

Comparación Mercados Eléctricos: Centralizados, Descentralizados y las Consecuencias de la Inserción de Energías Renovables

Comparison of Electricity Markets: Centralized, Decentralized and the Consequences of the Insertion of Renewable Energies

Francisco Quinteros^{1*}, Paul Masache², Estefanía Vaca³

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación en redes Eléctricas Inteligentes (GIREI), Carrera de Electricidad, Ecuador.

² Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador

³ Unidad Educativa “San Luis Gonzaga”, Proyecto EAC (Experiencia Avanzada de Cambio).

*Autor de correspondencia: jquinteros@ups.edu.ec.

RESUMEN. El presente documento, ofrece un análisis comparativo entre los mercados eléctricos centralizados y descentralizados, con un enfoque particular en las consecuencias resultantes de la integración de energías renovables en ambos modelos de mercados. El objetivo principal es analizar y contrastar cómo los mercados eléctricos gestionados de manera centralizada y aquellos que adoptan un enfoque descentralizado afectan en la inserción de fuentes de energía renovable en el suministro eléctrico. Los mercados eléctricos centralizados presentan ventajas como la competencia entre generadores, estabilidad y coordinación centralizada. Sin embargo, enfrentan dificultades en la coordinación de múltiples actores y la integración de fuentes de energía renovable intermitente. Por otro lado, los mercados eléctricos descentralizados empoderan a los consumidores, diversifican las fuentes de energía y mejoran la seguridad energética. A pesar de estas ventajas, se enfrentan a desafíos en la coordinación a nivel local, la estabilidad de la red y la toma de decisiones sin una autoridad central. Este análisis denota que, tanto los mercados eléctricos centralizados como los descentralizados poseen sus propias ventajas y desafíos en la gestión de la energía y la integración de fuentes renovables. Además, se destaca cómo ambos enfoques están siendo moldeados por la evolución tecnológica y las políticas energéticas, con el objetivo de lograr una matriz energética más sostenible y diversificada.

Palabras clave. Comercialización, energía renovable, generación distribuida, mercado eléctrico, tarifas eléctricas.

ABSTRACT. This paper offers a comparative analysis between centralized and decentralized electricity markets, with a particular focus on the consequences resulting from the integration of renewable energies in both market models. The main objective is to analyze and contrast how centrally managed electricity markets and those adopting a decentralized approach affect the insertion of renewable energy sources in the electricity supply. Centralized electricity markets present advantages such as competition among generators, stability and centralized coordination. However, they face difficulties in the coordination of multiple actors and the integration of intermittent renewable energy sources. On the other hand, decentralized electricity markets empower consumers, diversify energy sources and improve energy security. Despite these advantages, they face challenges in local-level coordination, grid stability and decision making without a central authority. This analysis shows that both centralized and decentralized electricity markets have their own advantages and challenges in energy management and integration of renewable sources. It also highlights how both approaches are being shaped by technological evolution and energy policies, with the goal of achieving a more sustainable and diversified energy matrix.

Keywords. Commercialization, Distributed Generation, Electricity Market, Electricity Rates, Renewable Energy.

Citación: J.F. Quinteros Flores et al., “Análisis Comparativo de Mercados Eléctricos Centralizados y Descentralizados y las Consecuencias de la Inserción de Energías Renovables”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (10-20), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 21 de agosto de 2023. **Recibido con correcciones:** 25 de septiembre de 2023. **Aceptado:** 15 de diciembre de 2023.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3854>

Copyright: 2024 J.F. Quinteros Flores et al., This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

La industria eléctrica ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de adoptar enfoques más eficientes y sostenibles en la generación, distribución y consumo de energía. En este contexto, los mercados eléctricos han surgido como una pieza fundamental en la gestión y optimización de los recursos energéticos. Los sistemas tradicionales, caracterizados por su centralización y control unidireccional, han dado paso a nuevos paradigmas que promueven la descentralización y la participación activa de múltiples actores en la red eléctrica [1].

En las últimas décadas, los mercados eléctricos han experimentado una transformación significativa, desde sistemas centralizados dominados por grandes empresas eléctricas hasta modelos más flexibles y descentralizados que involucran a una variedad de actores. En este estado del arte, analizaremos en detalle los mercados eléctricos centralizados y descentralizados, comparando sus características, ventajas y desafíos [1], [2], [3],[4].

La evolución histórica de los mercados eléctricos ha sido marcada por una progresiva liberalización y desregulación de la industria, lo que ha permitido la entrada de competidores y el acceso abierto a la red de transmisión y distribución. Los modelos de mercado centralizado, también conocido como mercados mayoristas, surgieron como una respuesta eficiente para la coordinación de la oferta y la demanda de energía eléctrica en grandes escalas. Estos mercados se basan en mecanismos de subasta y contratos a plazo, facilitando la compra y venta de electricidad entre generadores y comercializadores [5], [6].

Sin embargo, a medida que las tecnologías avanzaron y la generación distribuida ganó protagonismo, se evidenciaron ciertas limitaciones en los mercados centralizados para integrar de manera óptima las energías renovables y satisfacer la demanda en zonas localizadas. Es así como surgen los mercados eléctricos descentralizados, donde la generación y el consumo de energía se acercan a los puntos de consumo, permitiendo una mayor participación de consumidores y consumidor moderno en la toma de decisiones [7].

