [11]. La Figura 5 presenta una serie de pasos para evaluar el desempeño de MR. El procedimiento presentado se infiere a partir de la revisión de diversos estudios que identifican métricas de rendimiento y, luego, las emplean para analizar el comportamiento de la MR [11], [12], [14].

El análisis de las métricas del desempeño puede ayudar en un potencial proceso de toma de decisiones para mejorar la planificación o el rendimiento de una MR. Wang *et al.* [20] utilizan las métricas para determinar la topología con el nivel de confiabilidad y rentabilidad más alto. Bianco *et al.* [28] hacen una comparación entre tecnologías de proyectos de MR para facilitar procesos de selección. Asimismo, Uddin *et al.* [14] presentan sugerencias para mejorar el rendimiento técnico y económico a partir del análisis del desempeño de la MR.

A pesar de la existencia de estudios sobre el desempeño de MR, algunos aspectos pueden discriminarse de forma más específica para facilitar su interpretación [4], [22]. Por ejemplo, aquellos indicadores que describen características de los elementos que suministran energía, pueden ser clasificados en la capacidad de generación; de modo similar se pueden agrupar otras métricas.

Tabla 1. Indicadores empleados en el análisis del desempeño de MR. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	M&S	Exp.	Observación	Características de simulación
[26]	2017	Probabilidad de pérdida de carga	X		Indicadores utilizados como restricciones en la etapa de dimensionamiento como condiciones de la operación proyectada.	Optimización del diseño y operación
[27]	2015	Carga no satisfecha				
[28]	2021	Autoproducción eléctrica Autoproducción eléctrica a partir de fuentes de energía renovable		X	Indicadores obtenidos a partir de medición. Son utilizados para analizar el desempeño de sistemas existentes y puedan ser tomados como referencia para diseños futuros.	N. A
[11]	2018	Relación de energía entre la generación y la carga Tasa de carga interrumpida Energía esperada no suministrada Costos de operación y mantenimiento	X		Son utilizados para describir las características de la MR y evaluar los costos y la confiabilidad por medio del cumplimiento de requerimientos. Se realiza análisis comparativo para conocer cuál topología tiene mayor rendimiento.	Considera datos históricos
[14]	2019	Factor de capacidad Factor de uso de la planta Factor de carga		X	Analiza la variación de los indicadores durante un periodo de tiempo, la relación entre la operación y los costos asociados, la relación entre la generación y la demanda e identifica los parámetros que pueden mejorar el rendimiento y reducir los costos.	N. A
[29]	2020	Capacidad de supervivencia Autonomía	X		Utilizan los indicadores para verificar que la MR pueda atender la carga durante un evento y determinar el tiempo en el que puede cumplir esa tarea.	Utiliza un método estocástico para evaluar el desempeño
[30]	2022	Deslaste de carga	X		Se estudia el impacto que tiene el nivel de riesgo de incendio en la desconexión de carga.	Realiza simulación dinámica y utiliza el método de flujo de potencia óptimo
[31]	2021	Índice de degradación Índice de restauración	X		El análisis de los indicadores permite proponer acciones para mejorar la resiliencia de la MR.	Utiliza datos históricos, un modelo dinámico y parámetros de probabilidad
[32]	2017	Valor máximo y mínimo de frecuencia	X		Los indicadores son utilizados para verificar que las variables del sistema permanezcan en un rango aceptable de operación ante diversas condiciones.	Uso de datos históricos y utilización del modelo desacoplado para el flujo de potencia
[33]		Valor máximo y mínimo de tensión				
M&S: modelado y simulación				Exp: experimentación		N. A: No aplica

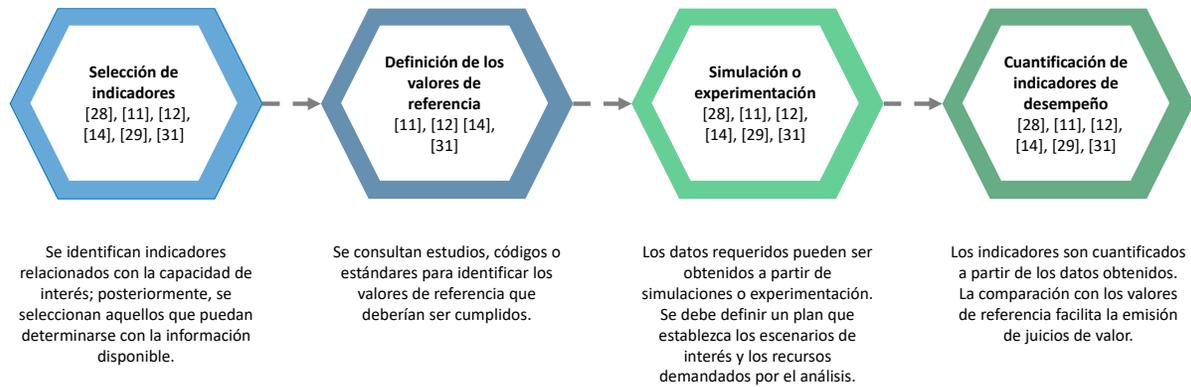


Figura 5. Pasos para la evaluación del desempeño de MR. Fuente: elaboración propia.

4. CAPACIDADES E INDICADORES

Las capacidades son definidas como la combinación de habilidades o atributos que posibilitan el funcionamiento de un sistema o permite alcanzar un objetivo. También pueden describirse como la competencia para realizar tareas y producir resultados, así como definir y resolver problemas [36], [37]. En la literatura, es posible identificar capacidades de las MR como generación, resiliencia, mantenimiento, comunicación, reconfiguración, operación, control, y protección. Para comprender el rendimiento del sistema frente a cada capacidad típicamente se emplean indicadores, los cuales miden la efectividad de un sistema respecto a parámetros de operación y requisitos establecidos por normatividad [29]. La Figura 6 presenta indicadores de desempeño categorizados en las diversas capacidades que son descritos en las siguientes subsecciones.

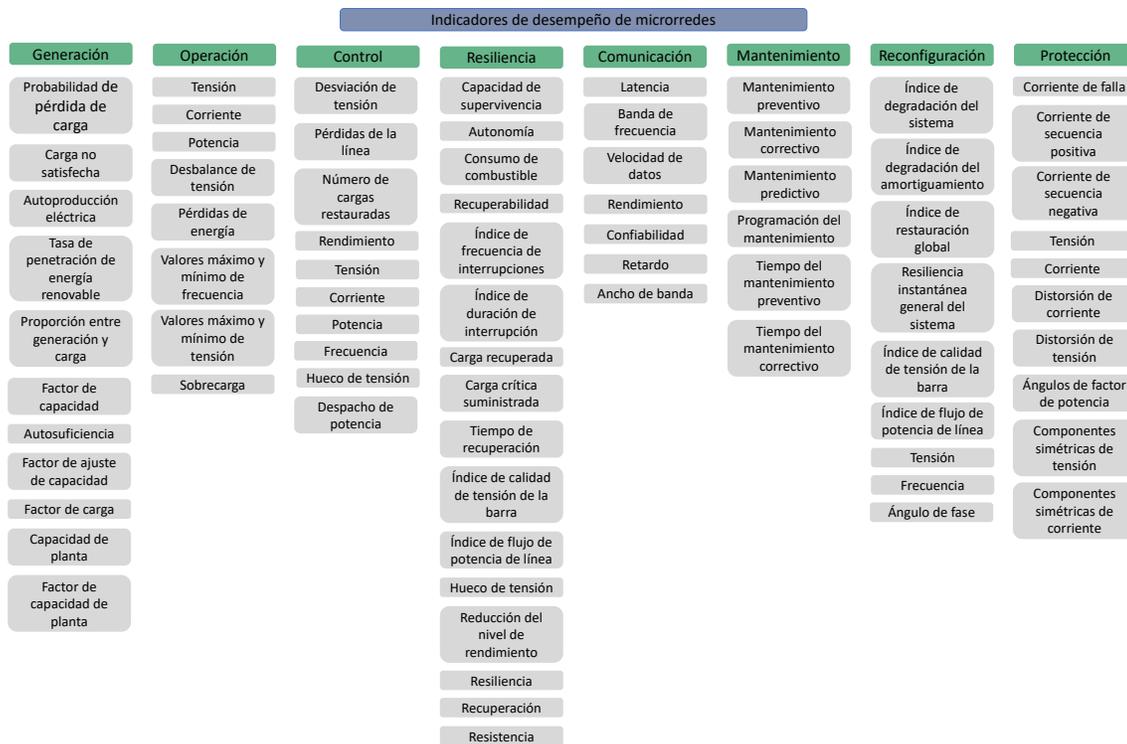


Figura 6. Indicadores de desempeño de microrredes. Fuente: elaboración propia.

