



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Mercado eléctrico PJM (Pensilvania-Jersey-Maryland)

Didier Montoya Echavarría

Diego Alejandro Cortés Córdoba

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Eficiencia Energética

Docente

Fernando Villada Duque, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Eficiencia Energética

Medellín, Antioquia, Colombia

2025



Cita

Cortés Córdoba y Montoya Echavarria [1]

Referencia

Estilo IEEE (2020)

- [1] D.A. Cortés Córdoba y D. Montoya Echavarria, “Mercado eléctrico PJM (Pensilvania-Jersey-Maryland)”, Trabajo de grado especialización, Especialización en Eficiencia Energética, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.



Especialización en Eficiencia Energética, Cohorte III.

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. JUSTIFICACIÓN.....	11
III. OBJETIVOS.....	12
A. Objetivo general	12
B. Objetivos específicos.....	12
IV. MARCO TEÓRICO.....	13
A. Mercados eléctricos.....	13
B. Mercado Spot.....	13
C. Mercado futuro	14
D. Mercado eléctrico PJM.....	14
E. Comisión federal reguladora de energía (FERC)	14
F. Organizaciones regionales de transmisión (RTO)	14
G. Operadores de sistemas independientes (ISO).....	15
H. La interconexión del este (Eastern Intrerconnection).....	16
I. Mercado de energía del día siguiente.....	16
J. Mercado de energía en tiempo real.....	17
K. Precios marginales locales de energía (LMP)	17
V. METODOLOGÍA	19
VI. DESARROLLO DEL TRABAJO	20
A. Descripción del sistema eléctrico de Estados Unidos	20
B. Características del mercado eléctrico	21
1) Mercado mayorista:	22

2) Mercado minorista:	22
C. Mercado eléctrico PJM (Pensilvania-Jersey-Maryland).....	23
1) Empresas PJM:	24
2) Generación de energía eléctrica en PJM.....	24
D. Mercado de energía en PJM.	25
1) Mercado del día siguiente:.....	25
2) Mercado en tiempo real:	25
E. Mercado de capacidad en PJM.	28
1) Funcionamiento del mercado de capacidad:.....	28
F. Mercados de servicios auxiliares	30
1) Mercado de regulación:	30
a) Señales de regulación:.....	31
2) Mercado de reservas:	31
a) Reserva de operación:	32
b) Reserva Primaria:.....	32
c) Reserva Sincronizada:.....	32
d) Reserva de Arranque Rápido (Quick Start):	32
e) Reserva Suplementaria:.....	32
G) Instrumentos financieros	32
1) Futuro de electricidad:	32
2) Swaps de energía:	33
3) Derechos de transmisión financiera (FTR):.....	33
a) Cálculo del valor de un FTR:	34
H. Transición energética en PJM	34
VII. CONCLUSIONES	36

REFERENCIAS38

LISTA DE TABLAS

TABLA I RESUMEN DE EMPRESAS PJM Y SUS FUNCIONES24

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Interconexiones eléctricas de América del Norte .	16
Fig. 2. Operadores del sistema eléctrico de Estados Unidos.	21
Fig. 3. Ilustración de mercado eléctrico.	22
Fig. 4. Mapa del territorio atendido por PJM.	23
Fig. 5. Todas las fuentes de generación eléctrica en PJM.	24
Fig. 6. Generación renovable en PJM.	25
Fig. 7. Mercado del día siguiente / Mercado en tiempo real.	26
Fig. 8. Diagrama de interacción entre el Mercado del Día Anterior y el Mercado en Tiempo Real, adaptado de una imagen generada por IA mediante ScholarGPT, 2025.	27
Fig. 9. Curva de demanda variable.	29
Fig. 10. Concepto de fluctuaciones en el consumo de energía que la regulación estabiliza instantáneamente.	31
Fig. 11. Riesgo de adecuación de recursos.	35

RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad conocer y profundizar en el funcionamiento del mercado eléctrico PJM en Estados Unidos, en el contexto de la asignatura de mercados eléctricos de la Especialización en Eficiencia Energética de la Universidad de Antioquia. PJM Interconnection opera uno de los mercados más complejos y avanzados a nivel internacional, lo que lo convierte en un referente clave para el estudio académico de sistemas eléctricos.

La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica y técnica, a la vez complementada con la consulta de información oficial en el portal de PJM. Se abordan temáticas como la estructura organizativa, los mercados de energía, capacidad, servicios auxiliares y los derechos financieros de transmisión.

Los resultados muestran un sistema altamente estructurado, con mecanismos eficaces de balance, sostenibilidad del suministro y participación de diversos agentes. Se concluye que el modelo PJM ofrece valiosos aprendizajes sobre eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad en mercados eléctricos a gran escala.

Palabras clave — Mercado PJM, interconexión PJM, mercado de energía, mercado de capacidad, servicios auxiliares, derechos financieros de transmisión, precios marginales locales (LMP).

ABSTRACT

The purpose of this paper is to understand and delve deeper into the functioning of the PJM electricity market in the United States, within the context of the electricity markets course in the Energy Efficiency Specialization at the University of Antioquia. PJM Interconnection operates one of the most complex and advanced markets internationally, making it a key reference for the academic study of electricity systems.

The research was conducted through a systematic review of scientific and technical literature, complemented by a consultation of official information on the PJM website. Topics covered include organizational structure, energy markets, capacity, ancillary services, and financial transmission rights.

The results show a highly structured system with effective balancing mechanisms, supply sustainability and the participation of various stakeholders. In conclusion, the PJM model offers valuable lessons on efficiency, reliability, and sustainability in large-scale electricity markets.

***Keywords* — PJM Market, PJM interconnection, energy market, capacity market, ancillary services, financial transmission rights, local marginal prices (LMP).**

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los mercados eléctricos se establece como una herramienta clave para comprender el funcionamiento de los sistemas energéticos, de manera especial en contextos donde la operación del sistema y la asignación eficiente de recursos energéticos se gestionan a través de mecanismos de mercado. Dichos sistemas permiten coordinar la generación, el consumo y la transmisión de electricidad mediante reglas y estructuras que buscan garantizar la confiabilidad y sostenibilidad del suministro, la eficiencia económica y la participación de múltiples agentes.

En el marco de la asignatura de mercados eléctricos, perteneciente a la Especialización en Eficiencia Energética de la Universidad de Antioquia, surge el interés por conocer y profundizar en el funcionamiento del mercado eléctrico PJM en Estados Unidos. Este mercado, operado por PJM Interconnection, se reconoce a nivel internacional por su nivel de desarrollo, complejidad operativa y capacidad para integrar distintos productos y servicios que permiten mantener el equilibrio entre oferta y demanda en tiempo real, asegurar la sostenibilidad del sistema y promover la competencia.

El objetivo general de este trabajo es conocer y profundizar en el funcionamiento del mercado eléctrico PJM en Estados Unidos, abordando su estructura, mecanismos de operación y componentes fundamentales, en el marco del estudio académico de la materia de mercados eléctricos. Para cumplir con dicho propósito, se desarrollará una revisión sistemática de literatura, a través de la cual se recopilará, analizará y sintetizará información proveniente de fuentes académicas, técnicas y oficiales especializadas en el tema.

