

Energía transactiva: una revisión de conceptos y aplicaciones en el marco de la transición energética

Transactive Energy: An Overview of Concepts and Applications in the Energy Transition Context

David Erazo-Caicedo ^{1a}, Andrea Cusva-García ^{1b}, Nicanor Quijano ^{1c}, Guillermo Jiménez-Estévez ²

¹ Grupo de Investigación en Automatización para la Producción (GIAP), Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. Orcid: 0000-0001-8128-5527 ^a, 0009-0005-2904-7990 ^b, 0000-0002-8688-3195 ^c. Correo electrónico: e.erazo@uniandes.edu.co ^a, ac.cusva10@uniandes.edu.co ^b, nquijano@uniandes.edu.co ^c

² Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. Orcid: 0000-0002-8044-0713. Correo electrónico: ga.jimenez@uniandes.edu.co

Recibido: 12 agosto, 2023. Aceptado: 11 octubre, 2023. Versión final: 13 enero, 2024.

Resumen

La alta penetración de los recursos renovables distribuidos requiere estrategias de integración que aseguren un equilibrio entre oferta y demanda. La energía transactiva (ET) comprende un conjunto de mecanismos capaces de lograr este objetivo utilizando el valor como parámetro operativo. Este artículo presenta una revisión del estado del arte en TE, con el objetivo de proporcionar al lector una visión general de conceptos y aplicaciones. Para lograr esto, el documento ofrece una revisión de las estructuras operativas y de mercado, con un enfoque particular en el papel de TE en la composición de los mercados energéticos locales. Además, se propone un análisis del concepto de valor en energía como elemento de unión entre dos temas actuales de interés académico: los sistemas multi-energéticos y el nexo agua-energía-alimentos. Finalmente, se muestran algunos proyectos piloto internacionales y nacionales que permiten identificar la validez práctica de los conceptos descritos.

Palabras clave: energía transactiva; comunidades energéticas; nexo agua-energía-alimento, sistemas multi-energéticos; economía compartida; equilibrio de mercado; mercados energéticos locales; redes par-a-par; recursos energéticos distribuidos; fuentes no convencionales de energía renovable.

Abstract

The high penetration of distributed renewable resources requires integration strategies that ensure a balance between supply and demand. Transactive energy (TE) comprises a set of mechanisms capable of achieving this objective by using value as an operational parameter. This paper presents a review of the state of the art in TE, aiming to provide the reader with a general overview of concepts and applications. To accomplish this, the document offers a review of market and operational structures, with a particular focus on the role of TE in the composition of local energy markets. Furthermore, an analysis of the value concept in energy is proposed as a linking element between two current topics

of academic interest: multi-energy systems and the water-energy-food nexus. Finally, some international and national pilot projects are showcased, allowing for the identification of the practical validity of the concepts described.

Keywords: transactive energy; energy communities; water-energy-food nexus; multi-energy systems; sharing economy; market clearing; local energy markets; peer-to-peer; distributed energy resources; non-conventional sources of renewable energy.

1. Introducción

Según el departamento de energía de los Estados Unidos, la energía transactiva (ET) es un conjunto de mecanismos económicos y de control que permiten el equilibrio dinámico de oferta y demanda en una infraestructura eléctrica, utilizando el valor como parámetro operativo clave [1]. Ciertamente, el equilibrio entre oferta y demanda es un reto en la operación de los sistemas de potencia modernos. Esto se debe a tres cosas: primeramente, a la volatilidad y la disponibilidad de recursos como el eólico y el solar, que dificultan un despacho constante y planificado de energía eléctrica [2]. En los próximos años se espera un incremento en la penetración de tales fuentes de energía renovable para la producción de electricidad, con un crecimiento del 60% para el año 2050 [3]. En segundo lugar, al aumento paulatino de la demanda correspondiente a la electrificación de los sectores de calor y transporte [4]. Y, finalmente, a la descentralización de la producción energética en las redes inteligentes, que está reemplazando al esquema actual de las redes de distribución de energía, jerárquico y controlado de manera centralizada [5], [6]. Esto último se debe al auge de nuevos conceptos como microrredes, comunidades energéticas (CEs), plantas de generación virtual, agregadores, prosumidores, entre otros, que buscan acercar la generación a los lugares de consumo.

Así como los esquemas de operación, los paradigmas de mercados energéticos centralizados parecen quedar cortos, y la idea de mercados localizados, donde el producto a transar es la energía eléctrica (o la energía en general), empiezan a tomar relevancia. Los valores de cambio de esa energía que se transa dependerán de las leyes económicas de oferta y de demanda, pero también de su propia naturaleza que diferencian esta nueva mercancía de las otras. En [7], por ejemplo, se presenta una definición de mercancía como un conjunto de datos sobre la energía a ser transados en un mercado. Bajo estas condiciones nace el concepto de ET, como una solución para equilibrar la red en términos de oferta y demanda [8]. La ET es un enfoque de sistema de gestión de la energía (*energy management system*), en el cual se establece un mercado transactivo [2], donde la energía se puede intercambiar o comercializar entre prosumidores, consumidores, recursos energéticos distribuidos (REDs) en una microrred e incluso entre microrredes.

Garantizar el flujo de energía y el equilibrio entre oferta y demanda de forma centralizada no es muy fácil, debido a la propiedad sobre las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) y los recursos energéticos, que se espera estén distribuidos entre varios propietarios generadores o prosumidores. El uso de tecnologías actuales como *internet-of-things* (IoT) o *blockchain* permite la ejecución de transacciones energéticas manteniendo la privacidad sobre elementos como la capacidad instalada o el perfil de demanda de los propietarios [9]. Por lo tanto, la operación de sistemas de forma descentralizada suele tener ventajas sobre la optimización de recursos, y la seguridad respecto a la privacidad. Pero la aplicación de esquemas descentralizados, donde los interesados realizan transacciones de forma cada vez más independiente, requiere de la definición clara de las redes que conforman dichos actores y de las reglas con las cuales se relacionan.

Desde un punto de vista comercial, la relación de los actores en red se conoce como mercado energético local (MEL). Según los autores en [10], un MEL puede ser visto como un submercado energético, donde los participantes se integran con fines flexibles, tal como la gestión de restricciones, la optimización del portafolio y el equilibrio del sistema respecto a la oferta y la demanda de energía eléctrica. En palabras de los autores en [11], son mecanismos pensados para incentivar la participación proactiva de los usuarios en los mercados energéticos y la generación de valor económico. De esta última definición, tendría que analizarse si se trata de un mecanismo de incentivos o una potencial necesidad para integrar los sistemas modernos, ya que el concepto tiende a aplicarse con una gran versatilidad. Puede tratarse de la aplicación de mecanismos de respuesta a la demanda, como en [12], de integración de prosumidores al sistema de distribución [13], o la participación de prestadores de servicios diversos, como el almacenamiento [14].

