

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Maestría en Electricidad mención en Redes Eléctricas Inteligentes

Modelo de mercado eléctrico minorista aplicado al Ecuador considerando transacciones tipo “Block chain” en el marco de clientes cuya potencia instalada no supere los 10 kW

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención en Redes Eléctricas Inteligentes

Autor:

Marcelo Esteban León Tenesaca

Director:

Pablo Alejandro Méndez Santos

ORCID:  0009-0003-8437-683X

Cuenca, Ecuador

2024-10-01

Resumen

El vertiginoso avance de la tecnología permite que los sistemas eléctricos evolucionen hacia un mundo inteligente, donde la información cada vez adquiere más valor. En este sentido la tecnología ha permitido que la micro generación o generación distribuida pueda ser económicamente rentable y se pueda instalar de manera masiva.

En Ecuador actualmente la generación distribuida es una realidad, sin embargo la rentabilidad de dichos sistemas no es el principal factor para su implementación, más bien sobresalen otras razones que pueden ser ambientales, de investigación, de publicidad, etcétera. Para que se convierta en una oportunidad de negocio y se genere mayor interés por parte de los posibles interesados e inversionistas, es necesario considerar un precio por la potencia eléctrica que se pueda inyectar a la red, lo que implica un cambio en el paradigma de la distribución y comercialización de energía.

Con la inclusión de estos sistemas distribuidos es posible cambiar el paradigma clásico de distribución y comercialización de energía efectuada por una sola empresa de suministro, y así, crear una nueva estructura de negocio en cuanto a la venta de energía eléctrica. En este sentido se podría pensar que la distribuidora adquiere un nuevo rol.

En este proyecto de titulación se propone analizar el funcionamiento de mercados eléctricos minoristas de dos países, posteriormente a este análisis se realiza una propuesta de mercado eléctrico minorista para Ecuador y se incluye transacciones utilizando la Plataforma diseñada en base a Block Chain entre los participantes de este mercado.

Palabras clave del autor: mercados eléctricos minoristas, cadenas de bloques



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

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The rapid advancement of technology allows electrical systems to evolve into an intelligent world where information increasingly acquires more value. In this sense, technology has enabled micro-generation or distributed generation to become economically viable and can be installed on a large scale.

In Ecuador, distributed generation is currently a reality; however, the profitability of such systems is not the primary factor for their implementation. Instead, other reasons such as environmental, research, publicity, etc., stand out. To turn it into a business opportunity and generate greater interest from potential stakeholders and investors, it is necessary to consider a price for the electrical power that can be injected into the grid, which implies a shift in the paradigm of energy distribution and commercialization.

With the inclusion of these distributed systems, it is possible to change the classic paradigm of energy distribution and commercialization carried out by a single supply company and thus create a new business structure regarding the sale of electric energy. In this sense, it could be thought that the distributor assumes a new role, which consists of being a network operator and/or energy transaction settler.

This thesis project proposes to analyze the functioning of retail electricity markets in two countries. Following this analysis, a proposal for a retail electricity market for Ecuador is made, including transactions using the Platform designed based on Blockchain among the participants of this market.

Author Keywords: energy markets, blockchain, retail market



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1	Generalidades	10
1.1	Introducción	10
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	General.....	13
1.2.2	Específicos	13
1.3	Alcance del estudio.....	13
2	Contextualización de los Mercados Eléctricos Minoristas	14
2.1	Introducción a los Mercados Eléctricos	14
2.2	Mercados Eléctricos Minoristas.....	15
2.3	Modelos de Mercado Minorista	16
2.3.1	Modelo 1: Monopsonio o Comprador único.....	17
2.3.2	Modelo 2: Competencia Mayorista.....	17
2.3.3	Modelo 3: Libertad de elección para todos los consumidores	18
2.4	Ventajas y Desventajas de los Mercados Eléctricos Minoristas	18
2.5	Comercializadores en el Mercado Minorista.....	19
2.5.1	Agregadores de demanda.....	20
2.6	Contratos dentro del Mercado Minorista	22
2.6.1	Contratos de Compraventa de Energía (PPA)	22
2.7	Medición en el Mercado Minorista.....	22
2.7.1	Net metering	23
2.7.2	Feed-in tariff (FIT).....	23
2.7.3	Sistema de Medición Exclusiva (SME).....	24
2.8	Modelos de intercambio de energía	24
2.8.1	Modelo Peer to Peer (P2P)	25
2.8.2	Comunidades energéticas	25
2.8.3	Virtual Power Plants (VPP)	26
2.8.4	“Landowners” (propietarios de tierras)	27
3	Análisis de Experiencias Internacionales en Mercados Eléctricos Minoristas.....	27
3.1	Caso de Estudio: Estados Unidos.....	27
3.1.1	Contextualización del Mercado Eléctrico Minorista	28
3.2	Caso de Estudio de España.....	39
3.2.1	Contextualización del Mercado Eléctrico Minorista	39
4	Sector Eléctrico Ecuatoriano	44

4.1	Evolución de la Electrificación en el Ecuador	44
4.2	Marco Regulatorio del Mercado Eléctrico Ecuatoriano	46
5	Planteamiento de un Mercado Eléctrico Alternativo Minorista para Ecuador	51
5.1	Uso de la tecnología Blockchain en el Mercado Eléctrico	53
5.1.1	¿Cómo funciona una cadena de bloques?	54
5.1.2	Componentes centrales de la tecnología blockchain.....	55
5.1.3	Clasificación de la tecnología Blockchain.....	58
5.2	Mercado Eléctrico Alternativo Minorista para Ecuador	58
6	Conclusiones y Trabajos Futuros	66
6.1	Conclusiones generales.....	66
6.2	Conclusiones asociadas a los objetivos específicos	67
6.3	Trabajos Futuros.....	70
7	Referencias.....	70

Índice de figuras

Figura 1.1 Configuración de un mercado conformado por microrredes Fuente: Autoría propia [6].....	12
Figura 2.1 Mercados eléctricos monopólicos y competitivos [16] Fuente: Autoría propia	16
Figura 3.1 Estados con mercados eléctricos de elección en EEUU Fuente: State public utility commissions (2017).....	28
Figura 3.2 Conexión de los participantes BMG: Borough Hall (rojo), Bay Ridge (morado) y Park Slope (verde). Fuente: Designing microgrid energy markets. A case study: The Brooklyn Microgrid	30
Figura 3.3 Implementación de los medidores inteligentes TransActive Grid Fuente: Addressing Key Challenges to Making Enterprise Blockchain Applications a Reality	31
Figura 3.4 Componentes para la correcta operación de mercados eléctricos de microrredes Fuente: Autoría propia [6]	32
Figura 3.5 Topología de la BGM Fuente: Autoría Propia [6].....	34
Figura 3.6 Esquematización de transacciones locales realizadas en el BMG Fuente: Autoría Propia [6]	35
Figura 3.7 Interfaz gráfica de la aplicación móvil de la BMG Fuente: Addressing Key Challenges to Making Enterprise Blockchain Applications a Reality.....	37
Figura 3.8 Red Eléctrica de España Fuente: Negocio Eléctrico en España [57].....	40
Figura 3.9 Fuentes de innovación de las principales empresas energéticas en España Fuente: Autoría Propia [58]	41
Figura 3.10 Plataforma Greenchain de la empresa Acciona Fuente: Acciona Energía [59].	42
Figura 4.1 Evolución del Sector Eléctrico Ecuatoriano Fuente: Autoría Propia [14].....	44
Figura 4.2 Estructura de Sector Eléctrico Ecuatoriano Fuente: Autoría propia [14]	47
Figura 5.1 Funcionamiento de la red Peer-to-Peer utilizando blockchain Fuente: IK4 [75] ..	55
Figura 5.2 Modelo de negociación del mercado eléctrico basado en contratos inteligentes [79].....	57
Figura 5.3 Curva de potencia diaria de consumo de un cliente típico residencial	60
Figura 5.4 Curva de potencia diaria entregada por sistema fotovoltaico	60

Figura 5.5 Ejemplo de subastas con contratos inteligentes	64
---	----

Índice de tablas

Tabla 1 Componentes principales del BMG	30
Tabla 2 Cargas Típicas Residenciales	59
Tabla 3 Modelos de mercados	61
Tabla 4 Consumos horarios diferenciados por día de la semana	62
Tabla 5 Orden de compra de energía	63
Tabla 6 Participantes del mercado minorista.....	65

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes me permitieron llevar a cabo este proyecto y me brindaron un constante impulso. Extiendo mi gratitud a mi esposa por su apoyo incondicional a lo largo de todo el desarrollo de la maestría, y a mi hija, cuya inspiración y motivación fueron fundamentales para la culminación de este proyecto. Agradezco también a mi familia política por su buena voluntad y apoyo. Finalmente, quiero agradecer a mi tutor por su disposición y orientación durante el desarrollo de la presente investigación.

1 Generalidades

1.1 Introducción

El uso eficiente de los recursos de nuestro planeta generalmente está ligado a las ventajas que ofrece la diversificación de las fuentes de energía, especialmente si se consideran las fuentes renovables (RES). Dicho uso en conjunto con una integración eficiente al sistema energético, la cual incluya la implantación de micro redes, ofrece ventajas tales como la mejora de la confiabilidad del sistema, incentivos a la sostenibilidad ambiental, además de traer simultáneamente potenciales beneficios económicos.

La integración no controlable de las fuentes de energía renovable (RES) dentro del actual sistema energético plantea grandes desafíos debido a su aumento constante. La amplia gama de recursos energéticos distribuidos que se conectan cada día a la red de distribución representa un gran reto para las empresas de servicios públicos, las cuales lidian con aspectos tales como mantener los límites de voltaje en los diferentes puntos de red así como garantizar la estabilidad y continuidad de servicio [1]. Por ello resulta imperativa una transformación de la red hacia un sistema de características mejoradas de confiabilidad y eficiencia.

Uno de los problemas actuales que tiene la implementación de las RES en el mercado mayorista es su baja o inexistente capacidad de gestión de acuerdo con las condiciones de abastecimiento de carga en el sistema así como su intermitente disponibilidad. Otro inconveniente es su costo, pues éste actualmente es determinado por el despacho centralizado que se realiza para el sistema nacional interconectado, situación que no permite conocer la condición económica del abastecimiento local de la carga [2]. Estas problemáticas hacen indispensable efectuar un análisis desde una perspectiva local respecto de la adecuación del mercado para satisfacer las necesidades energéticas.

En el nuevo paradigma energético, las transacciones de energía permiten a los diferentes clientes o comunidades elegir libremente y de manera periódica a su proveedor de servicios, ya sean empresas distribuidoras, empresas de servicios públicos o minoristas de energía pura [3]. En [4] se presenta como clave para abrir la innovación en el sector eléctrico dar paso a modelos comerciales que se centren en el consumidor, así como programas enfocados en la gestión del lado de la demanda (DSM de sus siglas en inglés Demand Side Magement).

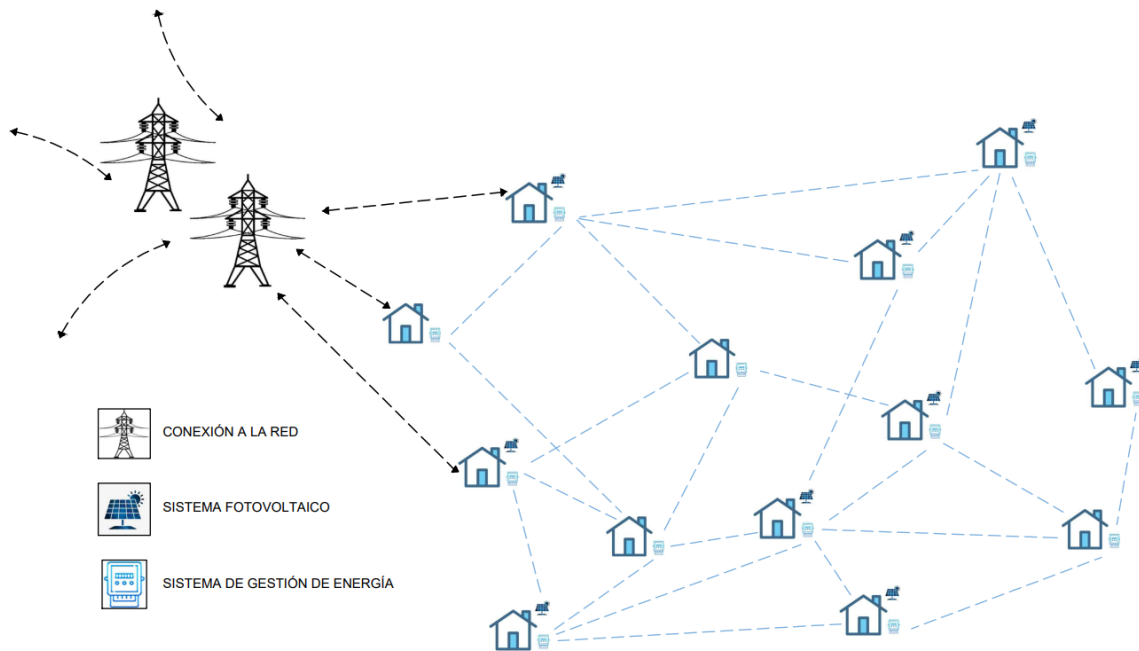
Los modelos de mercados de economía colaborativa que incentivan el comercio libre y descentralizado se presentan como una solución viable para otorgar independencia a los

consumidores [5], que a su vez pueden participar de manera activa en la toma de decisiones respecto a su suministrador de energía y con ello, dejar de depender de los monopolios naturales que se mantienen como es el caso de países como Ecuador. En general, con la penetración de las energías renovables y autoconsumo, las plataformas de intercambio de energía dan la capacidad a los consumidores de ponerse en contacto, aprovechando al máximo los sistemas de generación distribuida que cada día son más populares en todo el mundo.

La inclusión de participantes a pequeña escala en el mercado eléctrico presenta como ventaja la comercialización activa de energía con la comunidad local en tiempo real, contribuyendo al equilibrio previamente mencionado entre el consumo y la demanda, de una manera sostenible, visible y local. Para ello, se requieren sistemas informáticos que cumplan con altos estándares de seguridad, además de ser inteligentes, lo que ofrece grandes oportunidades para diseños de mercados descentralizados, proporcionando sistemas más sencillos y transparentes [6].