Con este proceso investigativo, se espera construir una visión integral sobre la forma en que opera el mercado PJM, incluyendo la participación de los diferentes agentes, la conformación de precios, la función del mercado de capacidad, la regulación de los servicios auxiliares y el uso de instrumentos financieros de transmisión. El producto final de este trabajo aportará a la consolidación del conocimiento sobre mercados eléctricos en contextos internacionales y servirá como referente para fortalecer la comprensión teórica y aplicada dentro del ámbito académico de la eficiencia energética.

II. JUSTIFICACIÓN

En el contexto del estudio de los mercados eléctricos, es importante conocer experiencias internacionales que han logrado consolidar estructuras eficientes, dinámicas y confiables para la operación y comercialización de energía. El mercado eléctrico PJM que se ubica en la región noreste de los Estados Unidos, representa uno de los ejemplos más complejos y evolucionados en cuanto a la gestión de mercados mayoristas de electricidad. Por esta razón ha sido seleccionado como objeto de estudio para realizar el presente trabajo de fin de materia.

El interés por ahondar en el funcionamiento del mercado eléctrico PJM surge de su relevancia internacional, no solo por su tamaño y nivel de integración, sino también por los mecanismos avanzados que utiliza para garantizar el equilibrio entre oferta y demanda, la confiabilidad del sistema, la formación eficiente de precios y la participación de múltiples agentes. Estudiar este modelo permite identificar elementos estructurales, económicos y regulatorios que han sido clave en su desarrollo y estabilidad del servicio a lo largo del tiempo.

La elección del tema responde también a la necesidad de ampliar nuestra perspectiva de sobre cómo operan los mercados eléctricos en diferentes contextos nacionales, institucionales y tecnológicos. En la asignatura se ha abordado el caso colombiano y al incorporar el análisis de un mercado como PJM nos permite contrastar estructuras de gobernanza, mecanismos de coordinación y enfoques regulatorios en otros escenarios.

El aporte principal de este trabajo se encuentra en el fortalecimiento del conocimiento teórico respecto a la organización, operación y evolución de los mercados eléctricos. En términos académicos y científicos, ofrece una sistematización de información relevante sobre el mercado PJM, basada en fuentes confiables y actualizadas, que puede servir como base para futuras investigaciones y como referencia para el análisis comparativo entre distintos modelos de mercado.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Conocer y profundizar en el funcionamiento del mercado eléctrico PJM en Estados Unidos, abordando su estructura, mecanismos de operación y componentes fundamentales, en el marco del estudio académico de la materia mercados eléctricos de la Especialización en Eficiencia Energética de la Universidad de Antioquía.

B. Objetivos específicos

- Describir como se compone y está organizado el mercado PJM.
- Profundizar en los mecanismos de formación de precios y modalidades de operación del mercado PJM, incluyendo los mercados de energía, capacidad, servicios auxiliares y derechos de transmisión.
- Explicar el funcionamiento de los instrumentos de coordinación y regulación que garantizan la confiabilidad y eficiencia del sistema PJM.
- Comprender la relevancia del mercado PJM como referente internacional en la evolución de los mercados eléctricos.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Mercados eléctricos

Los mercados eléctricos son sistemas complejos donde se intercambia y vende electricidad mediante mecanismos competitivos, con el principal objetivo de garantizar la asignación eficiente de recursos de generación, transmisión y distribución de energía. Dichos mecanismos están diseñados para coordinar a múltiples actores que hacen parte de un mercado eléctrico, tales como: generadores, comercializadores, distribuidores, operadores y consumidores, mediante un marco regulatorio que asegura la estabilidad, la confiabilidad y la eficiencia del suministro eléctrico[1].

Los mercados eléctricos comprenden dos componentes principales: el mercado de energía y el mercado de capacidad. El mercado de energía determina el despacho de la generación y los precios de la electricidad a corto plazo, por otro lado, el mercado de capacidad se encarga de asegurar que exista la infraestructura suficiente para cubrir la demanda futura, en particular cuando haya momentos de máxima carga. Este último componente es fundamental para incentivar la inversión en generación firme que no necesariamente es rentable solo con ingresos del mercado de energía, debido a los límites regulatorios en los precios mayoristas y a la inelasticidad de la demanda [2].

Inicialmente los mercados eléctricos han sido estructurados principalmente para optimizar la operación de tecnologías de generación convencionales (en base a combustibles fósiles) y para asegurar el despacho económico de estas fuentes de generación en función de sus costos marginales de producción. Sin embargo, en el mundo actual, donde se encuentra en auge la transición energética hacia fuentes renovables, este diseño de mercado se enfrenta a limitaciones importantes, a causa de la naturaleza variable, descentralizada y de bajo costo marginal de estas tecnologías emergentes [1].

B. Mercado Spot

Es un mercado en el cual los bienes tangibles se encuentran disponibles para entrega inmediata [3], [4].

C. Mercado futuro

Es un mercado en el cual se adquieren compromisos contractuales que obligan a comprar o vender una cantidad específica de un activo subyacente a un precio que se acordó previamente y en una fecha futura que se ha establecido, conocida como fecha de entrega[3].

D. Mercado eléctrico PJM

El mercado eléctrico operado por PJM Interconnection es uno de los sistemas más avanzados y completos a nivel mundial, está diseñado para garantizar un suministro de electricidad eficiente, confiable y económicamente competitivo en el este de los Estados Unidos. Funciona mediante la operación de mercados mayoristas organizados, principalmente el mercado de energía en tiempo real, el mercado a día adelantado y el mercado de capacidad. Estos mercados permiten a generadores y compradores interactuar a través de mecanismos de oferta y demanda, apoyándose en un modelo de precios marginales locales (LMP) que refleja tanto el costo de producción, así como también las condiciones técnicas de la red en distintas ubicaciones geográficas[5].

El sistema del mercado PJM no solo promueve la eficiencia económica, sino que también tiene como objetivo asegurar la confiabilidad del sistema eléctrico a largo plazo, incluyendo mecanismos para garantizar la capacidad futura. PJM ha evolucionado para integrar nuevas tecnologías como energías renovables, almacenamiento y recursos distribuidos, los cuales representan grandes desafíos técnicos y de regulación. A pesar de ello PJM, trabaja en adaptar su diseño de mercado para enfrentar la transición energética y mantener un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y seguridad del suministro[5].

E. Comisión federal reguladora de energía (FERC)

La comisión Federal Reguladora de energía (FERC, por sus siglas en inglés), es una agencia independiente del gobierno de los Estados Unidos que regula la transmisión interestatal de electricidad, gas natural y petróleo en este país. Adicionalmente, la FERC regula los proyectos hidroeléctricos y las terminales de gas natural[6].

F. Organizaciones regionales de transmisión (RTO)

Las Organizaciones Regionales de Transmisión (RTO, por sus siglas en inglés) se crearon en Estados Unidos por mandato de la FERC mediante la Orden 2000, con el fin de mejorar la

eficiencia, confiabilidad y equidad del sistema eléctrico. Son entidades independientes que operan redes de transmisión a gran escala, gestionando el acceso abierto y no discriminatorio, además hacen que los mercados mayoristas sean competitivos[7]. Estas organizaciones se encargan de coordinar el despacho de generación, administrar la congestión de la red y planificar la expansión del sistema[8].