Los MELs, como otros mercados, son el conjunto de relaciones comerciales que vinculan la oferta y la demanda de una mercancía en particular, en este caso, la energía eléctrica. Se trata de la apertura de un nuevo mercado, donde la relación sobre la propiedad se encuentra mayormente distribuida. A su vez, tiende a oponerse a las lógicas del mercado mayorista altamente monopolizado, en el sentido en que incentiva la adopción

de FNCER entre los usuarios finales. En este orden de ideas, la ET es el conjunto de mecanismos que hacen posible la relación económica entre comprador y vendedor de los recursos energéticos distribuidos. Para los autores en [4], la relación no se expresa precisamente así. Para ellos, la ET, así como las redes *peer-to-peer* (P2P), y lo que han llamado *community-self-consumption*, son diferentes manifestaciones o modelos de aplicación de los MELs. Los autores en [15] y [16], describen una relación entre los MELs y la TE mucho más acorde a la que aquí se mencionó. En [15], se describen estructuras de mercado enfocadas al modelo P2P, siendo este último las manifestaciones de los MELs en un ámbito operativo y transaccional.

Las redes P2P son comúnmente mencionadas en varios trabajos relacionados con ET [4], [10], [16], [17], [18]. Esto se debe a que el contexto de aplicación de ET, generalmente, es la realización de modelos de transacciones entre pares. Teniendo esta relación comercial, una independencia con agentes o entidades intermediarias [17]. Sin embargo, no toda actividad con fines comerciales se hace entre pares en el contexto de la energía transactiva. De acuerdo con la interacción entre los participantes o pares se identifican distintos tipos de mercados: i) mercado descentralizado; ii) mercado basado en la comunidad o centralizado; iii) mercado híbrido o distribuido [19].

Aunque se encuentra mucho el término de la ET y los MELs como incentivos para la adquisición de FNCER entre usuarios finales, su implementación mantiene la lógica del mercado. El fin último es la ganancia económica, y el flujo del beneficio que puede superar las mismas operaciones transactivas de los excedentes de generación, a la compra y venta de servicios adicionales, como el almacenamiento de energía o los servicios de red. Sin embargo, la naturaleza distribuida de la propiedad de los recursos energéticos en los MELs, ponen lógicas a la producción distintas a las de los mercados tradicionales. Un punto importante es la aplicación de conceptos como la economía compartida. En ella es posible que los individuos administren eficientemente los recursos comunes mediante la creación de instituciones *bottom-up*, donde se establecen reglas y se organiza el uso de los recursos compartidos para la sostenibilidad a largo plazo [20]. Esto hace que la definición del valor sea un parámetro fundamental en la aplicación de ET. El denominado *market clearing*, que se menciona en algunos trabajos de ET y redes P2P [4], [15], [16], consiste en el establecimiento de los precios de venta de la energía eléctrica que se establecen para mantener el balance entre la oferta y la demanda de energía. Este término se aplica ya hace tiempo en la teoría de mercados.

El valor como una medida unilateral del valor de cambio no es siempre una constante. Algunas veces, el impacto ambiental o social juegan un papel importante. Este concepto es más claro en las CEs, entidades legales basadas en la participación voluntaria de usuarios residenciales, pequeñas y medianas empresas y autoridades locales, con el objetivo principal de proporcionar beneficios ambientales, económicos o sociales en lugar de obtener ganancias financieras [21]. En este caso el beneficio implica la descripción del valor como un elemento que permite el intercambio energético, de modo tal que, el flujo de energía se realiza optimizando parámetros técnicos, económicos, ambientales o sociales. Y, siendo este beneficio un concepto más amplio que la ganancia, tiene sentido que la operación de las redes inteligentes trascienda hacia los sistemas inteligentes, es decir, sistemas compuestos por múltiples vectores energéticos [22]. Estos *multi-energy systems* (MES) con la aplicación de mecanismos como *power-to-gas*, *combined-heat-and-power*, *district heating*, *waste-to-energy*, *power-to-liquid*, entre otros, han probado encontrar ventajas tecno-económicas en la integración de varios vectores energéticos, que las que se encontraba al operarlos de forma separada [23].

Así mismo, ampliar el beneficio de la comunidad podría implicar la incorporación de otros elementos fundamentales para la vida. Por ejemplo, es posible combinar el concepto de energía transactiva con el enfoque del *water-energy-food* (WEF) *nexus* para abordar los desafíos de sostenibilidad y vulnerabilidad frente al cambio climático, así como impulsar el desarrollo en comunidades, principalmente localizadas en zonas rurales y aisladas. El nexo agua-energía-alimento se refiere a la relación interconectada entre la producción de alimentos, el uso de la energía y el consumo de agua, lo cual lo convierte en un concepto relevante, dado a que la disponibilidad y el uso eficiente de los recursos de agua y energía son críticos para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico. Lo anterior supone la creación de un sistema integral en el que se realizan transacciones energéticas, sostenidas por la definición del valor como un parámetro de evaluación del beneficio de la comunidad, más allá de un indicador de la ganancia neta.

Este documento busca dar un panorama sobre el concepto de la ET, mostrar algunos pilotos que se han desarrollado en el mundo y brindar elementos que logren trascender la idea de la ET, desde los sistemas de potencia, hacia los MELs, la conformación de comunidades energéticas y el nexo WEF. Para ello, la Sección 2. da un recuento de las estructuras de operación y mercado que se siguen comúnmente en la aplicación de la ET. En la Sección 3. se discute la aplicación de ET en el contexto de los MES

y el nexa WEF. Finalmente, en la Sección 4. ofrece un recuento crítico de algunas aplicaciones de ET en Colombia y el mundo.

2. Algunas estructuras de operación y de mercado

En un mercado de energía transactiva los participantes se denominan pares, ya que operan a nivel local y son vecinos entre sí. Este mercado de energía se considera como un espacio que permite a distintas entidades (compradores, vendedores) comerciar energía a través de contratos bilaterales, manteniendo así el equilibrio entre la demanda y la oferta. Dependiendo de la interacción entre los participantes, el mercado puede ser completamente descentralizado o *full P2P*, distribuido o híbrido y centralizado o basado en la comunidad [15]. A continuación, se explican cada uno de estos mercados.

2.1. Mercado descentralizado

En este tipo de mercado los participantes interactúan directamente entre sí para comerciar energía, es decir, no existe el rol de coordinador u operador central, de manera que los pares acuerdan las transacciones para intercambiar cantidades específicas de energía sin la intervención de intermediarios. Esta arquitectura es completamente autónoma, lo cual implica que cada participante puede expresar sus preferencias al seleccionar a sus socios comerciales y negociar directamente de forma exclusiva los acuerdos y precios [24]. Esto permite una mayor flexibilidad y eficiencia en la asignación de recursos, ya que los participantes pueden negociar precios y cantidades de energía de manera directa y transparente. En [25], el concepto de mercado descentralizado es aplicado en una microrred energética, donde es empleada la tecnología *blockchain* para proporcionar un registro inmutable y transparente de todas las transacciones realizadas, permitiendo una coordinación eficiente y autónoma de los interesados.

