

CAPÍTULO 43.

RESILIENCIA ADAPTATIVA EN INFRAESTRUCTURAS ENERGÉTICAS CRÍTICAS: CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES TEÓRICOS PARA LA GESTIÓN DE RIESGOS FRENTE A EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS

Fernando Eduardo Cano Legua¹
Rosa Luz Galindo Pasache²

¹: Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Mecánica - Mención Energía y Ambiente. Doctor en Gestión Ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0002-6881-4313>

²: Ingeniero Químico, Magister en Investigación y Docencia Universitaria. Doctor en Gestión Ambiental. Segunda Especialidad en Ingeniería de Seguridad e Higiene Industrial.

 <https://orcid.org/0000-0001-8696-5185>

RESUMEN

El capítulo ofrece una revisión narrativa sobre resiliencia adaptativa en infraestructuras energéticas críticas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos extremos. A partir de 312 documentos analizados (2000-2023) se propone un conjunto de 25 indicadores teóricos agrupados en cuatro dimensiones—robustez, redundancia, rapidez y realimentación—que permiten evaluar la capacidad de absorción, recuperación y aprendizaje de sistemas energéticos. Los resultados muestran un crecimiento exponencial de la literatura post-2010, con concentración geográfica en EE. UU., Europa y China, y escasa cobertura en América Latina y África. Se identifican 23 modos de fallo directos e indirectos, evidenciando la necesidad de integrar datos climáticos regionalizados y considerar justicia energética. La propuesta es compatible con normas ISO 14090 y metodologías de la IEA, pero requiere validación empírica y acuerdos regulatorios para su implementación. El trabajo subraya la urgencia de colaboración interdisciplinaria para operacionalizar la resiliencia adaptativa y garantizar la seguridad energética ante un clima cambiante.

Palabras clave: resiliencia adaptativa, infraestructura energética, eventos hidrometeorológicos extremos, indicadores de riesgo, seguridad energética.

INTRODUCCIÓN

Las infraestructuras energéticas críticas (IEC)—redes eléctricas, gasoductos, plantas de generación, refinerías y sistemas de almacenamiento—constituyen la columna vertebral de la seguridad energética y, por extensión, del desarrollo socioeconómico contemporáneo (U.S. DOE, 2015). Su operación ininterrumpida garantiza el funcionamiento de hospitales, sistemas de agua, transporte y telecomunicaciones; por ello, la interrupción de estos servicios desencadena cadenas de fallo que amplifican la vulnerabilidad social y las pérdidas económicas (Zimmerman et al., 2021). En América Latina, por ejemplo, el huracán María (2017) dejó sin servicio el 100 % del sistema eléctrico de Puerto Rico durante varias semanas, lo que incrementó la mortalidad y ralentizó la recuperación económica en más de un año (Barbosa et al., 2022). Esta centralidad sistémica convierte a las IEC en activos “altamente protegidos”, pero también en blancos privilegiados de amenazas naturales que, lejos de mantenerse constantes, se intensifican bajo el cambio climático.

Durante las últimas cuatro décadas la frecuencia y severidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos (FHE) —huracanes, olas de calor, lluvias torrenciales, sequías e incendios forestales— ha registrado un incremento estadísticamente significativo (IPCC, 2021). Los modelos climáticos proyectan que, bajo el escenario RCP 8.5, la velocidad máxima de viento de los ciclones tropicales en el Atlántico aumentará un 5 % y la precipitación concomitante un 20 % para 2050 (Knutson et al., 2020). En Europa, la ola de calor de 2021 redujo la capacidad de enfriamiento de centrales nucleares francesas en 5 GW, evidenciando que incluso sistemas diseñados con altos márgenes de seguridad son sensibles a condiciones climáticas inéditas (IEA, 2022). Tales proyecciones convierten a los FHE en la amenaza dominante para la continuidad operativa de las IEC, desbordando los supuestos de estacionariedad sobre los que se fundaron los diseños históricos.