Para que los prosumidores tengan la posibilidad de comerciar con la energía autoproducida, el modelo de negocio que se está siendo ampliamente utilizado es el “Peer-to-Peer”, el cual permite a los individuos conectarse con otros usuarios o con empresas directamente, es decir sin necesidad de un tercero. Para poder fomentar la entrada de este tipo de modelo se requiere de la implementación de tecnologías innovadoras que permitan integrar a los participantes del mercado sin la necesidad de intermediarios centrales, y para ello cada día toma más relevancia el concepto de mercados de energía de micro red basados en cadenas de bloques (blockchain) [6]. Así, la utilización de este tipo de tecnología surge de la necesidad de coordinar y optimizar mejor la oferta y la demanda en un sistema de energía bidireccional, además permite a los usuarios decidir quién produce su energía y el tipo de fuente de generación.

Los sistemas de energía descentralizados brindan a los prosumidores y consumidores de pequeña escala (hasta 200 kW) una plataforma de mercado en la que pueden comercializar la energía producida con su comunidad, ya sea en modo isla o conectados a la red de distribución local [7]. La Figura 1.1 presenta un escenario de mercado de energía de consumidores residenciales y prosumidores, este modelo fomenta la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos locales, además es importante resaltar que los participantes del mercado no requieren de una conexión física entre sí, pudiéndose configurar micro redes virtuales con el control de múltiples proveedores, prosumidores y consumidores a manera de una comunidad virtual.



*Figura 1.1 Configuración de un mercado conformado por microrredes
Fuente: Autoría propia [6]*

Una ventaja de los mercados de micro redes es que posibilitan reducir el costo del transporte de la energía y por lo tanto disminuir las pérdidas que implica un transporte a largas distancias y el efecto de la ocurrencia de fallas en el sistema [8], fomentando de esta manera una economía colaborativa. Además, dado que el periodo de amortización de proyectos que incluyen energías renovables ha resultado un problema persistente, el poder vender el excedente de energía generada da paso a la disminución de dicho periodo haciendo atractiva la inversión en este tipo de proyectos. [9].

Para el funcionamiento de los mercados de micro redes, una propuesta descentralizada es la utilización de la tecnología de cadena de bloques (block chain), que funciona como sistemas informáticos que permiten la reconfiguración del mercado, ya que cambian el control hacia los participantes distribuidos en lugar de mantener el poder en las autoridades centrales [10]. Este tipo de tecnologías permite desarrollar cooperaciones confiables mediante plataformas de criptografía segura y contratos inteligentes, posibilitando transacciones rentables.

Así, dentro del mercado eléctrico, la tecnología blockchain da paso al registro de transacciones transparentes y continuas de incluso pequeñas transacciones de energía, al ser una tecnología emergente aún presenta problemas de escalabilidad y cargas de transacciones limitadas [11], además plantea grandes retos en cuanto a su compleja

implementación. Se debe tener en cuenta que uno de los principios de sostenibilidad en el sector eléctrico implica el uso eficiente de la energía, el implementar la tecnología de cadena de bloques requiere de cantidades notables de energía, por lo que se requiere de innovaciones computacionales que usen recursos mínimos y con ello evitar la contradicción del principio de sostenibilidad previamente mencionado [6]. La implementación de este tipo de tecnologías podría llevar a mercados energéticos operativos y rentables que fomenten la generación mediante fuentes de energía renovables en una comunidad, lo que implicaría aumentar el empleo local y su economía pues las ganancias podrían permanecer dentro de dicha comunidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Proponer un modelo de mercado eléctrico minorista de transacciones energéticas y económicas utilizando la plataforma Blockchain para Ecuador en el marco de clientes cuya potencia instalada no exceda los 10 kW.

1.2.2 Específicos

Objetivo 1: Realizar estudio del estado del arte de los mercados eléctricos minoristas en al menos dos países e incluir en el estudio al menos tres modelos de mercados.

Objetivo 2: Determinar las características del marco regulatorio ecuatoriano respecto de la estructura del sector eléctrico y el régimen de transacciones comerciales.

Objetivo 3: Elaborar una propuesta de estructura de mercado eléctrico minorista para el Ecuador, el cual incluya los tipos de transacciones comerciales y el uso de la plataforma blockchain

1.3 Alcance del estudio

El presente proyecto tiene como alcance describir los diferentes modelos de mercado minorista que actualmente se encuentran vigentes en al menos dos países y adicionalmente evidenciar las potenciales oportunidades para el sector eléctrico del Ecuador. Es relevante mencionar que está fuera del alcance de este trabajo indicar las modificaciones regulatorias que se deberían realizar para crear este nuevo modelo de mercado.

Dentro del proyecto se realizará un estudio del estado del arte sobre mercados minoristas o proyectos para diseñar mercados locales de electricidad basados en contratos inteligentes y tecnología blockchain.

En cuanto a la propuesta de uso de una moneda virtual, es importante mencionar que se planteará un modelo para liquidar la energía de manera diaria, semanal y mensual. Adicionalmente se describirán las tablas y ecuaciones para calcular el costo de la energía de generación cuarto horaria despachada al sistema de distribución, de acuerdo a la hora, día, mes, estación y precio de compra de la energía por parte de la empresa de distribución. En cuanto a las transacciones tipo blockchain no se incluirá algoritmos de programación sobre la liquidación energética, el alcance se reduce a la estructura transaccional y definición de tipos de transacciones en el mercado eléctrico minorista.

2 Contextualización de los Mercados Eléctricos Minoristas

2.1 Introducción a los Mercados Eléctricos

Actualmente, el acceso a la energía eléctrica está ligado estrechamente tanto al desarrollo social como al económico, siendo primordial que dicho acceso sea seguro, confiable, económico y eficiente como lo establecido en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 [12]. De esta manera surgen los mercados energéticos con el fin de generar las condiciones propicias para que la generación y consumo de energía eléctrica beneficien a la sociedad. Estos mercados energéticos constituyen plataformas que permiten la compra, venta y comercialización de electricidad mediante ofertas o contratos a corto, mediano y largo plazo.

Dentro del mercado de energía eléctrica se pueden encontrar dos segmentos que se diferencian por la manera en la que establecen a quien comprar o vender la energía y los precios de la misma, estos segmentos son el mercado eléctrico minorista y mayorista, cada uno de ellos posee sus propias características y regulaciones.

En el mercado eléctrico mayorista los productores de energía eléctrica venden energía en grandes cantidades a los distribuidores a un precio establecido por la oferta y la demanda en el mercado, en tanto que los distribuidores compran la energía necesaria para abastecer a los consumidores de las respectivas áreas de servicio. Por otro lado, en el mercado minorista los consumidores finales tienen la potestad de comprar la energía eléctrica a los proveedores mediante diferentes planes de tarifas y opciones de energía [13].

La diferencia clave entre estos mercados radica en la manera en la que establecen sus precios. Así, en el mercado mayorista, el precio se establece mediante subastas en las que los generadores de energía compiten para vender su energía al precio más alto posible. En cambio, en el mercado minorista los precios dependen del uso de la energía y otros factores que priorizan las necesidades del usuario final mediante planes de tarifas y opciones de energía como renovable o de origen fósil.

2.2 Mercados Eléctricos Minoristas

Los mercados eléctricos minoristas constituyen sistemas en los que los consumidores compran la energía directamente de los proveedores en lugar de tener como intermediario al proveedor designado por el gobierno o una empresa de servicios públicos. El correcto funcionamiento de este tipo de mercados es clave para satisfacer las necesidades de los consumidores con libertad de selección del suministrador, a precios justos y con eficiencia en el consumo, sumado a servicios adicionales a la energía.

En este tipo de mercado los consumidores pueden elegir la cantidad de energía que desean comprar y cómo desean pagarla, esto puede ser mediante facturación mensual o mediante planes prepago [14]. La energía continúa siendo entregada a través de la red local, la cual es propiedad de las empresas de servicios públicos y es operada por ellas, entonces la entrega de energía al consumidor se coordina entre el proveedor y la empresa de servicios públicos.

Los mercados minoristas deben garantizar a los consumidores que los proveedores de energía eléctrica sean confiables y que estén habilitados para su operación, por ello se requiere que los entes regulatorios aseguren que los precios sean justos y transparentes, así como también establezcan mecanismos de protección para los consumidores contra prácticas comerciales desleales.

Así, los mercados eléctricos minoristas presentan grandes ventajas ya que dan a los consumidores la opción de elegir a su suministrador y así también de poder controlar su suministro de energía eléctrica. De esta manera los consumidores pueden seleccionar a su proveedor y el plan de tarifa que se ajuste a sus necesidades. La demanda en el mercado da como resultado mayor competitividad entre proveedores y por consecuencia incentiva la disminución de precios e innovación, dando apertura a nuevos servicios para los consumidores finales.

Por otro lado, otro beneficio del mercado eléctrico minorista es la posibilidad que brinda a los consumidores de seleccionar la cantidad y el tipo de energía que desean comprar (promoviendo la adopción de fuentes de energía renovables), y el cómo desean pagarla, incluso pudiendo realizar transacciones su abastecimiento en tiempo real, siendo éste un factor clave para la reducción de costos, la mejora en la eficiencia del sistema y una mayor inversión en tecnologías de energía renovable.

Finalmente, se debe mencionar que los mercados eléctricos minoristas poseen la capacidad de mejorar la transparencia en el sector eléctrico, esto debido a que los proveedores están

sujetos a regulaciones y estándares para su operación en el mercado que protegen los intereses del usuario, por lo tanto los compradores pueden confiar en el proceso de adquisición de la energía.

2.3 Modelos de Mercado Minorista

La industria eléctrica ha pasado por diversos procesos de fragmentación a lo largo de la historia, con participaciones diversas de carácter local, privado y en varias ocasiones no sujetas a regulación. Así, a manera de mejorar el sistema eléctrico y llegar a áreas más remotas, a principios del siglo XX, se empezó considerar el suministro eléctrico como servicio público. El impacto económico debido al crecimiento poblacional tuvo repercusiones en las pequeñas empresas generadoras, cuya rentabilidad disminuyó considerablemente. De esta manera nacen los monopolios naturales en la industria energética, los que respondían a la necesidad de optimizar la inversión aprovechando la característica de economía de escala de esta actividad [15]. Por lo tanto, antes de la implementación de políticas de liberalización, el modelo de monopolio, ya sea estatal o privado, era comúnmente utilizado en todo el mundo y el mismo no promovía la competencia ni permitía al consumidor elegir a su proveedor. Para tener una visión general, la Figura 2.1 evidencia un mercado monopolístico y competitivo.

MERCADOS ELÉCTRICOS MONOPÓLICOS Y COMPETITIVOS

ASPECTOS	MONOPÓLICO	COMPETENCIA
GENERACIÓN	ÚNICO PROVEEDOR	MÚLTIPLES PROVEEDORES
TRANSMISIÓN	ÚNICO PROVEEDOR	ÚNICO PROVEEDOR
OPERADOR DEL SISTEMA	ÚNICO PROVEEDOR	ÚNICO PROVEEDOR
INTERMEDIARIOS	NO EXISTE	MÚLTIPLES PROVEEDORES
DISTRIBUCIÓN	ÚNICO PROVEEDOR	ÚNICO PROVEEDOR
COMERCIALIZACIÓN MINORISTA	ÚNICO PROVEEDOR	MÚLTIPLES PROVEEDORES

*Figura 2.1 Mercados eléctricos monopolísticos y competitivos [16]
Fuente: Autoría propia*

Las medidas liberalizadoras de la industria eléctrica surgen de tres factores clave [17]. El primero de ellos es el económico debido al incremento significativo en la magnitud de los mercados energéticos. Por otro lado, el factor técnico en el que los avances tecnológicos en la medida y control energético dan apertura a la descentralización del mercado y permiten una mejor relación de recuperación de la inversión a pequeña y mediana escala. Finalmente el factor político, en donde la competencia en el marco energético incentiva la eficiencia económica. De esta manera surgen modelos alternativos a los monopolios naturales a manera de promover la competencia en la industria eléctrica que se describe a continuación.

2.3.1 Modelo 1: Monopsonio o Comprador único

El monopsonio es un modelo de mercado eléctrico que posee un solo comprador de energía en una determinada área geográfica, generalmente, este comprador es la empresa de servicios públicos. En este tipo de modelo los consumidores no pueden elegir entre diferentes proveedores de energía eléctrica, ya que todos los productores tienen la obligación de vender su energía eléctrica al comprador único, de esta manera la competencia se centra en la generación, existiendo la posibilidad de tener generadores independientes para atraer inversiones [15]. El precio de la energía eléctrica es establecido mediante un proceso regulado por el gobierno, la transmisión y distribución se mantienen como monopolios naturales.

Para seleccionar el modelo de mercado eléctrico minorista que mejor se adapta a un país o región específica, se deben analizar varios factores como las necesidades energéticas, la estructura económica, la competencia en el mercado y la capacidad regulatoria del gobierno. Así, en el caso de los países en vías de desarrollo en donde un modelo de mercado más avanzado sea complejo de implementar, el modelo de comprador único podría ser una buena opción para garantizar el suministro de energía eléctrica, proporcionar estabilidad en los precios de la energía y asegurar la calidad y la continuidad del suministro [18]. Sin embargo, es necesario mencionar que el modelo de monopsonio puede limitar la competencia en el mercado y reducir la innovación y la eficiencia en la producción de energía eléctrica.

2.3.2 Modelo 2: Competencia Mayorista

En este modelo varios generadores de energía eléctrica compiten en el mercado mayorista para vender libremente su energía eléctrica a empresas de venta minorista que agrupan cantidades representativas de clientes finales cautivos o a grandes clientes finales que de

acuerdo a normativa tengan características de consumo de energía y potencia que los califique para adquirir su abastecimiento de forma directa con los generadores, incentivando así la eficiencia económica del mercado [15].

Este modelo permite a los generadores de energía eléctrica brindar diferentes precios y planes de venta para las empresas de venta minorista. Los precios de la energía eléctrica en el mercado mayorista se establecen ya sea por un proceso de subasta o mediante acuerdos bilaterales entre los generadores y los compradores.

Las ventajas de este modelo se centran en la competencia agregada al mercado, lo que puede llevar a precios más bajos para los consumidores finales, además de la posibilidad de elección de proveedores de energía eléctrica para las empresas de venta minorista, aspectos que incentivan la innovación y optimización de costos de producción. Sin embargo, es relevante mencionar que este modelo presenta mayor complejidad y puede dar paso a la posible falta de transparencia en la fijación de precios de venta mayorista.

