

Optimización de la resiliencia en sistemas eléctricos mediante la integración de energía solar: Propuesta para COELCHA

Optimization of resilience in electrical
systems through the integration of solar
energy: Proposal for COELCHA

Maykop Pérez-Martínez¹, Josnier Ramos-Guardarrama²

Fecha de recepción: 26 de julio, 2025
Fecha de aprobación: 6 de febrero, 2026

Pérez-Martínez, M; Ramos-Guardarrama, J. Optimización de la resiliencia en sistemas eléctricos mediante la integración de energía solar: Propuesta para COELCHA. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 3. Julio-Setiembre, 2026. Pág. 91-103.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i3.7862>



¹ Universidad de Concepción, Chile.

 maykoperez@udec.cl

 <https://orcid.org/0000-0003-3073-1675>

² Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.

 josnier@electrica.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0002-8796-8481>

Palabras clave

Resiliencia; sistemas eléctricos; energía renovable; eventos climáticos; metodología.

Resumen

El estudio de la resiliencia en los sistemas eléctricos de distribución se ha convertido en un tema crítico en el contexto actual de cambio climático y creciente incertidumbre en la generación y distribución de energía. Este artículo propone una metodología para estimar la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA, considerando la integración de fuentes renovables de energía. Para ello, se analizan tres estudios de caso que ilustran cómo la generación fotovoltaica puede mejorar la estabilidad y capacidad de carga de los sistemas eléctricos. El primer estudio de caso presenta el desarrollo de un software para el control de la demanda eléctrica en sistemas industriales, demostrando que la inclusión de paneles solares reduce la demanda máxima en un 27% y aumenta el factor de carga en un 32,5%. El segundo caso describe el diseño de una central fotovoltaica autónoma, que reduce la dependencia de la red eléctrica y aumenta la autonomía energética. El tercer caso evalúa el impacto de una central fotovoltaica en el sistema eléctrico de potencia Matala-Lubango-Namibe, mostrando un aumento de la capacidad de carga en 31,1 MW y una mejora del 11% en la estabilidad del voltaje. A partir de estos casos, se propone una metodología en tres fases (definición, análisis e implementación) para estimar la resiliencia del sistema de COELCHA frente a eventos climáticos extremos. Los resultados demuestran que la integración de energías renovables, junto con herramientas de análisis y simulación, es fundamental para diseñar sistemas eléctricos más resilientes y sostenibles.

Keywords

Resilience; electrical systems; renewable energy; climate events; methodology.

Abstract

The study of resilience in electrical distribution systems has become a critical topic in the current context of climate change and increasing uncertainty in energy generation and distribution. This article proposes a methodology to estimate the resilience of COELCHA's distribution system, considering the integration of renewable energy sources. To this end, three case studies are analyzed that illustrate how photovoltaic generation can improve the stability and load capacity of electrical systems. The first case study presents the development of software for controlling electrical demand in industrial systems, demonstrating that the inclusion of solar panels reduces maximum demand by 27% and increases the load factor by 32,5%. The second case describes the design of an autonomous photovoltaic power plant, which reduces dependence on the electrical grid and increases energy autonomy. The third case evaluates the impact of a photovoltaic power plant on the Matala-Lubango-Namibe power system, showing an increase in load capacity of 31,1 MW and an 11% improvement in voltage stability. Based on these cases, a three-phase methodology (definition, analysis, and implementation) is proposed to estimate the resilience of COELCHA's system against extreme climate events. The results demonstrate that the integration of renewable energies, along with analysis and simulation tools, is essential for designing more resilient and sustainable electrical systems.

Introducción

Uno de los avances más notorio de la sociedad actual es el desarrollo de la tecnología, con el consiguiente aumento de la demanda de la energía eléctrica, en sus diferentes formas, estableciendo una progresiva complejidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en cuanto a la generación, transmisión, subtransmisión y distribución de la energía y que, por

tanto, se replanteen mecanismos para disminuir las pérdidas de energía eléctrica y de aumentar la confiabilidad para de esta forma garantizar la continuidad del suministro de energía eléctrica y tener sistemas eléctricos más eficientes [1].

En ese sentido, la electricidad es un servicio público, que está disponible todo el tiempo, en la mayoría de los lugares y que presenta una amplia gama de aplicaciones [2]. Como esta no puede ser almacenada a gran escala, es generada en el mismo momento y en la misma cantidad que es consumida y tiene que ser transmitida instantáneamente desde la generación hasta los consumidores a través de líneas de transmisión.

Producto de estas características especiales, el sistema eléctrico de potencia tiene que estar diseñado para suplir la demanda máxima esperada. También, dependiendo del tipo de plantas generadoras que se encuentren en operación en los distintos momentos del día, la eficiencia de la producción y el costo del combustible quemado en las plantas térmicas puede cambiar significativamente[2].