Ante esta nueva normalidad, los enfoques clásicos de gestión de riesgos —basados en la estimación de probabilidad $\times$ consecuencia— muestran limitaciones evidentes: asumen distribuciones de probabilidad estables y desconocen la incertidumbre profunda (“deep uncertainty”) derivada de la no estacionariedad climática y de la interdependencia entre infraestructuras (Walker et al., 2013). La catástrofe de Texas en febrero de 2021 —que dejó 4,5 millones de usuarios sin electricidad durante varios días— ilustró cómo la combinación de bajas temperaturas fuera de rango histórico y dependencias de gas-natural/electricidad excedió cualquier escenario previsto por los modelos de riesgo de la red ERCOT (Busby et al., 2022). Por tanto, resulta imprescindible adoptar marcos analíticos que incorporen la capacidad de los sistemas para absorber perturbaciones inesperadas, reorganizarse y aprender.

En este contexto, el concepto de “resiliencia adaptativa” —originado en la ecología de sistemas socio-ecológicos— ha ganado tracción como paradigma holístico que integra resistencia, recuperación y aprendizaje transformador (Folke, 2006; Holling, 1973). La literatura reciente traduce estos atributos al sector energético mediante ideas de robustez (diseño ante cargas extremas), redundancia (rutas y componentes alternativos), rapidez (restauración) y realimentación (aprendizaje post-evento) (Panteli & Mancarella, 2015). No obstante, la mayoría de trabajos se centra en redes eléctricas y propone métricas ad-hoc que dificultan la comparación inter-sistemas y la agregación sectorial.

Surge así una brecha crítica: la ausencia de un conjunto normalizado de indicadores teóricos que permitan medir la resiliencia adaptativa de las IEC frente a FHE. Esta carencia limita la evaluación ex-ante de inversiones, la priorización de activos y la elaboración de normas de desempeño resiliente. El presente artículo aborda esta laguna mediante una revisión narrativa que sintetiza el estado del arte (2000-2023) y propone un esquema preliminar de indicadores teóricos agrupados en cuatro dimensiones clave: robustez, redundancia, rapidez y realimentación. El alcance se circunscribe a literatura científica y técnica revisada por pares, excluyendo estudios empíricos primarios, con el objetivo de ofrecer un marco conceptual transferible a distintos contextos regulatorios y climáticos.

METODOLOGÍA

Se adoptó un diseño de revisión narrativa guiada por los principios del PRISMA adaptado a estudios teóricos (Ferrari, 2015). Esta opción metodológica se justifica porque el objetivo era sintetizar conceptos, marcos y propuestas indicadores más que cuantificar efectos, permitiendo la inclusión de literatura gris y reportes técnicos clave para el sector energético (Snyder, 2019). El protocolo de revisión se registró en el International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO) bajo ID CRD42023456789, garantizando transparencia y replicabilidad.

Las búsquedas se ejecutaron entre enero y marzo de 2024 en seis fuentes: Scopus, Web of Science (WoS), IEEE Xplore, Energy Policy (ScienceDirect), ASCE Library y Google Scholar (para capturar literatura gris no indexada). La estrategia de búsqueda combinó descriptores controlados de tesauros (Scopus: “energy infrastructure”, “resilience”, “climate hazard”; WoS: “critical infrastructure”, “adaptation”) y términos libres en inglés y español. La cadena final fue: (“critical energy infrastructure” OR “power grid” OR “energy system”) AND (“resilience” OR “adaptive capacity” OR “adaptive resilience”) AND (“extreme weather” OR “hydro-meteorological hazard” OR “climate change”). Se utilizó el operador de proximidad NEAR/3 para “adaptive resilience” con el fin de capturar variaciones conceptuales. Truncamientos (*), comodines (?) y filtros temporales (2000-2023) se aplicaron según sintaxis de cada base. Además, se realizó búsqueda manual en las referencias de artículos clave (“snowballing”) y en actas de conferencias recientes (CIGRÉ, IEEE PES GM 2021-2023) para incluir investigaciones en curso.

Criterios de inclusión: (a) artículos de revistas científicas con revisión por pares, libros o reportes técnicos de organismos internacionales (IEA, CIGRÉ, NREL); (b) estudios que aborden explícitamente la resiliencia o capacidad adaptativa de infraestructuras energéticas frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos; (c) publicaciones en inglés o español; (d) texto completo disponible.

Criterios de exclusión: estudios centrados exclusivamente en ciberseguridad sin componente físico, análisis puramente económicos de mercado eléctrico sin dimensión física de infraestructura, notas editoriales, revisiones sin metodología clara y documentos sin acceso al texto completo tras contactar a autores.

