

Comité de Estudios C5 – Mercados de electricidad y regulación**FORTALECIENDO LA RESILIENCIA DEL MERCADO DE ENERGÍA MAYORISTA
ANTE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS. CASO COLOMBIANO****Juan Gerónimo Villarreal Montoya****XM****Colombia****jvillarreal@xm.com.co**

Resumen – El fenómeno de El Niño 2024 ha evidenciado la vulnerabilidad del Mercado de Energía Mayorista (MEM) colombiano ante eventos climáticos extremos, afectando la estabilidad del suministro y generando volatilidad en los precios. La alta dependencia de la generación hidroeléctrica, que en condiciones normales aporta hasta el 80% de la energía, se redujo al 50% durante el Niño, aumentando la necesidad de respaldo térmico y elevando los costos del mercado.

Este estudio analiza la resiliencia del MEM colombiano mediante la evaluación de factores como volatilidad de precios, riesgos financieros y respuestas regulatorias. Se identifican tres pilares clave para mejorar la resiliencia: la diversificación de la matriz energética, el incremento de la flexibilidad del mercado y el fortalecimiento del marco regulatorio. Se proponen estrategias como la integración de energías renovables, la implementación de mercados intradiarios y la expansión de la interconexión regional.

Los resultados resaltan la necesidad de reformas estructurales para garantizar un mercado eléctrico más estable y eficiente. La modernización del MEM y la adopción de estrategias de resiliencia permitirán mitigar los impactos de eventos climáticos extremos y mejorar la sostenibilidad del sistema eléctrico colombiano.

Palabras clave: Mercado de electricidad – Regulación – Precios altos de electricidad – Contratos de largo plazo de energía – Formación de precios de electricidad

1 INTRODUCCIÓN

La resiliencia del Mercado de Energía Mayorista es un factor crítico en la estabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico colombiano, especialmente en el contexto de eventos climáticos extremos como el fenómeno de El Niño. Durante estos eventos, la disponibilidad de generación hidroeléctrica, que representa hasta el 80% de la matriz energética del país en condiciones normales, se ve drásticamente reducida, generando aumentos significativos en los precios de la electricidad y una mayor dependencia de generación térmica y solar. El impacto de El Niño 2024 ha evidenciado vulnerabilidades en la estructura actual del mercado, lo que plantea la necesidad de evaluar y fortalecer su capacidad de respuesta ante este tipo de contingencias [1].

El concepto de resiliencia en mercados eléctricos ha sido ampliamente estudiado en diversos contextos internacionales. Según [2], los mercados eléctricos deben ser diseñados para reducir la frecuencia, magnitud y duración de los apagones mediante mecanismos regulatorios adecuados y mercados de capacidad eficientes. A su vez, [3] destacan que los mercados deben integrar estrategias de prevención, detección y mitigación para garantizar el suministro eléctrico en escenarios adversos. En este sentido, experiencias como la del Mercado Nacional de Electricidad en Australia muestran la importancia de adoptar un enfoque sistémico para mejorar la resiliencia a largo plazo, [4].

En el 2024 se observó una reducción significativa de la oferta de generación hídrica, aumentando la necesidad de generación térmica. Esta situación ha elevado los costos de electricidad y ha impuesto desafíos financieros y operativos al sector.

La resiliencia del mercado eléctrico colombiano se entiende como su capacidad para absorber, adaptarse y recuperarse de eventos extremos sin comprometer la seguridad energética ni la estabilidad económica de los actores involucrados. Este análisis se fundamenta en estudios internacionales sobre resiliencia en mercados eléctricos, aplicando estas perspectivas al contexto colombiano.

La estructura del documento es la siguiente: en la Sección 2 se presenta una revisión de la resiliencia en mercados eléctricos; en la Sección 3 se caracteriza el mercado colombiano y su vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos; y en la Sección 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2 RESILIENCIA EN EL MERCADOS ELÉCTRICO COLOMBIANO

En esta sección se presenta un análisis del concepto de resiliencia en los mercados de electricidad y las estrategias necesarias para mejorar la capacidad de respuesta del sistema.