Las RTO reemplazan el modelo tradicional de operadores locales fragmentados y resuelven problemas como la congestión y los conflictos de interés. Estas entidades deben cumplir con criterios clave como independencia, cobertura regional adecuada y responsabilidad en la operación eficiente de la red. Las RTO han demostrado ser fundamentales para integrar nuevas tecnologías, mejorar la competitividad y garantizar la estabilidad del sistema eléctrico estadounidense[7] [8].

G. Operadores de sistemas independientes (ISO)

Los Operadores de Sistemas Independientes (ISO, por sus siglas en inglés) son entidades quienes se encargan de la coordinación, control y supervisión de las redes eléctricas en regiones determinadas de los Estados Unidos. Su función principal es garantizar el despacho eficiente y confiable de la electricidad, respetando las restricciones físicas del sistema y promoviendo la competencia en los mercados mayoristas de energía. Estas organizaciones se crearon en el contexto de la desregulación del sector eléctrico, con el objetivo de separar la operación de la red de la propiedad de los activos de generación, lo cual permitió un acceso abierto y no discriminatorio a la infraestructura de transmisión[9].

Un aspecto clave de los sistemas ISO es que no solo operan como sistemas eléctricos, sino que también utilizan herramientas económicas y algorítmicas avanzadas para lograr un equilibrio entre oferta y demanda dentro del mercado, lográndolo hacer incluso en condiciones de información incompleta y dinámica[9].

H. La interconexión del este (*Eastern Interconnection*)

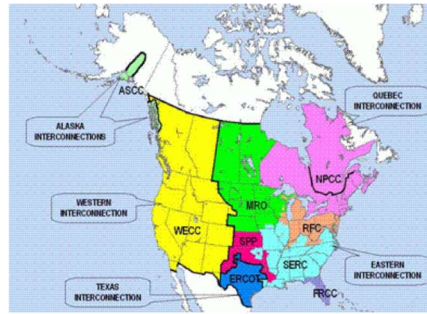


Fig. 1. Interconexiones eléctricas de América del Norte [10].

La Interconexión del Este es una de las principales redes eléctricas de Norte América, la cual abarca desde el centro de Canadá hasta la costa atlántica de Estados Unidos y desde Florida hasta el pie de las Montañas Rocosas (excluyendo Texas y Quebec). Todas las empresas eléctricas pertenecientes a esta red están sincronizadas a 60 Hz, lo que permite una operación conjunta y estable en condiciones normales del sistema[10].

Con el fin de planificar el desarrollo futuro de esta interconexión, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés) respalda a entidades como el *Eastern Interconnection Planning Collaborative* y el *Eastern Interconnection States' Planning Council*. Estas organizaciones trabajan en conjunto para analizar escenarios energéticos de largo plazo, estimar necesidades de transmisión y diseñar planes integrados que aseguren la confiabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico regional[10].

I. Mercado de energía del día siguiente

El mercado de energía del siguiente día es una metodología en la cual generadores y compradores de electricidad presentan la oferta y la demanda de este bien, para cada hora del día siguiente. Su principal función es anticipar el despacho de energía mediante una programación óptima que toma en cuenta los costos de generación, las restricciones de la red eléctrica y la disponibilidad. Lo que permite a los operadores del sistema planificar con mayor precisión, y a la vez reducir riesgos y mejorar la confiabilidad del suministro[5].

J. Mercado de energía en tiempo real

El mercado de energía en tiempo real es un sistema de operación eléctrica que ajusta el despacho y los precios de la electricidad en intervalos cortos, normalmente cada 5 minutos, con base en las condiciones actuales de demanda, oferta y red. El principal objetivo es mantener el equilibrio instantáneo entre generación y consumo, lo que permite actuar oportunamente frente a imprevistos como fallas, cambios en la demanda o variabilidad que se da en las fuentes de generación, entre ellas las renovables, en las cuales la generación no es continua. Este tipo de mercado es un complemento al mercado de energía del siguiente día, que corrige desviaciones y optimiza el uso de los recursos disponibles, garantizando una operación confiable y eficiente del sistema eléctrico en tiempo real[5].

K. Precios marginales locales de energía (LMP)

Los precios marginales locales (LMP, por sus siglas en inglés) son la base de los mercados eléctricos en países como Estados Unidos y representan el costo incremental de suministrar una unidad adicional de energía eléctrica en un nodo específico (punto específico de la red), considerando todas las restricciones físicas de la red eléctrica, tales como las pérdidas de transmisión y la congestión[11].

Matemáticamente, los LMP se obtienen de la solución dual del problema de despacho económico con restricciones de seguridad (SCED, por sus siglas en inglés), cuyo propósito es minimizar el costo total de la generación:

$$\min_P C^T P \quad (1)$$

Sujeto al balance de potencia, los límites de transmisión y la generación.

El precio marginal en un nodo i se calcula como sigue[11]:

$$\lambda_i = \lambda - \frac{\partial \text{Loss}}{\partial P_i} \lambda + \sum_{k=1}^K T_{ik} \mu_k \quad (2)$$

Donde:

- λ , costo de la energía base,
- $\frac{\partial \text{Loss}}{\partial P_i}$, el impacto de las pérdidas,
- y $T_{ik} \mu_k$, la congestión de la red[11].

Los LMP se pueden descomponer en tres componentes: energía base, pérdidas marginales y congestión. Los cuales deben ser tenidos en cuenta de manera conjunta para liquidaciones[11].

Los precios marginales locales tienen dos enfoques de cálculo[11]:

- Ex ante: antes de la operación.
- Ex post: después de la operación real.

Los LMP no solo son indispensables para cálculos de los precios de la energía, sino que también son fundamentales para gestionar instrumentos financieros como los Derechos de transmisión Financiera (FTR), permitiendo reflejar las limitaciones físicas del sistema en los costos calculados[11].

V. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación se desarrollará mediante una revisión sistemática de literatura, enfocada en conocer y profundizar el funcionamiento del mercado eléctrico PJM de Estados Unidos. La metodología empleada se basa en la recopilación, análisis y síntesis de información proveniente de fuentes académicas y técnicas especializadas.

En primer lugar, se realizará una búsqueda sistemática en bases de datos científicas y académicas, tales como IEEE Xplore y Scopus, utilizando palabras clave como “PJM Interconnection”, “electricity markets”, “capacity market”, “ancillary services” y “transmission rights”. Esta búsqueda permitirá identificar artículos relevantes, estudios de caso y análisis regulatorios relacionados con el funcionamiento del mercado PJM.

Como complemento y apoyo, también se llevará a cabo una búsqueda de información en la web, en fuentes oficiales y de libre acceso, con especial énfasis en el portal institucional de PJM Interconnection (<https://www.pjm.com/>), donde se encuentra disponible documentación clave y oficial sobre sus mecanismos de operación, estructura de mercados, informes y datos actualizados.

También se consultarán documentos de organismos reguladores, informes gubernamentales y publicaciones de organismos internacionales relacionados con la operación de sistemas eléctricos y mercados de energía.

El análisis de la información estará enfocado en categorizar y describir los distintos componentes del mercado PJM, tales como la organización institucional, los mercados de energía, capacidad, servicios auxiliares y los instrumentos de transmisión financiera. La información será sistematizada en función de su relevancia temática, claridad conceptual y aporte a los objetivos del trabajo.