Además, las pérdidas de energía eléctrica son comunes e inherentes de las empresas eléctricas y se tornan en un problema muchas veces grave cuando éstas rebasan ciertos límites lógicos y preestablecidos. Éstas aumentan el consumo de la generación de la electricidad total, por tanto, se requiere generar más, con la consiguiente pérdida de recursos energéticos. Las pérdidas de energía es uno de los indicadores de eficiencia de cualquier sistema eléctrico [2].

Por ejemplo, en la referencia [3] se enfatiza que en España estas pérdidas representan el 8,9 % aproximadamente de la energía de la red, en el Reino Unido, las pérdidas son de 7,92 %, en Alemania 6,74 %, en Francia un 5,40 %, en Austria un 6,29 %, en Estados Unidos un 6,29% y un 5,06 % en Australia.

En su conjunto, el índice de pérdidas de electricidad en Chile del año 2020 a junio de 2021 fue de 10,06% [4]. Estas pérdidas eléctricas, varían según la configuración de la red, determinada por la ubicación y producción de los generadores, la localización y demanda de los clientes [5].

En correspondencia, los autores de [6], [7] aseguran que es importante clasificar las causas más comunes que ocasionan que los sistemas eléctricos sean ineficientes, esencialmente se asocian en cinco (5) grupos:

- **Diseño deficiente:** debido a una concepción errónea del punto de vista del diseño, los materiales, el proceso de fabricación, el equipo y/o los sistemas conducen al despilfarro de energía eléctrica, por ejemplo, la utilización de bombillas ineficientes o su empleo de forma incorrecta antes los principios del uso racional de la energía;
- **Operación ineficiente:** incluso cuando los sistemas de energía eléctrica están bien diseñados, puede ser operado irresponsablemente, por ejemplo, mantener una habitación sin actividad iluminada innecesariamente, empleo de tecnología obsoleta;
- **Mantenimiento inadecuado:** una parte de las pérdidas eléctricas podrían minimizarse a través de procedimientos adecuados de mantenimiento correctivo y preventivo, que incluye el correcto ajuste y control de los sistemas, de manera que mantengan, en la medida de lo posible el desempeño de las condiciones originales;
- **Operación de las cargas en los horarios de máxima demanda:** cuando todas las cargas operan en los horarios donde el costo del kWh es mayor se ocasionan pérdidas en la generación de energía;
- **Eventos externos:** en particular aquellos de índole climática como huracanes, tormentas, inundaciones, incendios forestales, terremotos, olas de calor y nevadas, ejercen una influencia considerable sobre la calidad del servicio de distribución eléctrica. La creciente frecuencia de estos fenómenos, atribuida al cambio climático, se convierte en un aspecto

fundamental para la regulación y los incentivos económicos en el ámbito de la distribución eléctrica. Es esencial que las metas de calidad y los indicadores de desempeño reflejen las particularidades de cada región, teniendo en cuenta su vulnerabilidad a riesgos climáticos, y que se compense adecuadamente las inversiones destinadas a mejorar la capacidad de recuperación ante situaciones adversas.

En este sentido, es de vital importancia, ante la situación económica actual de cualquier país, reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica y las inversiones en equipos eléctricos utilizados en instalaciones industriales y de servicios. Además, esta necesidad se ve potenciada por el impacto ambiental de las tecnologías energéticas dominantes [8].

Los análisis demuestran que, si se quieren lograr altas perspectivas de crecimiento y desarrollo, se debe imponer una gran atención a la reducción de pérdidas de energía y mejora de la eficiencia energética en todos los sectores socioeconómicos y para todos los actores energéticos. En este contexto, es absolutamente fundamental promover y acompañar programas gubernamentales para evaluar acciones y estimar los resultados de forma consistente.

Por otra parte, la frecuencia de los desastres naturales está en aumento, y el cambio climático tiene el potencial de afectar negativamente a los SEP de diversas maneras. Esto ha acelerado la necesidad de investigar cómo operarlos en condiciones distintas a las tradicionales, considerando el contexto del cambio climático y sus consecuencias, que pueden provocar afectaciones negativas en su infraestructura y operación.

Por lo tanto, debido al impacto crítico que representan los eventos climáticos en el equipamiento de los SEP, surge la necesidad de realizar investigaciones que evalúen el daño y la severidad de dichos eventos, así como la forma en que estos se recuperan después de una perturbación.

En este sentido, los SEP han sufrido severos daños como consecuencia del aumento del número de eventos climáticos extremos en los últimos 30 años. En los Estados Unidos, por ejemplo, el paso de los huracanes ha dejado entre 8 millones de clientes sin suministro eléctrico por varias semanas. También, en otros países con niveles sísmicos similares a los de Chile, como lo son Japón y Nueva Zelanda, han experimentado similar afectación, donde los mayores daños se observaron en las áreas de distribución del sector eléctrico [9].

En el contexto chileno, desastres como nevadas y terremotos han producido prolongados cortes de suministro eléctrico, siendo nuevamente el área de distribución la más afectada. Estos aspectos han demostrado la necesidad e importancia de desarrollar investigaciones y acciones relacionadas a la resiliencia de los SEP. Estos desafíos exigen que los sistemas eléctricos no solo sean robustos, sino también adaptables y capaces de recuperarse rápidamente de cualquier perturbación [9].