4.1 Generación

La generación es la capacidad de satisfacer la demanda de forma fiable, lo cual representa un reto para las MR aisladas con fuentes renovables debido a su intermitencia. Por lo tanto, la generación debe considerar el impacto de la variación de los recursos energéticos, el crecimiento de la demanda y los costos para garantizar la confiabilidad [38], [39].

Los indicadores de la capacidad de generación muestran la cantidad de energía que puede suministrar el sistema, la carga que puede atender y la relación existente entre la energía suministrada y/o demandada con el porcentaje de participación de elementos de generación. La Tabla 2 relaciona los indicadores aplicables a la capacidad de generación.

La capacidad de generación se caracteriza por indicadores que en su mayoría demandan la recopilación de datos a lo largo de un intervalo de tiempo específico, principalmente vinculados a la energía suministrada. Entre los indicadores más frecuentemente empleados se encuentran la fracción de energía renovable o el porcentaje de contribución de fuentes renovables, así como la autoproducción eléctrica. Otros indicadores relevantes están asociados con la potencia proporcionada, la demanda y la capacidad instalada de la microrred.

La generación puede ser afectada por la intermitencia de los recursos energéticos o el incremento de la carga. El análisis de indicadores puede contribuir en la mejora del rendimiento de la capacidad dado que pueden ser empleados en la etapa de dimensionamiento para estimar la energía suministrada y características de la carga o en la etapa de operación para realizar ajuste [43].

4.2 Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de resistir o recuperarse de un evento y estar en un nivel de desempeño aceptable y durante un periodo de tiempo admisible. La resiliencia depende de la habilidad de anticipar riesgos, minimizar impactos, adaptarse y recuperarse rápidamente ante una perturbación [44], [45], [46]. Los indicadores de resiliencia señalan el estado de las variables del sistema ante una perturbación, la cantidad de energía capaz de suministrar, el tiempo suministrando energía y la habilidad para recuperarse.

La Tabla 3 contiene algunos indicadores aplicables a la capacidad de resiliencia. Varios de estos indicadores requieren de un registro de datos durante un periodo de tiempo para conocer el comportamiento del sistema, por ejemplo, la frecuencia de interrupciones o la duración de las interrupciones.

Para esta capacidad se identificaron múltiples indicadores empleados para el análisis de su desempeño; no obstante, los artículos muestran que con algunas de estas métricas es posible obtener una percepción de su rendimiento. Entre los índices más frecuentemente utilizados se encuentran aquellos relacionados con la potencia de la carga, el comportamiento de la tensión y el tiempo de recuperación después de un evento disruptivo.

La resiliencia presenta retos en cuanto predicción, prevención y mitigación de eventos como extremas temperaturas, tormentas, inundaciones, tsunamis, ataques físicos o cibernéticos, entre otros, que pueden afectar la operación de la MR. El conocimiento del comportamiento del sistema ante estos eventos (e.g., número de interrupciones, caídas de tensión, tiempo de detección y recuperación de una falla) permite formular estrategias para contribuir a la operación correcta [53].

Tabla 2. Indicadores aplicables a la capacidad de generación. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula	Descripción
[26]	2017	Probabilidad de pérdida de carga (LLP: <i>Load loss probability</i>)	$LLP = \frac{T_s}{T_{tot}}$ (%) $LLP = 0$; 100 % confiabilidad $LLP = 1$; 0 % confiabilidad	Periodo de tiempo de corte de energía dividido por el tiempo de trabajo total del sistema.
[27]	2015	Carga no satisfecha (UL: <i>Unmet load</i>)	$EDNS = \frac{\sum_{t=1}^n ENS}{\sum_{t=1}^n P_{total}}$ (%) $UL = 0$; 100 % confiabilidad $UL = 1$; 0 % confiabilidad	Es la energía no suministrada en un periodo de tiempo.
		Autoproducción eléctrica (ESP: <i>Electrical self-production</i>)	$ESP = \frac{E_{tot}^{el,sp}}{D_{tot}^{el}}$ (%)	Es la relación entre la energía autoproducida y la demanda eléctrica total.
[28]	2021	Autoproducción eléctrica a partir de fuentes de energía renovable (ESPRES: <i>Electrical self-production from renewable energy sources</i>)	$ESPRES = \frac{E_{res}^{el,sp}}{E_{tot}^{el,sp}}$ (%)	Relación entre la energía producida por fuentes renovables y la energía suministrada por componentes de cogeneración.
		Autoproducción eléctrica, producción de calor y energía combinados (ESPCHP: <i>Electrical self-production from combined heat and power</i>)	$ESPCHP = \frac{E_{chp}^{el,sp}}{E_{tot}^{el,sp}}$ (%)	Es la relación entre la energía suministrada por componentes de cogeneración y la demanda eléctrica total.
[40]	2023	Tasa de penetración de energía renovable	$R_f = \frac{E_{ren}}{E_{tot}}$ (%)	Relación de energía suministrada por fuentes renovables y consumo total de energía
[41]	2020			
[11]	2018	Proporción entre la generación y la carga (GLPR: <i>Generation load power ratio</i>)	$GLPR = \frac{\sum_{j=1}^N P_{gen,j}}{\max\{\sum_{k=1}^L P_{load,k}\}}$	Es la proporción entre la generación total y la demanda máxima
		Factor de capacidad (CF: <i>Capacity factor</i>)	$CF = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P^G(t)}{8760P^S}$	Presenta la relación entre la energía producida y la capacidad instalada.
[42]	2022	Autosuficiencia (SS: <i>self-sufficiency</i>)	$SS = \frac{\sum P_{RE,load}}{\sum P_{RE,load} + \sum P_{storage,load}}$	Es la relación entre la energía de los generadores (ER) que se utiliza para atender la demanda y la energía total utilizada para satisfacer la demanda, incluidas las pérdidas de operación y almacenamiento.
		Factor de ajuste de capacidad (CAF: <i>Capacity adjustment factor</i>)	$CAF = \frac{Avg(\sum ER)}{P_L}$	Es la relación entre la capacidad de los generadores (ER) y la demanda pico.
		Factor de carga (LF: <i>Load factor</i>)	$LF = \frac{P_m}{P_p}$	Mide la eficiencia de utilización del sistema
[14]	2019	Capacidad de planta (Cc: <i>Plant capacity</i>)	$C_c = C_p * h_{exp}$	Cantidad de energía que puede suministrar el sistema
		Factor de capacidad de planta (Fp: <i>Plant capacity factor</i>)	$F_p = \frac{E_s}{C_c}$	Es la relación entre la energía suministrada y la capacidad de planta en un periodo de tiempo.