VI. DESARROLLO DEL TRABAJO

A. Descripción del sistema eléctrico de Estados Unidos

El sistema eléctrico de Estados Unidos es uno de los más extensos, y diversificados del mundo. Está estructurado como una red interconectada de generación, transmisión y distribución que opera bajo una gobernanza mixta entre entidades federales y estatales, con amplia participación del sector privado y público[12].

Estados Unidos se divide en tres grandes interconexiones eléctricas:

- La Interconexión del Este (Eastern Interconnection): la cual abarca la mayor parte del territorio estadounidense.
- La Interconexión del Oeste (Western Interconnection): esta cubre los estados del oeste del país.
- La Interconexión de Texas (ERCOT): funciona casi de manera independiente del resto del país.

El sistema es operado por Organizaciones Regionales de Transmisión (RTO) y Operadores Independientes del Sistema (ISO), quienes gestionan el despacho de energía, la operación del sistema en tiempo real y la administración de los mercados mayoristas. Algunos de los más relevantes son: PJM Interconnection, MISO, NYISO, ISO New England, SPP, CAISO y ERCOT [12].

En términos de generación, el mix energético estadounidense es diverso. Predomina el gas natural, seguido de energía nuclear, carbón, eólica, solar e hidroeléctrica. El mercado opera en niveles mayorista y minorista, con subastas competitivas y contratos bilaterales. Los precios en los mercados spot se determinan mediante sistemas de despacho económico, basados en precios marginales locales (LMP) [12].

El sistema de transmisión de alta tensión está compuesto por múltiples compañías privadas y públicas, mientras que la distribución es gestionada principalmente por empresas de servicios (utilities) reguladas a nivel estatal [3].

Entre las entidades reguladoras clave se incluyen la Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC), que supervisa las transacciones interestatales, y la Corporación de Confiabilidad Eléctrica de América del Norte (NERC), que establece estándares obligatorios de confiabilidad. A nivel estatal, las comisiones públicas regulan la distribución y los servicios locales.

En Estados Unidos existen 10 operadores del sistema que cubren la demanda de energía eléctrica en todo el territorio estadounidense. Estas empresas de servicios públicos son las responsables de las operaciones y la administración del sistema, también proporcionan energía a los consumidores minoristas [3].



Fig. 2. Operadores del sistema eléctrico de Estados Unidos [13].

El sistema eléctrico de Estado Unidos se enfrenta a importantes desafíos, incluyendo la integración de energías renovables, el desarrollo de almacenamiento energético, la modernización de la infraestructura eléctrica, la electrificación de la demanda y la resiliencia frente a eventos climáticos extremos[14].

B. Características del mercado eléctrico

La electricidad, al igual que otros bienes, se compra, se vende y se comercializa en mercados mayoristas en unidades de MW y minoristas en KW, aunque con características técnicas y regulatorias particulares debido a su naturaleza como producto no almacenable y crítico para el desarrollo económico.

Se crearon mercados mayoristas eléctricos organizados para hacer frente a los precios cada vez más altos de energía y fomentar la innovación a través de la competencia de la libre empresa.

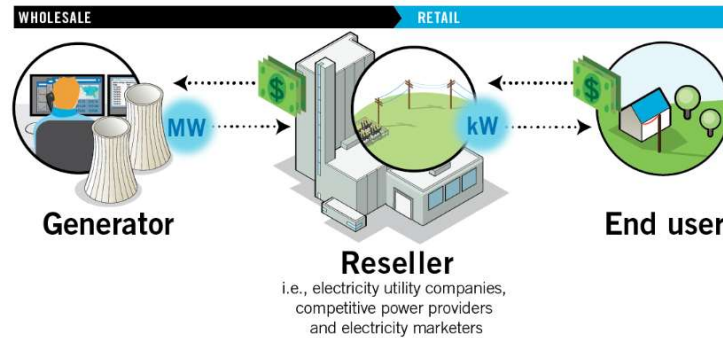


Fig. 3. Ilustración de mercado eléctrico [15].

1) Mercado mayorista:

El mercado mayorista de electricidad es el espacio donde los generadores venden energía a revendedores, como empresas de servicios públicos, comercializadores o proveedores competitivos, quienes posteriormente la suministran a los consumidores finales. En Estados Unidos, este mercado es regulado por la FERC, quien supervisa su funcionamiento para asegurar eficiencia, competencia y transparencia.

La energía puede venderse mediante contratos bilaterales o a través de mercados organizados, como el de PJM Interconnection. En estos mercados, los generadores ofertan precios a los que están dispuestos a suministrar electricidad. El operador del sistema despacha los recursos empezando por los más económicos hasta cubrir la demanda, fijando como precio final el de la última oferta aceptada, conocido como precio marginal.

Este proceso, llamado despacho por mérito económico, permite asignar los recursos de forma eficiente y reducir los costos del sistema. Además, ofrece señales de precio que orientan las decisiones de inversión y operación, contribuyendo a la modernización y confiabilidad del sistema eléctrico, aspectos fundamentales en el contexto de la transición energética [15].

2) Mercado minorista:

Se refiere a la etapa en la que la energía adquirida previamente en el mercado mayorista es vendida a los consumidores finales. En este entorno, los hogares, comercios e industrias contratan el suministro eléctrico a través de empresas de servicios públicos locales o proveedores minoristas competitivos.

En muchas regiones de Estados Unidos, los consumidores tienen la posibilidad de elegir entre diferentes proveedores, lo que fomenta la competencia y permite acceder a servicios más

ajustados a sus necesidades. Estos minoristas compran electricidad en el mercado mayorista y la revenden bajo condiciones reguladas (en el caso de las empresas de servicios) o de mercado libre (en el caso de proveedores competitivos), dependiendo del marco normativo de cada estado [15].

Este modelo complementa el mercado mayorista al asegurar la entrega eficiente de electricidad a nivel local, integrando la dinámica de precios, regulación y competencia al nivel del usuario final.

C. Mercado eléctrico PJM (Pensilvania-Jersey-Maryland)

PJM Interconnection es una Organización Regional de Transmisión (RTO), encargada de gestionar el movimiento de energía eléctrica al por mayor en gran parte de Delaware, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, Michigan, Nueva Jersey, Carolina del Norte, Ohio, Pensilvania, Tennessee, Virginia, Virginia Occidental y el Distrito de Columbia[13].

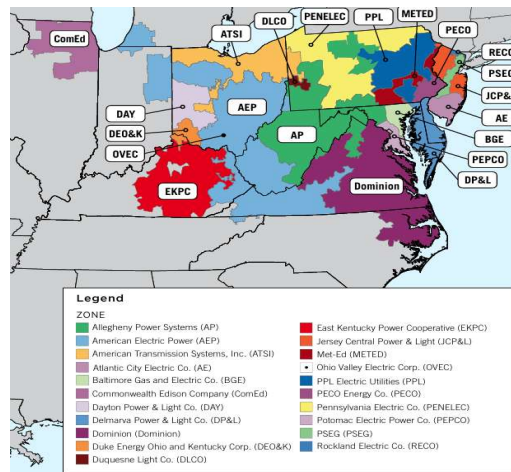


Fig. 4. Mapa del territorio atendido por PJM [13].