Este estado del arte tiene como objetivo analizar y comparar los modelos de mercado eléctrico centralizado y descentralizado, así como explorar las ventajas y desafíos asociados a cada enfoque. Se examinarán los

conceptos básicos de funcionamiento de ambos sistemas, considerando las implicaciones económicas, técnicas y regulatorias que cada uno conlleva. Además, se abordará la relevancia de la integración de energías renovables en los mercados, destacando las tecnologías habilitadoras y las estrategias para optimizar la operación de la red eléctrica [8], [9].

Con un enfoque multidisciplinario y una revisión detallada de la literatura científica y técnica, se espera obtener una visión integral sobre los mercados eléctricos centralizados y descentralizados, tomando en cuenta las bases para la identificación de oportunidades de mejora y el desarrollo de futuras líneas de investigación en este campo en constante evolución [10].

1.1 Contexto y antecedentes

Una serie de factores históricos y tecnológicos que dieron origen a la industria energética contemporánea han influido en el crecimiento y desarrollo del mercado eléctrico. Inicialmente, la generación, transmisión y distribución de electricidad estaban estrechamente integradas bajo el control de monopolios verticales, lo que dio como resultado en sistemas eléctricos altamente centralizados. En esta situación, la regulación estatal tuvo un papel clave en la determinación de los precios y el funcionamiento de la red [11], [12].

Sin embargo, a medida que surgieron nuevos avances tecnológicos y se buscaba una mayor eficiencia y competitividad en el sector eléctrico, se inició un proceso de liberalización y desregulación en varios países. Esto dio lugar a la aparición de los mercados eléctricos centralizados, también conocidos como mercados mayoristas, donde la electricidad se comercializa entre productores y comercializadores a través de mecanismos de subasta y contratos a plazo. Estos modelos permitieron una mayor competencia en la generación y la optimización de los recursos, lo que llevó a una mayor eficiencia en la asignación de la energía eléctrica [13].

Pero a medida que crecía la conciencia sobre la sostenibilidad y el efecto ambiental, surgió la necesidad de incorporar fuentes de energía renovables a la red eléctrica. Las tecnologías solares, eléctricas y de generación distribuida ganaron popularidad, lo que planteó nuevos desafíos para los mercados eléctricos centralizados. La variabilidad inherente de las fuentes de energía renovables y la necesidad de una operación más

flexible del sistema llevaron al surgimiento de mercados eléctricos descentralizados [14],[15],[16],[17].

Los mercados eléctricos descentralizados permiten una mayor participación de actores locales, como pequeños generadores y consumidores, en la toma de decisiones sobre la generación y el consumo de energía. Esta descentralización también se tradujo en una mayor resiliencia del sistema eléctrico ante perturbaciones y eventos adversos, al reducir la dependencia de grandes centrales eléctricas.

En la actualidad, la industria eléctrica experimenta una fase de transición hacia modelos híbridos, donde se combinan elementos de mercados centralizados y descentralizados para aprovechar las ventajas de ambos enfoques. Estos modelos integrados buscan equilibrar la eficiencia y competitividad de los mercados mayoristas con la flexibilidad y la inclusión de los mercados minoristas descentralizados [18].

2. Materiales y Métodos

Los mercados eléctricos, ya sean centralizados o descentralizados, son fundamentales para la operación eficiente y confiable de los sistemas eléctricos modernos. En esta sección, se explorarán los conceptos básicos que definen el funcionamiento de estos mercados, así como su estructura y componentes clave [19], [20].

En primer lugar, un mercado eléctrico es un entorno donde se negocia y comercializa la energía eléctrica entre diferentes actores del sistema. Los principales participantes en estos mercados son los generadores de energía, los comercializadores y los consumidores. Cada uno de estos actores juega un papel esencial en la dinámica de oferta y demanda, lo que afecta directamente el precio de la electricidad [21].

En un mercado eléctrico centralizado, también conocido como mercado mayorista, la electricidad se negocia a gran escala. Los generadores venden su energía en subastas o mediante contratos a plazo a los comercializadores y distribuidores, quienes luego la suministran a los consumidores finales. La coordinación y planificación de la generación y la transmisión de energía se realizan de manera centralizada a través de operadores del sistema y organismos reguladores [21].

Por otro lado, los mercados eléctricos descentralizados emplean un enfoque más centrado y adaptable. La generación y la participación activa de los consumidores juegan un papel importante en esto. Convertirse en "consumidores modernos", es decir, usuarios que generan parte de su propia energía utilizando tecnologías

como paneles solares y pequeñas turbinas eléctricas, incluso vender el exceso de energía que producen mientras regresan a la red [21].

La operación de un mercado eléctrico, ya sea centralizado o descentralizado, se basa en el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía. Los precios de la electricidad se determinan mediante mecanismos de formación de precios que varían según el modelo de mercado. En los mercados centralizados, los precios pueden ser influenciados por factores como la disponibilidad de generación, la demanda prevista y las restricciones de la red de transmisión. Mientras tanto, en los mercados descentralizados, los precios pueden estar influenciados por la oferta y demanda local, así como por incentivos y esquemas de tarifas específicos.