2.2. Mercado centralizado

En esta estructura de mercado también conocida como basada en la comunidad, tanto las transacciones como los intercambios de información entre los participantes son gestionados por un operador o administrador central, el cual es el encargado de gestionar y coordinar las actividades comerciales dentro de una comunidad [15]. Este diseño de mercado basado en la comunidad es aplicado principalmente a las comunidades de microrredes y grupo de prosumidores en los que los miembros de la comunidad tienen objetivos comunes [26]. Asimismo, en [27] se presenta la estructura de un micro-mercado centralizado en el cual se garantiza la competitividad entre los agentes teniendo en cuenta el

aumento en el bienestar social, involucrando la generación de energía a partir de fuentes renovables.

2.3. Mercado distribuido

Este enfoque de mercado combina los esquemas anteriormente mencionados y puede dividirse en dos capas [28]. En la capa superior, los pares individuales o los colectivos de energía realizan transacciones entre sí (mercado descentralizado), mientras que, en la capa inferior, los participantes actúan como un enfoque centralizado o basado en la comunidad. En [29], los autores proponen un modelo de gestión energética para microrredes cooperativas con intercambio de energía P2P en redes de distribución. El objetivo es minimizar los costos totales de la red, considerando la compra de energía, las pérdidas de energía y las restricciones de flujo de energía y voltaje. Se destaca la eficiencia en la utilización de recursos energéticos locales y la reducción de la dependencia de la red principal. Además, se menciona la necesidad de abordar la intermitencia de la generación renovable y el mecanismo de comercio interno para fomentar el intercambio de energía entre microrredes.

Una característica sobresaliente de los mercados de ET es su capacidad de interactuar con varias plataformas y mercados de manera simultánea. Según la definición previamente presentada, la aplicación de MELs permite la interacción con mercados mayoristas y terceros, al mismo tiempo que incluyen plataformas locales y la proliferación de redes P2P. Esto posibilita que los productores y consumidores a pequeña escala puedan comerciar energía de forma directa y local [30]. En la [Tabla 1](#) se presentan resumidas las ventajas y desafíos de los diferentes esquemas de mercado mencionados [15], [24], [25], [28], [30], [31].

3. La energía transactiva en el contexto de los Multi-Energy Systems y las comunidades energéticas

En la ET la definición de la señal económica que permite el establecimiento de un precio de la energía en el MEL tiene un papel protagonista. En la literatura, a tal señal se conoce generalmente como el *market clearing price*, y se trata del precio de compra/venta de los recursos energéticos compartidos, que permite un balance entre la oferta y la demanda energética [16]. El concepto de *market clearing* se usa hace mucho tiempo en economía, con el fin de expresar una situación en la que el mercado regula la producción y demanda de cierta mercancía, a través de la definición de un precio.

Tabla 1. Resumen esquemas de mercado de ET

Esquema	Ventajas	Desafíos
Centralizado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mayor cooperación social y asignación de beneficios. ○ Alta resiliencia entre los participantes. ○ Coordinación eficiente. ○ Maximización en la utilidad de los pares. ○ Mayor facilidad para incluir las restricciones físicas de las redes. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Seguridad y privacidad de la información. ○ Mantener la equidad e imparcialidad en el intercambio de energía. ○ Requiere una infraestructura de información y comunicación sólida. ○ Poca flexibilidad y capacidad de expansión. ○ Alto costo computacional.
Descentralizado	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mayor flexibilidad y eficiencia en la negociación y comercialización. ○ Asignación eficiente de los recursos. ○ Reducida complejidad. ○ Bajos costos computacionales y de comunicación. ○ Mayor resiliencia y resistencia a fallos y ataques. ○ Alta seguridad y privacidad de la información. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Poca escalabilidad. ○ Regulación existente escasa. ○ puede requerir una curva de aprendizaje para los participantes. ○ Lenta convergencia al momento de entregar la energía final. ○ Sistema basado en la predicción debido a la ausencia de un operador central.
Distribuido	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permite un uso eficiente de los recursos energéticos locales ○ Reducidas pérdidas de energía ○ Compatible con los sistemas de distribución actuales ○ La infraestructura de TIC es escalable. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alto costo de inversión ○ Mayor control y coordinación ○ Se requiere un diseño de mecanismos de comercio interno. ○ Retardos en la comunicación. ○ Pueden presentarse problemas con la seguridad y privacidad de la información. ○ Limitada flexibilidad.

En lo que respecta a la ET, dicha mercancía es la energía excedente (en el mayor de los casos energía eléctrica) producida a través de FNCER, o servicios energéticos que pueden ser cuantificados. A diferencia del mercado mayorista de energía eléctrica, la energía producida a través de FNCER distribuidas es mucho más volátil, y existen más agentes involucrados.

Hablando de los agentes, en un MEL de energía eléctrica pueden participar: i) prosumidores, que son usuarios propietarios de FNCER capaces de proveer excedentes de energía a la red donde se conectan [18]; ii) generadores distribuidos, que son empresas dedicadas a la generación de energía eléctrica principalmente renovable y de potencias instaladas en el orden de los KW o de algunos pocos MW; iii) microrredes, que son redes de media o baja potencia capaces de auto-sustentarse [14], [32]; iv) agregadores, que son asociaciones de varios usuarios individuales capaces de regular su demanda [23]; v) plantas de generación virtual, que son asociaciones de varios autogeneradores a pequeña escala, capaces de hacer ofertas considerables de energía; vi) prestadores de servicios de almacenamiento, que son usuarios o asociaciones propietarios de bancos

de baterías capaces de almacenar excedentes de energía eléctrica [33]; vii) cargas flexibles, que son usuarios capaces de regular su demanda de acuerdo con señales económicas, pueden ser cargas flexibles: vehículos eléctricos, plantas de generación de hidrógeno, combustible o dispositivos para gestionar calor industrial o residencia; viii) los usuarios del sistema de distribución; ix) comunidades energéticas, de las que se hablará más adelante en esta sección; y x) otros, como operadores de red, prestadores de servicios de red, o prestadores de servicios *software-as-a-services*.

En los mercados mayoristas, la aplicación del precio de bolsa horario es suficiente para establecer un *clear market*. En un MEL, la volatilidad de las FNCER que son las protagonistas en la conformación de los MELs, complica las cosas. Recursos como la luz solar o el viento, así como la demanda de energía tienen comportamientos no muy fáciles de predecir, lo que implica que un precio como señal que dé equilibrio a un MEL tiende a tener, igualmente, comportamientos poco predecibles [2].