2.3.3 Modelo 3: Libertad de elección para todos los consumidores

En este modelo todos los usuarios finales tienen la libertad de elegir su proveedor de energía eléctrica, así los consumidores tienen la opción de comprar su energía eléctrica directamente a un generador en lugar de tener que comprarla a través de empresas de venta minorista o de la empresa de servicio público regional, normalmente la apertura del sector a la competencia se da de manera gradual y los últimos consumidores que tienen la capacidad de seleccionar su suministrador son los de pequeño consumo [15].

En el modelo de libre elección se presenta como desventaja la posible complejidad en la elección de planes de tarifas y proveedores de energía eléctrica. También se presentan como dificultades la posible falta de información y transparencia en la fijación de precios así como también la posible exclusión de pequeños consumidores.

2.4 Ventajas y Desventajas de los Mercados Eléctricos Minoristas

Las ventajas y desventajas de los mercados eléctricos minoristas pueden variar dependiendo del modelo específico que se utilice. Algunas ventajas y desventajas generales son [14]:

Ventajas

- **Mayor competencia:** Incentiva la competencia entre generadores de energía, lo que puede resultar en precios más bajos y mejores opciones de tarifas para los consumidores finales.
- **Opción de elección:** Permite que los consumidores seleccionen el proveedor de energía eléctrica que mejor se adapte a sus necesidades, esto permite personalizar sus planes de tarifas y ahorrar dinero.
- **Mejoras en la eficiencia:** Fomenta la eficiencia en la producción y distribución de energía eléctrica, ya que los proveedores tendrán que competir en calidad y precio, además fomenta la inclusión de fuentes de energía renovables y da paso a la innovación tecnológica.

Desventajas

- **Complejidad del mercado:** Pueden ser muy complejo y confuso para los consumidores a la hora de entender sus opciones y elegir el mejor plan de abastecimiento.
- **Peligro de monopolización y fluctuaciones en los precios:** Si el mercado no está bien regulado, los proveedores pueden monopolizar ciertas áreas, lo que no trasladaría beneficios para el consumidor final, además situaciones operativas pueden afectar los precios de la energía eléctrica en cortos períodos de tiempo incidiendo notablemente en su estabilidad, afectando de manera importante el pronóstico de costos de compra de energía.
- **Mayor riesgo para los proveedores de energía:** Los proveedores de energía eléctrica asumen un elevado riesgo financiero al tener que competir en precios y calidad de energía, esto puede llevar a que algunos de ellos no sean rentables y tengan que salir del mercado.

Estas son solo algunas de las ventajas y desventajas generales de los mercados eléctricos minoristas, y es importante tener en cuenta que pueden variar dependiendo del modelo específico que se utilice.

2.5 Comercializadores en el Mercado Minorista

Dentro del mercado minorista, los comercializadores proveen de energía, productos y servicios complementarios basados en las necesidades de los consumidores finales, dándoles la oportunidad de elegir al suministrador cuya calidad de servicio y precio sea el mejor según los parámetros que cada consumidor considere adecuados. Así, el comercializador tiene la capacidad de comprar la energía directamente a un generador, a

otro comercializador o directamente en el mercado mayorista, pagando cargos por el uso de las redes transmisión y distribución [14], [19]. Estos cargos se deben establecer como incentivos para que las plantas más baratas puedan despacharse sin causar congestión en la red, así como proporcionar réditos que promuevan la localización eficiente de las plantas generadoras.

Así también la comercialización competitiva a nivel minorista presenta ventajas y desventajas [20]:

Ventajas

- Las necesidades del consumidor final se solventan mediante la capacidad que poseen de elegir a su suministrador de energía y negociar sus contratos a mediano o largo plazo.
- Se abre un abanico de posibilidades de nuevos productos (manejo de riesgo, gestión de la demanda), servicios y tarifas que se pueden ofrecer a los consumidores finales.
- En general, no se requiere cambios en las redes de transmisión y distribución.
- La competitividad refleja disminución de los costos en la cadena de suministro.
- La red de transporte y distribución continúan siendo reguladas, lo que asegura la no discriminación en el acceso a la red.

Desventajas

- Se pueden presentar fallos de mercado tales como la colusión y poder de mercado, por ejemplo, si el propietario de una empresa monopólica también lo es de otras empresas participantes en segmentos competitivos, el poder acumulado puede ser ejercido en contra de otros agentes. Este abuso de poder se puede evidenciar al promover condiciones discriminatorias en el acceso a las redes de transporte, así también se puede dar el caso de favorecer a la propia empresa de generación, implementar precios de distribución excesivos, generación de subsidios cruzados o a su vez imponer requisitos técnicos innecesarios para el uso de la red.
- Los pequeños consumidores corren el riesgo de mantenerse estáticos durante su participación en el mercado minorista.

2.5.1 Agregadores de demanda

Si un agente es capaz de controlar varios puntos de consumo a la vez, además de analizar sus patrones de demanda, surge la posibilidad de modular la misma optimizando de esta

forma la producción y el uso de la red en determinados momentos del día. De esta manera nace la agregación de la demanda como mecanismo para flexibilizar el sistema eléctrico y mejorar su eficiencia al reducir la carga en momentos de alta demanda.

El actor principal para este mecanismo es el ‘prosumidor’, mismo que tiene una doble función en el mercado como consumidor y productor. Estos agentes podrán ser capaces de ofertar diversos productos al sistema, tales como su producción, reducciones de su demanda o venta de energía de sistema de acumulación. Por ejemplo, una comunidad de vecinos en determinado momento reducen su demanda en un horario predefinido en el que tienen esta posibilidad, esto con el objetivo de abastecer el pico de demanda de una industria cercana. Así se obtienen como beneficios la disminución de la facturación eléctrica y una remuneración por la acción de reducción de demanda [21].

Las posibilidades de actuación de un agregador son múltiples, ya que actúan como intermediarios en el mercado eléctrico minorista y se encargan de agrupar y negociar los servicios a ofrecer al operador del sistema, obteniendo a cambio una remuneración. Los agregadores de demanda ofrecen servicios diversos como la gestión de la demanda, la disminución de carga en momentos de alta demanda y el suministro de energía mediante fuentes renovables, en ciertos casos también actúan como comercializadores de energía, vendiendo la energía comprada en el mercado mayorista a los consumidores minoristas a precios más competitivos [22].

2.5.1.1 CCA (Community Choice Aggregation)

Constituyen un tipo específico de agregador de demanda que se enfoca a nivel comunitario para ofrecer opciones de suministro de energía eléctrica. Los CCA son entidades gubernamentales o bien sin fines de lucro, que permiten a la comunidad elegir su proveedor de electricidad en lugar de tener que comprar la energía de un proveedor predefinido [23]. Los CCA se encargan de negociar contratos para el suministro de energía a gran escala en nombre de sus clientes para conseguir beneficios para la comunidad. Esto da como resultado la obtención de precios más competitivos además de una mayor cantidad de opciones de suministro, dentro de este aspecto los CCA pueden favorecer la adopción de fuentes de energía renovable, ya que ofrecen directamente este tipo de suministro a los usuarios que deseen apoyar en la transición energética hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

2.6 Contratos dentro del Mercado Minorista

En el mercado eléctrico minorista se pueden encontrar diversos tipos de contratos que permiten establecer acuerdos entre los distintos actores comerciales, algunos de ellos se describen a continuación.

2.6.1 Contratos de Compraventa de Energía (PPA)

Los contratos de compraventa de energía o PPA por sus siglas en inglés que provienen de Power Purchase Agreements, son contratos de compraventa de energía renovable a largo plazo (normalmente de 5 a 20 años) entre un productor y un consumidor corporativo a un precio previamente pactado [24], esto ayuda a las empresas a reducir su huella ecológica en el entorno, reducir su dependencia de la red eléctrica convencional y al mismo tiempo conseguir precios estables para su suministro energético.

Es importante mencionar que generalmente, la implementación del sistema de generación renovable no corre a cargo del cliente, sino el consumidor simplemente debe pagar por la tarifa acordada. Cabe destacar que este tipo de contratos son personalizados en función del consumo del comprador, en conjunto con sus objetivos de sostenibilidad y el nivel de riesgo que pueda asumir [25]. Entre las principales ventajas se encuentra el aseguramiento de un precio fijo de la energía en el largo plazo, lo que protege a las empresas de la volatilidad del mercado, además de permitir obtener precios mucho más competitivos.

Los PPA se pueden diferenciar en función del punto de inyección de energía, en donde los on-site corresponden a los contratos en donde las instalaciones de generación se montan dentro de la propia empresa y se conectan directamente con su red interna, por otro lado, los PPA off-site son aquellos en los que la electricidad es recibida a través de la red de transmisión y/o distribución local, ya que no necesariamente requiere proximidad del cliente con el sistema de generación. Además también se pueden encontrar PPA virtuales, que se basan en acuerdos de precio entre el proveedor y consumidor, sin entrega física de energía [24].

2.7 Medición en el Mercado Minorista

En los modelos de competencia minorista, los clientes requieren de mecanismos de medición como fuente de información para la facturación, independientemente del tipo de contrato del comercializador con el generador. Teniendo en cuenta que el precio horario de la energía consumida difiere a lo largo del día, la medición mensual energética no resulta el mejor parámetro de valoración de la energía consumida [26]. De esta manera los

contadores horarios permiten calcular de una manera más precisa el costo real del consumo. Sin embargo, para el área residencial o de pequeños consumidores, los perfiles de carga estáticos continúan siendo la base para determinar la planilla mensual de los clientes [14].

Con el fin de aumentar la precisión de la medición, la utilización de sistemas de medición inteligente o avanzada está sentando pasos firmes dentro de los mercados eléctricos. Este tipo de medición desempeña un papel clave en los mercados eléctricos minoristas y puede tener varios efectos positivos. Uno de ellos es la facturación precisa que permite obtener el consumo real de energía por parte de los usuarios. Con este tipo de información más detallada se pueden identificar oportunidades para reducir el consumo energético lo que implica mayor eficiencia dentro del sistema eléctrico, además es posible gestionar la demanda, y con ello mejorar la estabilidad de la red eléctrica. Por otro lado, es importante mencionar que la medición inteligente posibilita la adopción efectiva de energías renovables dentro del sistema eléctrico al saber su generación en tiempo real y la demanda energética [27].

Existen diferentes tipos de sistemas de medición inteligente dentro de los mercados eléctricos que dan la oportunidad a los consumidores de controlar su consumo, optimizar la generación y distribución, y reducir los costos de abastecimiento eléctrico. Algunos de estos sistemas se describen a continuación.

2.7.1 Net metering

Este sistema de medición permite facturar a los clientes solamente por el uso neto de energía eléctrica, así este sistema acredita a los propietarios del sistema fotovoltaico o de otros sistemas de energía renovable por la electricidad que producen e inyectan en la red [28]. Así, es posible medir la cantidad de energía que un consumidor genera y utiliza de la red eléctrica.

En resumen, la energía generada en exceso se inyecta a la red eléctrica y otorga un crédito al consumidor para su factura de energía, dicho crédito puede ser utilizado para compensar la energía consumida de la red eléctrica cuando el sistema de energía renovable no genera la cantidad suficiente energía para su autoconsumo.

2.7.2 Feed-in tariff (FIT)

Al igual que el net metering, este sistema de medición se enfoca en fomentar la adopción de energía renovable. Sin embargo, en este mecanismo se realizan pagos a los propietarios

del sistema renovable por generar su electricidad y devolverla a la red, el pago se recibe independientemente si la energía generada es consumida o vendida a la red. Por lo tanto, la principal diferencia con el net metering es que en el sistema FIT el consumidor vende toda la energía que genera a la red eléctrica a un precio fijo establecido ya sea por el gobierno o el ente regulador del mercado eléctrico, en tanto que en el net metering solo se consume energía de la red cuando resulta necesario por la demanda[29].

Las FIT actúan como una especie de subsidio que garantiza un precio fijo para la energía proveniente de fuentes renovables por un periodo de tiempo, dicho precio suele ser superior a la tasa regular del mercado, haciéndolo atractivo para los inversionistas [28]. Sin embargo, también pueden ser costosas para los consumidores que no utilizan energía renovable, quien podrían pagar el precio más alto que compense el costo de la compra de la energía renovable generada por los otros consumidores. Por lo tanto, resulta necesario que los mercados eléctricos equilibren los beneficios del FIT con los costos para los consumidores y la viabilidad financiera del mercado eléctrico en general [30].

2.7.3 Sistema de Medición Exclusiva (SME)

A diferencia del net metering y del FIT, donde el exceso de energía generada por el consumidor se vende a la red, en un sistema de medición exclusiva, toda la energía renovable producida es utilizada directamente por el consumidor y no se devuelve a la red eléctrica, es decir, en este sistema el consumidor solo paga por la energía que consume de la red eléctrica. [30].

Las ventajas que presenta el SME se evidencian cuando los consumidores generan suficiente energía renovable para satisfacer sus necesidades y no requieren vender su exceso de energía a la red eléctrica. Sin embargo, resulta menos beneficioso para los consumidores que requieren consumir electricidad de la red ya que no generan la energía suficiente para sustentar su propia demanda [31].

Es importante destacar que cada sistema de medición tiene sus ventajas y desventajas, y la elección del sistema de medición depende de las regulaciones y políticas del mercado eléctrico en cada país.

2.8 Modelos de intercambio de energía

Los modelos de intercambio de energía se diseñaron para fomentar el uso de fuentes de energía renovables mediante un conjunto de mecanismos y políticas para intercambiar energía eléctrica entre diversos actores del mercado. Estos modelos incluyen contratos de

compraventa de energía, sistemas de compensación y medición, acuerdos de intercambio de energía, entre otros. A continuación se describen algunos de los principales modelos de intercambio de energía.

2.8.1 Modelo Peer to Peer (P2P)

Este es un modelo de intercambio de recursos y servicios que permite que dos o más dispositivos se conecten sin necesidad de un intermediario. En términos del mercado eléctrico, este modelo da paso a que consumidores y productores de energía puedan conectarse directamente para intercambiar electricidad, comúnmente proveniente de fuentes de energía renovable, esto a través de plataformas digitales [32]. La filosofía P2P se presenta como camino hacia un comercio libre y descentralizado, en el que no se requiere de intermediarios para llevar a cabo transacciones [5].