PJM es una organización neutral e independiente que opera el mercado mayorista de electricidad y administra la red de transmisión de alto voltaje para asegurar la confiabilidad del servicio a más de 65 millones de personas. A través de su planificación regional a largo plazo, identifica mejoras rentables y efectivas para el sistema eléctrico. Sus actividades son supervisadas por una junta independiente y se guían por una gobernanza colaborativa que respalda su visión de liderar la industria eléctrica en operaciones confiables, mercados eficientes y desarrollo de infraestructura [13].

1) Empresas PJM:

PJM Interconnection participa activamente en iniciativas internacionales y se apoya en un conjunto de subsidiarias especializadas que fortalecen sus funciones en el mercado eléctrico. Estas empresas se resumen en el siguiente tabla [14].

TABLA I
RESUMEN DE EMPRESAS PJM Y SUS FUNCIONES

Empresa	Función Principal
PJM Connex	Servicios de consultoría, capacitación y operación técnica para el sector energético global.
PJM EIS (Environmental Information Services)	Monitoreo y certificación de emisiones y energía renovable mediante GATS y AGCS.
PJM Settlement, Inc.	Gestión de liquidaciones del mercado, facturación, créditos y mitigación del riesgo de impago.
GO15	Colaboración internacional para fortalecer la seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico.

2) Generación de energía eléctrica en PJM

En el mercado eléctrico operado por PJM Interconnection, participan más de 1.400 generadores de electricidad que en conjunto, suman una capacidad instalada de 185 GW aproximadamente. Estos generadores abarcan una amplia gama de tecnologías, incluyendo plantas térmicas (carbón, gas natural, petróleo), nucleares, hidroeléctricas, eólicas, solares y otras fuentes renovables.

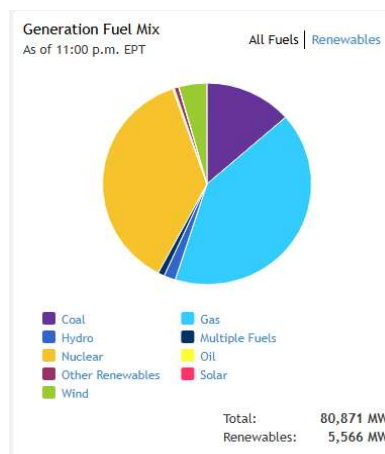


Fig. 5. Todas las fuentes de generación eléctrica en PJM [17].

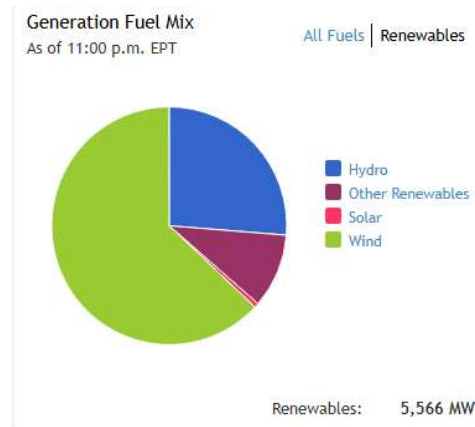


Fig. 6. Generación renovable en PJM [17].

D. Mercado de energía en PJM.

El mercado energía operado por PJM interconnection se estructura mediante un sistema de precios marginales locales (LMP), en el cual los generadores presentan ofertas de venta y los consumidores incluidos los comercializadores, empresas de servicios (utilities) y grandes consumidores industriales presentan solicitudes de compra [18].

Este mercado opera en dos niveles complementarios:

1) Mercado del día siguiente:

Funciona como un mercado financiero de programación anticipada, donde se determina despachos y precios para cada hora del día siguiente, las ofertas y demandas se procesan mediante un modelo económico que busca minimizar costos, respetando restricciones técnicas y de red.

2) Mercado en tiempo real:

Opera de manera continua, ajustando el despacho cada 5 minutos según las condiciones reales del sistema (cambios en demanda, generación disponible, fallas o congestiones). Este mercado compensa las diferencias entre lo programado y lo efectivamente entregado. [17], [19]”

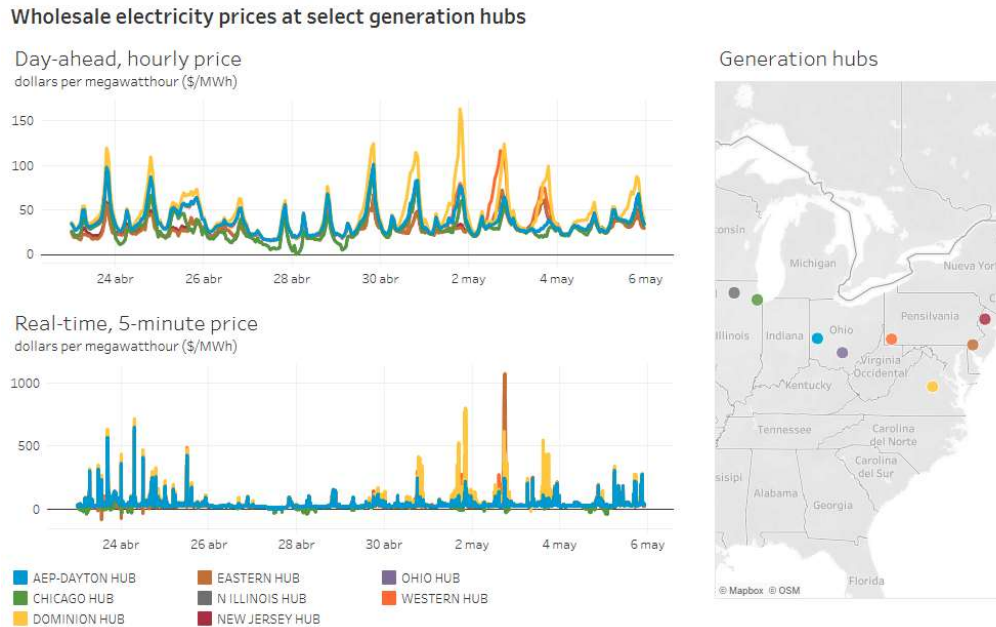


Fig. 7. Mercado del día siguiente / Mercado en tiempo real [20].

Ambos niveles están coordinados mediante un sistema de liquidación dual, en el que las diferencias entre lo programado y lo real se liquidan al precio marginal que corresponda. Este método es una forma de promover la eficiencia económica y garantiza la confiabilidad operativa del sistema [21].

La integración de estos dos mercados mediante precios LMP permite reflejar las condiciones físicas reales de la red (congestión, pérdidas, restricciones operativas) en los precios económicos, logrando señales eficientes para los participantes del mercado y reduciendo oportunidades de manipulación o arbitraje. Asimismo, el diseño incentiva la participación tanto en la planificación como en la operación real del sistema.

Este modelo, ampliamente adoptado como referencia en mercados eléctricos competitivos, combina elementos de planificación anticipada y flexibilidad operativa, lo cual lo convierte en un ejemplo sólido de diseño integral de mercado [18].