Ahora bien, para hacer frente a este tipo de eventos disruptivos, es necesario realizar análisis de vulnerabilidad para implementar soluciones adecuadas sobre la base de tomas de decisiones y la identificación de los puntos más vulnerables del sistema [10] cyber attacks, physical attacks. Ya que en el instante en que se producen estos eventos disruptivos se generan daños en el SEP que se ven reflejados en pérdidas del suministro de energía con un tiempo de recuperación indeterminado.

Es preciso mencionar que se entiende por vulnerabilidad en este contexto como la incapacidad del SEP de soportar interrupciones antes de recuperar su estado normal de operación. En consecuencia, los operadores de red pueden implementar diferentes tipos de medidas para mitigar estos daños, en los cuales se tiene la utilización de microrredes, la reconfiguración del sistema, recursos energéticos distribuidos como baterías, estaciones de cargas, vehículos eléctricos, generación distribuida, acomodos de cargas en los sistemas eléctricos industriales y emplazamientos de fuentes renovables de energías como la solar y la eólica.

Estos tienen como objetivo principal la recuperación de la mayor cantidad de carga y la minimización de los costos de operación de la red. Por ende, es necesario contar con métricas que evalúen la resiliencia del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) tras un evento disruptivo o perturbación, frente a las medidas tomadas por el operador de la red. Esto permitirá determinar el porcentaje de componentes del sistema eléctrico que permanecen en servicio y los costos de operación asociados. La Figura 1 presenta la territorialidad de la Cooperativa de Consumo de Energía Eléctrica Charrúa (COELCHA). La extensión de las líneas alcanza un total de 151 km considerando un rango de tensión que va desde los 13,2 kV hasta los 0,4 kV. El Cuadro 1 resume las longitudes de las líneas separadas por nivel de voltaje.

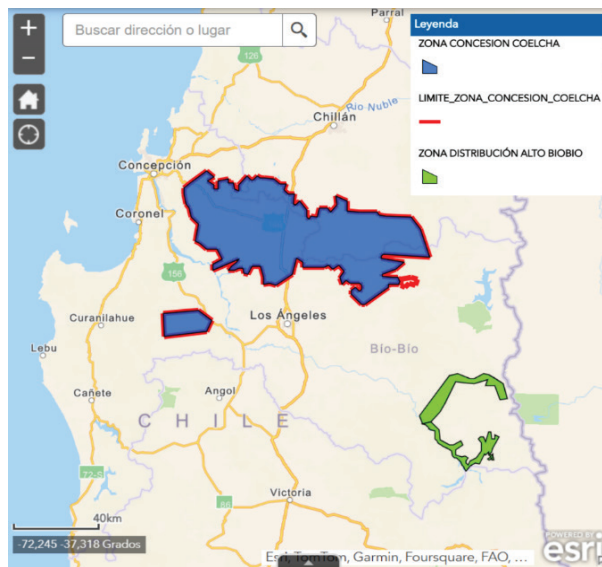


Figura 1. Territorialidad de COELCHA.

Cuadro 1. Resumen de las longitudes de las líneas del sistema de distribución de COELCHA.

Tipo de red	Longitud de las líneas [km]
Redes media tensión trifásica 13,2 kV	40
Redes media tensión bifásica 13,2 kV	20
Redes media tensión monofásica 7,62 kV	18
Redes baja tensión monofásica 0,231 kV	66
Redes baja tensión bifásica 0,231 kV	0
Redes baja tensión trifásica 0,4 kV	7

En la concesión de COELCHA se han identificado 32 proyectos de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), con una potencia combinada cercana a 1,34 GW, lo que evidencia un alto potencial de generación distribuida en la zona. Los proyectos solares fotovoltaicos concentran la mayor parte de esta capacidad, con 22 iniciativas que suman aproximadamente 1,08 GW, incluyendo plantas en operación (por ejemplo, Cortijo y Moya, de 9 MW cada una),

en construcción (La Quinta y Pequén, también de 9 MW) y en proceso de calificación (como Pillancó, con 208 MW, y Monte Águila, con 240 MW). Aunque menos numerosos, los proyectos eólicos aportan capacidades relevantes, destacando Peñasco Ventoso (486 MW) y Dañicalqui (95,2 MW), junto con iniciativas de biomasa (Laja, 52 MW) y pequeñas centrales hidroeléctricas (Itata, 19,43 MW). En conjunto, muestra un escenario favorable para incorporar generación renovable en puntos estratégicos de la red de COELCHA, lo que abre la posibilidad de diseñar escenarios de simulación y estrategias de integración orientadas a mejorar su resiliencia y sostenibilidad ante eventos climáticos extremos.