Es importante destacar que la evolución tecnológica y las políticas energéticas influyen significativamente en la estructura y operación de los mercados eléctricos. La integración de energías renovables, el desarrollo del almacenamiento de energía y las iniciativas de gestión de la demanda son ejemplos de factores que están transformando la industria eléctrica y llevando a una mayor convergencia entre los enfoques centralizados y descentralizados [21], [22].

2.1 Mercados eléctricos centralizados

En un mercado eléctrico centralizado, la generación, transmisión y distribución de energía se gestionan de manera integrada y controlada por una entidad central, típicamente una empresa eléctrica de propiedad estatal o privada. Las principales características de estos mercados son:

Generación de Energía: En el modelo centralizado, la generación de energía se lleva a cabo principalmente en grandes centrales eléctricas, como centrales térmicas, hidroeléctricas o nucleares. Estas centrales son construidas y operadas por grandes compañías que poseen el control casi total sobre la oferta de energía [21].

Transmisión y Distribución: La energía generada se transmite a través de redes de transmisión de alta tensión y luego se distribuye a los consumidores a través de redes de distribución de menor voltaje. El control de estas redes también recae en manos de la empresa eléctrica centralizada [21],[23].

2.1.1 Ventajas y desafíos de los mercados centralizados

Los mercados eléctricos centralizados, también conocidos como mercados mayoristas, ofrecen una serie de ventajas significativas en la gestión y coordinación de

la energía eléctrica a gran escala. Uno de los principales beneficios de estos mercados es su capacidad para facilitar la competencia entre los generadores, lo que puede llevar a precios más eficientes y justos para los consumidores. La subasta y los contratos a plazo permiten a los generadores planificar su producción de energía a largo plazo y garantizar un suministro estable y confiable [21].

Además, los mercados eléctricos centralizados simplifican la operación y planificación del sistema, al tener una autoridad central que coordina la generación y la transmisión de energía. Esto puede conducir a una mayor estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto, ya que las decisiones estratégicas se toman considerando el panorama general de la red.

No obstante, los mercados centralizados también enfrentan desafíos significativos. Uno de los problemas más destacados es la necesidad de coordinar una amplia gama de actores, incluidos generadores, distribuidores, comercializadores y reguladores. La falta de sincronización en las estrategias y políticas de estos actores puede conducir a desequilibrios en la oferta y demanda de energía, lo que puede afectar los precios y la estabilidad del sistema.

Otro desafío clave es la integración de fuentes de energía renovable intermitente en un mercado mayorista. La naturaleza variable de la generación renovable puede crear incertidumbre en la oferta y dificultar la planificación óptima de la generación y la gestión de la carga. Asimismo, las restricciones en la capacidad de transmisión pueden dificultar el acceso y la entrega de energía renovable desde áreas remotas a los centros de demanda [24].

2.1 Mercados eléctricos descentralizados

Los mercados eléctricos descentralizados son aquellos en los que múltiples actores, como hogares, empresas y comunidades, pueden participar activamente en la generación, transmisión y distribución de energía. Algunos elementos clave de estos mercados son:

Generación de Energía: En un mercado descentralizado, la generación de energía proviene de diversas fuentes, como paneles solares fotovoltaicos en techos, turbinas eólicas a pequeña escala y sistemas de almacenamiento de energía distribuida.

Transmisión y Distribución: La electricidad generada localmente puede ser utilizada por el propio generador o compartida con otros miembros de la comunidad a través de redes de distribución de menor escala, como micro redes o redes inteligentes [23],[24],[25].

2.1.1 Ventajas y desafíos de los mercados descentralizados

En contraste, los mercados eléctricos descentralizados ofrecen una serie de ventajas distintas, especialmente en términos de flexibilidad y resiliencia del sistema. La generación distribuida y la participación activa de los consumidores permiten una mayor diversidad de fuentes de energía y reducen la dependencia de grandes centrales eléctricas. Esto puede mejorar la seguridad energética y la capacidad de recuperación ante posibles interrupciones en la red.

Los mercados eléctricos descentralizados también empoderan a los consumidores al permitirles tomar decisiones informadas sobre su consumo de energía. Los consumidores modernos tienen la oportunidad de reducir sus costos de energía al generar parte de su electricidad, y en algunos casos, vender el excedente a la red. Esto fomenta la adopción de tecnologías más eficientes y sostenibles, como paneles solares y sistemas de almacenamiento de energía [26].

Sin embargo, los mercados descentralizados también enfrentan desafíos importantes. La coordinación de múltiples actores locales puede resultar compleja y requerir un mayor nivel de comunicación e interconexión. La variabilidad en la generación de energía distribuida, especialmente en sistemas con una alta penetración de energías renovables, puede generar desafíos en la estabilidad de la red y la gestión de la frecuencia.

Así mismo, la falta de una autoridad centralizada puede plantear desafíos en la toma de decisiones a nivel sistémico y la asignación eficiente de recursos. La ausencia de una coordinación adecuada entre los consumidores modernos y los operadores de la red podría conducir a congestiones y desequilibrios en la red eléctrica [26].

3. Integración de energías renovables

La integración de fuentes de energía renovable en los mercados eléctricos es un tema de creciente importancia y relevancia en el contexto de la transición hacia una matriz energética más sostenible y de bajas emisiones de carbono. Las tecnologías solares, eólicas, hidroeléctricas y otras formas de generación renovable representan una alternativa limpia y abundante a los combustibles fósiles, lo que ha llevado a su adopción a gran escala en muchos países[26], [27].