T_s : tiempo de corte de energía; T_{tot} : tiempo de trabajo del sistema; ENS : energía no suministrada; P_{total} : Carga total; $E_{tot}^{el,sp}$: energía total auto producida; D_{tot}^{el} : demanda; $E_{res}^{el,sp}$: energía autoproducida por fuentes de energía renovable; $E_{chp}^{el,sp}$: energía producida por tecnologías de cogeneración (CHP); E_{ren} : energía suministrada por fuentes renovables; E_{tot} : energía total demandada; $P_{gen,j}$: potencia generada; $P_{load,k}$: demanda; P^G : energía generada por la fuente; P^S : potencia instalada; $P_{RE,Load}$: potencia suministrada de los generadores a la carga; $P_{storage,Load}$: potencia suministrada de las baterías a la carga; P_L : demanda pico; ER: energía renovable; P_m : potencia media; P_p : potencia pico; C_p : capacidad energética de la planta; h_{exp} : número de horas esperado de funcionamiento; E_s : energía total generada.

Tabla 3. Indicadores aplicables a la capacidad de resiliencia. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula / Instrumento	Descripción
		Capacidad de supervivencia	$S_h(t, Q) = \sum_{h=0}^{8760} q_h S_h(t)$	Cuantificación de la resiliencia de forma estadística. Expresa la probabilidad promedio de sobrevivir a un evento de isla durante un año
[29]	2020	Autonomía	$A = \sum_{t=0}^T B_{loss}^{load} = \begin{cases} B_{loss}^{load}(t) = 1, P_{loss}^{load}(t) = 0 \\ B_{loss}^{load}(t) = 0, P_{loss}^{load}(t) \neq 0 \end{cases}$	Es el tiempo en horas que la MR puede atender el 100 % de la carga crítica.
		Consumo de combustible	$F_{con,tot}^g = \sum_{t=0}^T [\sum_{g=0}^{Ng} F^g(t, g)]$	Cantidad de combustible consumido en un periodo de tiempo.
[47]	2022	Recuperabilidad	$R = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{D_t - G_t}{D_t}$	Es la relación entre la demanda y la potencia entrega durante el periodo de interrupción
[21]	2019	Índice de frecuencia promedio de interrupciones (SAIFI)	$SAIFI = \frac{Interrupciones/año}{Clientes}$	Mide la frecuencia promedio de interrupciones en el suministro de energía en el sistema
		Índice de duración promedio de interrupción SAIDI	$SAIDI = \frac{minutos/año}{Clientes}$	Índice de duración acumulada promedio de las interrupciones del suministro eléctrico en el sistema
		Carga recuperada	$ENS = \sum_{i=1}^n E_{ns}$	Energía no suministrada
[48]	2021	Carga crítica	$CCS = \sum_{i=1}^n C_{cs}$	Suministro máximo de carga crítica
[49]	2017	suministrada		
		Tiempo de recuperación	Determinación a partir de medición	Tiempo transcurrido desde el momento del evento hasta la recuperación
[50]	2014	Índice de calidad de tensión de la barra	$DI_i = \frac{V_i - V_i^{sp}}{\Delta V_i^l}$	Determina el estado de la tensión en la barra
	2014	Índice de flujo de potencia de línea	$OL_i = \frac{P_{li}}{P_{li}^{lim}}$	Este indicador es utilizado para garantizar la transmisión de energía en un evento.
	2020	Hueco de tensión	$Sag \% = \frac{V_o - V_m}{V_o}$	Muestra la caída de tensión durante un evento
[18]	2020	Reducción del nivel de rendimiento	$L_o P_R = \frac{\sum P(load_s)I - \sum P(load_s)m}{\sum P(load_s)I} \%$	Muestra el porcentaje de carga atendida durante un evento.
[30]	2022	Proporción de deslastre de carga	$\frac{SD - AC}{SD} (\%)$	Es la relación entre la carga reducida y la demanda total del sistema
[51]	2018	Resiliencia	$\int_{t_1}^{t_2} (1 - Q(t)) dt$ $Q(t) = \frac{\sum_{n=1}^N P_{gen,n}}{P_{demand}}$	Es la habilidad de recuperarse luego de un evento
		Resistencia	$\frac{\sum_{i \in N_{Not-Interrupted}} (Pr_{i,t}^L \times PLoad_{i,t})}{\sum_{i \in N} (Pr_{i,t}^L \times PLoad_{i,t})}$	Es la relación entre la potencia de los clientes no interrumpidos y la potencia total de la carga
[52]	2018	Recuperación	$\frac{LPR}{\sum_{i \in N_{interrupted}} (Pr_{i,t}^L \times PLoad_{i,t})}$	Es la relación entre la energía restaurada y la energía total de las cargas interrumpidas
		Resiliencia	$\frac{LPR + \sum_{i \in N_{Not-Interrupted}} (Pr_{i,t}^L \times PLoad_{i,t})}{\sum_{i \in N} (Pr_{i,t}^L \times PLoad_{i,t})}$	Es la relación entre la energía suministrada esperada y la energía total de las cargas del sistema

Q: distribución de inicio de interrupciones; q_h : probabilidad de que un evento comience en una hora h de un año; q_h : probabilidad de supervivencia de la MR; B_{loss}^{load} : describe si la carga es atendida; F^g : consumo de combustible; LPR: energía restaurada; TR: tiempo tomado para la restauración; ENS: energía no suministrada; E_{ns} : energía no suministrada en la hora ; CCS: carga crítica suministrada; C_{cs} : carga crítica suministrada en la hora i; V_i : magnitud de tensión en la barra i; V_i^{sp} : magnitud de tensión especificada en la barra i; ΔV_i^l : límite de desviación de tensión; P_{li} : potencia en la línea; P_{li}^{lim} : Capacidad de la línea; V_o : tensión inicial; V_m : tensión final; $P(load_s)I$: potencia inicial; $P(load_s)m$: potencia final; SD: demanda del sistema; AC: consumo real; Pr: factor de prioridad, D_t : demanda, G_t : energía suministrada.

4.3 Mantenimiento

El mantenimiento es la capacidad de garantizar la operación en un rango aceptable, mantener o mejorar la eficiencia y aumentar la vida útil de los equipos. Por ende, es necesario realizar chequeos preventivos, limpieza, reparación y sustitución de componentes [54], [55].

El mantenimiento del sistema es esencial para lograr un equilibrio entre la confiabilidad y los costos asociados a la operación, reparación y remplazo. Para esta capacidad se verifica la aplicación de los planes de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. La Tabla 4 presenta indicadores aplicables a la capacidad de mantenimiento.

Los planes de mantenimiento son herramientas indispensables para preservar en adecuadas condiciones la microrred. Entre los tres planes expuestos, el mantenimiento predictivo puede ocasionar mayor dificultad debido a que la dificultad de previsión de los riesgos a futuro; es decir, existe la posibilidad de que la microrred se vea impactada por circunstancias imprevistas y que no se disponga de medidas correctivas para abordar dichas eventualidades.

El mantenimiento en MR es un proceso sujeto a cambios según la operación del sistema. El rendimiento puede mejorar con la exploración de algoritmos de optimización, uso de inteligencia artificial e implementación de IoT, entre otros.

4.4 Comunicación

La comunicación es la capacidad de intercambiar información e instrucciones de control entre componentes del sistema de forma eficiente para realizar la gestión y garantizar el rendimiento, la eficiencia y la confiabilidad [59], [60]. Los indicadores muestran el rendimiento en la transmisión de datos, la velocidad de transmisión y el tiempo de recepción, a partir de lo cual se puede inferir sobre la confiabilidad de la comunicación. La Tabla 5 relaciona indicadores utilizados para la evaluación de la capacidad de comunicación.