En este tipo de modelo los productores tienen la capacidad de ofrecer el excedente de energía generada a otros consumidores cercanos, y estos consumidores pueden comprar dicha energía a precios acordados, lo que puede disminuir los costos por adquisición de energía en comparación con la ofertada por la red eléctrica convencional.

Así, el modelo P2P se presenta como una solución innovadora y sostenible de intercambiar energía eléctrica y además promueve la generación de energía mediante fuentes renovables de manera local y con ello se tiene como resultado la reducción de emisiones de carbono. Sin embargo, es importante mencionar que su implementación presenta grandes desafíos regulatorios que permitan garantizar la seguridad y estabilidad de la red eléctrica.

2.8.2 Comunidades energéticas

Las comunidades energéticas son una forma de organización que busca fomentar la transición hacia un sistema energético más sostenible, descentralizado y democrático, gracias a la utilización de fuentes de energía limpias y mediante la participación de los ciudadanos y comunidades en las decisiones de producción y gestión del suministro de energía.

En contexto, las comunidades energéticas son agrupaciones, empresas u organizaciones que colaboran para gestionar y compartir la energía producida localmente, entonces los participantes pueden elegir qué servicio llevar a cabo, es decir, producir, consumir, almacenar, compartir o vender energía [33].

Las principales actividades desarrolladas en una comunidad energética son la generación de energía mediante fuentes renovables, el suministro, consumo, agregación,

almacenamiento de energía y posiblemente su distribución. Además proporcionan servicios referentes a eficiencia energética, usualmente prestan servicios de carga de vehículos eléctricos.

Este modelo presenta grandes beneficios económicos, sociales y medioambientales, por ejemplo, los participantes pueden reducir su facturación energética, aumentar la competitividad en la industria, fomentar la creación de empleo local, disminuir las emisiones de carbono, evitar la dependencia sobre las compañías eléctricas convencionales y en general mejorar la resiliencia energética de la comunidad.

Sin embargo, también presenta grandes retos como la falta de un marco normativo y regulatorio definido, también dependen en gran manera de voluntarios y profesionales de sectores diferentes al energético. Otro reto notable es la escasa experiencia para resolver barreras administrativas al ser un modelo de organización relativamente nuevo, lo que también lo vuelve complejo a la hora de usar estrategias de relaciones locales [34].

2.8.3 Virtual Power Plants (VPP)

Son un nuevo concepto de gestión energética de la demanda que consiste básicamente en un software remoto que permite agrupar múltiples fuentes de generación (residencial, comercial, industrial) [35]. Es decir, este modelo permite la conexión y gestión conjunta de las fuentes descentralizadas de generación participantes así como del almacenamiento de energía eléctrica, siendo su objetivo principal actuar como una única central eléctrica virtual que controla sistemas de generación distribuida, baterías de almacenamiento, cargadores de vehículos eléctricos y otros dispositivos de gestión de carga.

Los operadores de los VPP pueden gestionar de manera centralizada los recursos para maximizar su eficiencia y mejorar la rentabilidad de los mismos. Por ejemplo, se pueden comprar energía durante periodos de baja demanda a costos reducidos y almacenarla para su posterior uso en periodos de alta demanda en donde perciben mejores remuneraciones por la energía vendida. Los VPP también pueden ofertar servicios de red tales como la gestión de oferta y la demanda en tiempo real, lo cual permite mejorar la estabilidad del sistema [1].

El modelo VPP está siendo aceptado cada vez más en todo el mundo, sin embargo, las reformas dentro del mercado eléctrico para su óptimo funcionamiento es uno de los principales factores que impide su implementación en América Latina, cabe recalcar que los VPP han tenido gran acogida en Estados Unidos, Europa, Asia y Australia [36]. En Australia

se tiene el VPP más grande del mundo, este modelo implementado por la empresa de servicios públicos AGL con sede en Sidney está compuesto por sistemas de baterías en más de 1000 hogares que cuentan con sistemas de generación fotovoltaica en sus azoteas, lo que ha sentado un precedente para el cambio regulatorio requerido de manera que esta solución sea efectiva y se puedan habilitar más VPPs [37].

2.8.4 “Landowners” (propietarios de tierras)

En el mercado eléctrico, especialmente en el sector de las energías renovables, es común escuchar el término de “*landowners*”, que se refiere a los propietarios de las tierras que arriendan sus terrenos para la instalación de sistemas de generación de energía. Así, estos terrenos son utilizados para la construcción de plantas solares fotovoltaicas, parques eólicos, plantas de biomasa, entre otros.

Este concepto da paso a beneficios tanto para el arrendatario, como para las empresas inversoras, ya que los propietarios de los terrenos pueden obtener ingresos adicionales y además aportar dentro del proceso de descarbonización, en tanto que la empresa tiene acceso a ubicaciones idóneas para la instalación de sus sistemas de generación [38]. Los términos y condiciones de arrendamiento varían según el caso en específico y se negocian mediante acuerdos que contemplan aspectos tales como la duración del arrendamiento, los pagos, las responsabilidades de mantenimiento entre otros temas relevantes. Es importante recalcar el valor sustancial que este tipo de modelo tiene en las comunidades rurales, ya que además de generar nuevos ingresos, se otorga también soporte comunitario y se generan plazas de empleo.

3 Análisis de Experiencias Internacionales en Mercados Eléctricos Minoristas

3.1 Caso de Estudio: Estados Unidos

El mercado eléctrico minorista de este país es diverso y varía según los estados, ya que cada uno de ellos tiene la autoridad para establecer sus propias regulaciones y políticas, lo que da como resultado una gran variedad de estructuras dentro del mercado eléctrico minorista y diferentes modelos de negocio. Se puede decir que, Estados Unidos es un país en constante evolución y adaptación a las nuevas necesidades de los consumidores, a la tecnología de vanguardia y adaptando el marco regulatorio a las necesidades actuales.

En general, se pueden distinguir tres tipos de mercados, el primero de ellos es el completamente liberalizado, en el que los consumidores tienen la capacidad de elegir a su proveedor de energía y los precios son determinados en base a la oferta y demanda. Otro

eléctrico minorista de elección en los diferentes estados de EEUU.



Antes de 1990, empresas eléctricas integradas verticalmente proporcionaban el suministro de energía eléctrica en EEUU, es decir eran los encargados de la generación, de los sistemas de transmisión y distribución, y además vendían la electricidad a los clientes minoristas. En la década de 1990 empezó la reestructuración de la industria eléctrica, siendo el primer paso la separación empresarial de las actividades de generación, transmisión y distribución, esto de forma previa a establecer un modelo de mercado mayorista a nivel de generación [39]. En algunos estados también se permitió que proveedores minoristas competitivos compraran electricidad al por mayor y la vendieran a

los consumidores finales. Así se introdujo la competencia en el comercio minorista de electricidad con el afán de dar opciones a los consumidores, y con ello fomentar servicios innovadores y trasladar beneficios de reducción de costos hacia los usuarios finales [40].

Para 2016, en 19 estados era posible que usuarios calificados eligieran a su proveedor de electricidad, siendo posible esta libertad de elección incluso para consumidores residenciales en 14 estados. Como ejemplos de estados con competencia minorista adecuada se tiene a Texas, Illinois y Ohio, que tienen el 100%, 60% y 50% de sus clientes residenciales recibiendo electricidad directamente de proveedores de su elección [41]. La tarifa de electricidad para la facturación mensual en ese momento se dividía en el cargo por entrega de electricidad por parte de las empresas distribuidoras y el cargo por la energía en sí, que dependía del proveedor seleccionado. Cabe recalcar que la mayoría de estados requieren de un servicio estándar como respaldo para los usuarios que no elijan un proveedor [39]. Este servicio estándar marcó una referencia en el costo de la energía, ya que el resto de proveedores minoristas no podían ofrecer precios más altos que el impuesto por el de servicios estándar ya que dejarían de ser atractivos.

Actualmente, los mercados minoristas asumen una tendencia creciente hacia la participación activa de los consumidores en el mercado, esto sumado a los avances tecnológicos, dan paso a modelos de negocio transactivos energéticos innovadores ya acogidos en diversos estados, así a continuación se describirán casos relevantes para el presente estudio.

3.1.1.1 Implementación del modelo Peer to Peer en Brooklyn

En Brooklyn, se implementó el primer proyecto a nivel mundial en 2016 con la utilización del modelo P2P y cadenas de bloques denominado *“The Brooklyn Microgrid (BMG)”*, proyecto que incluye una microred tanto física como virtual, los participantes del proyecto se ubican en tres redes de distribución como se puede observar en la Figura 3.2 Este proyecto es gestionado por LO3 Energy, que es una empresa con sede en Brooklyn, New York, dedicada a desarrollar soluciones innovadoras en el campo de la energía, creando sistemas energéticos más eficientes, transparentes y sostenibles [42]. Esta empresa fue fundada en 2012, y es mundialmente reconocida desde entonces por sus proyectos pioneros en el área de energía descentralizada, permitiendo a productores y consumidores realizar transacciones en un entorno local. Además contaron con el apoyo técnico de *“Siemens Digital Grid Division”* para la instauración de la microrred y de Siemens como financiador mediante su proyecto *“Next47”*, en apoyo a empresas emergentes de tecnologías potencialmente disruptivas [43] [44].

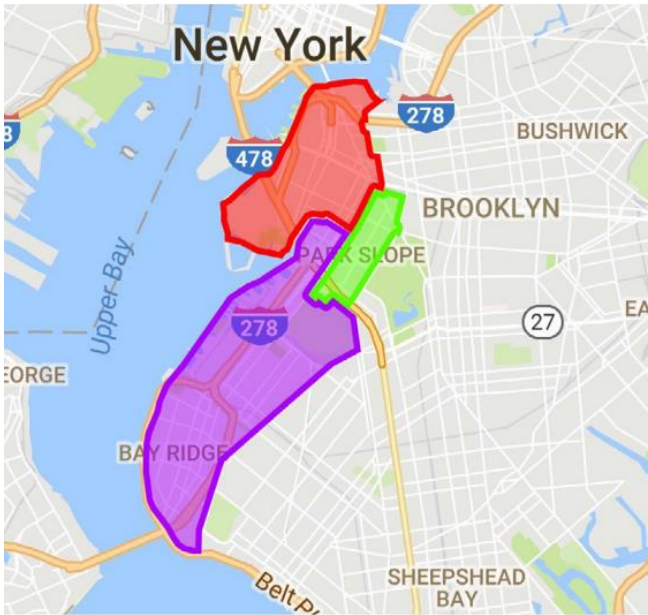


Figura 3.2 Conexión de los participantes BMG: Borough Hall (rojo), Bay Ridge (morado) y Park Slope (verde).
Fuente: Designing microgrid energy markets. A case study: The Brooklyn Microgrid

El BMG busca abordar diversas problemáticas como redes eléctricas obsoletas, eventos climáticos severos (como el Huracán Sandy en 2012), la creciente cantidad de generación renovable (especialmente fotovoltaica residencial), y los nuevos elementos incorporados como carga (vehículos eléctricos o sistemas de almacenamiento), esto mediante la incorporación de mercados energéticos locales que permitan a los miembros de su comunidad intercambiar energía P2P generada con sus vecinos[43]. Esta medida tiene especial relevancia en los sectores observados en la Figura 3.2 (sobre todo para la red de distribución de Borough Hall) debido a que son ampliamente propensas a fallas ya que la cargabilidad de la línea es elevada por su frecuente congestión[6].

El proyecto consta de una plataforma comunitaria virtual para el mercado energético y de una microrred física, estos constituyen los dos componentes principales del BMG, mismos que se resumen en la Tabla 1 [6].

Tabla 1 Componentes principales del BMG
Fuente: Autoría propia

Componente principal BMG	Plataforma Comunitaria Virtual	Microrred física
Descripción	Plataforma que proporciona la infraestructura técnica local para el mercado eléctrico.	Se construye una microrred física adicional a la red tradicional existente.

Características	• Utiliza el protocolo Tendermint para formar la cadena de bloques privada, que es capaz de comunicarse con otras cadenas de bloques [45]. • Se implementa la arquitectura blockchain y medidores inteligentes TransActive Grid. • Se mantiene el medidor analógico como respaldo y mecanismo de verificación.	• Actúa como respaldo ante cortes energéticos. • Puede operar en modo isla. • Instalaciones críticas como hospitales reciben tarifas fijas y tienen preferencias [43]. • Los excedentes energéticos de empresas y residencias deben ser ofertados. • Actualmente se comprende de bloque de viviendas de 10 por 10 y se plantea una expansión.
------------------------	--	---

El termino TransActive Grid se refiere a la plataforma más conocida de la LO3 Energy, misma que aprovecha los medidores inteligentes para registrar la cantidad de energía generada y consumida, y utiliza las cadenas de bloques para rastrear y verificar las transacciones energéticas realizadas por los participantes del mercado [42]. Como ejemplo de los sistemas de medición inteligente, su implementación se presenta la Figura 3.3



Figura 3.3 Implementación de los medidores inteligentes TransActive Grid
Fuente: Addressing Key Challenges to Making Enterprise Blockchain Applications a Reality

Antes de describir la topología del BGM, es necesario recopilar lo descrito en [6] [42][43], en donde se desglosan siete componentes específicos para el correcto funcionamiento de los mercados eléctricos de microrredes basados en la tecnología blockchain, estos 7 componentes se resumen en la Figura 3.4

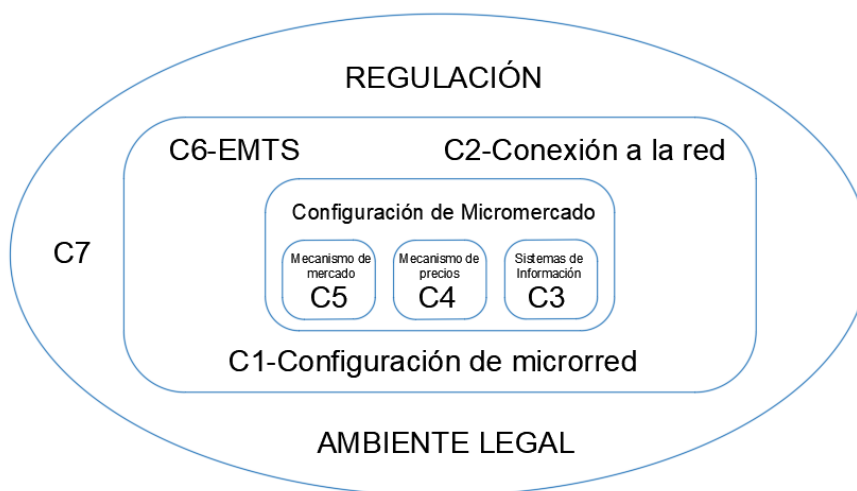


Figura 3.4 Componentes para la correcta operación de mercados eléctricos de microrredes
Fuente: Autoría propia [6]

Estos componentes pueden ser explicados de la siguiente manera:

- **C1- Configuración de microrred:** en esta primera componente se definen los objetivos de la microrred, que puede ser mejorar la seguridad del suministro energético o la integración de generación local renovable, esto se da mediante la inclusión de prosumidores en el mercado, además se debe definir el mecanismo de transmisión de la energía generada.
- **C2 – Conexión a la red:** Para el correcto equilibrio de la generación y demanda es necesario una correcta conexión (uno o varios puntos) a la red de distribución, ya sea para la puesta en marcha de una red física o virtual, donde una de las principales ventajas de las microrredes físicas es que pueden desacoplarse de la red cuando existan cortes energéticos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para la actuación en isla de una microrred se debe garantizar niveles adecuados de seguridad del suministro, además de tener en cuenta los posibles problemas de congestión de la red, para ello resulta necesario la utilización de sistemas de medición electrónicos [48] [49].
- **C3 – Sistemas de información:** sistemas informáticos de alto rendimiento y de resolución temporal son requeridos para conectar a los participantes en el mercado sin necesidad de un intermediario, de manera segura y sin posibilidad de discriminación [49]. Para ello una opción es utilizar contratos inteligentes mediante protocolos de cadenas de bloques con una conexión confiable a los medidores inteligentes de los participantes.