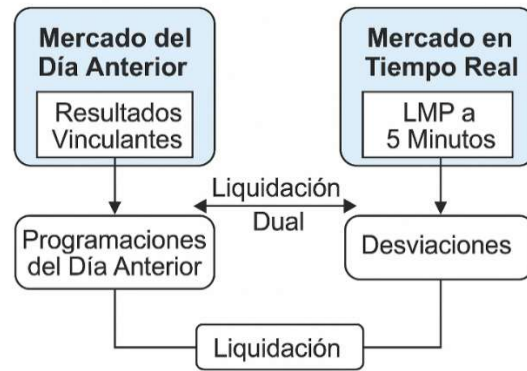


Fig. 8. Diagrama de interacción entre el Mercado del Día Anterior y el Mercado en Tiempo Real, adaptado de una imagen generada por IA mediante ScholarGPT, 2025.

En el mercado PJM, los precios de la electricidad en cada punto de la red se definen mediante el modelo de Precio Marginal Localizado (LMP). Este modelo contiene el costo real de entregar una unidad adicional de energía en un nodo específico del sistema, adicionando tanto las características económicas como físicas de la red eléctrica[11]. El LMP se calcula de acuerdo con la ecuación (2).

La importancia económica del LMP es que envía señales eficientes a los actores del mercado. Generadores con costos bajos en nodos con alto LMP tienen incentivos a producir más. Los consumidores pueden decidir reducir su consumo en horas o ubicaciones donde el LMP es elevado.

Adicionalmente el LMP da otras ventajas como:

- Promover inversiones en generación o almacenamiento donde más se necesitan.
- Mejorar la eficiencia general del sistema.
- Garantiza la operación segura y económica del sistema eléctrico.

PJM utiliza sistemas computacionales avanzados para[22]:

- Despachar generación en orden merito económico: es asignar la producción de electricidad a las plantas generadoras disponibles de menor a mayor costo variable, hasta cubrir la demanda eléctrica en un momento determinado, respetando las restricciones físicas del sistema.
- Monitorear la red en tiempo real.
- Determinar precios cada 5 minutos en tiempo real en más de 2000 nodos [22].

Un de los factores clave que determina el valor del LMP es la congestión eléctrica, la cual se presenta si el operador del sistema elige las unidades generadoras más baratas para cubrir la demanda total, sin importar su ubicación. Sin embargo, la red de transmisión tiene límites térmicos, de estabilidad y de seguridad, por lo que no siempre es posible transferir la energía desde donde se genera al menor costo hasta donde se necesita.

Cuando esas limitaciones impiden usar los recursos más baratos, se debe recurrir a generación más costosa en otras zonas. Esto da lugar a una diferencia en los precios LMP entre nodos, y se dice que la red está congestionada.

E. Mercado de capacidad en PJM.

El mercado de capacidad dentro de PJM es un componente diseñado con el fin de garantizar la disponibilidad futura de recursos energéticos, suficientes para satisfacer la demanda cuando se presenten picos o haya condiciones críticas, de esta manera se asegura la confiabilidad del sistema eléctrico[23].

Este mercado surge porque no siempre los ingresos del mercado de energía son suficientes para cubrir los costos fijos de inversión en nuevas plantas de generación. Si se cuenta únicamente con un mercado de solo energía no se podría incentivar de manera óptima la construcción de nuevos recursos, lo que pone en riesgo la confiabilidad del sistema[23]. Así, con el mercado de capacidad se tienen los siguientes objetivos:

- Incentivar nuevas inversiones.
- Asegurar la suficiencia de recursos con tres años de antelación.
- Proveer señales de precio que reflejen las condiciones locales de oferta y demanda[24].

1) Funcionamiento del mercado de capacidad:

El mercado de capacidad de PJM opera bajo el esquema Reliability Pricing Model (RPM), un mecanismo de subastas adelantadas, que consiste en:

- Subasta de base residual (BRA, por sus siglas en inglés, Base Residual Auction): anualmente se realiza en PJM una subasta donde se compra con tres años de antelación la capacidad necesaria para cubrir la demanda de electricidad pico estimada, más un margen de reserva, el cual generalmente está entre el 15% y el 20%.

- Curva de demanda variable (VRR, por sus siglas en inglés):

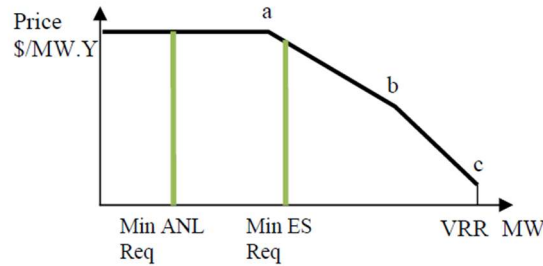


Fig. 9. Curva de demanda variable[24].

Esta curva representa la relación entre la capacidad disponible y el precio que los compradores están dispuestos a pagar. En la curva se observan 3 segmentos, el segmento plano representa la penalización a la escasez de capacidad con un precio alto de energía, el tramo inclinado (ab) nos muestra como el precio va disminuyendo conforme se alcanza la suficiencia de capacidad, y el tramo bajo del segmento (bc) llega hasta el precio mínimo si hay sobrecapacidad[24].

- Subastas incrementales (incremental auctions)

Este tipo de subastas permite ajustar la cantidad comprometida debido a cambios en la demanda proyectada o en la disponibilidad de recursos[5].

- Mercado Locacional (LDA, por sus siglas en inglés, Locational Deliverability Areas)

PJM divide su territorio en áreas de entrega local (LDA), debido a las limitaciones que se presentan en la transmisión de electricidad. Lo cual permite establecer precios distintos de capacidad en cada región, reflejando las condiciones reales de oferta y demanda[24].

En las subastas de RPM se incluyen recursos de generación, recursos de eficiencia energética (EE) y recursos de recuperación ante los desastres (DR), las dos primeras categorías se dice que son recursos ilimitados. Los recursos DR se pueden clasificar en tres categorías dependiendo de los tiempos máximos de interrupción y la duración máxima de una sola interrupción, de la siguiente manera[24].

- DR anual (ANL): disponible todo el año sin límite de interrupciones o debe mantener el nivel de reducción durante al menos un periodo de 10 horas.

- Verano extendido (ES): disponible de junio a octubre, durante el periodo de verano, sin límite de interrupciones. Se requiere mantener el nivel de reducción durante al menos un periodo de 10 horas.
- Limitado: se permiten hasta 10 interrupciones por año y máximo 6 horas cada interrupción.

F. Mercados de servicios auxiliares

Los servicios auxiliares en el sistema de transmisión eléctrico ayudan a mantener equilibrio entre generación y consumo. PJM opera a lo largo del día mercados para dos servicios clave: regulación y reservas. La regulación corrige pequeños desajustes entre la carga y la generación, por otro lado, las reservas logran recuperar el equilibrio ante pérdidas importantes, como la caída de un gran generador, manteniendo la frecuencia del sistema en 60 Hz.

1) Mercado de regulación:

El mercado de regulación es un servicio auxiliar que proporciona compensación económica a los recursos capaces de ajustar rápidamente su producción o consumo de electricidad para mantener el equilibrio de la red eléctrica. Su principal objetivo es corregir cambios de corto plazo en la demanda y generación, manteniendo el Área de Control del Error (ACE, por sus siglas en inglés). El ACE es la diferencia entre la generación eléctrica programada y la real, y además tiene en cuenta las variaciones de frecuencia del sistema[25].