Tabla 4. Indicadores aplicables a la capacidad de mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula / Instrumento	Descripción
		Mantenimiento preventivo		Incluye inspecciones visuales y físicas, actividades para verificar el estado de los componentes y el cumplimiento de las recomendaciones de los fabricantes.
[56]	2018	Mantenimiento correctivo	Plan de actividades programadas	Comprende las actividades de detección de fallas, reparación o reemplazo de componentes con presencia de fallas o anomalías.
[57]	2021	Mantenimiento predictivo		Abarca las actividades relacionadas con la anticipación de riesgos, modificaciones debido a imprevistos como cambios debido a normatividad o reparación por daños ocasionados por fenómenos naturales
[55]	2018	Programación del mantenimiento	Actividades de mantenimiento	Momento en el cual se realiza mantenimiento a cada elemento y acciones para mantener la operación de la microrred mientras un componente no está activo.
[58]	2017	Tiempo medio del mantenimiento preventivo	$MPMT = \frac{\sum_{i=1}^m APMT_i f_i}{\sum_{i=1}^m f_i}$	Es el tiempo promedio requerido para realizar el mantenimiento preventivo.
		Tiempo medio del mantenimiento correctivo	$MCMT = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j CPMT_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}$	Es el tiempo promedio requerido para realizar el mantenimiento correctivo.

APMT: tiempo medio requerido para realizar una tarea de mantenimiento preventivo i, f_i : es la frecuencia de la tarea de mantenimiento preventivo i dada en tareas por hora de operación.

Tabla 5. Indicadores aplicables a la capacidad de comunicación. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula / Instrumento	Descripción
		Latencia		Es el retraso de los datos transmitidos entre los componentes
		Banda de frecuencia	Obtenidos a partir de medición	Permite que la comunicación sea de alta calidad
[59]	2013	Velocidad de datos		Indica que tan rápido se transmiten los datos entre componentes
[61]	2023	Rendimiento	$R(bps) = \frac{N_b}{t(s)}$	Es la tasa de bits con la que los datos son transferidos en un periodo de tiempo
		Confiabilidad	Verifica el cumplimiento de requerimientos como la latencia y ancho de banda	Mide que tan confiable puede transferir datos el sistema de comunicación
[62]	2020	Retardo	$Rt(ms) = t_l - t_e$	Es el tiempo que transcurre desde que se envía un dato hasta que es recibido
		Ancho de banda	Obtenido a partir de medición	Es la velocidad de los datos medida en bit por segundo

t_l : tiempo de llegada; t_e : tiempo de envío; N_b : número de bits entregados; t : tiempo.

Los indicadores brindan una descripción del desempeño de la microrred respecto a la comunicación, permitiendo evaluar la rapidez de envío de datos, el tiempo transcurrido entre el envío y la recepción, y el cumplimiento de los valores de operación normal. Sin embargo, estas métricas demandan la obtención mediante el uso de software especializado o dispositivos de medición, lo que podría conllevar cierta complejidad en su determinación.

Dado que el sistema de comunicación es importante para la MR porque permite el monitoreo, análisis y control de la MR, resulta relevante el uso de indicadores para validar el funcionamiento apropiado de componentes que lo conforman como medidores inteligentes, sensores, enlaces de comunicación y equipos de adquisición y procesamiento de datos.

4.5 Reconfiguración

La reconfiguración es la capacidad de cambiar la estructura del sistema mediante la apertura o cierre de conmutadores, interruptores o seccionadores. La reconfiguración ayuda a mejorar el rendimiento de la MR y los perfiles de tensión, puede minimizar pérdidas o sobrecargas y restaurar el sistema [63], [64], [65].

Los indicadores de reconfiguración señalan el estado de las variables eléctricas como la tensión, frecuencia o potencia luego de una acción de conexión o desconexión de algún elemento del sistema. Además, permiten comprender el nivel de degradación o recuperación de la MR debido a una acción de reconfiguración. La Tabla 6 contiene indicadores utilizados para el análisis de la capacidad de reconfiguración.

Los índices relacionados con el comportamiento de la tensión y la potencia pueden ser determinados con mayor facilidad en comparación con aquellos que incluyen el índice de degradación. Estos índices, además de su simplicidad en obtención, pueden proporcionar una descripción suficiente del desempeño de la reconfiguración.

El estudio de la reconfiguración requiere de un sistema de medición y almacenamiento de datos para el análisis antes, durante y después de algún suceso. De esta forma, se conoce información sobre la robustez del sistema frente a eventos, los componentes más sensibles o componentes con fallas y permite proponer acciones correctivas para mejorar el estado de la MR.

Tabla 6. Indicadores aplicables a la capacidad de reconfiguración. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula	Descripción
[31]	2021	Índice de degradación del sistema (SDR)	$SDR = \frac{DBFC_0 - DNFC_d}{DBFC_0}$	Toma un valor de 0 a 1, donde 0 indica que el sistema opera en condición segura y 1 indica que el sistema está degradado
		Índice de degradación del amortiguamiento (DDI)	$DDI = \frac{\int_{t_d}^{t_s} DBFC_0 - DBFC(t)}{DBFC_0(t_s - t_d)}$	DDI = 1 indica alta resiliencia DDI = 0 indica inestabilidad ante eventos
		Índice de restauración global (ORI)	$ORI = \frac{\int_{t_{restore}}^{t_{AOC}} DBFC(t) - DBFC(\max)}{(DBFC_0 - DBFC(\max))(t_{AOC} - t_{restore})}$	ORI = 1 si todos los equipos son restaurados ORI = 0 si no hay restauración
		Resiliencia instantánea general del sistema (SOIR)	$SOIR = \frac{\int_{t_d}^{t_{AOC}} DBFC(t)}{DBFC_0(t_{AOC} - t_d)}$	SOIR = 1 los elementos dañados o con falla son restaurados SOIR = 0 no hay restauración
[50]	2014	Índice de calidad de tensión de la barra	$DI_i = \frac{V_i - V_i^{SP}}{\Delta V_i^l}$	Determina el estado de la tensión en la barra. El índice debe ser menor o igual a 1 Este indicador es utilizado para garantizar la transmisión de energía en un evento. La potencia transportada debe ser menor a la capacidad de la línea
	2014	Índice de flujo de potencia de línea	$OL_i = \frac{P_{li}}{P_{li}^{lim}}$	
[66]	2014	Tensión Frecuencia Ángulo de fase	Determinación a partir de medición	Condiciones para la sincronización según IEEE 1547

V_{rms} : tensión eficaz; f : frecuencia; $DBFC_0$: índice de vulnerabilidad al momento del evento; t_d ; $DBFC_d$: momento establecido t_s ; V_i : magnitud de tensión en la barra i ; V_i^{SP} : magnitud de tensión especificada en la barra i ; ΔV_i^l : límite de desviación de tensión; P_{li} : potencia en la línea; P_{li}^{lim} : Capacidad de la línea.

4.6 Operación

La operación es la capacidad del sistema de permanecer en un correcto nivel de rendimiento. Comprende el análisis del flujo de potencia, análisis de fallas y la verificación de las variables eléctricas como potencia, tensión, corriente y frecuencia. Estos análisis son realizados para comprender el comportamiento de las fuentes de generación, carga, red de distribución y demás componentes de la MR [67].

Los indicadores muestran el estado del sistema a partir de variables como corriente, tensión y potencias en los elementos y permiten determinar si cumplen con los umbrales definidos. La capacidad de operación puede incluir la determinación de indicadores en diversos escenarios debido comúnmente a la variación de la generación y la carga. La Tabla 7 lista indicadores empleados en el estudio de la operación de MR.

Los indicadores de corriente, tensión y potencia destacan por su simplicidad en cuanto a su obtención, debido a que son parámetros que pueden ser medidos directamente o determinados mediante software. Estas métricas, además, pueden proporcionar una evaluación del rendimiento de la microrred, convirtiéndose en las más frecuentemente utilizadas en este aspecto.