Sumado a lo anterior, a lo largo de los últimos 14 años, COELCHA ha visto un total de 12108 interrupciones del suministro eléctrico. Las causas van desde actos vandálicos, caída de árboles, choques de vehículos, averías, sobrecargas, entre otros. Del total, 2110 están relacionadas con incendios, condiciones ambientales y eventos catastróficos, representando un 17,4% de las causas de interrupciones. Esto muestra que el sistema de distribución no está exento de pérdida de suministro eléctrico producto de eventos relacionados con el medio ambiente, y, por lo tanto, es de interés seguir evaluando el impacto de estos fenómenos en la resiliencia sistémica.

El Cuadro 2 muestra las causas de las interrupciones, el número de interrupciones anuales y totales registradas por cada distribuidora entre el 9 de octubre del 2010 y el 3 de junio de 2024 de la empresa COELCHA.

Cuadro 2. Causa de interrupción y su respectiva cantidad en empresa COELCHA entre el 9 de octubre de 2010 y el 3 de junio de 2024.

Causa de la interrupción	Cantidad	Causa de la interrupción	Cantidad
Actos vandálicos	1172	Externas	540
Animales	277	Fallas en los trabajos de la empresa	284
Árboles	1975	Incendio	216
Avería	469	Instalaciones de clientes	3
Choque de vehículos	620	Orden de autoridad	21
Condiciones atmosféricas	1665	Otros	2077
Desconexión programada	184	Sin determinar	1998
Eventos catastróficos	229	Sobrecarga	378

En correspondencia con lo anteriormente planteado, este artículo propone una metodología para estimar la resiliencia de sistemas eléctricos de distribución ante eventos climáticos extremos, aplicada al caso de la red de COELCHA e incorporando la integración de fuentes renovables de energía.

El objetivo general es formular y estructurar dicha metodología de manera que permita, en etapas posteriores, cuantificar el impacto potencial de la generación renovable sobre la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA a partir de datos reales de operación.

Materiales y métodos

La investigación se basa en una metodología mixta, que combina enfoques cualitativos y cuantitativos para analizar y proponer soluciones que mejoren la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA mediante la integración de energías renovables, en la que se utilizaron:

Métodos de nivel teórico:

- **Histórico - lógico:** para conocer los referentes teóricos – prácticos sobre el desarrollo de la integración de las fuentes de energía renovables en los sistemas eléctricos de distribución, el estudio y conceptualización de la resiliencia en los sistemas eléctricos, así como los antecedentes históricos de las interrupciones del servicio eléctrico en el sistema de distribución de COEICHA.
- **Analítico – sintético:** para analizar las posiciones teóricas acerca del estudio de la resiliencia en los sistemas eléctricos de distribución y su optimización a partir de las fuentes renovables de energía, para de esta forma conceptualizarla y establecer las características generales y particulares de la propuesta para el sistema de distribución de COELCHA
- **Inductivo – deductivo:** permite analizar los factores que influyen en la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución y determinar cómo la integración de energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica, puede mejorar dicha resiliencia mediante la metodología propuesta.
- **Sistémico-estructural-funcional:** permite analizar el sistema eléctrico de COELCHA como un conjunto interconectado de componentes que cumplen funciones específicas para garantizar un suministro eléctrico resiliente. Desde una perspectiva **sistémica**, se estudia cómo la integración de energías renovables, como la solar fotovoltaica, afecta al sistema en su conjunto, mejorando su capacidad para anticipar, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de eventos disruptivos. El análisis **estructural** identifica los componentes críticos del sistema (líneas de distribución, subestaciones, cargas, etc.) y cómo la incorporación de fuentes renovables modifica su organización, liberando carga de las líneas principales y redistribuyendo la generación. Finalmente, el enfoque **funcional** examina las contribuciones específicas de las energías renovables, como la estabilización del voltaje, el aumento de la capacidad de carga y la reducción de la dependencia de la red, funciones que fortalecen la resiliencia del sistema. Este enfoque integral sustenta la propuesta metodológica para estimar la resiliencia del sistema de COELCHA, permitiendo evaluar cómo la integración de energías renovables optimiza su estructura y funciones para enfrentar eventos climáticos extremos

Métodos del nivel empírico:

- **Estudio de casos:** permite analizar, desde un contexto real, cómo la integración de energías renovables, específicamente la solar fotovoltaica, mejora la resiliencia del sistema eléctrico de COELCHA. A través de tres estudios de caso concretos (el software de control de demanda en Scilab, la central fotovoltaica en Angola y el sistema eléctrico Matala-Lubango-Namibe), se recopilan y analizan datos reales que demuestran cómo la generación fotovoltaica reduce la demanda máxima, aumenta la capacidad de carga y estabiliza el voltaje. A través de la observación y el análisis de casos concretos, se identifican patrones, tendencias, relaciones causales que contribuyen al conocimiento científico, así como validar la hipótesis de que las energías renovables fortalecen la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución para proporcionar evidencia empírica en la realización de la propuesta metodológica al sistema de COELCHA para estimar su resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