2.1 Concepto de resiliencia en mercados eléctricos

La resiliencia en mercados eléctricos se define como la capacidad del sistema para absorber, adaptarse y recuperarse de eventos disruptivos, manteniendo la estabilidad del suministro y la eficiencia del mercado. En el contexto colombiano, esta resiliencia es puesta a prueba por eventos climáticos extremos, particularmente el fenómeno de El Niño, que impacta significativamente la disponibilidad de generación hidroeléctrica y genera volatilidad en los precios.

Los mercados eléctricos deben ser diseñados para reducir la frecuencia, magnitud y duración de las interrupciones del suministro. La literatura destaca tres pilares fundamentales para mejorar la resiliencia del sistema eléctrico: diversificación de la matriz energética, flexibilidad del mercado y fortalecimiento de la regulación.

2.2 Estructura y dinámica del mercado de energía en Colombia

El Mercado de Energía Mayorista (MEM) colombiano opera bajo un esquema de oferta competitiva en el cual los generadores presentan sus ofertas de precio y cantidad, y el operador del sistema asigna el despacho según el criterio de costo marginal. Las transacciones en el mercado se realizan a través de contratos bilaterales y en la bolsa de energía, donde el precio de bolsa es determinado por el costo de la unidad generadora marginal en cada hora.

Una característica distintiva del MEM colombiano es su alta dependencia de la generación hidroeléctrica, la cual representa aproximadamente el 68% de la capacidad instalada. Esta situación hace que el mercado sea altamente sensible a fenómenos climáticos como El Niño, que reducen la disponibilidad de agua y obligan a incrementar la participación de generación térmica, elevando los costos del sistema.

El modelo de mercado también incluye el Cargo por Confiabilidad, un mecanismo implementado para garantizar la seguridad del suministro mediante subastas de Obligaciones de Energía Firme (OEF). Sin embargo, su diseño actual no incentiva adecuadamente tecnologías de almacenamiento ni renovables no convencionales, por lo que es necesario una revisión del esquema de subastas para incluir criterios de resiliencia y diversificación tecnológica.

2.3 Volatilidad de precios y riesgos financieros

El MEM colombiano presenta una alta volatilidad en los precios de la energía, lo que genera desafíos tanto para generadores como para comercializadores y consumidores. En mercados como el lituano y el polaco, la volatilidad se ha estudiado mediante indicadores como el coeficiente de oscilación y la velocidad diaria de precios. En Colombia, los estudios han demostrado que la volatilidad está fuertemente influenciada por la variabilidad climática y la estructura de costos del mercado.

Además, el mercado enfrenta riesgos financieros sistémicos, donde la interdependencia entre agentes puede amplificar choques de precios y generar efectos en cadena sobre la estabilidad del sistema. Similar a la crisis

financiera de 2008, en mercados eléctricos con alta penetración de renovables, una pérdida financiera en un segmento del mercado puede propagarse rápidamente a otros actores, comprometiendo la estabilidad financiera del sistema [5].

2.4 Factores que afectan la resiliencia del mercado eléctrico

2.4.1 Eventos Climáticos Extremos y vulnerabilidad del mercado

El fenómeno de El Niño 2024 ha sido un claro ejemplo de la vulnerabilidad del Mercado de Energía Mayorista (MEM) en Colombia. Durante periodos de sequía, la generación hidroeléctrica, que normalmente representa hasta el 80% de la oferta de energía en el país, se reduce a aproximadamente 50%, incrementando la dependencia de generación térmica y solar. Este cambio genera precios elevados en el mercado de bolsa y un incremento en los contratos de largo plazo.

El caso de Australia ha demostrado que un enfoque sistémico en el diseño del mercado puede mejorar la resiliencia. Estudios han destacado que la adopción de herramientas de dinámica de sistemas para la planificación del mercado permite identificar vulnerabilidades y puntos de intervención efectivos.

2.4.2 Fallas del mercado y respuestas regulatorias

El debate sobre la necesidad de intervención regulatoria en mercados eléctricos ha sido ampliamente analizado. Mientras que los modelos económicos tradicionales promueven precios de escasez como señales para nuevas inversiones, en la práctica, los gobiernos tienden a intervenir para evitar aumentos excesivos en tarifas eléctricas.

En la crisis energética europea de 2021-2022, se observó una diferencia entre las medidas regulatorias recomendadas en la literatura y las aplicadas en la realidad. En teoría, la respuesta a picos de precios debería basarse en mecanismos de mercado; sin embargo, en la práctica, los gobiernos aplicaron subsidios y controles de precios para evitar impactos sociales y políticos adversos.