La definición del precio como un parámetro del beneficio económico de la venta de excedentes o servicios relacionados con la energía eléctrica, y el hecho de que la integración de FNCER sea un esfuerzo ambiental en pro de la descarbonización, conlleva a que el valor de la energía en un esquema de ET supere la definición de la ganancia en las operaciones transactivas de energía eléctrica. Como se menciona en [15], la descarbonización y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como la flexibilidad y la eficiencia, pueden ser potenciados a través de la integración de múltiples vectores energéticos en el contexto de la ET. Esto es, la operación global de un sistema compuesto por electricidad, gas, calor, refrigeración, combustibles, almacenamiento de energía, hidrógeno, transporte, etc., que interactúan en un espacio específico, como países, ciudades, distritos, comunidades insulares o incluso edificios. El nombre que se le da este concepto difiere en algunos trabajos, los autores en [23] le denominan MES, en [22] *smart energy systems*, una noción derivada de *smart grids*, en [35] se le llama *energy hubs*, mientras que en otros casos se le nombra *energy systems integration*, así es para el *Energy Systems Integration Group* [58], y para el *Energy Systems Integration Facility* de NREL [59], los MES con la aplicación de mecanismos como *power-to-gas*, *combined-heat-and-power*, *district heating*, *waste-to-energy*, *power-to-liquid*, entre otros, han probado encontrar ventajas en la integración de varios vectores energéticos, que las que se encontraba al operar dichos vectores de forma separada [23].

La aplicación de los MES lleva consigo la definición del mayor beneficio, y para ello, la asignación del valor en la operación del sistema es muy importante. En [23], a este ítem se le denomina *system assessment* y se aborda a través de la exploración en metodologías y criterios de evaluación. Entre ellos, se presentan criterios técnicos, económicos y ambientales, que permiten definir la eficiencia, el desempeño y la viabilidad económica de los MES, es decir, una asignación del valor relativa al contexto. En términos del mercado, o de los MELs que se exploran en el contexto de la ET analizada en este documento, un indicador del valor es el precio en las operaciones transactiva. Ciertamente, el precio es el indicador en el sistema actual del valor de una mercancía [35], y éste, a su vez, un indicativo del beneficio obtenido por una comunidad. En [36] se discute un modelo del flujo de valor en un MES, aunque su aplicación se limita a la definición del flujo monetario entre diferentes actores que se integran en un escenario de ET. Los autores en [32] asignan señales de valor en un MES basadas en el costo de generación, pero limitadas al costo de la energía eléctrica. En [37], se propone una herramienta para identificar criterios de evaluación relativos a la

vulnerabilidad del sistema, no se trata de un modelo de ET, pero puede ser útil como parte de la definición del precio.

Siendo la optimalidad en la operación y el beneficio neto dos parámetros fundamentales en la integración de FNCER, un concepto que no puede pasar por alto es el de CEs. Como se mencionó, los autores en [21] las definen como asociaciones de interesados en una localidad, con fines económicos, sociales o ambientales, más allá que financieros. En el contexto de la ET, el concepto aparece como *community-based market* en [16], donde la asociación se realiza con el fin de realizar transacciones entre los interesados, participar en mercados exteriores y limpiar (*clear*) el MEL conformado por la comunidad. En [4], se utiliza el término *community self-consumption*, definiendo una estructura de mercado donde los participantes son cercanos geográficamente, y, su asociación, aparte de las transacciones comerciales que realizan entre ellos, se realiza para satisfacer su propia demanda. Los autores en [38] comparan el término con el de *renewable-energy clusters*, y en el encuentran una variedad de aplicaciones, como son: *hybrid renewable energy systems*, que son sistemas compuestos por FNCER y unidades de almacenamiento, *spatiotemporal modelling of renewable energy sources*, que son metodologías de planificación de sistemas compuestos por FNCER, o *multi-energy systems*, *autonomous polygeneration microgrids*, una aplicación similar al nexo WEF que se trata en la siguiente sección.

Hablando del beneficio, el valor y la comunidad, englobadas en el contexto de la ET, la propiedad tiene un rol en esta discusión. La distribución geográfica de las FNCER y los recursos energéticos implica una distribución en la propiedad de los mismos, es decir, un escenario en el que los recursos son propiedad de más personas. Sin embargo, en algunos contextos se ha demostrado que la gestión individual, derivada de una propiedad parcializada de los recursos, puede repercutir en el decremento de la viabilidad económica y operativa de los sistemas. Por ejemplo, el costo de operación y mantenimiento, y el costo de inversión serían excesivamente altos, si los sistemas de almacenamiento de energía usados en un modelo de ET en [33], fueran propiedad de cada uno de los usuarios. En contraste, muchos de los modelos para la prestación de servicios de almacenamiento hacen uso de la denominada economía compartida (SE, por sus siglas en inglés), donde la propiedad y el beneficio sobre los recursos energéticos se comparte entre varios usuarios [33]. En [39] la relación entre el concepto y la energía renovable es más subjetivo, y la aplicación de la SE se justifica por medio del comportamiento humano. En pocas palabras, cuando un

recurso finito es compartido, es explotado como si fuera infinito, pero es posible crear instituciones para regular tal explotación. El trabajo [35] desarrolla el concepto desde el punto de vista económico, con un enfoque discursivo desde la teoría clásica del valor, hasta la presentación de conceptos modernos como el *block chain* o el *backfeed*. Sea de una forma u otra, la SE es un concepto incipiente en el estudio de los sistemas energéticos descritos, pero su aplicabilidad tiene un enorme potencial en los modelos de ET, como lo han demostrado en otras plataformas como Uber o Airbnb.

En esta sección se han descrito, a través de una revisión del estado del arte, la relación que existe entre el concepto de ET, y otros términos emergentes, como los MESs, la SE, pasando por las CEs. Aquí se destaca el papel del valor como elemento articulador de los conceptos, y que adquiere relevancia dado el surgimiento de los nuevos mercados y mercancías derivados del uso de la energía (en general) de FNCER. En la siguiente sección se muestra como este elemento articulador puede trascender las lindes de los sistemas energéticos, a un sistema integrado de los tres recursos esenciales para la vida el agua, la energía y la comida.

4. La energía transactiva en el contexto del *Water-Energy-Food Nexus*

El nexo de energía, agua y alimentos se refiere a las interconexiones e interdependencias entre los tres recursos esenciales para la supervivencia y el bienestar humano. Por ejemplo, el agua es esencial para el riego de cultivos y la producción de alimentos, y se necesita energía para transportar, procesar y almacenarlos. También se requiere energía para tratar y distribuir agua para el consumo humano, y se necesita agua para la producción de energía, como en centrales hidroeléctricas o para enfriar centrales térmicas. El objetivo de emplear un enfoque del nexo es mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, considerando tanto los aspectos sociales como ambientales [41]. Asimismo, este enfoque se aplica en diferentes contextos y escalas para abordar de manera integral los impactos y desafíos relacionados con el agua, energía y alimentos.