La creciente penetración de energías renovables plantea desafíos significativos tanto para los mercados eléctricos centralizados como descentralizados. En los

mercados centralizados, la variabilidad inherente de la generación renovable puede generar fluctuaciones en la oferta y demanda de energía, lo que afecta los precios y la planificación del sistema. La predicción precisa de la generación renovable se convierte en un aspecto crítico para asegurar la estabilidad del sistema y la eficiencia en la operación [28].

Para abordar estos desafíos, los mercados eléctricos centralizados están adoptando enfoques innovadores como la integración de tecnologías de almacenamiento de energía y la gestión de la demanda. Los sistemas de almacenamiento, como baterías y sistemas de almacenamiento térmico, permiten acumular el excedente de energía renovable durante momentos de alta producción para ser utilizada cuando la generación es menor. Asimismo, la gestión de la demanda, mediante programas de respuesta a la demanda y tarifas dinámicas, busca ajustar el consumo de energía según la disponibilidad de la generación renovable [28].

Por otro lado, los mercados eléctricos descentralizados tienen un potencial significativo para facilitar la integración de energías renovables. La generación distribuida, en forma de paneles solares en techos y pequeñas turbinas eólicas, puede reducir la demanda de energía de la red y, en algunos casos, incluso inyectar energía de vuelta a la red. Esto descentraliza la generación y reduce las pérdidas en la transmisión, lo que puede mejorar la eficiencia general del sistema.

Además, la participación activa de los consumidores modernos en los mercados eléctricos descentralizados promueve la adopción de tecnologías de generación renovable y fomenta la conciencia sobre la sostenibilidad energética. Los incentivos para la instalación de sistemas solares y la venta de energía generada a la red impulsan la transición hacia una economía más verde y con menor huella de carbono [28].

Sin embargo, los mercados eléctricos descentralizados también deben enfrentar desafíos en la integración de energías renovables. La variabilidad y la intermitencia de la generación renovable pueden dificultar la estabilidad y la gestión de la red, especialmente en sistemas con una alta penetración de energías renovables.

4. Tecnologías habilitadoras para mercados descentralizados

La evolución de los mercados eléctricos hacia un enfoque más descentralizado ha sido impulsada en gran medida por avances tecnológicos que permiten la generación distribuida y la participación activa de los

consumidores en la gestión de la energía. En esta sección, explicaremos las tecnologías habilitadoras clave que respaldan los mercados eléctricos descentralizados y facilitan la integración de generación distribuida [29], [30].

4.1 Generación distribuida (DG)

La generación se refiere a la producción de energía eléctrica a pequeña escala, frecuentemente a nivel local y cerca de los puntos de consumo. La tecnología incluye sistemas de paneles solares fotovoltaicos en la azotea, pequeñas turbinas eléctricas, micro y otras formas de generación de energía renovable. Con la ayuda de la DG, los consumidores pueden convertirse en consumidores modernos al producir parte de su propia energía y disminuir su dependencia de la red eléctrica centralizada. [29], [30], [31].

4.2 Tecnologías de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son fundamentales para mejorar la flexibilidad y la estabilidad de los mercados eléctricos descentralizados. Estas tecnologías incluyen baterías, sistemas de almacenamiento térmico y almacenamiento de energía en forma de hidrógeno, entre otros. Los sistemas de almacenamiento permiten acumular la energía generada por fuentes renovables durante los períodos de alta producción y utilizarla cuando la generación es menor o la demanda es más alta [29], [30],[32].

4.3 Gestión de la demanda

La gestión de la demanda involucra el control y ajuste del consumo de energía de acuerdo con la disponibilidad de la generación y las condiciones del mercado. Mediante programas de respuesta a la demanda, tarifas dinámicas y tecnologías de automatización, los consumidores pueden modificar su consumo de energía para aprovechar los períodos de menor demanda o alta generación renovable [29], [30].

4.4 Tecnologías de internet de las cosas (IoT)

La IoT juega un papel fundamental en los mercados eléctricos descentralizados al permitir la comunicación y coordinación entre múltiples dispositivos y sistemas. Los medidores inteligentes, sensores de consumo de energía y sistemas de automatización se integran mediante la IoT

para optimizar el consumo y la generación de energía en tiempo real [29], [30].

4.5 Plataformas de comercialización energética

Las plataformas de comercialización energética son herramientas tecnológicas que facilitan la compra y venta de energía entre consumidores modernos, comercializadores y distribuidores en los mercados descentralizados. Estas plataformas ofrecen una interfaz de usuario amigable y transparente para participar activamente en el mercado eléctrico local [29], [30].

La convergencia de estas tecnologías habilitadoras ha permitido el desarrollo y expansión de los mercados eléctricos descentralizados, lo que a su vez ha impulsado la adopción masiva de generación distribuida y energías renovables. La descentralización y la participación activa de los consumidores en la generación y gestión de la energía están transformando la forma en que concebimos y operamos los sistemas eléctricos, fomentando la sostenibilidad y la resiliencia energética.