Las decisiones políticas y regulatorias deben tomarse con base en la teoría económica y de mercados. Muchas veces las decisiones intervienen el mercado para obtener resultados en el corto plazo pero sacrifican el desempeño del mercado en el largo plazo generando impactos negativos en los usuarios y haciendo menos atractivo el negocio para los inversionistas.

3 ESTRATEGIAS PARA FORTALECER LA RESILIENCIA DEL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO

Esta sección presenta un conjunto de medidas enfocadas en mejorar la diversificación de la matriz energética, incrementar la flexibilidad del mercado y fortalecer el marco regulatorio. La implementación de estas estrategias permitirá no solo reducir la exposición a variaciones climáticas, sino también optimizar la eficiencia del mercado, atraer nuevas inversiones y proporcionar señales de precios más estables para los consumidores.

Es fundamental adoptar estrategias que fortalezcan la resiliencia del sistema eléctrico, permitiendo una respuesta más eficiente a futuras contingencias y garantizando la estabilidad del suministro.

3.1 Diversificación de la matriz energética

Para mejorar la resiliencia del sistema, es fundamental diversificar la matriz con tecnologías menos susceptibles a la variabilidad climática, como:

- Mayor integración de energías renovables no convencionales:
 - Colombia tiene un gran potencial solar y eólico, especialmente en regiones como la Guajira. Sin embargo, la penetración sigue siendo baja porque los proyectos han tenido retrasos significativos de más de tres años. No está la red de transmisión y siguen los retrasos dada la difícil aprobación de licencias ambientales y trámites legales que requieren los proyectos.

- La adopción de mecanismos de subastas de largo plazo y la mejora en la infraestructura de transmisión facilitarían una mayor inversión en energías renovables.
- Almacenamiento de energía y tecnologías de respaldo:
 - Sistemas de baterías de gran escala pueden mitigar la intermitencia de las energías renovables y mejorar la seguridad del suministro, [6].
 - Tecnologías como el hidrógeno verde también representan una alternativa viable para el almacenamiento de largo plazo.
- Desarrollo del gas natural como tecnología de transición:
 - Aunque los combustibles fósiles deben reducirse progresivamente, el gas natural puede actuar como un respaldo flexible y menos contaminante que el carbón o el diésel.
 - Se requiere una infraestructura de importación y almacenamiento más robusta para evitar picos de precio durante periodos de crisis.

En conclusión, una matriz energética más equilibrada reducirá la exposición del MEM colombiano a fenómenos climáticos extremos, estabilizando los precios y mejorando la seguridad del suministro.

3.2 Flexibilidad del Mercado

Se requiere de mecanismos para responder rápidamente a fluctuaciones en Oferta y Demanda. La capacidad de adaptación del MEM colombiano ante cambios bruscos en oferta y demanda es limitada. Durante El Niño 2024, la falta de mecanismos de flexibilidad profundizó la volatilidad de precios y dificultó la respuesta del sistema. Para mejorar la capacidad de adaptación, se requieren los siguientes cambios estructurales:

3.2.1 Evolución a un mercado completo de electricidad. Mercados intradiarios y mercado de futuros

La estructura actual del mercado debe actualizarse para aprovechar las nuevas tecnologías y promover aún más la competencia en términos de oferta en mercados de corto y largo plazo. La estructura actual es limitada y debe ser actualizada para abastecer la demanda con eficiencia y no correr los riesgos de racionamiento en condiciones de sequía (El Niño) [3], [7].

Es necesario que el mercado continúe evolucionando a un mercado completo que ofrece más alternativas de participación a los usuarios y a los nuevos tipos de participante. Un mercado completo permite trasladar precios más eficientes a los usuarios finales.

La Tabla I presenta una comparación entre el diseño de mercado colombiano actual y el diseño de mercado necesario para fortalecer la resiliencia del mercado de energía colombiano.