Las MR presentan dificultades para mantener las variables eléctricas en un rango adecuado debido a la variabilidad de la generación y la carga. Sin embargo, existen estrategias para afrontar estos problemas; por ejemplo, la combinación de fuentes renovables y no renovables mejora el desempeño del sistema, mientras la operación en modo aislado mejora la confiabilidad cuando hay perturbaciones en la red eléctrica. La efectividad de estas estrategias puede medirse a partir de los indicadores relacionados en esta sección.

Tabla 7. Indicadores aplicables a la capacidad de operación. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula	Descripción
[63]	2019	I_{rms}, V_{rms}, P	Determinación con simulación o medición	Validación del cumplimiento de los indicadores según umbrales
[21]	2019	Desbalance de tensión	$U = \frac{V_a - V_b}{V_a}$	Diferencia de tensión entre las tres fases
	2019	Pérdidas de energía	$P_e = \frac{E_s - E_d}{E_s}$	Cantidad de energía perdida en el sistema
[32]	2017	Valor máximo y mínimo de frecuencia		Rango de variación de frecuencia durante un periodo de tiempo
[33]	2017	Valor máximo y mínimo de tensión	Determinación con simulación o medición	Rango de variación de tensión durante un periodo de tiempo
[68]	2021	Sobrecarga		Potencia transportada por los elementos del sistema.

I_{rms} : Corriente eficaz; V_{rms} : tensión eficaz; P : potencia; V_a : tensión de la fase a; V_b : tensión de la fase b; E_s : energía suministrada; E_d : energía demandada.

4.7 Control

El control es la capacidad de estabilizar la operación de la MR frente a eventos a partir de la aplicación de técnicas o estrategias [69]. Esta capacidad comprende la capa primaria, que controla la tensión y la frecuencia, la capa secundaria, que busca la restauración de la frecuencia y la tensión, y la capa terciaria, que comprende el despacho de energía y sincronización de la MR [70],[71].

La Tabla 8 presenta indicadores utilizados para la evaluación del control que permiten validar que el control se efectúa sobre el sistema, verificando parámetros como desviación de tensión, frecuencia, pérdidas de potencia y cargas restauradas.

Las métricas son utilizadas para evaluar la capacidad del sistema de control para lograr un alto rendimiento ante eventos. A partir del conocimiento del estado del sistema, se han propuesto maniobras o modelos para mejorar el desempeño, incluyendo la programación de la operación de generadores diésel u otro componente capaz de suministrar energía para dar soporte cuando las fuentes de energía no puedan satisfacer la carga, el uso algoritmos para reducir el tiempo de restauración de cargas ante eventos y la aplicación de estrategias para mitigar efectos de perturbaciones.

En el análisis del control, el enfoque habitualmente se centra en verificar qué indicadores, como tensión, frecuencia y potencia, permanezcan dentro de un rango de operación aceptable bajo diversas condiciones de la microrred.

Dentro de la capa primaria, se otorga especial atención al estudio de la frecuencia y la distribución de la potencia generada por las fuentes de energía. En la capa secundaria, se vuelve esencial validar que la frecuencia de la microrred se ajuste hacia el valor de referencia, ya que se presenta una desviación de su valor debido a las operaciones en la capa primaria. En lo que respecta a la capa terciaria, la métrica principal recae en la potencia suministrada, lo que permite garantizar que cada fuente de generación esté entregando la cantidad de energía esperada de manera correcta.

Tabla 8. Indicadores aplicables a la capacidad de control. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Fórmula	Descripción
		Desviación de tensión	$minJ(V(t)) = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{bb=1}^{N_{bb}} 1 - V_{bb}^t $	El indicador considera las caídas de tensión y las sobretensiones en el sistema. La tensión debe mantenerse en el rango de 0 a 6 %.
[72]	2022	Pérdidas de la línea	$minJ(P_l(t)) = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_l} \frac{V_l^t{}^2}{z_l} \cos\theta_l$	Las pérdidas en la línea pueden variar debido a cambios en la carga y también modifica la potencia suministra por los componentes generadores.
		Número de cargas restauradas	$N_l = \sum L_R$	Es la cantidad de carga que vuelve al modo de operación normal.
		Rendimiento	Determinación con simulación o medición	Costos asociados a las fuentes de energías, costos de capital, operación y mantenimiento.
[63]	2019	I_{rms}, V_{rms}, P	Determinación con simulación o medición	Validación del cumplimiento de los indicadores según umbrales
[73]	2023	Frecuencia	Determinación de la frecuencia con dispositivos de medición	Simulación de deslastre de carga y estudio de la frecuencia durante el evento.
[74]	2021	Control de tensión	Determinación con simulación o medición	Indica la inestabilidad de tensión debido a la intermitencia de las fuentes de energía o debido a la discordancia entre la generación y la carga.
[18]	2020	Hueco de tensión	$Sag \% = \frac{V_o - V_m}{V_o}$	Muestra la caída de tensión durante un evento
[75]	2023	Despacho de potencia Variación de tensión	Determinación con simulación o medición	Análisis de la distribución de potencia en la microrred Análisis de cambios en las tensiones de los nodos debido a variaciones de la potencia en la microrred.
[76]	2020	Potencia suministrada Frecuencia	Determinación con simulación o medición	Estudia el comportamiento de la potencia suministrada y frecuencia debido a cambios en la carga o variación del tiempo de retraso en la comunicación.

L_R : cargas restauradas; V_x^t : tensión del nodo; z_l : impedancia de la línea; V_o : tensión inicial; V_m : tensión final.

4.8 Protección

La protección es la capacidad de resistir y mitigar perturbaciones en la MR. El sistema de protección debe ser compatible con soluciones de operación y control de la MR. En general, los requisitos de protección son la sensibilidad de modo que pueda detectar anomalías o fallas, la selectividad para determinar con exactitud la zona que debe aislar, la confiabilidad para asegurar que los elementos operen de forma correcta y oportuna, la adaptabilidad para cambiar la configuración del sistema según el estado de operación y la resincronización que permite conectarse nuevamente a la red luego de eliminar fallas [67], [77].

Existen varios métodos para el análisis de protección de MR, tales como: (i) el análisis convencional, que consiste en comparar la magnitud de la corriente con un valor umbral, (ii) el análisis de tensión, que se basa en monitorear las tensiones de salida de los recursos de generación distribuida y transformarlo en variables de eje directo y eje cuadratura para reducir los cálculos, (iii) la transformada Wavelet, con la cual se detectan fallas al extraer las componentes transitorias de las distorsiones de la red y (iv) la transformada S, que es un

híbrido de la transformada de Fourier y la transformada Wavelet y presenta información de la señal distorsionada [78]. La Tabla 9 contiene el indicador más empleado en el estudio de la capacidad de protección.

La evaluación de la capacidad de protección suele centrarse en el análisis del indicador de corriente de falla. Además, algunos estudios han propuesto la utilización de componentes simétricas como una alternativa para investigar la protección de las microrredes. Por otro lado, se observa que las métricas vinculadas a la distorsión de corriente y tensión han tenido una presencia menos prominente en los estudios relacionados con protecciones.

En relación con los métodos de análisis de protección, es relevante destacar que el enfoque convencional se apoya en la corriente de falla como indicador fundamental. En el análisis de tensión, se examina el comportamiento de esta variable, mientras que la transformada Wavelet y S recurren a índices que se vinculan con las distorsiones presentes en la corriente y la tensión.

5. DISCUSIÓN

Esta sección resalta algunos puntos importantes a partir de la revisión de los trabajos realizada. Al realizar la revisión de diversos artículos, se aprecia el uso de métricas o indicadores para evaluar el rendimiento de manera global. No obstante, se considera conveniente la clasificación de estos indicadores por capacidades, lo cual permite una visión más exacta y detallada del funcionamiento de la microrred.