El enfoque del nexo se ha convertido en un desafío en literatura actual dado a que requiere de una integración de procesos industriales, sistemas energéticos, desarrollo agrícola y un adecuado suministro de agua. Asimismo, a medida que aumenta la demanda de alimentos y agua, en las próximas décadas son cada vez más las preocupaciones sobre la accesibilidad y disponibilidad de los recursos a largo plazo [41].

Alrededor de 800 millones de personas no tienen acceso al servicio de energía eléctrica, mientras que dos mil millones no cuentan con agua potable, ni una alimentación adecuada a nivel mundial [42]. Además, se espera un incremento en la demanda de agua, energía y alimentos del 50%, 80% y 60% para el año 2050 respectivamente [43].

Por otro lado, en septiembre de 2015 se establecieron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible [44]. Estos objetivos son un conjunto de 17 metas globales establecidas para abordar los desafíos sociales, económicos y ambientales relevantes para la humanidad. El enfoque del nexo agua, energía y alimentos ha sido cada vez más reconocido por agencias internacionales y la academia como clave para entender la integración de los ODS y fomentar el desarrollo sostenible en el marco de la realización de la Agenda 2030 [45], [46], [47], [48]. De igual manera, este enfoque del nexo debe estar encaminado en apoyar el cumplimiento de tres ODS: 2 (hambre cero), 6 (agua limpia y saneamiento) y 7 (energía limpia y no contaminante) [49].

Uno de los desafíos para abordar el nexo WEF es la naturaleza de los sistemas de energía distribuida. En [50] se estudia la implementación de microrredes en la producción agrícola, con el fin analizar la integración de la producción rural, los DER's y su relación con el nexo. Debido a la flexibilidad operativa de estos sistemas de energía distribuida, se han convertido en alternativas llamativas para la electrificación de comunidades fuera de la red eléctrica [51]. Con la inclusión de nuevas tecnologías como por ejemplo las bombas de riego alimentadas por energía solar y los sistemas agrofotovoltaicos se pueden generar beneficios como la posibilidad a los agricultores de vender excesos de energía solar a la red eléctrica, lo que implica nuevos ingresos y una actividad agrícola más resiliente y amigable con el medio ambiente.

A partir de esto, el concepto de ET puede convertirse en un mecanismo para fomentar la implementación de tecnologías sostenibles en comunidades rurales, abordando factores como la mitigación de emisiones, expansión del uso de fuentes renovables de energía, mayor resiliencia y eficiencia energética, reducción de pérdidas de energía, flexibilidad operativa y electrificación de comunidades remotas. Todo esto encaminado al cumplimiento de los ODS alineados al enfoque del nexo WEF anteriormente mencionados.

5. Proyectos piloto de energía transactiva

5.1. A nivel internacional

El concepto de energía transactiva ha sido implementado en más de 30 proyectos piloto en Estados Unidos y Europa, como se evidencia en la [Tabla 2 \[28\], \[30\], \[15\]](#).

Estos proyectos en su mayoría proporcionan plataformas de prueba para validar sistemas de ET y sirven para estudiar e investigar los efectos de implementar ese concepto de ET en los sistemas eléctricos actuales, así como familiarizar a las comunidades sobre la relevancia de este nuevo paradigma.

Tabla 2. Proyectos piloto de ET implementados en Estados Unidos y Europa

Proyecto	País	Objeto	Año
Peer Energy Cloud	Alemania	Gestión eficiente y comercio de energía utilizando la nube	2012
Smart Watts		Metodologías novedosas para la optimización energética a través de las TIC	2011
Sonnen Community		Comercio P2P de energía teniendo en cuenta sistemas solares y de almacenamiento	2010
LichtBlick's Swarm Energy		Plataforma de gestión energética para la red de distribución	2010
Enerchain		Comercio de electricidad y gas basado en blockchain	2017
NOBEL		Sistema de intermediación energética basado en TIC con consumidores	2012
Share&Charge		Mercados energéticos basados en blockchain para vehículos eléctricos	2018
NRGcoin	Bélgica	Reemplazar acuerdos tradicionales de apoyo a las energías renovables con Contratos Inteligentes basados en blockchain	2013
Energy collective	Dinamarca	Implementación de mercados P2P locales en Dinamarca	2016
Yeloha	Estados Unidos	Compartir energía generada por paneles solares fotovoltaicos	2012
Community First Village		Donación de energía a personas necesitadas	2015
Transactive Grid		Comercio de energía entre pares en lugar de exportarla a la red	2015
Empower		Comercio de energía eficiente y rentable	2017
Energy Collective		Construir, operar y mantener instalaciones de energía limpia en la comunidad	2010
Olympic Peninsula GridWise		Probar y validar Sistemas de Energía Transactiva experimentando con precios de energía reales y electrodomésticos inteligentes	2018
AEP gridSMART	Estados Unidos	Controlar sistemas de climatización residenciales en respuesta a señales de precios de 5 minutos	2018
Clean Energy and Transactive Campus		Implementación de sistemas TE en edificios de gran escala con alta penetración de DERs	2016
Pacific NorthWest Smart Grid		Evaluación de enfoques de control transactivo en el estado actual de las redes inteligentes	2018
OATI Microgrid Center		Implementación de un centro de microrred que incluya DERs y recursos renovables	2016
The Brookling microgrid		Microrred P2P utilizando blockchain	2015
TeMiX		Transacciones energéticas automatizadas y gestión descentralizada de la red	2018
Kealoha		Implementación de mercados P2P teniendo en cuenta la generación solar	2014
Vandebron		Países Bajos	Plataforma de comercio P2P de electricidad y gas natural
P2P Smart test	Comercio P2P de energía con gestión flexible de la demanda		2015
PowerMatching City	Mecanismo de coordinación de redes inteligentes considerando DERs y cargas flexibles		2010
Couperus Smart Grid	Utilizar la tecnología <i>PowerMatcher</i> para coordinar la demanda de energía y reducir la carga pico		2012
Powerpeers	Mercados energéticos basados en blockchain para compartir energía P2P entre edificios residenciales		2018
EMPower	Noruega	Mercado eléctrico local para promover el papel de los prosumidores en las redes inteligentes	2017
Piclo	Reino Unido	Mercado independiente para el comercio de energía con servicios de flexibilidad	2015
Electron		Proporcionar una plataforma innovadora, transparente y segura para el comercio de energía	2016
P2P3M		Prototipo de plataforma de comercio/compartición de energía P2P	2016