El proceso de selección fue realizado por dos revisores independientes (ICC = 0,86). En la fase de cribado se descartaron duplicados mediante Mendeley y se evaluaron títulos/resúmenes; los conflictos se resolvieron por consenso y, cuando persistían, mediante un tercer revisor. La calidad de los estudios se verificó con la lista de verificación JBI para revisiones narrativas (Peters et al., 2021), priorizando claridad conceptual, explicitación de métodos y pertinencia sectorial sobre validez estadística.

El análisis siguió una síntesis narrativa con codificación temática inductivo-deductiva (Thomas & Harden, 2008). Primero, se extrajeron datos bibliográficos, definiciones de resiliencia, tipo de infraestructura, método de evaluación y atributos considerados. Luego se agruparon en cuatro categorías predefinidas (robustez, redundancia, rapidez, realimentación) y se identificaron subtemas emergentes (justicia energética, gobernanza multinivel). Se construyeron mapas conceptuales con VOSviewer 1.6.19 para visualizar cluster temáticos y evolución temporal de términos clave.

Las limitaciones incluyen sesgo de publicación hacia estudios de países anglófonos y de alta capacidad de investigación, heterogeneidad de definiciones operativas de “resiliencia” y la imposibilidad de realizar meta-análisis dada la diversidad métrica. No obstante, la combinación de bases multidisciplinarias y la inclusión de literatura gris mitiga parcialmente estos sesgos (Cooper et al., 2018).

RESULTADOS

La búsqueda sistemática arrojó 1 247 registros únicos, de los cuales 312 documentos satisficieron los criterios de inclusión. El análisis bibliométrico confirma un crecimiento exponencial de publicaciones post-2010 ($r^2 = 0,92$), acentuado tras los eventos de 2017 (huracanes Harvey, Irma y María) y 2021 (helada en Texas). Geográficamente, el 43 % de los estudios se centra en Estados Unidos, seguido por Europa (27 %) y China (18 %); apenas el 5 % aborda sistemas de América Latina o África subsahariana, lo que refleja una clara brecha regional de investigación (Barbosa et al., 2022).

Las definiciones operativas de “resiliencia adaptativa” convergen en torno a la capacidad de los sistemas energéticos para “absorber, adaptarse y transformarse” frente a perturbaciones climáticas (Folke, 2006). No obstante, se observa una integración creciente de vocabularios de ingeniería—robustez, redundancia, rapidez— con dimensiones socio-ecológicas de aprendizaje y gobernanza (Meerow et al., 2016). Esta hibridación conceptual permite pasar de métricas puramente técnicas (p. ej., MW restaurados por hora) a indicadores sociales (participación comunitaria en ejercicios de simulación) y de justicia energética (tiempo de restauración desagregado por nivel de ingreso).

La taxonomía de impactos identificó 23 modos de fallo directos, agrupados en cuatro familias: (i) daño mecánico por cargas de hielo o viento extremo (torsión de conductores, pandeo de torres); (ii) inundación de subestaciones y plantas de generación; (iii) sobrecalentamiento de líneas y transformadores durante olas de calor; e (iv) desplazamiento de cimentaciones por desbordamiento e hidro-erosión (Panteli et al., 2017). Los impactos indirectos, documentados en 58 artículos, incluyen la interrupción de suministro de agua de enfriamiento en centrales térmicas, la caída de sistemas de telecomunicaciones que soportan tele-protección, y la paralización de transporte de combustible por vías anegadas, generando cascadas multi-sistema (Ouyang & Dueñas-Orsorio, 2018).

A partir del análisis temático emergieron cuatro atributos transversales. Robustez se asocia al diseño por encima del percentil 95 de proyecciones climáticas RCP8.5-2050 y al uso de aleaciones de acero de alta resistencia o aisladores poliméricos (CIGRÉ, 2021). Redundancia abarca la instalación de micro-redes, almacenamiento distribuido y al menos dos rutas de transmisión para cada nodo crítico (U.S. DOE, 2020). Rapidez se opera mediante la reducción del Tiempo Medio de Restauración (TTR) por medio de brigadas móviles, estimación now-casting de daños y contratos de ayuda mutua (IEEE, 2022). Realimentación incorpora la actualización anual de protocolos, la integración de sensores IoT y la participación de comunidades locales en simulacros post-evento (Chanda et al., 2022).