5. Modelos de comercialización de energía

Los mercados eléctricos, ya sean centralizados o descentralizados, ofrecen diversos modelos de comercialización de energía que determinan cómo se negocia y se lleva a cabo la transacción de electricidad entre los distintos actores del sistema. Estos modelos de comercialización son fundamentales para garantizar una asignación eficiente de los recursos energéticos y una distribución justa de los costos y beneficios entre los participantes del mercado [33].

5.1 Mercado spot (spot market)

El mercado spot es un modelo de comercialización en el cual la electricidad se negocia y se compra y vende en tiempo real, al precio de mercado actual. En este sistema, la oferta y la demanda de energía eléctrica se encuentran en equilibrio a través de mecanismos de formación de precios, como la casación de ofertas y demandas. Los generadores y los consumidores tienen la flexibilidad de comprar y vender electricidad en función de sus necesidades y condiciones del mercado en un momento determinado [33].

5.2 Contratos a plazo (forward contracts)

Los contratos a plazo son acuerdos entre productores y compradores de energía para la compra o venta de electricidad a un precio y volumen predeterminados en un momento futuro específico. Estos contratos ofrecen estabilidad y predictibilidad en los precios de la electricidad, lo que permite a los participantes protegerse contra la volatilidad del mercado. Los contratos a plazo son una herramienta comúnmente utilizada en los mercados eléctricos centralizados para planificar la generación y la compra de energía a largo plazo [33].

5.3 Tarifas reguladas y tarifas dinámicas

En los mercados eléctricos descentralizados, las tarifas pueden variar dependiendo del horario del día, la demanda y la disponibilidad de generación renovable. Las tarifas dinámicas, también conocidas como tarifas de tiempo real, reflejan los cambios en el costo de la electricidad a lo largo del día y pueden incentivar a los consumidores a ajustar su consumo de energía para aprovechar los períodos de menor costo [33].

5.4 Esquemas de incentivos para energías renovables

En muchos mercados eléctricos, especialmente en los descentralizados, se ofrecen esquemas de incentivos y programas de apoyo para fomentar la adopción de energías renovables. Estos esquemas pueden incluir tarifas de alimentación (feed-in tariffs) que garantizan un precio fijo y preferencial para la energía renovable inyectada en la red, lo que estimula la inversión en tecnologías limpias [33].

5.5 Mercados peer-to-peer (P2P)

Los mercados P2P están emergiendo como una opción innovadora en los mercados eléctricos descentralizados. Estos modelos permiten a los consumidores modernos comprar y vender directamente energía entre ellos, sin intermediarios, a través de plataformas digitales. Esto promueve la descentralización y la participación activa de los consumidores en la comercialización de energía [33].

La elección del modelo de comercialización de energía puede tener un impacto significativo en la eficiencia y la competitividad de un mercado eléctrico. Los mercados centralizados y descentralizados pueden adoptar diferentes enfoques según sus objetivos y regulaciones específicas. La combinación de modelos de

comercialización flexibles y bien diseñados es esencial para lograr un sistema eléctrico eficiente, confiable y sostenible [33].

6. Resultados y Discusiones

6.1 Desafíos regulatorios y políticos

La transición hacia mercados eléctricos centralizados y descentralizados conlleva desafíos regulatorios y políticos que deben abordarse para asegurar una implementación efectiva y equitativa de estos modelos. La regulación y las políticas desempeñan un papel fundamental en la creación de un entorno propicio para la operación de los mercados eléctricos, la promoción de la competencia y la protección de los intereses de los consumidores [34].

En los mercados eléctricos centralizados, un desafío importante es garantizar una competencia justa y abierta entre los actores del mercado. Las regulaciones antimonopolio y las medidas para evitar prácticas restrictivas de la competencia son cruciales para evitar la concentración excesiva de poder en manos de unos pocos actores. Además, las políticas de fomento a las energías renovables y las tecnologías limpias deben ser diseñadas de manera cuidadosa para no distorsionar la competencia en el mercado mayorista [34].

Por otro lado, los mercados eléctricos descentralizados enfrentan desafíos específicos relacionados con la integración de generación distribuida y la participación activa de los consumidores modernos. La regulación debe abordar cuestiones como la conexión segura y confiable de sistemas de generación distribuida a la red eléctrica, así como el establecimiento de tarifas justas y transparentes para la venta de energía de los consumidores modernos a la red. También es importante asegurar que los consumidores modernos tengan un acceso equitativo a los mercados y que no se les impongan barreras regulatorias injustas.

Además, la coordinación y colaboración entre los reguladores y las autoridades en los diferentes niveles de gobierno son esenciales para asegurar una transición fluida hacia sistemas eléctricos más descentralizados. Los marcos regulatorios deben permitir la flexibilidad necesaria para adaptarse a la rápida evolución tecnológica y a los cambios en los patrones de consumo y generación de energía [34].

Un desafío común para ambos modelos de mercado es diseñar adecuadamente mecanismos de incentivos y subsidios para promover la adopción de tecnologías limpias y la eficiencia energética sin crear distorsiones en el mercado. Las políticas de fijación de precios del carbono y los esquemas de compensación de energía renovable son ejemplos de instrumentos que deben calibrarse cuidadosamente para lograr un equilibrio entre los objetivos ambientales y la estabilidad económica de los mercados de electricidad [34].