La regulación mantiene el equilibrio entre la generación y la demanda de energía de:

- Ajuste de la frecuencia del sistema en 60 Hz.
- Seguimiento de las fluctuaciones instantáneas en el consumo de los clientes.
- Corrección de las fluctuaciones no deseadas en la generación (por ejemplo, desconexión de una gran unidad generadora).
- Gestión de diferencias entre el flujo de energía programado y el flujo real.

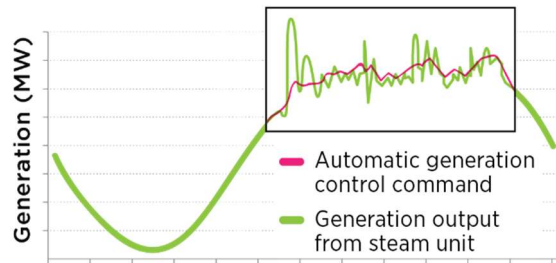


Fig. 10. Concepto de fluctuaciones en el consumo de energía que la regulación estabiliza instantáneamente[25].

a) Señales de regulación:

En PJM, existen dos tipos de señales de regulación:

- Regulación D: respuesta rápida ante fluctuaciones instantáneas.
- Regulación A: respuesta más lenta para corregir cambios de mayor duración.

Ambas señales trabajan juntas para estabilizar el sistema de forma eficiente, según las necesidades del momento.

Entre los recursos que actualmente participan en el mercado de regulación de PJM son [25]:

- Vapor.
- Turbinas de combustión.
- Hidroeléctricas.
- Almacenamiento en baterías.
- Respuesta a la demanda.

El mercado actualmente ha evolucionado con la inclusión de recursos energéticos distribuidos (como energía solar, eólica y almacenamiento en baterías), que permiten la operación de microrredes y la integración de nuevas tecnologías en el sistema eléctrico[25].

2) Mercado de reservas:

Las reservas de generación corresponden a los suministros de electricidad que no están siendo utilizados actualmente, sino que están disponibles para ser usados rápidamente en caso de una interrupción inesperada de la generación. Su función es similar a la de una llanta de repuesto: un recurso disponible para situaciones de emergencia[25].

Existen los siguientes tipos de reservas:

a) Reserva de operación:

Corresponde a la energía disponible en un máximo de 30 minutos. La cual proviene de generadores sincronizados a la red o que están fuera de línea, o de cargas que pueden ser retiradas del sistema (respuesta de la demanda).

b) Reserva Primaria:

Hace referencia a la energía que debe estar disponible en 10 minutos. Se obtiene a partir de generadores sincronizados a la red o fuera de línea o a través de cargas que se pueden desconectar de la red.

c) Reserva Sincronizada:

Potencia disponible en 10 minutos, obtenida de generadores ya hacen parte de la red o de cargas de respuesta a la demanda que pueden se desconectadas de la red.

d) Reserva de Arranque Rápido (Quick Start):

Energía que puede ser suministrada en 10 minutos por generadores que inicialmente están fuera de línea.

e) Reserva Suplementaria:

Energía disponible entre 10 y 30 minutos, proveniente tanto de generadores sincronizados o fuera de línea, como de cargas que pueden ser retiradas de la red.

Cada tipo de reserva cumple un papel esencial para garantizar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico frente a contingencias inesperadas[25].

G) Instrumentos financieros

1) Futuro de electricidad:

En los mercados eléctricos mayoristas organizados, los participantes enfrentan una alta volatilidad de precios debido a factores como variabilidad en la demanda, congestión de la red y fluctuaciones en los costos de generación. Para mitigar estos riesgos, existen instrumentos derivados estandarizados como los contratos a futuro financieros sobre electricidad, negociados en plataformas como la Intercontinental Exchange (ICE)[17].

Uno de los productos más utilizados es el PJM Western Hub Real-Time LMP Financial Futures, un contrato que permite a los participantes cubrirse frente a las variaciones del precio

marginal locacional (LMP) en tiempo real en una de las zonas más representativas del sistema PJM[17].

2) *Swaps de energía:*

Los swaps de energía son contratos financieros bilaterales que permiten a dos partes intercambiar flujos de pagos basados en precios fijos y variables de la electricidad durante un periodo acordado. Son ampliamente utilizados como mecanismos de cobertura de riesgo de precio en mercados como PJM, donde los precios (LMP) pueden experimentar alta volatilidad [17](cita).

3) *Derechos de transmisión financiera (FTR):*

Los derechos de transmisión financiera (FTR, por sus siglas en inglés) son instrumentos financieros que actúan como una protección para los actores del mercado frente al riesgo de variaciones en los precios de la electricidad a causa de congestiones en la red de transmisión[5]. Estos derechos no otorgan acceso físico a la red, no implican entrega física de energía, sino que representan un derecho financiero al ingreso, o un posible cargo (dependiendo), teniendo como base la diferencia de precios marginales de localización (LMP) entre el punto de origen y el punto de destino[5] [3].

Los FTR ayudan a reducir la volatilidad de precios para quienes transan energía en base a precios marginales locales (LMP), tal como se hace en el mercado PJM. Además fomentan un mercado más líquido y eficiente, porque permiten la gestión de riesgos sin necesidad de controlar físicamente la red[5].

Los FTR pueden ser adquiridos de diferentes maneras[5]:

- Subasta anual: los FTR son subastados para toda la capacidad de transmisión disponible de un año.
- Subastas mensuales: se ofrece la cantidad remanente después de la subasta anual.
- Subastas de largo plazo: hay FTR válidos hasta por tres años.
- Mercado secundario: los FTR se pueden comprar o vender bilateralmente entre los participantes.

a) Cálculo del valor de un FTR:

Cunado dentro de la red de transmisión existe congestión entre dos puntos (nodos), el titular recibe o paga un monto proporcional de la siguiente manera[3]:

Ecuación 1

$$C = Q \times (P_D - P_O) \quad (3)$$

Donde:

- Q , cantidad en MW del FTR,
- P_D , precio LMP en el nodo de destino, y
- P_O , precio LMP en el nodo de origen.

De esta manera, de acuerdo con la ecuación, hay un beneficio para el titular del FTR si el precio en el nodo de destino es mayor que el precio en el nodo de origen; por otro lado, hay un cargo para el titular del FTR si el precio en el nodo de destino es menor que en el nodo de origen[3].

H. Transición energética en PJM

Conforme al informe generado por PJM, Energy Transition en PJM: Resource Retirements, Replacement & Risks. la demanda eléctrica sigue creciendo, especialmente por el auge de los centros de datos y la electrificación de sectores industriales. El estudio publicado en 2023 por PJM analiza los riesgos asociados a la acelerada salida de generación térmica (principalmente carbón) y la entrada insuficiente de recursos renovables y almacenamiento.

Los hallazgos más destacados de este estudio son:

- Si la demanda de electricidad aumenta, más del 20% de los generadores de PJM aproximadamente 40GW corren el riesgo de retirarse para 2030.
- Los nuevos proyectos de generación renovable están completando el proceso de interconexión de PJM, pero muchos no se están construyendo debido a problemas de ubicación, financiación o cadena de suministros.
- Alrededor de 40GW de proyectos completaron el proceso de estudio de PJM, pero aún no habían pasado a la construcción de finales de año.