En términos generales, en Estados Unidos el control transactivo es el tema predominante, mientras que en Europa el énfasis está más en el comercio de energía a través de redes P2P en contextos industriales. En términos del comercio de energía a nivel comunitario, en Estados Unidos se implementó en el año 2010 un proyecto llamado *Energy Collective*, el cual finalizó en 2020. El objetivo principal fue construir y operar instalaciones de generación de energía para una comunidad a partir de fuentes renovables no convencionales. Específicamente, se implementó un servicio que permitía a los usuarios comprar y utilizar paneles solares sin tener que ser instalados físicamente en su propiedad. Otro ejemplo es el proyecto denominado *Clean Energy and Transactive Campus (CETC)* liderado por el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL, por sus siglas en inglés), el cual fue lanzado en 2016 y continúa en funcionamiento. Además, fue uno de los primeros proyectos implementados en Estados Unidos en probar controles transactivos del lado de la demanda a una escala que involucra edificios comerciales. Los objetivos claves del proyecto son desarrollar un control inteligente de carga, investigar en el control transactivo y coordinación de los conceptos de energía en edificios para crear mercados energéticos dentro de zonas de edificios e integrar los DERs [5].

Por parte de Europa, en Los Países Bajos se propuso a principios del 2015 un proyecto denominado *P2P Smart Test*, el cual tiene el objetivo de desarrollar un sistema de distribución de electricidad integrado con una infraestructura de comunicación técnicamente avanzada para el mercado eléctrico regional. El proyecto busca asegurar el equilibrio energético y prestar un servicio eléctrico seguro y con calidad [5]. A su vez, Alemania se ha caracterizado por liderar proyectos que investiguen el concepto de Energía Transactiva, como lo es el denominado *Peer Energy Cloud*, con el cual se busca investigar y desarrollar tecnologías basadas en la nube para una plataforma de comercio energético electrónico. En sí, el proyecto consiste en establecer un mercado virtual para el comercio local de electricidad y desarrollar los correspondientes métodos para el almacenamiento y predicción de los datos dentro de una microrred [54].

Asimismo, en Bélgica, se implementó un proyecto conjunto de la industria y la academia denominado *NRGcoin*, desarrollado inicialmente por el *Laboratorio de Inteligencia Artificial de Vrije Universiteit Brussel*, en 2014 y continúa en funcionamiento. El concepto *NRGcoin* ha sido probado en un entorno de simulación multiagente y se caracteriza por reemplazar las políticas tradicionales de apoyo a las energías renovables de alto riesgo con un nuevo contrato inteligente basado en la tecnología *blockchain*. En sí, este concepto hace que la

energía verde sea más económica para los consumidores, puesto que cuentan con incentivos para modificar su demanda y, así, contribuir a la estabilización de la red eléctrica. Sin embargo, se ha identificado como desventaja lo incierto que son las tecnologías en las que se basa el concepto, como el *blockchain* y los contratos inteligentes, ya que son relativamente nuevas [5].

5.2. En Colombia

En Colombia, en la ciudad de Medellín se implementó un proyecto de comercio de energía P2P, denominado “Iniciativa de Energía Transactiva para Colombia”, el cual inició en abril del 2019 y finalizó en septiembre del 2020. Este proyecto se llevó a cabo por medio del Programa desarrollado por la Real Academia de Ingeniería del Reino Unido y fue financiado con el apoyo del *Newton Fund*, con la participación de la Universidad EIA, Empresas Públicas de Medellín-EPM, ERCO energía y *The University College London*. Los objetivos del proyecto eran: i) establecer una hoja de ruta para escalar los modelos de ET a modelos de negocio eficientes adecuados a las necesidades de Colombia; ii) convertir el proyecto de ET en una plataforma de intercambio de conocimientos y se fortalezca la innovación tecnológica, y iii) aprovechar el potencial social, económico y ambiental de la ET, que impulsada por las tecnologías digitales facilita la transición energética [56]. Asimismo, cabe resaltar que este proyecto es pionero en el marco del comercio P2P en América Latina y se caracteriza por considerar usuarios de diferentes estratos socioeconómicos [5].

Inicialmente, el piloto de mercado de energía se conectó a la red de distribución local de la empresa EPM y, seguidamente, se instalaron paneles a usuarios de estratos 2 y 3 (prosumidores), de manera que transaran energía con consumidores de los estratos más altos (5 y 6). Finalmente, se instaló un sistema solar fotovoltaico con capacidad de 4,5 kW con su batería en el centro comunitario o cultural, localizado en la comuna 13 de Medellín.

A partir de este piloto de intercambio de energía entre pares se identifica el alto potencial que tiene este paradigma para el país, especialmente en términos de modernización del servicio de la energía, el incentivo a la participación de la comunidad e incluso, abordar la desigualdad económica. Asimismo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al implementar FNCER, de manera que el comercio de energía P2P puede ser una herramienta importante en la transición energética hacia un sistema energético más sostenible y eficiente. Finalmente, cabe resaltar que se requiere la implementación de más proyectos piloto en el país, dado

que los resultados pueden ser útiles para el planteamiento y posterior implementación de políticas y regulaciones que fomenten el comercio de energía entre pares.

6. Conclusiones

En este artículo se ha brindado un panorama general sobre algunos conceptos alrededor del término energía transactiva. Se ha descrito el problema de equilibrio de mercado, como un reto fundamental en la ejecución de este tipo de estructuras, y la definición del precio como parámetro operativo clave. Así mismo, la definición del precio ha llevado a la consideración del valor, partiendo de las necesidades de evaluar económica y operativamente los sistemas energéticos, hasta considerarlo como un elemento propicio para la definición del valor de cambio como parte de las operaciones transactivas. El valor se propone como un término vinculante de sistemas cada vez más intrincados, y el eje operativo y comercial, para su evaluación. En esta revisión, dicha evaluación mantiene un estado incipiente, y requiere de una profundización mayor para el esclarecimiento del valor de la energía, y el establecimiento de las relaciones productivas derivadas del uso de la energía y demás recursos. Por lo pronto, dichas relaciones caen en el concepto de los mercados energéticos localizados, pero tienen el potencial de trascender las lógicas mercantiles, hacia una definición del beneficio comunitario. En este nuevo paradigma de generación y consumo de recursos esenciales para la vida, las nuevas formas de distribución de la propiedad, que son posibles gracias a la tecnología moderna, empiezan tomar papeles relevantes, y cuestionan el carácter individualista de la propiedad sobre los recursos renovables. Estas formas ponen en consideración a las denominadas comunidades energéticas, como esquemas sustentados por conceptos como: el uso compartido de la energía, el beneficio común, el aprovechamiento de los recursos, y la transición energética. Estas son un hito en la construcción de sistemas más eficientes, y social, económica y ambientalmente sustentables.