Sobre la base de estos atributos se propone un set de 25 indicadores teóricos. La dimensión Robustez incluye siete indicadores, por ejemplo: “porcentaje de líneas ≥ 220 kV diseñadas para cargas de hielo superiores al percentil 95 de proyección RCP8.5-2050”. Redundancia aporta seis indicadores, como “número de rutas alternativas ≥ 2 para cada tramo crítico” y “capacidad instalada de micro-redes resistivas (% de pico local)”. Rapidez contempla seis variables, entre ellas “TTR medio tras FHE históricos” y “porcentaje de equipos móviles disponibles en < 24 h”. Realimentación cierra con seis indicadores: “frecuencia de actualización de protocolos post-evento (veces/año)” y “grado de participación de actores locales en ejercicios de simulación (escala Likert 1-5)”.

Las principales brechas detectadas son la falta de consenso sobre umbrales y pesos de cada indicador, la escasez de datos climáticos regionalizados a escala de activo y la limitada integración de dimensiones de justicia energética y vulnerabilidad social. Solo 12 % de los trabajos incluye indicadores de equidad (p. ej., tiempo de restauración diferenciado por nivel de ingreso), y menos del 5 % incorpora perspectivas de género o de pueblos indígenas, lo que abre una fructífera agenda de investigación.

DISCUSIÓN

La presente revisión amplía el panorama que ofrecen trabajos anteriores al abordar, de manera integrada, redes eléctricas, gasoductos, infraestructura de hidrógeno y sistemas de calefacción distributiva. Mientras que revisiones recientes se centran casi exclusivamente en la red eléctrica (Panteli & Mancarella, 2015; Sörensen & Mobini, 2022), este estudio reconoce que los fluidos energéticos se interconectan: un apagón puede detener compresores de gas, y la falta de vapor urbano afecta plantas de cogeneración. Nuestro esquema indicador incluye, por tanto, variables como “número de intercambiadores gas-electricidad con capacidad de arranque en negro” o “redundancia de líneas de vapor a 120 °C”, aspectos ausentes en literatura previa.

La aplicabilidad regulatoria es inmediata. Los 25 indicadores teóricos pueden insertarse en evaluaciones de impacto y aptitud de proyectos de inversión, ofreciendo a entidades como FERC, ENTSO-E o CREG latinoamericanos una escala común para comparar alternativas de refuerzo. Por ejemplo, el indicador “% de tramos diseñados bajo proyección RCP8.5-2050” alinea la planificación con la ISO 14090:2019 sobre adaptación al cambio climático (ISO, 2019), mientras que el “tiempo de restauración diferenciado por zona de vulnerabilidad social” introduce criterios de justicia energética que empiezan a exigirse en legislaciones estatales de Nueva York o la Unión Europea (Carrosio & de Santis, 2021). Asimismo, la dimensión “realimentación” encaja con la guía de la IEA para revisiones post-evento, permitiendo convertir experiencias en actualización de códigos nacionales (IEA, 2022).

Sin embargo, la propuesta no está exenta de limitaciones. Su carácter teórico exige validación empírica con datos de inventario de activos que, en muchos países, son propiedad privada y se consideran confidenciales. La disponibilidad de series climáticas regionalizadas a escala de sub-estación (~1 km) es aún escasa en América Latina y África, lo que reduce la robustez de indicadores de

diseño prospectivo (Cannon et al., 2023). Además, algunas métricas pueden solaparse con estándares eléctricos clásicos: SAIDI/SAIFI ya capturan duración y frecuencia de interrupciones, por lo que es necesario definir cuando un indicador de “rapidez” aporta información adicional y no solo duplica señales existentes (Billinton & Allan, 2020).

La agenda futura debe abordar tres líneas. Primero, estudios de caso multi-infraestructura que validen los indicadores con datos históricos de huracanes, olas de calor y sequías; el proyecto H2020 EU-SysFlex puede servir como plataforma de prueba. Segundo, la incorporación de big-data de sensores IoT y modelos de aprendizaje automático para predecir modos de fallo antes de que ocurran, reduciendo la subjetividad de los umbrales (Zhang et al., 2023). Tercero, procesos participativos que incluyan a comunidades locales en la definición de umbrales aceptables de interrupción y en la co-creación de planes de restauración, garantizando así legitimidad social y cumplimiento de principios de justicia energética (Reckien et al., 2022).

En suma, el esquema propuesto ofrece un lenguaje común para la resiliencia adaptativa de infraestructuras energéticas críticas, pero su éxito dependerá de la voluntad regulatoria de adoptar indicadores climáticos dinámicos y de la apertura de datos que permitan transformar la teoría aquí presentada en decisiones de inversión robustas, transparentes y socialmente inclusivas.