6.2 Impacto socioeconómico y ambiental de los mercados eléctricos

La transición hacia mercados eléctricos centralizados y descentralizados tiene un impacto significativo en diversos aspectos socioeconómicos y ambientales. Estos modelos de mercado influyen en la economía, la sociedad y el medio ambiente, y es esencial comprender los efectos para tomar decisiones informadas y promover una gestión sostenible de los recursos energéticos [35].

A nivel socioeconómico, los mercados de electricidad centralizados pueden alentar la inversión en infraestructura energética a gran escala, como plantas de energía convencionales y sistemas de transmisión a granel. Esto puede crear empleo y desarrollo económico en las regiones donde se implementan estos proyectos. Además, los contratos a plazo y los mecanismos de fijación de precios en el mercado al contado pueden brindar a los consumidores ya la industria estabilidad y previsibilidad en los costos de la energía.

En los mercados eléctricos descentralizados, los impactos socioeconómicos pueden variar. La promoción de la generación distribuida y la participación activa de los consumidores modernos puede descentralizar la generación y fomentar el crecimiento de las pequeñas empresas locales relacionadas con las energías renovables y las tecnologías limpias. Esto puede fortalecer la economía local y empoderar a las comunidades a través de la generación y el autoconsumo de energía [35].

Desde una perspectiva ambiental, tanto los mercados centralizados como los descentralizados juegan un papel fundamental en la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. La integración de energías renovables en ambos modelos reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles fósiles, lo que contribuye a

la lucha contra el cambio climático y la mitigación de la contaminación del aire [35].

En los mercados centralizados, la incorporación de tecnologías de generación más limpias y eficientes puede reducir la huella de carbono y mejorar la calidad del aire en las regiones donde se encuentran las centrales eléctricas. Además, la implementación de políticas de eficiencia energética puede reducir el consumo total de electricidad y minimizar el impacto ambiental de la generación eléctrica [35], [36].

En el caso de los mercados eléctricos descentralizados, el impulso de la generación distribuida y la utilización de energías renovables a nivel local pueden disminuir las pérdidas de transmisión y distribución, lo que resulta en una mayor eficiencia y una reducción del desperdicio energético.

Sin embargo, también es importante tener en cuenta que la transición hacia una mayor integración de energías renovables puede plantear desafíos ambientales, como la necesidad de una gestión adecuada de los recursos naturales utilizados en la fabricación de tecnologías limpias, así como el impacto en el uso del suelo y la biodiversidad en ciertas regiones.

6.3 Impacto socioeconómico y ambiental de los mercados eléctricos

La interacción entre mercados eléctricos centralizados y descentralizados es un tema de creciente interés debido a la coexistencia de ambos modelos en el panorama energético actual. Esta interacción plantea desafíos y oportunidades para optimizar la operación y planificación del sistema eléctrico en su conjunto, buscando alcanzar un equilibrio entre eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad [36].

Una de las formas en que interactúan los mercados centralizados y descentralizados es mediante la integración de la generación distribuida en los mercados mayoristas. En muchos casos, el excedente de energía generado puede ser alimentado a una red centralizada por consumidores modernos que participan activamente en mercados descentralizados. Esto hace posible vender energía producida localmente a comerciantes o distribuidores, lo que a su vez contribuye al suministro de energía en el mercado mayorista.

La integración de la generación distribuida en el mercado mayorista plantea desafíos técnicos y regulatorios, como la coordinación de la generación intermitente con la demanda y la implementación de

mecanismos de compensación justos para los consumidores modernos. Además, la sincronización de los datos y la comunicación entre los mercados centralizados y descentralizados son aspectos cruciales para asegurar una operación eficiente y fluida del sistema eléctrico en su conjunto [37].

Otro aspecto importante de la interacción entre los dos modelos es el papel del sistema de almacenamiento de energía. Los sistemas de almacenamiento, ya sean centralizados o distribuidos, pueden desempeñar un papel clave en la estabilización de la red, el equilibrio entre la oferta y la demanda y la gestión de los cambios en la generación de energía renovable.

Además, la complementariedad de la generación centralizada y distribuida puede proporcionar ventajas para la planificación del sistema. La generación centralizada puede proporcionar la capacidad y la estabilidad necesarias para satisfacer la demanda de electricidad a gran escala, mientras que la generación distribuida puede ayudar a satisfacer la demanda local y reducir las pérdidas de transmisión y distribución.

En términos de políticas y regulación, la interacción entre mercados también requiere la adaptación de marcos regulatorios que consideren ambos modelos y sus particularidades. Esto implica abordar temas como la compensación adecuada para los consumidores modernos, la coordinación de precios y la compatibilidad de los mecanismos de formación de precios entre los mercados centralizados y descentralizados [37],[38].

7. Conclusiones

Los mercados eléctricos centralizados y descentralizados representan dos enfoques contrastantes para la gestión de la energía. Mientras que los mercados centralizados han demostrado su eficacia en el pasado, los mercados descentralizados ofrecen un camino hacia la sostenibilidad, la resiliencia y la democratización del suministro de energía.

Es probable que en el futuro veamos una combinación de ambos enfoques, donde se buscará aprovechar la eficiencia y confiabilidad de los mercados centralizados, al tiempo que se integran tecnologías y estructuras más descentralizadas para permitir la participación de los consumidores y la expansión de las energías renovables. El desarrollo de tecnologías inteligentes, almacenamiento de energía avanzado y políticas adecuadas serán clave para el éxito de esta transición.