Como resultado de su investigación, PJM lanzó la iniciativa Garantizar una Transición Energética confiable, cuyo objetivo es preservar la confiabilidad del sistema eléctrico durante el proceso de descarbonización. Esta estrategia define preocupaciones clave, presenta análisis

técnicos y establece acciones concretas en las áreas de planificación, mercados y operaciones. La iniciativa continúa siendo una prioridad estratégica para PJM[26].



Fig. 11. Riesgo de adecuación de recursos [26].

VII. CONCLUSIONES

- El mercado eléctrico PJM representa uno de los modelos más avanzados y consolidados a nivel internacional en la gestión de sistemas eléctricos a gran escala. Debido a que su estructura operativa y regulatoria permite una asignación eficiente de recursos, garantiza la confiabilidad del sistema y promueve la competencia entre agentes.
- Con el estudio de los principales componentes de PJM (mercado de energía, mercado de capacidad, servicios auxiliares y derechos financieros de transmisión) se evidencia un alto nivel de coordinación técnica y económica, a través de procesos transparentes, reglas bien definidas y una participación del operador independiente del sistema.
- Con la revisión sistemática de literatura y la búsqueda de información en fuentes oficiales, como la página web de PJM, se identificó que el éxito del mercado PJM se encuentra fundamentado en la integración de mecanismos que responden de manera efectiva a la variabilidad de la demanda, la incorporación de tecnologías diversas y la necesidad de mantener el equilibrio en tiempo real.
- Se logra comprender la dinámica compleja y estructurada de las distintas operaciones del mercado eléctrico PJM, incluyendo sus servicios complementarios y su mecanismo de despacho, los cuales están interconectados a través del sistema de LMP. Este modelo asigna el valor económico dependiendo de la ubicación geográfica, la topología de la red y las restricciones operativas haciendo que en cada nodo se calcule no solo el costo marginal de generación, sino también las pérdidas técnicas y la congestión de la red de transmisión.
- La variabilidad del LMP en tiempo real y su coordinación simultánea con el mercado del día siguiente permite a PJM mantener un sistema flexible, competitivo y eficiente, en el cual el mercado puede responder a condiciones cambiantes con herramientas financieras y operativas adecuadas. El diseño nodal del mercado, en conjunto con instrumentos como los FTRs, los contratos a futuros y los swaps de energía, provee un entorno robusto para la gestión de riesgo y señalización económica de largo plazo, incentivando inversiones en infraestructura y nuevos recursos energéticos.
- Se logra entender que mediante la revisión sistemática de literatura sobre el mercado eléctrico de PJM opera con altos estándares de confiabilidad, eficiencia y adaptabilidad, abasteciendo a más de 65 millones de personas en los Estados Unidos. Adicional a esto su estructura ha servido de modelo de referencia internacional para la reforma de otros

mercados eléctricos en América Latina, Europa y Asia. Además de esto podemos comparar el mercado eléctrico PJM, con el sistema de nuestro país (XM S.A) y entender la gran importancia de tener un sistema que nos brinde confiabilidad y seguridad energética para el desarrollo y bienestar del país.

REFERENCIAS

- [1] «Repurposing Power Markets: The Path to Sustainable and Affordable Energy for All».
- [2] P. Cramton, A. Ockenfels, y S. Stoft, «Capacity Market Fundamentals», *Econ. Energy Environ. Policy*, vol. 2, n.º 2, abr. 2013, doi: 10.5547/2160-5890.2.2.2.
- [3] V. D. G. Vera y J. D. V. Henao, «Caracterización Sistemática de la Estructura de los Mercados de Derivados Eléctricos a Nivel Mundial», dic. 2013.
- [4] «PJM Learning Center - Energy Markets». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://learn.pjm.com/three-priorities/buying-and-selling-energy/energy-markets>
- [5] Zhenyu Fan, T. Horger, J. Bastian, y A. Ott, «An overview of PJM energy market design and development», en *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China: IEEE, abr. 2008, pp. 12-17. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523372.
- [6] «Federal Energy Regulatory Commission (FERC) | USAGov». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.usa.gov/agencies/federal-energy-regulatory-commission>
- [7] H. M. Merrill, «Regional transmission organizations: FERC Order 2000», *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 20, n.º 7, pp. 3-5, jul. 2000, doi: 10.1109/39.850428.
- [8] K. Kelly, «The value of large regional transmission organizations», en *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, New York City, NY, USA: IEEE, 2004, pp. 1012-1013. doi: 10.1109/PSCE.2004.1397597.
- [9] R. Singh, P. R. Kumar, y L. Xie, «Decentralized Control via Dynamic Stochastic Prices: The Independent System Operator Problem», *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 63, n.º 10, pp. 3206-3220, oct. 2018, doi: 10.1109/TAC.2018.2799899.
- [10] «Learn More About Interconnections», Energy.gov. Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/oe/learn-more-about-interconnections>
- [11] E. Litvinov, «Design and operation of the locational marginal prices-based electricity markets», *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, n.º 2, pp. 315-323, feb. 2010, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0046.
- [12] «Electricity in the U.S. - U.S. Energy Information Administration (EIA)».
- [13] J. D. Arias, «EVALUACIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MEM», *Com. Regul. Energ. GAS - CREG*, n.º DOCUMENTO IEB 1037-22-02, p. 62.
- [14] «Electricity Information Sharing and Analysis Center». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nerc.com/pa/CI/ESISAC/Pages/default.aspx>
- [15] «PJM - Territory Served». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pjm.com/about-pjm/who-we-are/territory-served>
- [16] «PJM - About PJM». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pjm.com/about-pjm/who-we-are>
- [17] «(PDF) Market-based transmission planning model in PJM electricity market», en *ResearchGate*, doi: 10.1109/EEM.2009.5207217.
- [18] A. L. Ott, «Experience with PJM market operation, system design, and implementation», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, n.º 2, pp. 528-534, may 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.810698.
- [19] R. Khatami y M. Parvania, «Continuous-Time Locational Marginal Price of Electricity», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129480-129493, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939366.

-
- [20] «PJM Interconnection (PJM) Wholesale Electricity Dashboard - U.S. Energy Information Administration (EIA)». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/electricity/wholesalemarkets/pjm.php>
- [21] W. W. Hogan, «Electricity Market Design and Zero-Marginal Cost Generation», *Curr. Sustain. Energy Rep.*, vol. 9, n.º 1, pp. 15-26, mar. 2022, doi: 10.1007/s40518-021-00200-9.
- [22] K. Neuhoff *et al.*, «EU power market reform toward locational pricing: Rewarding flexible consumers for resolving transmission constraints».
- [23] J. Bowring, «Capacity Markets in PJM», *Econ. Energy Environ. Policy*, vol. 2, n.º 2, abr. 2013, doi: 10.5547/2160-5890.2.2.3.
- [24] Ying Xiao y A. Engle, «Demand resource modeling in PJM capacity market», en *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA: IEEE, jul. 2012, pp. 1-7. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345733.
- [25] «PJM Learning Center - Ancillary Services Market». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://learn.pjm.com/three-priorities/buying-and-selling-energy/ancillary-services-market>
- [26] «PJM 2023 Annual Report». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://services.pjm.com/annualreport2023/>