Tabla 9. Indicadores aplicables a la capacidad de protección. Fuente: elaboración propia.

Ref.	Año	Indicador	Instrumento	Descripción
[78]	2016	Corriente de falla	Determinación con simulación o medición	Su aplicación consiste en simular varios tipos de falla y determinar si la corriente de falla supera el umbral permitido.
[79]	2023			
[80]	2012			
[81]	2013			
[82]	2015	Corriente de secuencia positiva	Análisis de circuitos equivalentes en el sistema de componentes simétricas	La corriente de secuencia positiva facilita la detección de fallas debido a que esta componente está presente en todos los tipos de falla. La falla es detectada a partir de la comparación de las impedancias de secuencia positiva antes y después de un evento.
[83]	2014	Tensión Corriente Distorsión de corriente Distorsión de tensión Ángulos de factor de potencia Componentes simétricas de tensión Componentes simétricas de corriente	Determinación con simulación o medición	Análisis estadístico de todas las variables de entrada para determinar la existencia de una falla
[84]	2017	Corriente de secuencia positiva Corriente de secuencia negativa	Determinación con simulación o medición	Identifica la dirección de la corriente de falla a partir de las componentes simétricas de la corriente antes y después de una perturbación.
[85]	2020	Tensión	Determinación con simulación o medición	La propuesta consiste en utilizar los datos de tensión para detectar e identificar fallas en diversas condiciones de operación.
[86]	2019			

El artículo logra describir los pasos empleados en varios trabajos para llevar a cabo la evaluación del rendimiento, abriendo la posibilidad de aplicar o dirigir estos pasos hacia la evaluación de aspectos específicos de la microrred. Esto permite una mayor profundidad en la evaluación y análisis de áreas de interés, brindando una perspectiva más completa de su comportamiento en contextos específicos.

Se destaca la conveniencia de profundizar en aspectos como el mantenimiento de la MR y la existencia de métricas para la evaluación de las estrategias de control. El mantenimiento de una MR propende por garantizar el rendimiento, aumentar la confiabilidad del sistema, su disponibilidad y la vida útil de los componentes. De este modo, se destaca la importancia de realizar una planificación de estrategias con técnicas y procedimientos capaces de hacer seguimiento a la MR y contribuir en la mejora de su desempeño [57].

Las estrategias de control utilizadas en MR han sido relevantes para reducir el impacto de diversos problemas relacionados con la estabilidad, confiabilidad y seguridad del sistema. En este sentido, las métricas de desempeño pueden ayudar a determinar la estrategia con mejor rendimiento entre las soluciones encontradas en la literatura [87].

También cabe resaltar que algunas capacidades involucran una cantidad considerable de indicadores y esto puede agregar complejidad al momento de decidir las métricas que mejor describen el rendimiento. Para facilitar esta tarea, se sugiere asignar pesos a los indicadores para dar nivel de importancia según experiencias en estudios realizados [13], [41].

6. CONCLUSIONES

Este El documento recopila y expone hallazgos sobre cómo estudiar el desempeño de MR a partir de ocho capacidades, a saber: generación, resiliencia, mantenimiento, comunicación, reconfiguración, operación, control y protección. Tal clasificación facilita la identificación de las métricas o indicadores pertinentes para estudiar un aspecto técnico de interés particular.

Se aprecia el uso de indicadores de rendimiento como una herramienta esencial para el estudio del desempeño de las MR desde el dimensionamiento hasta la operación y formulación de soluciones.

Las métricas identificadas para la capacidad de generación permiten evaluar el potencial de suministro, la habilidad para enfrentar las fluctuaciones climáticas (irradiancia solar y viento) y demandas variables del sistema. Por otro lado, las métricas vinculadas a la resiliencia facilitan un análisis de la microrred frente a eventos considerando variables tales como: cantidad de carga que puede abastecer, capacidad de recuperación a un estado operativo normal y lapso necesario para lograrlo.

Los indicadores expuestos en relación con la capacidad de mantenimiento tienen el propósito de incentivar y fomentar la elaboración de planes de actividades para prevenir posibles riesgos, abordar reparaciones y estimar el tiempo de fallo potencial de los diversos componentes que conforman una microrred. En cuanto a la capacidad de la comunicación, las métricas se orientan hacia la garantía de que los datos se transmitan con una velocidad, calidad y nivel de confiabilidad específicos.

La reconfiguración engloba indicadores que exhiben la condición de variables cruciales (tensión o flujo de potencia) y el estado global de la microrred basado en los índices de degradación frente a diversas condiciones. En lo que concierne a la operación, los indicadores abarcan parámetros convencionales de los sistemas eléctricos, como corriente, tensión, frecuencia, potencia y pérdidas de energía.

La evaluación del control de una MR se centra en el análisis del comportamiento de la frecuencia, la tensión y la distribución de potencia. No obstante, algunas investigaciones han

dirigido su atención hacia la consideración detallada de factores adicionales como la potencia generada por cada fuente de energía, la demanda energética de las cargas y los costos asociados para alcanzar el nivel de rendimiento deseado.

El indicador más utilizado para evaluar la capacidad de protección es la corriente de falla, la cual valida el funcionamiento de los dispositivos de protección ante distintos tipos de fallos. Sin embargo, dada la naturaleza de flujo de potencia bidireccional que define a las microrredes, han surgido otras propuestas de indicadores como el análisis de las corrientes a partir de componentes simétricas con el objetivo de discernir la dirección de la corriente en caso de fallos.

7. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

CONFLICTOS DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Todos los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jersson García-García: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, redacción del documento.

Juan Rey-López: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, edición del documento, supervisión.

German Osma-Pinto: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, edición del documento, supervisión.

8. REFERENCIAS

- [1] A. Majid *et al.*, “Renewable energy sources-based hybrid microgrid system for off-grid electricity solution for rural communities,” *Energy Science and Engineering*, pp. 1-14, Jul. 2023. <https://doi.org/10.1002/ese3.1535>
- [2] S. H. Mirbarati, N. Heidari, A. Nikoofard, M. S. S. Danish, and M. Khosravy, “Techno-Economic-Environmental Energy Management of a Micro-Grid: A Mixed-Integer Linear Programming Approach,” *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 15036, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/su142215036>
- [3] B. Lasseter, “Microgrids [distributed power generation],” in *Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, Columbus, USA, 2001, pp. 146-149. <https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917020>
- [4] M. N. Alam, S. Chakrabarti, and A. Ghosh, “Networked Microgrids: State-of-the-Art and Future Perspectives,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1238–1250, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2881540>
- [5] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu, and J. M. Guerrero, “Microgrids: A review, outstanding issues and future trends,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, p. 101127, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- [6] R. Elazab, A. T. Abdelnaby, H. E. Keshta, and A. A. Ali, “Optimal techno-economic feasibility analysis of a grid-tied microgrid considering demand response strategy,” *Electric Power Systems Research*, vol. 224, p. 109768, Nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109768>
- [7] Y. Parag, and M. Ainspan, “Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits

- of microgrid deployment,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 52, pp. 72–81, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.07.003>
- [8] J. M. Rey *et al.*, “A Review of Microgrids in Latin America: Laboratories and Test Systems,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 1000–1011, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9757743>
- [9] M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, and F. Blaabjerg, “Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 109, pp. 160–186, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038>
- [10] S. Ullah, A. M. A. Haidar, P. Hoole, H. Zen, and T. Ahfock, “The current state of Distributed Renewable Generation, challenges of interconnection and opportunities for energy conversion based DC microgrids,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 122777, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122777>
- [11] S. Wang, X. Zhang, L. Wu, and S. Sun, “New metrics for assessing the performance of multi-microgrid systems in stand-alone mode,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 98, pp. 382–388, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.002>
- [12] F. Rebolledo, P. Mendoza-Araya, G. Carvajal, and G. Ramírez, “Performance evaluation of different solar modules and mounting structures on an on-grid photovoltaic system in south-central Chile,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 68, pp. 65–75, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.02.003>
- [13] H. Zhao *et al.*, “Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: A hybrid multi-criteria decision-making method,” *Energy*, vol. 240, p. 122830, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122830>
- [14] M. Uddin, M. F. Romlie, and M. F. Abdullah, “Performance assessment and economic analysis of a gas-fueled islanded microgrid - A Malaysian case study,” *Infrastructures*, vol. 4, no. 4, p. 61, Sep. 2019. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4040061>
- [15] A. Haffaf, F. Lakdja, and D. O. Abdeslam, “Experimental performance analysis of an installed microgrid-based PV / battery / EV grid-connected system,” *Clean energy*, vol. 6, no. 4, pp. 599–618, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac035>
- [16] Z. M. Ali, M. Al-dhaifallah, and T. Komikawa, “Optimal operation and scheduling of a multi-generation microgrid using grasshopper optimization algorithm with cost reduction,” *Soft Computing*, vol. 26, pp. 9369–9384, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07282-7>
- [17] M. F. Ishraque, A. Rahman, S. A. Shezan, and G. M. Shafiullah, “Operation and Assessment of a Microgrid for Maldives: Islanded and Grid-Tied Mode,” *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 15504, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/su142315504>
- [18] M. Ibrahim, and A. Alkhraibat, “Resiliency assessment of microgrid systems,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 5, p. 1824, Mar. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10051824>
- [19] A. Kwasinski, “Quantitative evaluation of DC microgrids availability: Effects of system architecture and converter topology design choices,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 835–851, Mar. 2011. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2102774>
- [20] 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 Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2852–2861, Aug. 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2249539>
- [21] D. Pramangioulis, K. Atsonios, N. Nikolopoulos, D. Rakopoulos, P. Grammelis, and E. Kakaras, “A methodology for determination and definition of key performance indicators for smart grids development in island energy systems,” *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 242, Jan. 2019. <https://doi.org/10.3390/en12020242>
- [22] D. Gutiérrez-Oliva, A. Colmenar-Santos, and E. Rosales-Asensio, “A Review of the State of the Art of Industrial Microgrids Based on Renewable Energy,” *Electronics*, vol. 11, no. 7, p. 1002, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11071002>
- [23] S. D. Rodrigues, and V. J. Garcia, “Transactive energy in microgrid communities: A systematic review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 171, p. 112999, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112999>
- [24] B. Sahoo, S. K. Routray, and P. K. Rout, “AC, DC, and hybrid control strategies for smart microgrid application: A review,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, p. e12683, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12683>
- [25] A. Rathore, A. Kumar, and N. P. Patidar, “Techno-socio-economic and sensitivity analysis of standalone micro-grid located in central India,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 44, no. 1, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2176922>
- [26] J. Tello-Maita and A. Marulanda-Guerra, “Optimization models for power systems in the evolution to smart grids: A review,” *DYNA*, vol. 84, no. 202, pp. 102–111, Jul. 2017. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.63354>
- [27] S. Sinha, and S. S. Chandel, “Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 755–769, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.040>

- [28] G. Bianco, B. Bonvini, S. Bracco, F. Delfino, P. Laiolo, and G. Piazza, “Key performance indicators for an energy community based on sustainable technologies,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 8789, Aug. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13168789>
- [29] J. Nelson, N. G. Johnson, K. Fahy, and T. A. Hansen, “Statistical development of microgrid resilience during islanding operations,” *Applied Energy*, vol. 279, p. 115724, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115724>
- [30] W. Yang, S. N. Sparrow, M. Ashtine, D. C. H. Wallom, and T. Morstyn, “Resilient by design: Preventing wildfires and blackouts with microgrids,” *Applied Energy*, vol. 313, p. 118793, May. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118793>
- [31] A. Hosseinzadeh, A. Zakariazadeh, and S. Ranjbar, “Fast restoration of microgrids using online evaluation metrics considering severe windstorms,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, p. 100458, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100458>
- [32] L. Sun, X. Zhao, and Y. Lv, “Stability Analysis and Performance Improvement of Power Sharing Control in Islanded Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4665–4676, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3178593>
- [33] P. Stanchev, G. Vacheva, and N. Hinov, “Evaluation of Voltage Stability in Microgrid-Tied Photovoltaic Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 4895, Jun. 2023. <https://doi.org/10.3390/en16134895>
- [34] A. A. Yahaya, M. AlMuhaini, and G. T. Heydt, “Optimal design of hybrid DG systems for microgrid reliability enhancement,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 5, pp. 816–823, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0277>
- [35] I. Akhtar, A. Altamimi, Z. A. Khan, B. Alojaiman, M. Alghassab, and S. Kirmani, “Reliability Analysis and Economic Prospect of Wind energy sources incorporated Microgrid system for Smart Buildings Environment,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 62013–62027, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3287832>
- [36] M. Mormina, “Science, Technology and Innovation as Social Goods for Development: Rethinking Research Capacity Building from Sen’s Capabilities Approach,” *Science and Engineering Ethics*, vol. 25, pp. 671–692, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11948-018-0037-1>
- [37] C. E. Isaza, P. Herrera Kit, J. C. Lozano Herrera, K. Mendez and A. Balanzo “Capacity: A Literature Review and a Research Agenda,” *SSRN Electronic Journal*, pp. 1–22, Aug. 2015. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2824486>
- [38] R. Srivastava, M. Amir, F. Ahmad, S. K. Agrawal, A. Dwivedi, and A. K. Yadav, “Performance evaluation of grid connected solar powered microgrid: A case study,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1044651>
- [39] S. El Hassani, F. Oueslati, O. Horma, D. Santana, M. A. Moussaoui, and A. Mezrhab, “Techno-economic feasibility and performance analysis of an islanded hybrid renewable energy system with hydrogen storage in Morocco,” *Journal of Energy Storage*, vol. 68, p. 107853, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107853>
- [40] N. C. Alluraiah, and P. Vijayapriya, “Optimization, Design and Feasibility Analysis of a Grid-Integrated Hybrid AC/DC Microgrid system for Rural Electrification,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 67013-67029, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3291010>
- [41] S. Alrashed, “Key performance indicators for Smart Campus and Microgrid,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, P. 102264, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102264>
- [42] M. S. Javed, J. Jurasz, M. McPherson, Y. Dai, and T. Ma, “Quantitative evaluation of renewable-energy-based remote microgrids: curtailment, load shifting, and reliability,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 164, p. 112516, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112516>
- [43] J. R. Araújo, E. N. M. Silva, A. B. Rodrigues, and M. G. da Silva, “Assessment of the Impact of Microgrid Control Strategies in the Power Distribution Reliability Indices,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 28, pp. 271–283, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40313-017-0299-x>
- [44] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, “Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32035–32053, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845378>
- [45] S. M. M. Amin, A. Hasnat, and N. Hossain, “Designing and Analysing a PV/Battery System via New Resilience Indicators,” *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10328, Jun. 2023. <https://doi.org/10.3390/su151310328>
- [46] F. H. Jufri, V. Widiputra, and J. Jung, “State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies,” *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1049–1065, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.017>
- [47] J. J. He, D. L. Van Bossuyt, and A. Pollman, “Experimental Validation of Systems Engineering Resilience Models for Islanded Microgrids,” *Systems*, vol. 10, no. 6, p. 245, Dec. 2022. <https://doi.org/10.3390/systems10060245>