En última instancia, el objetivo principal será garantizar un suministro de energía seguro, limpio y asequible para todos, mientras se abordan los desafíos del cambio climático y la transición hacia un futuro energético sostenible.

La revisión exhaustiva del estado del arte sobre los mercados eléctricos centralizados y descentralizados revela una dinámica energética en constante evolución. Estos dos modelos de mercado presentan enfoques distintos y desafíos particulares, pero ambos comparten el objetivo fundamental de lograr un sistema eléctrico eficiente, sostenible y confiable.

En primer lugar, se ha destacado que los mercados eléctricos centralizados se caracterizan por una planificación y coordinación a gran escala de la generación y distribución de energía. La optimización de los recursos y la eficiencia en la transmisión eléctrica son pilares fundamentales para garantizar un suministro confiable y competitivo. El empleo de tecnologías avanzadas de gestión y control, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, ha permitido una operación más eficiente y una mejor integración de las energías renovables.

Por otro lado, los mercados eléctricos descentralizados han surgido como una respuesta a los desafíos de la transición energética hacia un modelo más sostenible. La generación distribuida y la participación activa de los consumidores modernos son elementos clave en esta nueva realidad. Los avances en tecnologías de la información y comunicación (TIC) han hecho posible una coordinación descentralizada de la generación y el consumo de energía, otorgando poder a los consumidores y fomentando el uso de fuentes limpias y renovables.

Un aspecto fundamental en ambos modelos es la promoción de energías limpias y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La integración de tecnologías renovables, como la solar y la eólica, ha demostrado su capacidad para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados con la generación de energía.

No obstante, la adopción masiva de energías renovables también presenta desafíos técnicos y regulatorios, como la gestión de la intermitencia y la coordinación con la demanda. En este sentido, el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía y la implementación de políticas de gestión de la demanda se han identificado como soluciones potenciales para

mejorar la estabilidad y la resiliencia del sistema eléctrico.

La interacción entre los mercados eléctricos centralizados y descentralizados emerge como un tema relevante que abre nuevas oportunidades para optimizar la operación del sistema en su conjunto. La complementariedad de la generación a gran escala con la generación distribuida ofrece ventajas en términos de eficiencia y reducción de pérdidas de transmisión. No obstante, esta interacción también plantea desafíos en términos de coordinación y compatibilidad entre ambos modelos

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a la Universidad Politécnica Salesiana a la carrera de Electricidad por el apoyo logístico para la elaboración del presente artículo

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores contribuyeron en la investigación, experimentación, así como en la conceptualización, preparación y corrección del artículo con un aporte del 100% del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] D. Felipe and V. Reyes, "Sistema De Gestión Energética Para La Interconexión De Microrredes," 2022.
- [2] P. Constanza and F. Carrasco, "Modelación de la Gestión de la Demanda Eléctrica en Redes Inteligentes con Mecanismos Dinámicos de Mercado," 2023.
- [3] A. G. Nogar, L. V. Clementi, and E. V. Decunto, "Argentina en el contexto de crisis y transición energética," *Rev. Univ. Geogr.*, vol. 30, no. 1, pp. 107–132, 2021, doi: 10.52292/j.rug.2021.30.1.0018.
- [4] A. V. Rendón, "Oportunidades en el uso de tecnología blockchain para el mercado de energía en Colombia," p. 132, 2021, [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80785>.
- [5] O. Segura-Bonilla and J. Hernández-Milián, "Aspectos conceptuales y metodológicos para la construcción de un Índice de Ciudades Inteligentes y Sostenibles," *Cuad. Política Económica*, 2021.