En esta componente es necesario analizar los mecanismos de verificación del sistema, que dependen de la configuración de la microrred. Si los participantes del

mercado son confiables, un consenso basado en identidad basados en hash es suficientemente seguro (verificación simple), reemplazando a los mecanismos criptográficos complejos que requieren mayor cantidad de datos para su implementación [50].

- **C4 – Mecanismos de Precios:** Se utilizan para realizar la oferta y demanda de energía de manera eficiente. Usualmente sirven como mecanismo de fijación de precios las subastas de compensación. Se debe analizar que una microrred puede poseer diferentes tarifas respecto a la red tradicional. Además, los prosumidores están en la capacidad de generar ganancias al fijar sus precios en base al apoyo a la utilización de energías renovables, lo que podría situar su valor por encima del precio de la red tradicional, caso contrario dicho valor debería ser menor para garantizar la rentabilidad de la microrred, esto se identifica según el tipo de microrred a implementar.
- **C5 – Mecanismos de mercado:** Esta componente contiene las reglas para la asignación (con un máximo y mínimo dependiendo de los prosumidores) y pago de la energía dentro del mercado mediante el componente C3. Se deben analizar espacios temporales como el diario o el intradiario, de manera que se pueda obtener una asignación eficiente de la demanda de energía. Las subastas se utilizan ampliamente en negociaciones intradiarias rápidas, sin embargo, para el caso de transacciones dentro del modelo P2P resultan más adecuados libros de órdenes cerrados compensados en distintos intervalos de tiempo. La microrred resulta rentable si los precios son menores a los cobrados por los principales operadores de red, sin embargo, si la demanda es consciente de la importancia de utilizar fuentes de energía renovables, se pueden exigir precios más altos [49].
- **C6 – Sistemas de comercio de gestión de energía (EMTS por sus siglas en inglés Energy Management Trading System):** Estos sistemas aseguran el suministro en tiempo real y automático de energía a los participantes del mercado. Con el acceso a los datos de oferta y demanda se crean licitaciones estratégicas inteligentes, mismas que toman en cuenta factores socioeconómicos como la preferencia en cuanto a fuentes energéticas. Como clave, un EMTS simple compra energía del mercado de microrredes cuando el precio cae por debajo de su límite de precio máximo, pero para EMTS inteligentes se emplean precios variables en diferentes momentos.
- **C7 – Regulaciones:** Para la inclusión de los mercados de microrredes en el marco regulatorio energético se requieren normativas que designen que tipo de microrredes están permitidas, sus tarifas y como se integrarán al sistema

tradicional. Así la introducción de subsidios se presenta como mecanismo para incentivar la puesta en marcha de este tipo de mercados, con el fin de utilizar los recursos locales eficientemente y contribuir con el cambio climático.

Partiendo de la explicación de los componentes de un mercado de microrredes óptimo, es posible analizar el caso del BMG. Como se mencionó anteriormente, se cuenta con la plataforma virtual y la microrred física, y para una mejor comprensión, en la Figura 3.5 se visualiza la topología de alto nivel con la que cuenta Brooklyn en los tres sectores cubiertos por la microrred.

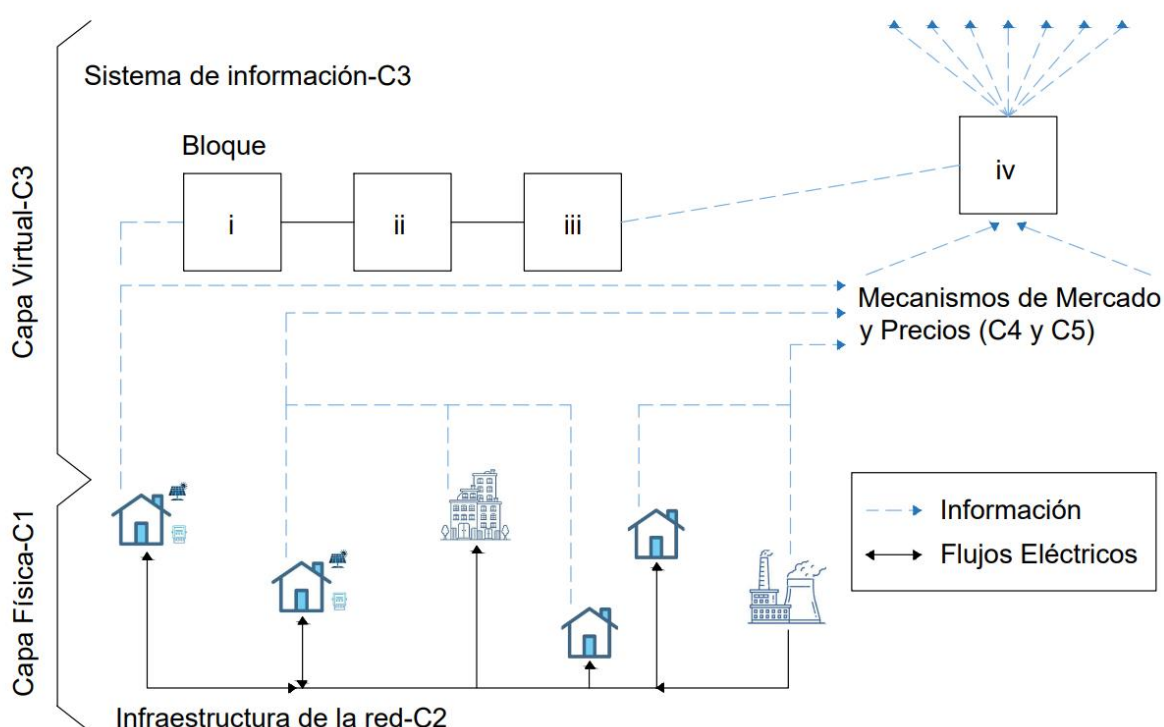


Figura 3.5 Topología de la BGM
Fuente: Autoría Propia [6]

Es importante recalcar que la microrred física solo es una parte del BMG, ya que el mismo usa mayormente la red eléctrica tradicional administrada por Con Edison, Inc.[51], que es el operador independiente del sistema, así solo en situaciones de emergencia la microrred se desacopla de la red tradicional. En cuanto a la información (datos de consumo y generación), la misma es transferida a través de la capa virtual desde los contadores inteligentes TransActive Grid de los participantes a sus cuentas de blockchain. Las órdenes de compra y demanda son creadas mediante dicha información, y las órdenes son enviadas al mecanismo de mercado (C4) para la formación de contratos inteligentes. Posteriormente se inicia la etapa de emparejamiento, que cuando finaliza da paso al pago y se crea un

nuevo bloque, que en la Figura 3.5 está representado como bloque iv y posee toda la información actualizada del mercado, y las transacciones realizadas se envían a todos los agentes involucrados [6]. La etapa de pruebas preliminares del BMG se realizó entre dos participantes durante tres meses mediante transacciones P2P.

Profundizando en el mecanismo de mercado, los participantes del mismo (C1) son los prosumidores y consumidores locales, también es posible la participación a nivel hiperlocal (área circundante). La conexión entre la C1 y la infraestructura de la red (C2) se realiza mediante los medidores inteligentes que permiten la medición del suministro y demanda de electricidad, además liquidan las transacciones a través del sistema de información (C3) (protocolo blockchain privado TransActive Grid), que permite la verificación de los datos. La red eléctrica convencional ayuda a equilibrar la oferta y la demanda, sin embargo, cuando se desacopla la microrred, esta no garantiza el suministro a toda la red virtual. La comercialización es realizada principalmente por el EMTS (C6) automáticamente en base a las preferencias de los participantes del mercado (por ejemplo, tipo de energía y límites de precio). La Figura 3.6 permite entender mejor el mecanismo de mercado.

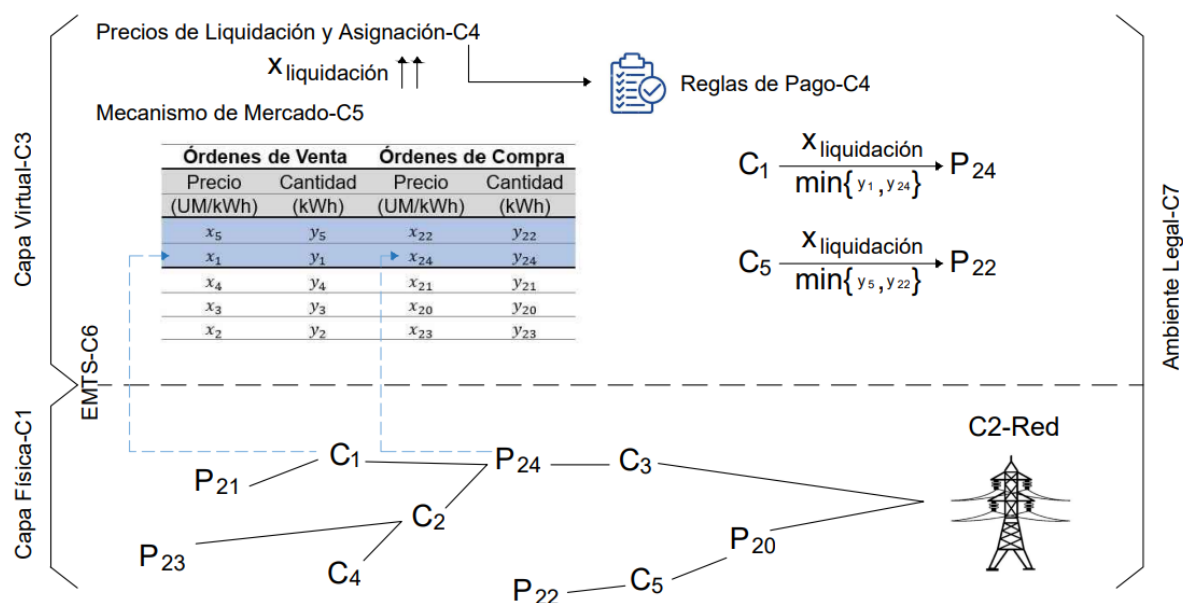


Figura 3.6 Esquematización de transacciones locales realizadas en el BMG
Fuente: Autoría Propia [6]

Donde, P_n representa al prosumidor n y C_α al consumidor α . Entonces cualquier consumidor o prosumidor que busque comercializar en la siguiente franja horaria está en la capacidad de enviar órdenes de compra o venta (cantidad y precio) a través de su EMTS (C6) al mercado. Así el mecanismo de mercado utilizado en el BMG es un libro de órdenes de tipo cerrado con una doble subasta de tiempo discreto en periodos de 15 minutos. El libro mayor

debe estar distribuido en la red, ya que para asegurar la resiliencia del sistema no puede tener alojamiento en la nube, porque cuando falla la red no tendría comunicación [52]. Este tipo de mecanismo permite determinar el precio y la asignación de los activos negociados, que en este caso es la energía. Las transacciones se realizan durante las subastas, y el libro de órdenes registra todas las órdenes que se reciben en el intervalo discreto de tiempo hasta el momento de la subasta. Previo a la subasta se realiza un análisis de las órdenes para buscar el precio de equilibrio que maximiza el volumen de transacciones y minimiza la discrepancia entre la oferta y la demanda. Durante la subasta se realiza el cruce de las órdenes de compra y venta, y las órdenes que no se cruzan se almacenan en el libro de órdenes para la siguiente subasta. La doble subasta hace referencia a que los participantes tienen la oportunidad de enviar nuevas órdenes y ajustar su estrategia, ya que la determinación de precios se realiza en dos momentos, que generalmente son al inicio y cierre del periodo de negociación, por lo que pueden ajustar su información en base a los resultados de la primera subasta.

Así retomando el mecanismo presentado en la Figura 3.6, los consumidores tienden a ofertar su límite de precio máximo según sus preferencias energéticas, en tanto que los prosumidores ofertan el valor mínimo que solicitan por la venta de la energía generada. Así, un consumidor C_1 ofrece un valor máximo x_1 por una cantidad y_1 , y el prosumidor P_{24} ofrece un precio mínimo x_{24} por una cantidad y_{24} . Así, tal como un despacho de mérito, el mejor precio se asigna primero. Si el consumidor no reduce su valor máximo deberá ser abastecido por el servicio estándar ofertado por la red tradicional o de manera hiperlocal, esto es asignado mediante mecanismos similares al descrito o precios predefinidos.