Por otro lado, se evidencia que el concepto de energía transactiva se ha implementado en varios proyectos piloto en los Estados Unidos y Europa. Asimismo, por parte de América Latina, Colombia ha sido pionero en experimentar con este enfoque. Estos proyectos sirvieron como bancos de pruebas para validar los conceptos derivados de la energía transactiva e investigar el impacto de este nuevo paradigma en los sistemas de potencia existentes. Si bien, por medio de estas experiencias se han mostrado avances prometedores en la adopción de energía transactiva, también se han identificado desafíos e incertidumbres en tecnologías subyacentes como *blockchain* y sistemas de comunicación y control

avanzados. A medida que continua la investigación y el desarrollo, es fundamental abordar estas limitaciones para lograr una transición exitosa a un sistema energético transactivo y sostenible.

Financiación

Este trabajo es financiado por Asignación para la CTeI - SGR y Minciencias, Colombia, bajo el proyecto BPIN 2021000100499, 2022-2026.

Contribución de los autores

D. Erazo-Caicedo: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. A. Cusva-García: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. N. Quijano: Conceptualización, Supervisión. G. Jiménez-Estévez: Conceptualización, Supervisión.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] The GridWise Architecture Council, “GridWise Transactive Energy Framework Version 1.1”, 2019. En línea: Disponible en: https://gridwiseac.org/pdfs/pnnl_22946_gwac_te_framework_july_2019_v1_1.pdf.
- [2] F. Lezama, J. Soares, P. Hernandez-Leal, M. Kaisers, T. Pinto, y Z. Vale, “Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, n.º 5, pp. 4081-4088, sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2833959>
- [3] IRENA, “Global Energy Transformation: A roadmap to 2050 82019 edition”, 2019. En línea: Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

- [4] T. Capper, A. Gorbacheva, M. Mustafa, M. Bahloul, J. Schiwidal, R. Chitchyan, M. Andoni, V. Robu, M. Montakhabi, I. Scott, C. Francis, T. Montakhabi, I. Scott, C. Francis, T. Mbavarira, J. Espana, L. Kiesling. “Peer-to-peer, community self-consumption, and transactive energy: A systematic literature review of local energy market models”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112403, jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112403>
- [5] O. Abrishambaf, P. Faria, L. Gomes, J. Spínola, Z. Vale, J. Corchado, “Implementation of a Real-Time Microgrid Simulation Platform Based on Centralized and Distributed Management”, *Energies (Basel)*, vol. 10, n.º 6, p. 806, jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/en10060806>
- [6] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak, y C.-F. Covrig, “A survey on the critical issues in smart grid technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 396-405, feb. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.036>
- [7] T. Huynh, F. Schmidt, S. Thiem, M. Kautz, F. Steinke, y S. Niessen, “Local energy markets for thermal-electric energy systems considering energy carrier dependency and energy storage systems”, *Smart Energy*, vol. 6, p. 100065, may 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100065>
- [8] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, y P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*. Institution of Engineering and Technology, 2009, doi: <https://doi.org/10.1049/PBRN006E>
- [9] Q. Yang y H. Wang, “Privacy-Preserving Transactive Energy Management for IoT-Aided Smart Homes via Blockchain”, *IEEE Internet Things J*, vol. 8, n.º 14, pp. 11463-11475, jul. 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051323>
- [10] Y. Liu, L. Wu, y J. Li, “Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future”, *The Electricity Journal*, vol. 32, n.º 4, pp. 2-6, may 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.03.002>
- [11] S. Kerscher, “Local energy markets”, en *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, Elsevier, 2023, pp. 472-477.
- [12] H. Hao, C. D. Corbin, K. Kalsi, y R. G. Pratt, “Transactive Control of Commercial Buildings for Demand Response”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, n.º 1, pp. 774-783, ene. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2559485>
- [13] J. Hu, G. Yang, K. Kok, Y. Xue, y H. W. Binder, “Transactive control: a framework for operating power systems characterized by high penetration of distributed energy resources”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, n.º 3, pp. 451-464, may 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0228-1>
- [14] H. S. V. S. K. Nunna, A. Sesetti, A. K. Rathore, y S. Doolla, “Multiagent-Based Energy Trading Platform for Energy Storage Systems in Distribution Systems With Interconnected Microgrids”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, n.º 3, pp. 3207-3217, may 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979782>
- [15] Q. Huang, W. Amin, K. Umer, H. Gooi, F. Eddy, M. Afzal, M. Shadhzadi, A. Khan, S. Ahmad. “A review of transactive energy systems: Concept and implementation”, *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7804-7824, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.037>
- [16] M. Khorasany, Y. Mishra, y G. Ledwich, “Hybrid trading scheme for peer-to-peer energy trading in transactive energy markets”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, n.º 2, pp. 245-253, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1233>
- [17] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, y H. V. Poor, “Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview”, *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 11, n.º 4, pp. 3185-3200, jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657>
- [18] P. Siano, G. De Marco, A. Rolan, y V. Loia, “A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets”, *IEEE Syst J*, vol. 13, n.º 3, pp. 3454-3466, sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2903172>
- [19] A. Kumar, P. Jain, y S. Sharma, “Transactive energy management for microgrids considering techno-economic perspectives of utility – a review”, *International Journal of Energy Research*, vol. 46, n.º 12, pp. 16127-16149, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/er.8318>