- [6] A. Sleisz, D. Divenyi, P. Sores, and D. Raisz, "Performance Comparison of Integrated Formulations for European Electricity Market Clearing," *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2022-Septe, no. 864274, pp. 0–5, 2022, doi: 10.1109/EEM54602.2022.9921009.
- [7] D. Plata, "Estudio de la implementación de la tecnología blockchain en un sistema low voltage distribution loop," 2020.
- [8] S. Galera, "CAMBIO DE MODELO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: ¿OTRO TREN QUE PASARÁ?," pp. 1–20, 2021.
- [9] Secretaría de Estado de Energía, *Estrategia de Almacenamiento Energético*. 2021.
- [10] J. D. Mercado-bautista, B. F. Chere-quión, and A. J. Martínez-peralta, "Impactos de la generación distribuida en la red inteligente: un análisis documental Introducción El objetivo principal de este capítulo es proporcionar los antecedentes esenciales de la generación distribuida y los desarrollos recientes en tecnologías de," vol. 3, pp. 593–609, 2022.
- [11] D. Gómez, "Mercados Minoristas Alternativos en el Mercado Eléctrico Colombiano," p. 55, 2020.
- [12] R. Silva, "DESARROLLO DE APLICACIÓN BLOCKCHAIN PARA PROYECTOS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN CHILE," vol. 2, no. 1, pp. 1–19, 2019.
- [13] V. Ahlqvist, P. Holmberg, and T. Tangerås, "A survey comparing centralized and decentralized electricity markets," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 40, 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100812.
- [14] J. P. García, "La tecnología blockchain como una herramienta para mejorar la estructura y funcionamiento de los mercados eléctricos," 2021.
- [15] D. Messina, R. Contreras, L. René, and S. Pavez, "Tendencias en materia de digitalización del sector eléctrico," *CEPAL*, pp. 1–36, 2022, [Online]. Available: www.cepal.org/apps.
- [16] T. Belalcázar, "DEMANDA EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO," 2020.
- [17] L. A. Flores Becerra, "Transversalidad de la administración pública, nuevo concepto para ubicar dependencias y entidades atípicas del sector eléctrico mexicano," *RICSH Rev. Iberoam. las Ciencias Soc. y Humanísticas*, vol. 9, no. 17, pp. 1–26, 2019, doi: 10.23913/ricsh.v9i17.184.
- [18] F. Barrera, A. Escobar, M. Manguashca, and H. Rudnick, "Misión para la Transformación Energética-1-Documento Foco 5: Institucional y Regulatorio Misión de transformación energética," pp. 1–36.
- [19] T. Lomane, A. Mahnitko, K. Berzina, and I. Zicmane, "Designing an electrical network configuration to improve the efficiency of electricity market," *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2018-June, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/EEM.2018.8469907.
- [20] S. Liu *et al.*, "Empirical evidence for the edge of a centralized regional market over a cross-province balancing market in allocating electricity resources: A case study of Yunnan in China," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 911–921, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.219.
- [21] E. Hernández-Mayoral *et al.*, "A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources," *Sustainability*, vol. 15, no. 12, p. 9847, 2023, doi: 10.3390/su15129847.
- [22] A. Li, "Centralization or decentralization: Divergent paths of governing offshore wind between China and Japan," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 84, no. November 2021, p. 102426, 2022, doi: 10.1016/j.erss.2021.102426.
- [23] S. Thapar, "Centralized vs decentralized solar: A comparison study (India)," *Renew. Energy*, vol. 194, pp. 687–704, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.05.117.
- [24] S. G. Rodrigo and M. O. García, "Energía más allá del mercado," 2022.
- [25] K. Lichtenegger *et al.*, "Decentralized heating grid operation: A comparison of centralized and agent-based optimization," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 21, p. 100300, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100300.
- [26] J. C. O. ROJAS, E. R. ARCHUNDIA, S. A. C. VILLANUEVA, and ..., "Propuesta de Mercado Eléctrico Minorista Transactivo en México," *Identidad Energ.*, pp. 11–17, 2019, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/61575898/propMerElectMinoristaTransMexico20191221-98288-1iftubh.pdf>.
- [27] E. González, D. Gualotuña, and J. F. Quinteros Flores, "Diseño de una Micro-Red óptima mediante el uso del recurso solar fotovoltaico en la Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur, utilizando el software HOMER PRO," *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 2, pp. 109–123, Nov. 2022, doi: 10.33412/idt.v18.2.3647.
- [28] J. F. Quinteros Flores, S. F. Yáñez, G. A. Mendoza, and E. A. Vaca, "Diseño óptimo de una micro-red para maximizar la generación de potencia eléctrica en Paragachi y Wildtecsa modelado en Homer Pro," *I+D Tecnológico*, vol. 19, no. 2, pp. 5–14, Jul. 2023, doi: 10.33412/idt.v19.2.3753.
- [29] E. Ramos, "La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación," *Forseti Rev. Derecho*, vol. 8, no. 11, pp. 7–35, 2020, doi: 10.21678/forseti.v8i11.1255.
- [30] A. Sergeant, "Los mercados eléctricos a la hora de la transición energética en perspectiva comparada," *Rev. Econ. Y DESAFÍOS DEL Desarro.*, vol. 1, 2022, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/361376150%0ALos>.
- [31] L. Li and S. Zhang, "Techno-economic and environmental assessment of multiple distributed energy systems coordination under centralized and decentralized framework," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 72, no. January, p. 103076, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103076.
- [32] J. C. Agrela, I. Rezende, and T. Soares, "Analysis of battery energy storage systems participation in multi-services electricity markets," *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol.

- 2022-Septe, no. Norte 2020, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/EEM54602.2022.9921164.
- [33] J. J. González and Á. Cardena, “Mercado eléctrico en Colombia: transición hacia una arquitectura descentralizada,” *FEDESARROLLO*, 2018.
- [34] J. Correa Lopez, “Asignación Óptima de Recursos Energéticos a través de Algoritmo Húngaro y Bipartite Matching para Respuesta a la Demanda en Microredes,” p. 34, 2019, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16689/1/UPS-ST003878.pdf>.
- [35] C. A. Beltran Padilla, “Smart Grid: Rompiendo el pensamiento de una red centralizada,” 2023.
- [36] S. Díaz, Y. Gómez, J. Silva, and E. Noriega, “Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de America Latina,” *Espacios*, vol. 38, no. 58, pp. 22–33, 2017.
- [37] J. D. García Hernández, “Antecedentes para la constitución de un mercado eléctrico descentralizado en Colombia,” 2020.
- [38] J. B. Bejerano, “Mercados eléctricos ante la transición energética: diseño y retos de futuro,” *Presup. y Gasto Público*, no. 97, pp. 177–192, 2019.