A finales de 2017, la BMG funcionaba con 60 prosumidores y aproximadamente 500 consumidores en su mercado de prueba y no contaba con un marco regulatorio regido dentro del área cobertura para su comercio P2P local. Sin embargo, en colaboración con la empresa de servicios públicos, continúan trabajando para proporcionar un correcto marco legal y además obtener una licencia dentro del mercado minorista requerido por el estado de New York para 2018, en donde se iniciarán las comercializaciones oficiales del mercado.

En resumen, BMG es un mercado de energía transactiva que se enfoca en la generación local mediante el recurso solar que permite a los propietarios de los paneles fotovoltaicos, ya sean residenciales o comerciales, vender el excedente de energía generada a los residentes de la ciudad de New York que tienen como prioridad la utilización de fuentes renovables en lugar de combustibles fósiles, a precios rentables [53]. Actualmente la BMG cuenta con la plataforma Exergy [54] patentada por la LO3 Energy, que crea mercados de

energía localizados, en donde se realizan transacciones de energía de manera autónoma casi en tiempo real, utilizando la infraestructura ya existente [53]. Así, el objetivo central de la Brooklyn Microgrid es fomentar la producción y consumo de energía solar fotovoltaica en la ciudad mediante tecnologías avanzadas como lo son las plataformas basadas en Blockchain, con ello se busca que la energía se genere, almacene y negocie localmente, dando paso a comunidades más eficientes, resilientes y sostenibles. Es posible acceder al mercado energético a través de la aplicación móvil Brooklyn Microgrid, en donde los participantes pueden comprar créditos locales de energía o vender sus excedentes al mercado, en esta aplicación se puede seleccionar la fuente de energía (renovable o marrón que corresponde a la convencional ofertada por el proveedor de servicios públicos) y el presupuesto diario para comprar la energía en el mercado. En la Figura 3.7 se presenta la interfaz gráfica de la aplicación móvil de la BMG.

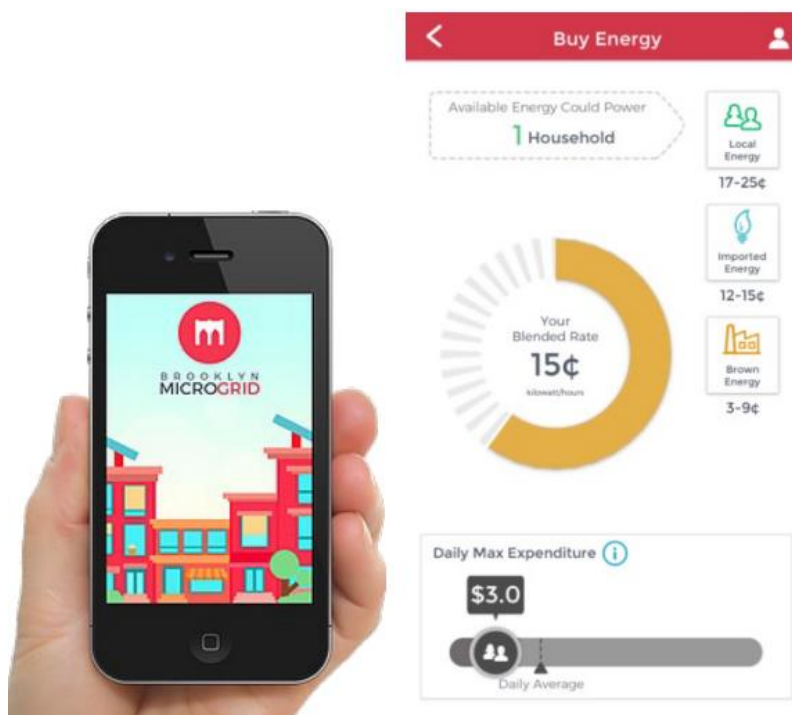


Figura 3.7 Interfaz gráfica de la aplicación móvil de la BMG
Fuente: Addressing Key Challenges to Making Enterprise Blockchain Applications a Reality

Finalmente, es necesario mencionar que el enfoque de LO3 Energy es ejercer la gobernanza de su plataforma mediante el establecimiento de la Fundación sin fines de lucro Exergy, esto para poder trabajar como un organismo independiente de gobierno y asesoramiento para los futuros adoptantes en la comunidad [52].

3.1.1.2 Nevada, “Statewide Ballot Question 3” (2016)

Resulta importante analizar el caso de la reforma presentada en el “*Statewide Ballot Question 3*” de 2016 en Nevada, ya que da un análisis argumentativo que señala los pros y contras de minimizar las regulaciones sobre el mercado de energía y eliminar los monopolios legales energéticos.

En Nevada, el alto consumo fuentes renovables ha impulsado al estado a desregular el mercado minorista. En 2016, “The Energy Choice Initiative” propuso romper el monopolio existente y generar un mercado minorista de energía eléctrica abierto y competitivo. Teniendo en cuenta que Nevada tenía una de las tarifas eléctricas más altas de Occidente, se determinaron los siguientes problemas en las políticas energéticas a los que los clientes estaban sometidos [55]:

- Las tarifas eléctricas pagadas son dictadas en gran medida por la empresa de servicios públicos, garantizado el beneficio de dicha empresa.
- Existe un monopolio legal en el mercado eléctrico de Nevada y las tarifas cobradas a los consumidores no están sujetas a competencia.
- Al no existir un mercado abierto, es complicado para los habitantes de Nevada tomar ventaja de los avances tecnológicos en generación energética.
- Los comerciantes y empresas no pueden decidir el tipo de energía eléctrica que ellos quieren.

Esta iniciativa planteada da paso factores clave [56] cómo eliminar el monopolio existente en el mercado minorista de energía, así también permite crear un nuevo mercado en el que se unan tanto clientes como proveedores y participen activamente. También busca proteger a los clientes al exigir legislaciones que permitan tener a los habitantes de Nevada electricidad segura, confiable y a precios competitivos, protegiendo a dichos clientes de desconexiones y prácticas desleales, así como plantear el pago de tarifas de electricidad impuestas por un mercado abierto y competitivo, no por una agencia gubernamental designada. Con esta reforma los proveedores de energía pueden ofrecer electricidad de cualquier fuente, incluidas las fuentes renovables, sin necesidad de aprobación por parte de una comisión y mantener el estándar de la cartera de energía renovable, junto con otras políticas renovables. Finalmente, se tiene como objetivo el preservar la empresa de distribución como operador de la red de distribución y permitir que la Comisión continúe regulando el mercado de electricidad, pero en lugar de regular un solo proveedor, regulan el mercado competitivo.

La oposición sustentó que la desregulación es innecesaria, ya que no trae consigo beneficios probados en cuanto a disminución de precios en los estados en donde se ha instaurado, además de no fomentar el crecimiento de las energías renovables. Además establece que las empresas encargadas tienen planes proyectados a 20 años que presentan un servicio confiable, así la desregulación da paso a mercados energéticos impredecibles. Por último, alegan que la desregulación conlleva años de arduo trabajo y gran cantidad de recursos [55].

Esta legislatura fue aprobada en 2016, sin embargo requería de volver a ser admitida en 2018, en donde fue rechazada y por lo tanto no fue agregada a la constitución. Los ejemplos presentados por la oposición incluían la crisis energética de Enron en California debido a la desregulación del mercado energético, en donde se produjeron apagones continuos y escases de energía. Por otro lado, en New York la desregulación resultó en el aumento de hasta el 70% en el costo de la energía respecto al promedio nacional. En Texas, así mismo, los clientes residenciales pagan un 15% más de lo que pagaban antes de la desregulación [56].

3.2 Caso de Estudio de España

3.2.1 Contextualización del Mercado Eléctrico Minorista

El mercado eléctrico español ha experimentado una transformación significativa desde su liberalización en 1997, en donde pasó a llamarse Mercado Ibérico de la Electricidad. Así, las decisiones tanto de generación y comercio que eran gestionadas por el Estado pasaron a manos de los entes participantes del libre mercado [13], teniendo en cuenta que el transporte y distribución continúan siendo administradas por el Estado. Desde entonces, la Unión Europea ha trabajado en reformas que fomenten la competencia en el mercado eléctrico, y además para que los consumidores tengan más opciones de suministro.

El sistema eléctrico español está compuesto por seis agentes que se pueden evidenciar en la Figura 3.8. En donde a la izquierda se observan los productores de energía y a la derecha los minoristas, así también (1 y 2) representan a los operadores del sistema, (3) los distribuidores, (4 y 5) los operadores del mercado y (6) los supervisores de la industria a través de su centro de control eléctrico (Cecoe) [57].

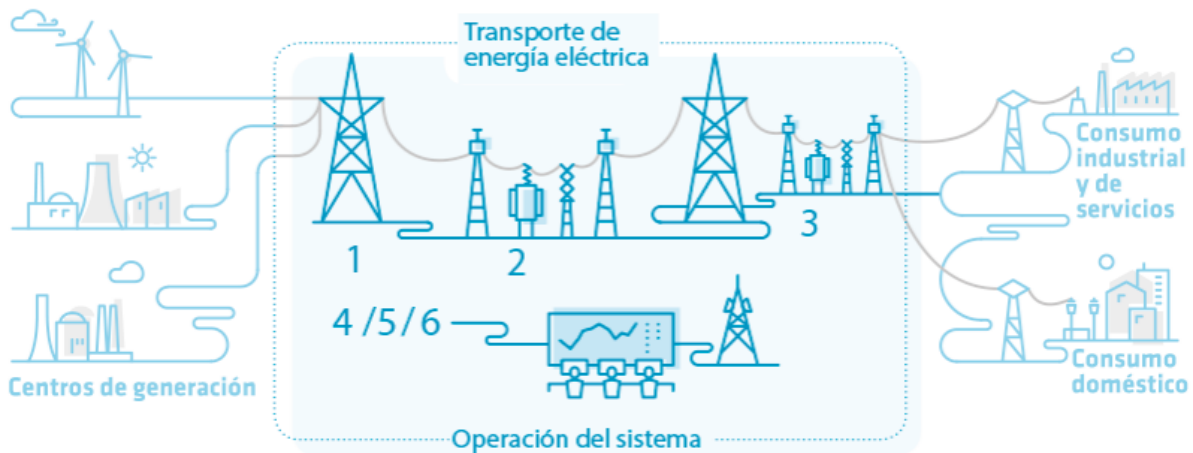


Figura 3.8 Red Eléctrica de España
Fuente: Negocio Eléctrico en España [57]

En España, el sector eléctrico se integra principalmente (alrededor del 80%) por cinco grandes empresas que establecen un sistema oligopólico. ENDESA, Iberdrola y Naturgy suman aproximadamente el 65% de la cuota del mercado eléctrico español y las dos otras grandes empresas son EDP y Viesgo [58].

Actualmente, los consumidores dentro del mercado español tienen la posibilidad de seleccionar su proveedor de energía eléctrica, esto ha dado paso a la aparición de numerosas compañías eléctricas y plataformas que ofrecen tanto tarifas competitivas como servicios adicionales, lo que ha fomentado el uso de energías renovables, además de dar preferencia a las necesidades del usuario y sus preferencias. Por otra parte los usuarios pueden optar por tarifas fijas o variables, y gestionar su contrato y consumo a través de plataformas en línea. También existen empresas dedicadas a la agregación de demanda o compra colectiva, dándoles la oportunidad a los consumidores de negociar sus condiciones y precios con los proveedores.

En [58] se muestra que las principales fuentes de innovación para las empresas eléctricas de España son las energías renovables, la Industria 4.0, las redes inteligentes, la generación distribuida, el autoconsumo, los sistemas de almacenamiento de energía, los vehículos eléctricos, los clientes con medidores inteligentes y la respuesta de la demanda, además cobra un rol importante la tecnología blockchain como medio para la transición hacia un mercado moderno y eficiente, esto se evidencia en la Figura 3.9.

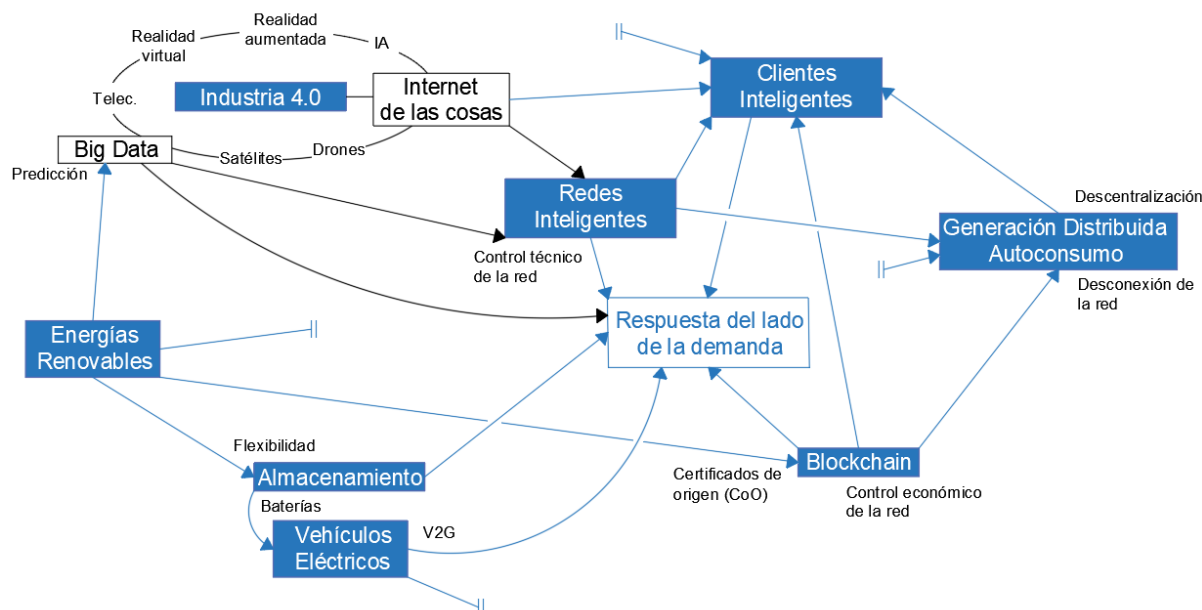


Figura 3.9 Fuentes de innovación de las principales empresas energéticas en España
Fuente: Autoría Propia [58]

Cada una de las tecnologías que están revolucionando el mercado energético actual, son líneas de innovación y fuentes potenciales para originar nuevos modelos de negocio, permitiendo resolver desafíos y limitaciones que el sistema tradicional impone ante el inminente crecimiento poblacional, tecnológico y la implementación de fuentes de energía renovable.