Resultados y discusión

Resiliencia en el contexto eléctrico

La resiliencia en los sistemas eléctricos se ha convertido en un imperativo en el contexto actual de transformación energética y creciente incertidumbre para garantizar un suministro eléctrico confiable y sostenible. Se debe destacar que en este contexto la expresión “creciente incertidumbre” se refiere a la variedad de factores y condiciones cambiantes que pueden afectar la operación y la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia [11].

resilient network investments is becoming increasingly important. This task, however, needs, in addition to widely accepted investment options focused on installing new infrastructure, explicit recognition of investment propositions to harden existing infrastructure such as substations. Hardening networks is fundamentally challenging to incorporate in optimization problems since it affects outage probabilities. Therefore, we propose an optimization approach to determine optimal portfolios of resilient network investments, considering endogenous probabilities that change with hardening investment options. This decision-dependent-probability model finds the optimal network enhancements in a cost-benefit fashion, minimizing investment plus operational costs, including demand curtailments. The proposed model also considers distributed energy resources (DER).

Esta incertidumbre puede surgir de diversas fuentes, incluyendo, cambio climático, variabilidad de las fuentes de renovable de energía, variación de la demanda, ciberseguridad, políticas y regulaciones y desarrollo tecnológico.

De manera general, la resiliencia se refiere a la capacidad de los SEP para anticipar, resistir, adaptarse y recuperarse de perturbaciones para garantizar así un suministro de energía confiable y continuo. En ese sentido las organizaciones internacionales como IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*), la definen como:

- Según el IEEE, la resiliencia de un sistema eléctrico se puede definir como: *“la capacidad de un sistema para prepararse para, responder a, y recuperarse de eventos adversos, minimizando el impacto en la operación y el servicio”*. Esto implica no solo la capacidad de resistir fallos, sino también la habilidad de adaptarse a nuevas condiciones y aprender de las experiencias pasadas.
- CIGRE define la resiliencia en los sistemas eléctricos como *“la capacidad de un sistema de energía para resistir y recuperarse de perturbaciones, asegurando la continuidad del suministro eléctrico y la estabilidad del sistema”*. Esta definición enfatiza la importancia de la continuidad del servicio y la estabilidad operativa, incluso en situaciones de crisis.

A partir de estas definiciones y de las investigaciones de [12], [13], [14], [15], [16] la resiliencia en sistemas eléctricos puede entenderse como:

“La capacidad de una red eléctrica para anticipar, resistir, absorber, responder, adaptarse y recuperarse de un evento disruptivo, sean estos desastres naturales, fallos técnicos o ciberataques para lograr la preservación, restauración y mejoramiento de sus estructuras, funciones básicas, identidad y continuidad del suministro eléctrico con las menores interrupciones posibles.”

Análisis de casos de estudio

Con el objetivo de desarrollar la propuesta metodológica para estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA, se aborda el análisis de tres estudios de caso que ilustran cómo la integración de fuentes renovables de energía, en particular la solar fotovoltaica, mejora la resiliencia en los SEP.

En primer lugar, se examina la implementación de un software desarrollado en Scilab para optimizar el acomodo de cargas en sistemas industriales, que considera la incorporación de paneles solares [1]. Este caso demuestra cómo la generación distribuida reduce la demanda máxima y mejora la eficiencia energética pues la inclusión de paneles solares redujo la demanda máxima en un 27% y aumentó el factor de carga en un 32,5%.

El segundo caso de estudio corresponde al diseño de una central fotovoltaica autónoma en el Centro de Salud 5 de Abril II, ubicado en el Municipio de Namibe, Angola, que demuestra cómo se reduce la dependencia de la red eléctrica y aumenta la autonomía energética en instalaciones críticas. Se observó una reducción de la dependencia de la red eléctrica y un aumento en la autonomía energética del centro de salud [17].

Por último, se analiza el impacto de una central fotovoltaica integrada al sistema eléctrico de potencia MatalaLubangoNamibe, configurado como un sistema radial cuyo envío se origina en la Central Hídrica de Matala. El estudio se realiza mediante simulaciones en el software PSAT, considerando escenarios con y sin la central fotovoltaica. Los resultados muestran que la generación fotovoltaica contribuye a estabilizar el perfil de tensión, especialmente en nodos críticos como Namibe 63 kV y el centro de salud asociado, donde el voltaje se eleva de 0,80 p.u. a 0,91 p.u., equivalente a un incremento aproximado del 11%. Esta mejora favorece el funcionamiento seguro de los equipos y la calidad del suministro. Además, el análisis de flujo de carga continuado indica un aumento significativo de la capacidad de carga del sistema, permitiendo un incremento de 31,1 MW en la demanda máxima admisible antes de alcanzar la condición crítica de cargabilidad. Esto habilita la incorporación de nuevos usuarios y cargas sin comprometer la estabilidad, lo cual es especialmente relevante en contextos de crecimiento de demanda. Las curvas de estabilidad de tensión muestran, asimismo, una menor caída de tensión en el nodo de carga previo al punto de máxima cargabilidad (0,1 p.u. con la central frente a 0,2 p.u. sin ella), reduciendo el riesgo de colapsos de voltaje y reforzando la capacidad del sistema para responder a perturbaciones.