TABLA I. COMPARACIÓN DE DISEÑO ACTUAL Y NECESARIO DEL MERCADO DE ELECTRICIDAD PARA FORTALECER LA RESILIENCIA

Diseño de mercado actual	Diseño necesario de mercado
Un mercado de corto plazo donde solo participan Generadores a través de un único precio para las 24 horas del día.	Un mercado de corto plazo donde participen generadores y agregadores de demanda para la formación de precios en el mercado de energía de corto plazo
No permite actualización de ofertas de los agentes durante el día de operación con mejor información disponible cercana a la hora de operación.	Un mercado que permita actualizaciones intradiarias de ofertas de los participantes. Se requiere el cálculo de múltiples liquidaciones con la implementación de mercados intradiarios

	o en tiempo real y con precios de cierre calculados ex ante.
Se ejecutan despachos de reserva y energía de forma aislada. Primero se hace un despacho de reservas del sistema y luego se ejecuta un despacho económico.	Se requiere ejecutar un modelo de despacho co-optimizado para la asignación de los recursos que deben proveer energía y servicios complementarios

En mercados como el europeo, la implementación de mercados intradiarios ha permitido una mayor integración de energías renovables y una respuesta más eficiente a eventos imprevistos. Se recomienda desarrollar mercados de balanceo en tiempo real, donde generadores y consumidores puedan ajustar su oferta y demanda con mayor dinamismo.

3.2.2 Adopción de Mecanismos de Respuesta de la Demanda (RD)

La flexibilidad del mercado no solo debe venir del lado de la oferta; los consumidores también pueden jugar un papel clave. En países como EE.UU. y Australia, los mecanismos de reducción voluntaria de consumo en horas pico han demostrado ser efectivos para aliviar la presión sobre el sistema en momentos críticos.

Colombia podría implementar incentivos para que industrias y grandes consumidores ajusten su consumo en función de señales de precio horarias. Por ejemplo, en Colombia en las horas 18, 19 y 20 el precio de la energía en la bolsa es un 45% mayor que en el resto de las horas del día. Aquí se hace relevante incentivar mecanismos de respuesta de la demanda que remuneren la desconexión horaria principalmente en estas horas del día donde se presentan precios pico [8].

3.2.3 Mayor interconexión con mercados vecinos

La interconexión con Ecuador y Venezuela ha sido limitada, mejorar estas conexiones permitiría un intercambio de energía más eficiente durante periodos de crisis. En América del Sur, países como Brasil y Argentina han desarrollado mecanismos de cooperación energética que podrían servir de modelo para Colombia.

Respecto a la integración regional, se tiene previsto para el 2026 la entrada del Mercado Andino Eléctrico Regional de Corto Plazo (MAERCP) que permitirá la operación de mercados regionales de corto plazo entre Ecuador, Perú y Colombia. El MAERCP brindará complementariedad en la oferta de energía, además que se proyecta a Colombia como un exportador relevante dentro de este mecanismo a partir de los excedentes de generación renovable que se esperan en los próximos años con el crecimiento de nuestra matriz en solar y eólica.

3.2.4 Fortalecimiento de la Regulación

El marco regulatorio del MEM colombiano ha sido clave para su estabilidad, pero los eventos climáticos y económicos de 2024 han evidenciado la necesidad de reformas estructurales. Una regulación robusta es clave para incentivar las inversiones sostenibles, garantizar la seguridad energética y disminuir los riesgos de recuperación de cara a los inversionistas

Respecto a la remuneración tarifaria, el regulador colombiano ha incorporado en sus distintas metodologías tarifarias, elementos que permiten a las distintas empresas del mercado, según su actividad, garantizar la recuperación de los costos y gastos propios de operación, incluyendo la expansión, la reposición y el mantenimiento, así como remunerar el patrimonio de los accionistas en la misma forma en la que lo habría

remunerado una empresa eficiente en un sector de riesgo comparable, tal como lo establece la Ley 142 de 1993.

Sin embargo, existen algunos aspectos relacionados con la expansión en generación y transmisión, que deben atenderse y articularse entre distintas entidades como la planeación, las autoridades ambientales, comunidades y otros involucrados, a fin que se pueda tener la entrada oportuna de los proyectos de expansión al sistema, lo cual sería muy positivo para atraer más el interés de los inversionistas en este tipo de proyectos.