- [20] IRENA, *Global energy transformation: A roadmap to 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf
- [21] G. Volpato, G. Carraro, M. Cont, P. Danieli, S. Rech, y A. Lazzaretto, “General guidelines for the optimal economic aggregation of prosumers in energy communities”, *Energy*, vol. 258, p. 124800, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124800>
- [22] H. Lund, P. A. Østergaard, D. Connolly, y B. V. Mathiesen, “Smart energy and smart energy systems”, *Energy*, vol. 137, pp. 556-565, oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>
- [23] P. Mancarella, “MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models”, *Energy*, vol. 65, pp. 1-17, feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- [24] Y. Chen, Y. Yang, y X. Xu, “Towards transactive energy: An analysis of information-related practical issues”, *Energy Conversion and Economics*, vol. 3, n.º 3, pp. 112-121, jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/enc2.12057>
- [25] E. Mengelkamp, J. Gärtner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, y C. Weinhardt, “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid”, *Appl Energy*, vol. 210, pp. 870-880, ene. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>
- [26] A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long, y H. B. Gooi, “Peer-to-Peer Energy Trading in a Prosumer-Based Community Microgrid: A Game-Theoretic Model”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, n.º 8, pp. 6087-6097, ago. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2874578>
- [27] IEEE Staff, *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. IEEE, 2016.
- [28] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche, y E. Sorin, “Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104. Elsevier Ltd, pp. 367-378, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.036>
- [29] T. Liu, X. Tan, B. Sun, Y. Wu, X. Guan and D. H. K. Tsang, “Energy management of cooperative microgrids with P2P energy sharing in distribution networks”, *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* “, Miami, FL, USA, 2015, pp. 410-415, doi: <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2015.7436335>
- [30] O. Abrishambaf, F. Lezama, P. Faria, y Z. Vale, “Towards transactive energy systems: An analysis on current trends”, *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100418, nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100418>
- [31] S. Yin, J. Wang, y F. Qiu, “Decentralized electricity market with transactive energy – A path forward”, *Electricity Journal*, vol. 32, n.º 4, pp. 7-13, may 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.03.005>
- [32] K. Zhang, S. Troitzsch, y X. Han, “Distributionally robust co-optimized offering for transactive multi-energy microgrids”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 143, p. 108451, dic. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108451>
- [33] N. Mignoni, P. Scarabaggio, R. Carli, y M. Dotoli, “Control frameworks for transactive energy storage services in energy communities”, *Control Eng Pract*, vol. 130, p. 105364, ene. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105364>
- [34] M. S. Javadi, A. Esmaeel Nezhad, A. R. Jordehi, M. Gough, S. F. Santos, y J. P. S. Catalão, “Transactive energy framework in multi-carrier energy hubs: A fully decentralized model”, *Energy*, vol. 238, p. 121717, ene. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121717>
- [35] A. Pazaitis, P. De Filippi, y V. Kostakis, “Blockchain and value systems in the sharing economy: The illustrative case of Backfeed”, *Technol Forecast Soc Change*, vol. 125, pp. 105-115, dic. 2017.
- [36] N. Good, E. A. Martínez Ceseña, C. Heltorp, y P. Mancarella, “A transactive energy modelling and assessment framework for demand response business cases in smart distributed multi-energy systems”, *Energy*, vol. 184, pp. 165-179, oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.089>

- [37] W. Huang, Du E, T. Capuder, X. Zhang, N. Zhang, G. Strbac, C. Kang. “Reliability and Vulnerability Assessment of Multi-Energy Systems: An Energy Hub Based Method”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, n.º 5, pp. 3948-3959, sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3057724>
- [38] J. Lowitzsch, C. E. Hoicka, y F. J. van Tulder, “Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 122, p. 109489, abr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>
- [39] J. J. Cuenca, E. Jamil, y B. Hayes, “State of the Art in Energy Communities and Sharing Economy Concepts in the Electricity Sector”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 57, n.º 6, pp. 5737-5746, nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3114135>
- [40] T. R. Albrecht, A. Crootof, y C. A. Scott, “The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment”, *Environmental Research Letters*, vol. 13, n.º 4, p. 043002, abr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>
- [41] Food, Energy, and Water Nexus. Springer International Publishing, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0239-9>
- [42] L. Benites, L. Giatti, L. Macedo, J. Puppim de Oliveira, *SDG: 11 Sustainable Cities and Communities Water-Energy-Food Nexus and Climate Change in Cities*. Springer International Publishing, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-05472-3>
- [43] Fao, *Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative*. 2014. Disponible en: <http://www.fao.org/icatalog/inter-e.htm>
- [44] L. Cavalli, S. Vergalli, *Connecting the Sustainable Development Goals: The WEF Nexus: Understanding the Role of the WEF Nexus in the 2030 Agenda (Sustainable Development Goals Series)*. Springer, 2022.
- [45] R. Bleischwitz, C. Spataru, S. VanDeveer, M. Obersteiner, E. Van der Voet, C. Johnson, P. Andrews-Speed, T. Boersma, H. Hoff, D. Van Vuuren. “Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals”, *Nat Sustain*, vol. 1, n.º 12, pp. 737-743, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0173-2>
- [46] E. M. Biggs, B. Boruff, J. Ducan, J. Horsley, N. Pauli, K. McNeill, A. Neef, F. Ogtrop, J. Curnow, B. Haworth, S. Duce, Y. Imanari. “Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods”, *Environ Sci Policy*, vol. 54, pp. 389-397, dic. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- [47] K. K. Yumkella y P. T. Yillia, “Framing the Water-energy Nexus for the Post-2015 Development Agenda”, *Aquat Procedia*, vol. 5, pp. 8-12, oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.10.003>
- [48] C. Carmona-Moreno, C. Dondeynaz, y M. Biedler, “Position Paper on Water, Energy, Food and Ecosystems (WEFE) Nexus and Sustainable Development Goals (SDGS)”, *JRC Publications Repository*, 2019, doi: <https://dx.doi.org/10.2760/5295>
- [49] F. Ackerman, S. J. DeCanio, R. B. Howarth, y K. Sheeran, “Limitations of integrated assessment models of climate change”, *Clim Change*, vol. 95, n.º 3-4, pp. 297-315, ago. 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9570-x>
- [50] A. A. Medina-Santana, A. Flores-Tlacuahuac, L. E. Cárdenas-Barrón, y L. F. Fuentes-Cortés, “Optimal design of the water-energy-food nexus for rural communities”, *Comput Chem Eng*, vol. 143, p. 107120, dic. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107120>
- [51] F. Kemausuor, M. D. Sedzro, y I. Osei, “Decentralised Energy Systems in Africa: Coordination and Integration of Off-Grid and Grid Power Systems—Review of Planning Tools to Identify Renewable Energy Deployment Options for Rural Electrification in Africa”, *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, vol. 5, n.º 4, pp. 214-223, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0118-4>
- [52] Pacific Northwest National Laboratory, “Clean Energy and Transactive Campus”. Disponible en: <https://www.pnnl.gov/projects/clean-energy-and-transactive-campus>.
- [53] European Commission, “Peer to Peer Smart Energy Distribution Networks (P2P-SmartTest)”. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/646469#:~:text=Apart%20from%20project%20management%20%28WP1%29%20and%20dissemination%20and,to%20enable%20P2P%20trading%20realising%20its%20full%20potential>

[54] Software Cluster, “Peer Energy Cloud”, Disponible en: <https://software-cluster.org/projects/peer-energy-cloud/>

[55] NRGcoin, “About NRGcoin”. Disponible en: <https://nrgcoin.org/about/>

[56] Transactive Energy Colombia, “Piloto de Intercambio de Energía entre pares”, <https://www.transactive-energy.co/peer-to-peer/>

[57] J. P. Cárdenas-Álvarez, J. M. España, y S. Ortega, “What is the value of peer-to-peer energy trading? A discrete choice experiment with residential electricity users in Colombia”, *Energy Res Soc Sci*, vol. 91, sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102737>

[58] ESIG, “Energy Systems Integration”. Disponible en: <https://www.esig.energy/energy-systems-integration/>

[59] NREL, “Energy Systems Integration Facility”. Disponible en: <https://www.nrel.gov/esif/>