En conjunto, estos tres estudios de caso proporcionan elementos complementarios que pueden transferirse al sistema de distribución de COELCHA:

- El caso del software en Scilab entrega criterios para evaluar la reducción de demanda máxima y la mejora del factor de carga en alimentadores específicos al incorporar generación fotovoltaica distribuida, métricas directamente utilizables en escenarios de simulación futuros en COELCHA.
- El caso de la central fotovoltaica autónoma en un centro de salud muestra cómo la generación local puede incrementar la autonomía de cargas críticas, lo que resulta especialmente relevante para definir, en la red de COELCHA, nodos prioritarios (como instalaciones de salud, agua potable o telecomunicaciones) donde la resiliencia debe maximizarse.
- Finalmente, el estudio del sistema MatalaLubangoNamibe aporta una referencia clara sobre el impacto de una central fotovoltaica en la capacidad de carga y la estabilidad de tensión de una red radial, lo que sirve de base para plantear, en COELCHA, escenarios de simulación con diferentes niveles de penetración fotovoltaica y ubicaciones de generación, evaluando indicadores como perfiles de tensión, cargabilidad y porcentaje de carga servida ante eventos climáticos extremos. De esta forma, los casos externos

no solo ilustran beneficios generales de la generación fotovoltaica, sino que orientan el diseño de los escenarios y métricas que se utilizarán posteriormente en la metodología propuesta para COELCHA

Propuesta metodológica para estimar la resiliencia del sistema de distribución de COELCHA frente a eventos climáticos extremos, considerando la integración de fuentes renovables de energía.

A partir de la sistematización realizada del concepto de resiliencia en los sistemas eléctricos de potencia y de cómo las fuentes renovables de energía ayudan a mejorarla a partir del estudio de casos presentado se puede proponer la metodología siguiente para ser aplicada al sistema de distribución de COELCHA:

1. Fase de definición:

Definición del alcance: determinar la topología del SEP, concretamente del SEP de COELCHA, así como la posible capacidad para instalar fuentes renovables de energía, específicamente la solar fotovoltaica.

Identificación de amenazas: Determinar los eventos y perturbaciones que pueden afectar al SEP de COELCHA (climáticos, ciberataques, fallos de componentes, etc.), considerando su probabilidad de ocurrencia e impacto potencial.

Definición de métricas de resiliencia: Seleccionar indicadores cuantitativos y cualitativos para evaluar la resiliencia del SEP de COELCHA en sus diferentes dimensiones (anticipación, resistencia, absorción, adaptación, recuperación). Específicamente en la propuesta: tiempo de recuperación, porcentaje de carga servida, costos de la energía no suministrada.

2. Fase de Análisis:

Modelado del SEP: Modelar el sistema eléctrico que incluya las fuentes renovables de energía y permita simular su comportamiento ante diferentes perturbaciones. Se pueden usar herramientas de software especializadas para el análisis de sistemas de potencia, como por ejemplo DIGSILENT o PSAT.

Simulación de escenarios: Simular diferentes escenarios de perturbaciones, considerando la variabilidad de las fuentes renovables y la respuesta del sistema.

Evaluación de la resiliencia: Calcular las métricas de resiliencia definidas en la fase anterior para cada escenario simulado.

Análisis de sensibilidad: Evaluar la influencia en la resiliencia del SEP de COELCHA, como la penetración de renovables, la ubicación de las fuentes, la capacidad de almacenamiento.

3. Fase de implementación y recomendaciones:

Identificación de estrategias de mejora: Proponer medidas para mejorar la resiliencia del SEP a partir del análisis anterior, como por ejemplo la optimización de la operación, el refuerzo de la red, la implementación de sistemas de control avanzados, la diversificación de fuentes, etc.

Evaluación de estrategias: Analizar el impacto de las estrategias propuestas en la resiliencia del SEP, utilizando el modelo del sistema y las métricas definidas.

Desarrollo de un plan de acción: Definir las acciones concretas para implementar las estrategias de mejora, incluyendo cronogramas, recursos necesarios y responsables.

En la Figura 2 se muestra un mapa conceptual de la metodología propuesta. Es importante señalar que a partir del estudio realizado se pudiera inferir que con la propuesta se pueda estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA y validar mediante la simulación y estudios rigurosos la hipótesis plantada al comienzo de este trabajo y esta pueda ser generalizada a otros sistemas de distribución.