En términos regulatorios, España representa un importante caso de estudio, ya que con la derogación del denominado “impuesto al sol” tras aprobarse el Real Decreto Legislativo 15/2018 y con la aprobación de la nueva ley sobre autoconsumo compartido a través del Real Decreto-ley 244/2019 se ha abierto una prometedora ventana para la comunidad energética.

Así en España se han promovido diversas iniciativas como por ejemplo el programa “Greenchain” implementado por la empresa “Acciona” destinado a aplicar la tecnología blockchain en el sector energético, específicamente en la trazabilidad de la generación y el consumo de energía renovable. Así, las cadenas de bloques permiten certificar de manera segura y verificable el origen y las características de la energía generada a partir de fuentes renovables de las instalaciones de “Acciona”. La plataforma ofertada por esta empresa permite a los generadores demostrar la autenticidad de su energía renovable, mientras que a los consumidores les da la certeza de que la energía que están utilizando proviene de fuentes limpias y sostenibles, todo esto en tiempo real. La Figura 3.10 muestra la plataforma

de “Greenchain”, en la cual se registra el momento en el que se genera cada kWh y en donde fue producido, además indica al cliente su nivel de consumo en diversos periodos de tiempo y también puede asignar a cada punto de consumo tanto las garantías de origen como los atributos verdes asociados[59].

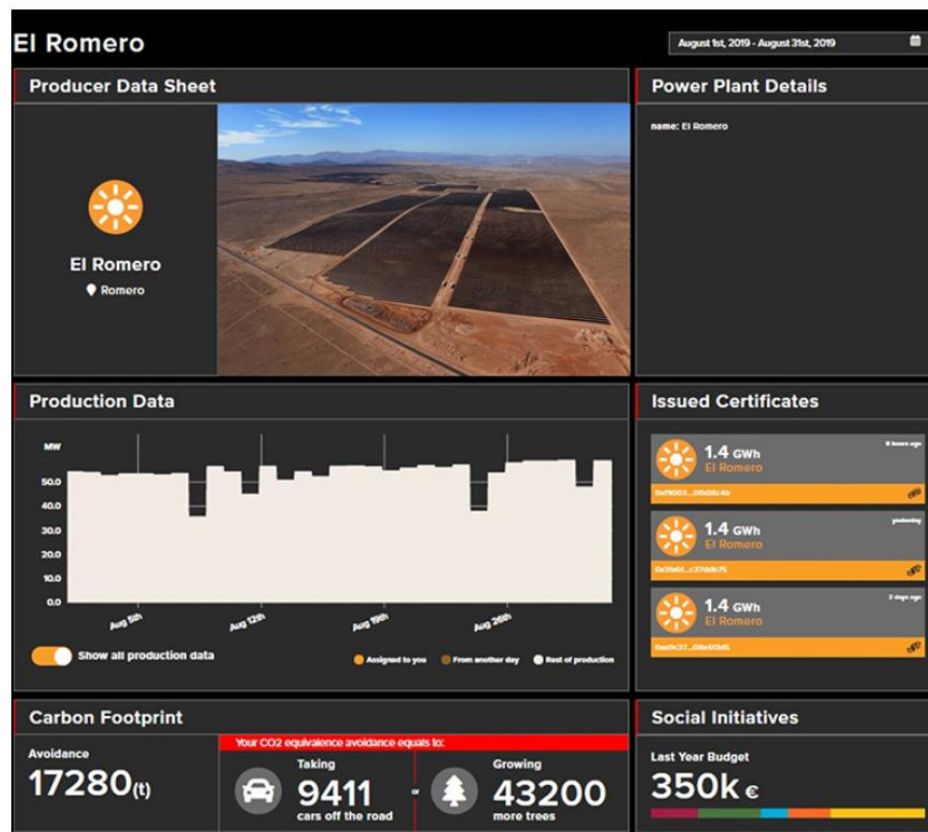


Figura 3.10 Plataforma Greenchain de la empresa Acciona
Fuente: Acciona Energía [59]

Así también existen empresas que se enfocan en fomentar la participación activa de prosumidores como es el caso de “Holaluz”. La empresa de energía renovable “Holaluz” fue fundada en 2010 y tiene su sede en Barcelona, sin embargo, opera en todo el territorio español. Se destaca por ofrecer soluciones energéticas sostenibles y transparentes a los consumidores, esto mediante la generación y suministro de energía a partir de fuentes renovables como la solar y eólica. Esta empresa opera bajo un modelo de negocio que permite la participación activa de prosumidores dentro de una comunidad, además ofrece tarifas competitivas y servicios personalizados que se basan en las necesidades de cada cliente [60].

Es importante recalcar uno de los proyectos llevados a cabo por “Holaluz” que es “La revolución de los tejados”. Este proyecto nace con el objetivo de cubrir la mayor cantidad de metros cuadrados para incrementar la generación de energía renovable sin discriminación.

Es decir, con este proyecto se buscaba que las placas solares estén “al alcance de todos” no solo de los “privilegiados”. Así sería posible generar energía verde sin una inversión inicial, ya que la empresa cubre el coste inicial de la instalación mediante un préstamo que es pagado en la propia factura del suministro, demostrando que esto implica un ahorro del 63% en electricidad para los clientes [60].

Además, como empresa ofrecía una tarifa personalizada basada en el balance de los últimos 12 meses de la factura del consumidor, así se calculaba la cuota mensual de manera que se obtenga una tarifa fija mensual, lo que establecía un plan prepago, en el que de haber excedentes en el pago mensual, el dinero es devuelto al cliente tras un balance anual energético, esto blindaba a los usuarios de la volatilidad del mercado. Con esto la empresa buscó demostrar su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Esta empresa obtuvo el certificado B Corp debido al impacto positivo que la empresa tiene en la sociedad y en la transformación del sector energético[61].

En cuanto a modelos de intercambio de energía, en España existen diversas plataformas que utilizan el modelo Peer-to-Peer entre prosumidores residenciales, recalando que dichas plataformas permiten a los usuarios ser participantes activos dentro del mercado eléctrico al generar su propia energía eléctrica a partir de fuentes renovables y compartir dicha energía directamente con otros consumidores en la misma red local.

Una de las plataformas destacadas en España gracias a la liberación del mercado de electricidad es “Som Energía”, que básicamente es una cooperativa de energía renovable en la que los socios generan y comparten energía dentro de una comunidad energética [62]. Así también “Zencer” es una plataforma digital reconocida para el intercambio de energía comunitaria, a las que se denominan “cooperativas verdes”, siendo su objetivo principal el rentabilizar el esfuerzo de sus asociados, haciendo a cada consumidor titular de su propia energía [63].

Para profundizar en el tema de comunidades energéticas se puede poner como claro ejemplo a “Power Ledger”, empresa energética australiana que lanzó el proyecto “Comunidad Energética” basado en tecnología Blockchain en el municipio de Almócita, España [64]. Este proyecto llevado a cabo mediante acuerdos entre las empresas “Fenie Energía” y “Albedo Solar” es el primero de varios proyectos a llevarse a cabo en España utilizando la plataforma xGrid. Este proyecto se enfoca en usuarios que han implementado autoconsumo mediante generación fotovoltaica, de manera que puedan generar mayores ingresos con el excedente de energía que produzcan. Así, el resto de la población podrá

acceder a esta energía solar y podrán comprar dicha energía, ya sea a sus vecinos o al municipio a un costo más bajo que el impuesto por la red tradicional, todo esto aplicando la tecnología de cadena de bloques. Así, la comunidad energética tendrá una capacidad inicial de 60kW que incluirá tanto edificios públicos como residenciales, y se prevé almacenar el exceso de energía en una batería de 22 kWh, de manera que la realimentación a las comunidades se de en la noche, esto con el fin de beneficiarse de los precios que varían a lo largo del día [65].

4 Sector Eléctrico Ecuatoriano

4.1 Evolución de la Electrificación en el Ecuador

Ecuador ha pasado por un largo proceso de transformación desde la puesta en marcha de sus dos primeras turbinas de 12 kW al pie del río Malacatos en 1897, donde se formó la empresa eléctrica “Luz y Fuerza” en Loja. Así, para resumir la evolución del sector eléctrico ecuatoriano se presenta la Figura 4.1, en donde se puede observar que, por ejemplo, la ciudad de Cuenca incrementó su potencia instalada en 64,5 kW entre 1914 y 1922. Posteriormente en 1926 el Ecuador contrató por 60 años a la firma americana Foreign Power Co. para el suministro de energía en Guayaquil, sirviendo como precedente para otras ciudades como Quito y Riobamba que implementaron proyectos similares. Posteriormente las municipalidades fueron adjudicadas como las responsables del suministro eléctrico alrededor de 1940 y el proceso de instalación masiva de pequeñas centrales hidroeléctricas continuó hasta 1961, en donde se contaba con aproximadamente 120 MW instalados [14].

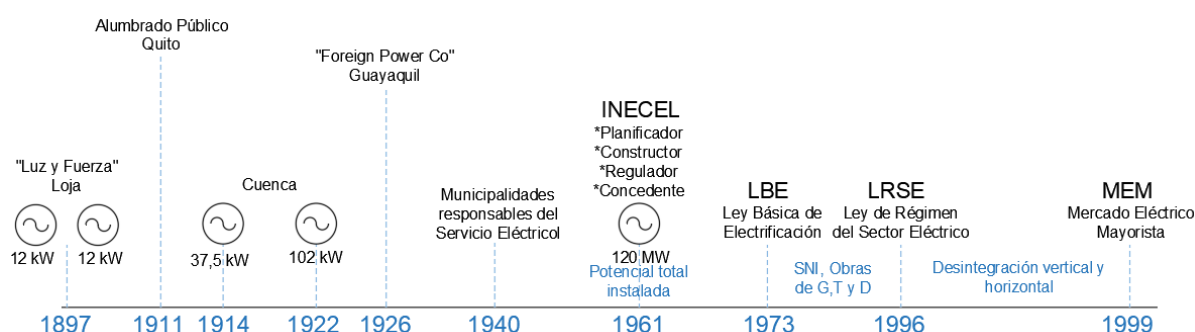


Figura 4.1 Evolución del Sector Eléctrico Ecuatoriano
Fuente: Autoría Propia [14]

El 23 de mayo de 1961 se crea el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) con el objetivo de integrar el sistema eléctrico nacional y elaborar un Plan Nacional de Electrificación, siendo atribución de este organismo la planificación, construcción, operación,

regulación, aprobación de tarifas eléctricas y además era accionista mayoritario de casi todas las empresas encargadas de la distribución de energía en el país. Es decir, el mercado eléctrico ecuatoriano se constituía como un sistema verticalmente integrado (monopolio en la generación, transmisión, distribución y comercialización) [66].

Posteriormente, la Ley Básica de Electrificación (LBE) presentada en 1973 permitió el desarrollo de estudios para la construcción del Sistema Nacional Interconectado (SNI) y de los sistemas regionales, esto gracias a que el Estado transfiere el 47% de los ingresos percibidos por el Fisco por concepto de regalías por la explotación de hidrocarburos y el transporte del crudo por los oleoductos [14].

Siguiendo la cronología, en 1996 se publica la Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE) para reformular la participación estatal en el sector eléctrico, generando reformas que dan paso a la privatización y competencia dentro del mercado eléctrico. Un dato importante es que la liquidación del INECEL se dio en 1999 a raíz de una corriente de liberalización internacional del sector energético que tenía por objetivo de introducir competitividad y eficiencia, esto en razón de que el Estado no contaba con los recursos necesarios para continuar formulando proyectos, por ello se dio paso a este nuevo modelo que posibilitaba que el sector privado invirtiera en las actividades de generación de energía eléctrica a nivel mayorista. Así, las propiedades que eran del Estado a través del INECEL pasaban a pertenecer al Fondo de Solidaridad tras la implementación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en 1999. Para este año empezaron su operación las denominadas sociedades anónimas que constituían seis empresas de generación y una de transmisión.

La Constitución de la República del Ecuador, vigente desde el 20 de octubre de 2008, establece disposiciones para la gestión y regulación de sectores estratégicos por parte del Estado. El Artículo 313 confirma que el Estado tiene la potestad exclusiva de administrar y regular estos sectores. Los sectores estratégicos incluyen energía, telecomunicaciones, recursos naturales no renovables, entre otros.

Por otro lado, el Artículo 314 especifica la responsabilidad del Estado en la provisión de servicios públicos esenciales como agua potable, riego, saneamiento, energía eléctrica, telecomunicaciones y otros, asegurando principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia y calidad en su oferta. El Estado regula también los precios y tarifas de estos servicios.

El Artículo 315 autoriza al Estado a constituir empresas públicas para la gestión de sectores estratégicos y la prestación de servicios públicos. Estas empresas pueden reinvertir sus

excedentes en el desarrollo sectorial o transferirlos al Presupuesto General del Estado según lo dispuesto por ley. Además, se establece que el Estado mantendrá mayoría accionaria en empresas mixtas que gestionen sectores estratégicos.

En adición, los Mandatos Constituyentes N°1 y N°9 de 2007, así como el Mandato Constituyente N°15 de 2008, han impactado en políticas específicas como la capitalización de empresas eléctricas y la implementación de una tarifa única nacional por consumo eléctrico, eliminando los costos marginales en generación. Estas medidas buscan promover la igualdad y solidaridad en la prestación de servicios públicos a nivel nacional, asegurando un precio justo para los usuarios.

Actualmente en Ecuador únicamente existe el Mercado Eléctrico Mayorista, no existe un mercado minorista. Es importante mencionar que el Mercado Ecuatoriano no permite la libre competencia es decir no existe mercado en sí, el despacho lo realiza el CENACE en base a una prelación de costos de cada central.

4.2 Marco Regulatorio del Mercado Eléctrico Ecuatoriano

Cómo se mencionó previamente, en octubre de 1996 se publica la “Ley del Régimen del Sector Eléctrico” (LRSE), la cual enmarcaba en el ámbito regulatorio la estructura y el funcionamiento del servicio de electricidad. Esta ley impuso las condiciones necesarias para que el mercado eléctrico funcione y sus objetivos fundamentales se enlistan a continuación [67].