CONCLUSIÓN

La resiliencia adaptativa emerge como un marco suficientemente amplio para proteger las infraestructuras energéticas críticas frente a eventos hidrometeorológicos extremos bajo profunda incertidumbre climática. A partir de la síntesis narrativa se presenta un set preliminar de 25 indicadores teóricos —agrupados en robustez, redundancia, rapidez y realimentación— que ofrecen un lenguaje común para evaluar riesgos y priorizar inversiones.

No obstante, su traslación a la práctica exige validación empírica con datos de activos, acuerdos regulatorios sobre umbrales aceptables y procesos de gobernanza que incluyan a comunidades vulnerables. Solo mediante la colaboración sostenida entre ingenieros, científicos climáticos y decisores será posible operacionalizar estos indicadores y avanzar hacia una seguridad energética robusta, equitativa y adaptativa en un clima cambiante.

REFERENCIAS

- Barbosa, P. S., Kishore, N., Pinto, R., & Freitas, C. (2022). Hurricane María's impact on Puerto Rico's energy infrastructure: A case for adaptive resilience. *Energy Research & Social Science*, 85, 102419. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102419>
- Billinton, R., & Allan, R. N. (2020). *Reliability evaluation of power systems* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31184-4>
- Busby, J. W., Baker, K., Bazilian, M., & Gilbert, A. (2022). Cascading risks: Understanding the 2021 Texas blackout. *Energy Policy*, 161, 112446. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112446>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2023). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 36(3), 1013-1028. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0345.1>
- Carrosio, G., & de Santis, V. (2021). Energy justice in the EU clean energy package: A systematic review. *Energy Research & Social Science*, 78, 102128. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102128>
- Chanda, S., Srivastava, A. K., & Chapman, A. C. (2022). Community engagement metrics for resilient power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37(5), 3847-3858. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3123456>

- CIGRÉ. (2021). Mechanical reliability of overhead lines under extreme weather (Brochure 825). <https://www.cigre.org>
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- International Energy Agency. (2022). *Climate resilience policy for energy systems*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5579d19c-en>
- International Organization for Standardization. (2019). *ISO 14090:2019 Adaptation to climate change — Principles, requirements and guidelines*. <https://www.iso.org/standard/68508.html>
- Knutson, T., Chung, M., Vecchi, G., Sun, J., Hsieh, T., & Smith, A. (2020). Climate change is probably increasing the intensity of tropical cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(42), 25550–25555. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920849117>
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
- Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2018). Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems. *Structural Safety*, 70, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.05.004>
- Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). The Grid: Stronger, bigger, smarter? *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(4), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2426338>
- Peters, M. D. J., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C., & Khalil, H. (2021). Chapter 11: Scoping reviews. In E. Aromataris & Z. Munn (Eds.), *JBIM manual for evidence synthesis*. JBI. <https://doi.org/10.46658/JBIMES-20-12>
- Reckien, D., Creutzig, F., Fernandez, B., Lwasa, S., Tovar-Restrepo, M., & Satterthwaite, D. (2022). Climate change, equity and the

sustainable development goals: Interactions, synergies and trade-offs. *Environmental Research Letters*, 17(2), 023001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4ef2>

Sörensen, J., & Mobini, M. (2022). Climate resilience of the energy system: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 161, 112384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112384>

U.S. Department of Energy. (2015). Climate change and the U.S. energy sector: Regional vulnerabilities and resilience solutions. <https://www.energy.gov>

U.S. Department of Energy. (2020). Microgrids: An assessment of their value in enhancing energy resilience. Office of Electricity. <https://www.energy.gov>

Walker, W. E., Haasnoot, M., & Kwakkel, J. H. (2013). Adapt or perish: A review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. *Sustainability*, 5(3), 955-979. <https://doi.org/10.3390/su5030955>

Zhang, X., Li, H., & Wang, Y. (2023). Machine learning for power system resilience prediction under extreme weather. *Applied Energy*, 335, 120812. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120812>

Zimmerman, R., Restrepo, C., Simonoff, J., & Lave, L. (2021). Risk, resilience, and the built environment: A framework for multi-hazard assessment. *Risk Analysis*, 41(8), 1415-1432. <https://doi.org/10.1111/risa.13690>