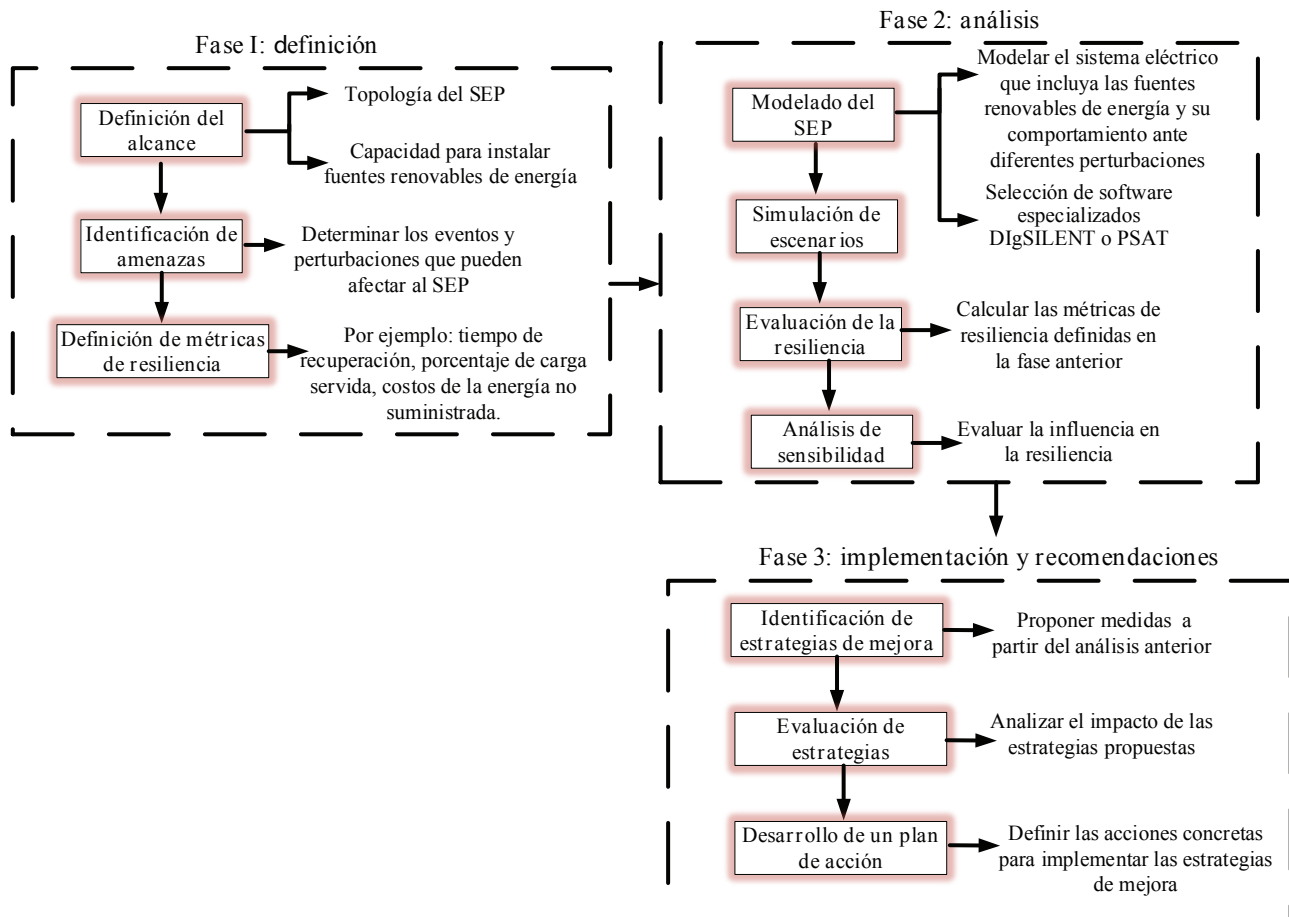


Figura 2. Mapa conceptual de la propuesta para estimar la resiliencia en el sistema de distribución de COELCHA.

Conclusiones

- La resiliencia en sistemas eléctricos es un concepto multidimensional que abarca la anticipación, resistencia, absorción, adaptación y recuperación frente a perturbaciones. No se trata solo de resistir, sino también de prever, responder, adaptarse y recuperarse de manera eficiente. El análisis de la resiliencia es fundamental en el contexto energético actual, debido a que el cambio climático y las crecientes amenazas a la ciberseguridad hacen que la capacidad de los sistemas eléctricos para afrontar perturbaciones sea más importante que nunca.
- La integración de fuentes renovables de energía, como la solar, juega un papel importante en la mejora de la resiliencia de los sistemas eléctricos. Los estudios de caso demuestran que la generación fotovoltaica puede ayudar a:
- Reducir la dependencia de la red eléctrica pública.
- Aumentar la autonomía energética de instalaciones críticas, como centros de salud.