- [48] A. Dehghani, M. Sedighzadeh, and F. Haghjoo, "An overview of the assessment metrics of the concept of resilience in electrical grids," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, p. e13159, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13159>
- [49] K. H. Anderson, N. A. DiOrio, D. S. Cutler, and R. S. Butt, "Increasing Resiliency Through Renewable Energy Microgrids," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 2, no. 2, Aug. 2017. <https://www.osti.gov/biblio/1389210>
- [50] X. Zhan, T. Xiang, H. Chen, B. Zhou, and Z. Yang, "Vulnerability assessment and reconfiguration of microgrid through search vector artificial physics optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 679–688, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.024>
- [51] L. Yang, S. Fan, G. He, and Z. Wang, "Evaluation of resilience in grid-connected microgrids under extreme disasters," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 2018, pp. 257–261. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2018.8566556>
- [52] S. Mousavizadeh, H. Mahmoud-Reza, and S. Mohammad-Hossein, "A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources," *Applied Energy*, vol. 211, pp. 443–460, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.067>
- [53] D. J. Rincon, M. A. Mantilla, J. M. Rey, M. Garnica, and D. Guilbert, "An Overview of Flexible Current Control Strategies Applied to LVRT Capability for Grid-Connected Inverters," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1052, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/en16031052>
- [54] P. Mazidi, and M. A. Sanz Bobi, "Strategic maintenance scheduling in an islanded microgrid with distributed energy resources," *Electric Power Systems Research*, vol. 148, pp. 171–182, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.032>
- [55] R. Ghaffarpour, B. Mozafari, A. M. Ranjbar, and T. Torabi, "Resilience oriented water and energy hub scheduling considering maintenance constraint," *Energy*, vol. 158, pp. 1092–1104, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.022>
- [56] M. Heisz, M. Guillén Paredes, SolarPower Europe and Asolmex, "Operación y Mantenimiento Guia de mejores practicas," *Edición México*, p. 92, Sep. 2018. <https://asolmex.org/estudios/Operaci%C3%B3n-y-Mantenimiento-SPE-and-ASOLMEX.pdf>
- [57] K. Keisang, T. Bader, and R. Samikannu, "Review of Operation and Maintenance Methodologies for Solar Photovoltaic Microgrids," *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, p. 730230, Nov. 2021, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.730230>
- [58] B. S. Dhillon, "Engineering systems reliability, safety, and maintenance: An integrated approach," *CRC Press*, New York: Taylor & Francis, 2017.
- [59] V. C. Gungor *et al.*, "A Survey on smart grid potential applications and communication requirements," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, Feb. 2013. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2218253>
- [60] M. Ghorbanian, S. H. Dolatabadi, M. Masjedi, and P. Siano, "Communication in smart grids: A comprehensive review on the existing and future communication and information infrastructures," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 4001–4014, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2928090>
- [61] A. M. Eltamaly, and M. A. Ahmed, "Performance Evaluation of Communication Infrastructure for Peer-to-Peer Energy Trading in Community Microgrids," *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5116, Jul. 2023. <https://doi.org/10.3390/en16135116>
- [62] I. Serban, S. Cespedes, C. Marinescu, C. A. Azurdia-Meza, J. S. Gomez, and D. S. Hueichapan, "Communication requirements in microgrids: A practical survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 47694–47712, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977928>
- [63] S. Thakar, A. S. Vijay, and S. Doolla, "System reconfiguration in microgrids," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 17, p. 100191, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100191>
- [64] O. Badran, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and W. Dahalan, "Optimal reconfiguration of distribution system connected with distributed generations: A review of different methodologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 854–867, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.010>
- [65] B. Sultana, M. W. Mustafa, U. Sultana, and A. R. Bhatti, "Review on reliability improvement and power loss reduction in distribution system via network reconfiguration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 297–310, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.011>
- [66] N. W. A. Lidula, and A. D. Rajapakse, "Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 907–920, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.045>
- [67] A. A. Memon, H. Laaksonen, and K. Kauhaniemi, "Microgrid protection with conventional and adaptive protection schemes," *Microgrids: Advances in Operation, Control, and Protection*, pp. 523–579, Mar. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4_19
- [68] T. Hira, L. Jae-Suk, and K. Rae-Young, "Efficiency evaluation of the microgrid for selection of common bus

- using copula function-based efficiency curves of the converters,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, p. 101621, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101621>
- [69] M. S. Mahmoud, S. Azher Hussain, and M. A. Abido, “Modeling and control of microgrid: An overview,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 5, pp. 2822–2859, May. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.01.016>
- [70] A. Anvari-Mohammadi, H. Abdi, B. Mohammadi-Ivatloo, and N. Hatziargyriou, “Microgrids Advances in Operation, Control, and Protection”, Springer Nature, 2021. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59750-4>
- [71] J. M. Rey, J. Torres Martinez, and M. Castilla, “Secondary control for island microgrid,” *Microgrids Design and Implementation*, pp. 171–193, Nov. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6_6
- [72] B. Papari, C. S. Edrington, M. Ghadamyari, M. Ansari, G. Ozkan, and B. Chowdhury, “Metrics Analysis Framework of Control and Management System for Resilient Connected Community Microgrids,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 2, pp. 704–714, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3129450>
- [73] A. Rashwan, A. Mikhaylov, T. Senjyu, M. Eslami, A. M. Hemeida, and D. S. M. Osheba, “Modified Droop Control for Microgrid Power-Sharing Stability Improvement,” *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11220, Jul. 2023. <https://doi.org/10.3390/su151411220>
- [74] S. P. Bihari *et al.*, “A Comprehensive Review of Microgrid Control Mechanism and Impact Assessment for Hybrid Renewable Energy Integration,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 88942–88958, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3090266>
- [75] N. Khosravi *et al.*, “A novel control approach to improve the stability of hybrid AC/DC microgrids,” *Applied Energy*, vol. 344, p. 121261, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121261>
- [76] Z. Wang *et al.*, “Asynchronous Distributed Power Control of Multimicrogrid Systems,” *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1960–1973, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1109/TCNS.2020.3018703>
- [77] A. Hooshyar, and R. Iravani, “Microgrid Protection,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1332–1353, Jul. 2017. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2669342>
- [78] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and A. Nasiri, “An overview of microgrid protection methods and the factors involved,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 174–186, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.089>
- [79] A. Azimi, and H. Hashemi-Dezaki, “Optimized protection coordination of microgrids considering power quality-based voltage indices incorporating optimal sizing and placement of fault current limiters,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 96, p. 104634, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104634>
- [80] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, “Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1560–1567, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2185072>
- [81] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, “Fault current coefficient and time delay assignment for microgrid protection system with central protection unit,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 598–606, May. 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2214489>
- [82] S. Mirsaedi, D. M. Said, M. W. Mustafa, and M. H. Habibuddin, “A protection strategy for micro-grids based on positive-sequence component,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 6, pp. 600–609, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0255>
- [83] E. Casagrande, W. L. Woon, H. H. Zeineldin, and D. Svetinovic, “A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2251017>
- [84] H. Muda, S. Member, and P. Jena, “Microgrid Protection : A New Technique,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 757–767, Apr. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2601921>
- [85] P. T. Manditereza, and R. C. Bansal, “Electrical Power and Energy Systems Protection of microgrids using voltage-based power differential and sensitivity analysis,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 118, p. 105756, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105756>
- [86] R. Bhargav, B. R. Bhalja, and C. P. Gupta, “Algorithm for fault detection and localisation in a mesh-type bipolar DC microgrid network,” *IET Generation, transmission & distribution*, vol. 13, no. 15, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5070>
- [87] A. Cagnano, E. De Tuglie, and P. Gibilisco, “Assessment and Control of Microgrid Impacts on Distribution Networks by Using Experimental Tests,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 7157–7164, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2940174>