Adicional, en el margen de remuneración existen riesgos que pueden impactar el margen de las actividades que desarrollan los agentes y los precios que deben pagar los usuarios finales. Por ejemplo, riesgos económicos que están ligados a índices macroeconómicos IPP e IPC que no necesariamente reflejan las variaciones en los costos de operación de la infraestructura eléctrica y el mercado de energía.

Otro riesgo relevante es la volatilidad de la TRM y el impacto que tiene en los precios de insumos internacionales para la expansión de la infraestructura eléctrica. Asimismo, la variación en el costo de los combustibles puede generar otro riesgo adicional en los márgenes de remuneración. En resumen, se debe fortalecer la regulación para dar señales que permita a los inversionistas gestionar el riesgo en estos aspectos.

4 CONCLUSIONES

La alta dependencia hidroeléctrica incrementa la vulnerabilidad del mercado. El análisis del fenómeno de El Niño 2024 confirma que el Mercado de Energía Mayorista (MEM) colombiano sigue siendo altamente dependiente de la generación hidroeléctrica. En periodos de sequía extrema, la reducción de la oferta hídrica genera aumentos significativos en los precios y una mayor presión sobre la generación térmica. Esto resalta la necesidad de una diversificación energética que reduzca la exposición del sistema a variaciones climáticas extremas.

Los mecanismos de flexibilidad del mercado deben ser fortalecidos. La volatilidad de precios observada durante El Niño 2024 evidencia que la estructura actual del mercado limita la capacidad de respuesta ante eventos imprevistos. La implementación de mercados intradiarios, un modelo de despacho co-optimizado y una mayor participación de la demanda en la formación de precios permitirán mejorar la eficiencia del mercado y reducir el riesgo de racionamiento en escenarios de estrés energético.

Es necesario un marco regulatorio más robusto y adaptativo. La regulación actual del MEM colombiano ha sido clave para su estabilidad, pero requiere ajustes para atraer nuevos inversionistas en proyectos de expansión en generación y transmisión. Aspectos como un trabajo articulado entre gobierno y empresas donde se agilicen los trámites legales y las licencias ambientales son fundamentales para mejorar la resiliencia del mercado a largo plazo.

La integración regional y la interconexión con mercados vecinos representan una oportunidad estratégica. La entrada en operación del Mercado Andino Eléctrico Regional de Corto Plazo (MAERCP) en 2026 permitirá una mayor complementariedad entre los sistemas eléctricos de Colombia, Ecuador y Perú. Este tipo de integración contribuirá a estabilizar la oferta energética, mejorar la seguridad del suministro y fortalecer la competitividad del mercado colombiano en la región.

5 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Y. Chung and Y. Xu, “Reliability and resilience in a regulated electricity market: Hong Kong under Typhoon Mangkhut,” *Util. Policy*, vol. 67, 2020, doi: 10.1016/j.jup.2020.101134.
- [2] M. Petit, B. Ünel, and F. A. Felder, “Making Electricity Capacity Markets Resilient to Extreme Weather Events,” *Econ. Energy Environ. Policy*, vol. 12, no. 2, pp. 49–67, 2023, doi: 10.5547/2160-5890.12.2.mpet.
- [3] N. Fabra, M. Motta, and M. Peitz, “Learning from electricity markets: How to design a resilience strategy,” *Energy Policy*, vol. 168, no. November 2021, p. 113116, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113116.

- [4] B. Newell, D. M. Marsh, and D. Sharma, “Enhancing the resilience of the Australian National Electricity Market: Taking a systems approach in policy development,” *Ecol. Soc.*, vol. 16, no. 2, 2011, doi: 10.5751/ES-04132-160215.
- [5] Q. Zhang and F. Li, “Financial Resilience and Financial Reliability for Systemic Risk Assessment of Electricity Markets With High-Penetration Renewables,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 2312–2321, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3115499.
- [6] A. Ingalalli *et al.*, “Energy Storage Systems in Emerging Electricity Markets: Frequency Regulation and Resiliency,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2019, vol. 2019-August, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973490.
- [7] C. de R. de E. y G. CREG, *MODERNIZACIÓN DEL MERCADO DE ENERGÍA MAYORISTA (Despacho vinculante, mercados intradiarios y servicios complementarios)*. Colombia, 2022.
- [8] C. de R. de E. y G. CREG, *Programa transitorio de respuesta de la demanda. Resolución CREG 101 043 de 2024*. 2024.