- Mitigar las fluctuaciones de voltaje y mejorar la calidad del suministro eléctrico.
- Incrementar la capacidad de carga del sistema.
- Mejorar la estabilidad del voltaje y reducir el riesgo de colapsos.
- El desarrollo de herramientas de software facilita la integración de fuentes renovables de energía y la optimización del consumo energético. Estas herramientas permiten a los ingenieros realizar análisis de acomodo de cargas, evaluar el impacto de la inclusión de paneles solares y optimizar la operación de la red.
- La integración de fuentes renovables de energía, junto con el desarrollo de herramientas de análisis y la adaptación a nuevas condiciones, son elementos fundamentales para diseñar sistemas eléctricos más resilientes y sostenibles. Los estudios de caso demuestran los beneficios de la generación fotovoltaica en la mejora de la resiliencia de los sistemas eléctricos, tanto en instalaciones industriales como en sistemas eléctricos de potencia.
- La metodología propuesta tiene como objetivo mejorar la resiliencia del sistema eléctrico de COELCHA. Su validación requiere la realización de estudios con datos reales del sistema, lo que permitirá evaluar su eficacia en la práctica.

Referencias

- [1] M. Pérez, J. Ramos, J. A. Rodríguez, y C. Pérez, «Software for Electric Demand Control from Scilab», Revista Politécnica, vol. 53, n.o 1, pp. 7-20, feb. 2024, doi: 10.33333/rp.vol53n1.01.
- [2] M. Pérez Martínez, D. García del Sol, y E. Díaz Alfonso, Importancia del acomodo de carga en la industria: Un estudio de caso. 2020. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/BTZ5S0>
- [3] J. F. García y H. A. Duarte, «Estudios de pérdidas técnicas en las redes eléctricas de distribución», Trabajo de fin de grado para optar por el título de ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27368/TFG_Jon_Fernandez_Garcia.pdf
- [4] Compañía General de Electricidad, «Análisis razonado compañía general de electricidad s.a. por el período terminado el 30 de junio de 2021», CGE, Chile, Resumen 30 de junio de 2021, 2021. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2021/07/Analisis-razonado-CGE-06-2021.pdf>
- [5] M. M. Pérez, F. A. Santos, y Campa O. J. Barroso, «Reconfiguración de redes para reducir pérdidas en circuitos de distribución. Un caso de estudio», Pedagogía profesional, vol. 21, n.o 4, pp. 1-17, 2023, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucpejv.edu.cu/index.php/rPProf/article/view/2430>
- [6] L. A. H. Nogueira, «Uso racional: a fonte energética oculta», Estudos Avançados, vol. 21, n.o 59, pp. 91-105, abr. 2007, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.usp.br/eav/article/view/10208>
- [7] D. M. Ramírez, E. A. Lagunas, y L. J. G. D. Ángel, «Disposición al ahorro de energía eléctrica en los hogares de México», Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 36, n.o 2, pp. 533-561, may 2021, doi: 10.24201/edu.v36i2.2002.
- [8] D. Borges Vasconcellos, P. Puch González, y G. Frías González, «Control de demanda eléctrica aplicando algoritmos genéticos», Ingeniare. Rev. chil. ing., vol. 25, n.o 3, pp. 389-398, sep. 2017, doi: 10.4067/S0718-33052017000300389.
- [9] F. E. B. Leiva, A. N. Espinosa, F. F. Garrido, y L. E. F. Bazán, «Efectos en los niveles de resiliencia en sistemas de distribución a través de ruteos de cuadrillas de restauración», Máster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Chile, 2018. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/handle/2250/169231>
- [10] S. E. Ramirez Espitia, «Resiliencia en sistemas eléctricos de distribución.», Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería., Bogotá, Colombia, 2023. Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/31740>

- [11] D. Alvarado, R. Moreno, A. Street, M. Panteli, P. Mancarella, y G. Strbac, «Co-Optimizing Substation Hardening and Transmission Expansion Against Earthquakes: A Decision-Dependent Probability Approach», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, n.o 3, pp. 2058-2070, may 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3180363.
- [12] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, y F. Li, «Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience», Proceedings of the IEEE, vol. 105, n.o 7, pp. 1253-1266, jul. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2679040.
- [13] J. Jasiūnas, P. D. Lund, y J. Mikkola, «Energy system resilience – A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 150, p. 111476, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111476.
- [14] L. Xu et al., «Resilience of renewable power systems under climate risks», Nature Reviews Electrical Engineering, vol. 1, n.o 1, pp. 53-66, ene. 2024, doi: 10.1038/s44287-023-00003-8.
- [15] J. A. L. Vilaplana, «Modernización de las redes de distribución eléctrica en España. Evaluación de los beneficios de la digitalización en el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://documentos.fedea.net/pubs/eee/2023/eee2023-21.pdf>
- [16] L. A. Cárdenas Durán, «Resiliencia y vulnerabilidad de sistemas eléctricos», en Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI, sep. 2021, pp. 1-11. doi: 10.26507/ponencia.1692.
- [17] P. Martínez y R. Domínguez, «Instalación de una Central Fotovoltaica en un Centro de Salud», Pedagogía profesional, vol. 17, n.o 1, pp. 1-15, 2019, Accedido: 17 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ucpejv.edu.cu/index.php/rPProf/article/view/749>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.