- Garantizar el desarrollo económico y social del país mediante un servicio eléctrico de alta calidad y confiabilidad;
- Fomentar la competitividad de los mercados de generación de energía eléctrica y las inversiones de riesgo por parte del sector privado para garantizar un suministro sostenible a largo plazo;
- Garantizar la confiabilidad, igualdad y uso generalizado de servicios e instalaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica;
- Proteger los derechos de los consumidores, otorgando beneficios (tarifas preferenciales) a sectores de escasos recursos económicos;
- Reglamentar y regular la operación técnica y económica del sistema, asegurando la libre participación y acceso a las instalaciones de transmisión y distribución;
- Asegurar la aplicación de tarifas justas tanto para el consumidor como para el inversionista mediante la regulación de la transmisión y distribución eléctrica.

- Promover inversiones privadas de riesgo incentivando la competitividad en el mercado;
- Promover inversiones públicas en la transmisión de energía eléctrica;
- Desarrollar la electrificación en el sector rural;
- Promover el desarrollo y uso de recursos energéticos no convencionales.

En el marco de esta ley se creó el Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC, organismo gubernamental que cubriría la función de regulación del sector el cual tenía también entre sus funciones principales la de emitir las recomendaciones para la planificación de la expansión de la infraestructura especialmente respecto de la generación y transmisión a través del Plan Maestro de Electrificación del Ecuador. La estructura del sector consideraba además la constitución del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), organización que cumpliría las funciones de operador nacional de red y mercado, además de formalizar la existencia de empresas concesionarias para las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización [67] . En la Figura 4.2 se esquematiza la estructura propuesta por la LRSE para el sector eléctrico nacional.

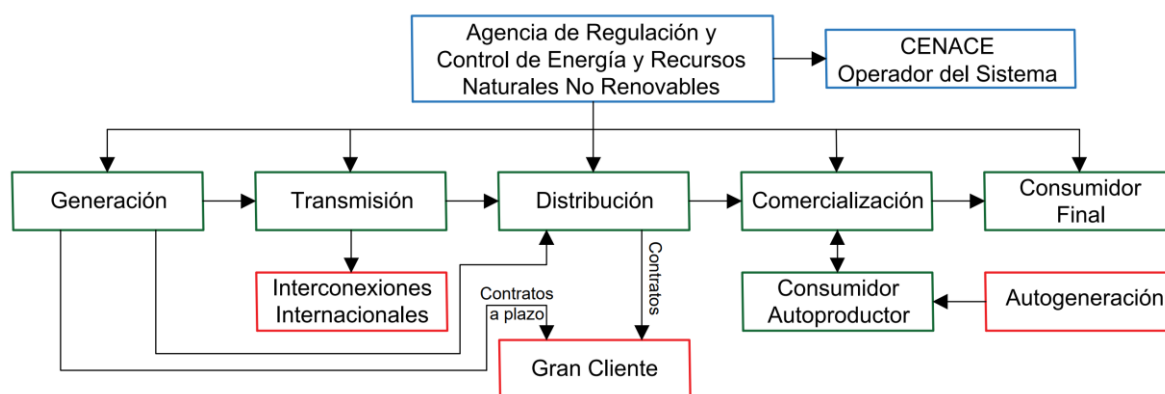


Figura 4.2 Estructura de Sector Eléctrico Ecuatoriano
Fuente: Autoría propia [14]

Entonces, el modelo de mercado eléctrico que este marco legal regulaba se enfocaba en transacciones de grandes bloques de energía y de libre competencia para la generación de energía eléctrica, mientras que plantea un monopolio para transmisión y distribución. También la constitución indicaba que los servicios básicos debían ser responsabilidad exclusiva del estado para garantizar la universalidad, continuidad, accesibilidad y calidad, considerando esta responsabilidad se tenía que recurrir a unificar y regularizar las tarifas a nivel nacional; sin embargo, la situación económica del Mercado Eléctrico Mayorista obligó a que en el año 2008, en la elaboración de la Constitución de Montecristi, se considere

nuevamente un modelo de desarrollo concentrado en el Estado para los sectores estratégicos incluyendo la generación [68].

El 31 de julio de 2008 se publicó en el Registro Oficial el Mandato Constituyente Nro. 15, el mismo que indica que el CONELEC deberá elaborar los nuevos pliegos tarifarios estableciendo así una única tarifa eléctrica, la cual será aplicada por las empresas eléctricas de distribución. Estos pliegos ya no consideraron costos marginales del componente de generación y tampoco consideraron la componente de inversión en los costos de transmisión y distribución. Los costos serían asumidos por el estado con lo que dejó de funcionar el mercado de libre competencia mayorista que regulaba la LRSE.

Posteriormente a estos cambios en la estructura del sector eléctrico y en el marco de la Constitución publicada en octubre de 2008, se publica el 16 de enero de 2018 la ley orgánica del servicio público de energía eléctrica. Esta ley regula el funcionamiento actual del mercado eléctrico mayorista conjuntamente con el reglamento específico y a las regulaciones correspondientes.

Por otro lado, la tendencia actual de la industria del abastecimiento eléctrico ha evolucionado tanto tecnológicamente como empresarialmente de tal manera que hoy en día existen mayor cantidad de tipos de agentes del mercado, por ejemplo el paradigma de la unidireccionalidad del flujo de carga con la generación concentrada en grandes centrales distantes de los puntos de consumos poco a poco va cambiando. Actualmente los sectores de consumo han evolucionado de tal manera que los consumidores generan electricidad utilizando como fuente primaria principalmente la energía solar fotovoltaica, entre otras fuentes como la eólica, biomasa, etc. De acuerdo con lo antes expuesto se pueden identificar nuevos agentes de mercado tales como los agregadores, los prosumidores y los consumidores con gestión de la demanda, figuras que amplían la visión de un mercado para un sistema unidireccional y obliga a considerar nuevas formas de realizar las transacciones comerciales de compraventa de energía.

Las empresas distribuidoras y comercializadoras de Ecuador actualmente tienen la necesidad de renovar su modelo de negocio, esto debido a que la figura de tradicional de consumidor ha cambiado. Actualmente el consumidor también puede generar energía, clientes con consumos representativos pueden contener embebido en su sistema una micro red (microgrid), los vehículos eléctricos pueden entregar potencia eléctrica almacenada en sus baterías a la red, inclusive se pueden instalar bancos de baterías para abastecer ciertas

zonas o dar servicios adicionales, etcétera. En este sentido el modelo de negocio actual donde el cliente adquiere bloques de energía ya no funcionará bajo el paradigma tradicional.

En varios países, actualmente la regulación considera modelos de mercado que permiten integrar a los clientes o consumidores a participar de forma activa en el mercado. En Ecuador la inclusión de la participación activa de los clientes ha iniciado con la emisión de regulaciones que permiten la conexión de sistemas de generación de pequeñas potencias a nivel del cliente final, como es el caso de la regulación Nro. ARCERNR-001/2021 “Marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica” y la Nro. ARCERNR-002/2021 “Marco normativo para la participación en generación distribuida de empresas habilitadas para realizar actividad de generación”. (La Regulación Nro. ARCERNR-002/2021 fue suspendida con la Resolución de Directorio Nro. ARCERNR-034/21 hasta que se expida la reforma), no obstante aún no alcanzan a brindar incentivos efectivos para que más clientes inviertan en sistemas de generación, principalmente al agregar excesiva carga administrativa para aprobación de los proyectos y no brindar un marco claro para la remuneración de los excedentes de energía entregados a la red.

Las regulaciones antes mencionadas permiten la conexión de pequeños sistemas de generación distribuida, sin embargo; la estructura y marco regulatorio actual impiden que éstos sistemas sean considerados en las transacciones de compraventa de bloques de energía, siendo únicamente considerada la energía para el autoconsumo de su propia carga.

Esto es posible constatarlo al revisar el objetivo de la regulación No. ARCERNR 001/2021, el cual indica *“establecer las disposiciones para el proceso de habilitación, conexión, instalación y operación de sistemas de generación distribuida basadas en fuentes de energía renovable para autoabastecimiento de consumidores regulados”* y se aplica a *“consumidores regulados que instalen y operen sistemas de generación distribuida para su autoabastecimiento, sincronizadas a las red de distribución y para las Empresas Eléctricas Distribuidoras”*[69].

Según la Regulación, los Sistemas de Generación Distribuida para Autoabastecimiento (SGDA) son aquellos cuya potencia nominal es menor a 1 MW, además su conexión es sincronizada con el sistema de distribución o por medio de las instalaciones internas del consumidor, también permite aprovechar los recursos renovables en los que se desarrolla el

sistema y finalmente utiliza tecnologías de generación diversas, sin importar si el sistema posee almacenamiento o no.

La aplicación de la antes citada Regulación obliga a las empresas de distribución a implantar procedimientos administrativos, por ejemplo en el caso de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (Centrosur), se pueden identificar los siguientes [70]:

Requisitos:

- *Solicitud de factibilidad de conexión de acuerdo al oficio factibilidad de conexión.*
- *Llenar “Solicitud de Factibilidad de Conexión Para Consumidores”.*
- *No tener deudas por ningún concepto con la CENTROSUR.*

Procedimiento:

- *La solicitud de factibilidad de conexión será validada y aprobada por CENTROSUR con una vigencia de tres meses.*
- *Dentro de este plazo, el interesado debe solicitar la emisión del Certificado de Calificación, adjuntando la memoria técnica descriptiva, cronograma de ejecución y, documento que acredite, la propiedad, posesión legítima del inmueble o predio donde se va a instalar el SGDA [69].*
- *CENTROSUR, luego de aprobar el estudio, emitirá un informe de aprobación y el Certificado de Calificación.*
- *Con la aprobación, el interesado instalará el SGDA en función del cronograma establecido y comunicará a CENTROSUR para que proceda con las pruebas y el cambio del sistema de medición.*
- *Se instalará un medidor bidireccional y el consumidor deberá cancelar la diferencia del costo del equipo de medición en relación al equipo que la Distribuidora instalaría a un usuario de la misma categoría sin un SGDA.*
- *Para la operación comercial se suscribirá un nuevo contrato de suministro con SGDA.*

Aunque la energía generada por un SGDA se destina principalmente para el autoconsumo, es posible que se produzcan excedentes ocasionales que se inyectarían a la red de distribución local. Esto está sujeto a regulaciones específicas para consumidores residenciales y comerciales sin demanda específica. Por lo tanto, la compañía distribuidora deberá calcular mensualmente el balance neto de energía que se obtiene mediante la ecuación (1) [69].

$$ENET_k = ERED_k - EINY_k \quad (1)$$

Donde el balance energético (kWh) en un periodo mensual de consumo k se produce entre,

$ENET_k$: Energía neta

$ERED_k$: Energía consumida desde la red de distribución

$EINY_k$: Energía inyectada por el SGDA

Entonces, si $ENET_k \leq 0$, la empresa distribuidora no cobrará al consumidor por la energía consumida, y en su lugar se generará un crédito energético a favor del consumidor en la factura $CEM_k = |ENET_k|$. En tanto que si $ENET_k > 0$, entonces $CEM_k = 0$ y se verifica saldo a favor acumulado existente SEA_{k-1} del consumidor de meses previos, si los créditos energéticos acumulados no cubren por completo el consumo k , se facturará la cantidad restante aplicando la tarifa correspondiente.

Es importante tener en cuenta que cada 24 meses, partiendo desde el inicio de la operación del SGDA, el SEA_k se reseteará a cero. Entonces, esto implica que los usuarios no pueden recibir una remuneración por el excedente anual que entregan a la red, ya que la energía consumida y demandada en el año se compensará, sin embargo, si anualmente se generó mayor cantidad de energía de la que se consumió, esta energía no recibe ninguna remuneración o valoración económica. Por esta razón, y con la finalidad de brindar incentivos efectivos a la inversión en estos proyectos, es necesario que el esquema regulatorio permita que los usuarios puedan ser compensados por el excedente de generación, de esta manera se fomentaría una participación activa de los prosumidores en el mercado, además de dar apertura a nuevos servicios ofrecidos desde el lado de la demanda.

5 Planteamiento de un Mercado Eléctrico Alternativo Minorista para Ecuador

El plantear un mercado alternativo emergente nace como mecanismo para promover la adopción de sistemas energéticos y modelos de negocio modernos, además de atraer financiamiento internacional, de manera que se pueda aportar a la mitigación de la contaminación por carbono e incrementar el acceso a energía limpia, confiable, asequible y resiliente. La tecnología blockchain, combinada con dispositivos inteligentes e interconectados, puede dar paso a la transición hacia un modelo de mercado minorista en el que la participación activa de generadores, consumidores y prosumidores permita cambiar el modelo de mercado eléctrico tradicional, adaptándolo a la era tecnológica actual.

En lugar de potenciar la operación de sistemas de generación unidireccionales centralizados para satisfacer una demanda inflexible, se podría fomentar la participación de proveedores de energía limpia distribuida que se autogestionan a través de sistemas bidireccionales de comunicación [71]. Así, blockchain permitiría establecer transacciones confiables y automatizada entre las partes, los consumidores podrían convertirse en prosumidores y generar valor dentro del mercado, además de proporcionar mayor flexibilidad dentro del sistema eléctrico, todo esto reduciendo los costos de administración de los participantes.

Así, maximizar la eficiencia de las redes eléctricas sería posible gracias a la gestión y automatización de las decisiones operativas, las cuales pueden ser realizadas desde un dispositivo electrónico usando contratos inteligentes. Estos contratos inteligentes pueden implementarse a través de la tecnología blockchain, lo que permitiría la activación, seguimiento y establecimiento de una variedad de servicios de red que son habilitados por dispositivos inteligentes interconectados. Además, se podrían generar acuerdos de respuesta a la demanda en un día “caluroso” por ejemplo, en dónde dispositivos inteligentes pueden ser apagados según las estipulaciones del contrato, también puede ocurrir con los sistemas de almacenamiento, que podrían almacenar excedentes según especificaciones previamente descritas en dichos contratos inteligentes.

Existen algunos dominios de aplicación de la tecnología blockchain, algunos de ellos fueron descritos en las secciones previas, sin embargo a continuación se enlistan algunos de ellos [71].

- Sistemas de Certificados de Origen (CoO) para mercados de energías renovables.
- Sistemas de facturación de servicios públicos.
- Programas de respuesta a la demanda.
- Redes de recarga de vehículos eléctricos.
- Sistemas de energía transactiva.
- Programas de eficiencia energética medida.
- Financiamiento climático específico.
- Cumplimiento normativo.

Además, se pueden encontrar factores clave que plantean la viabilidad de la generación de energía descentralizada. El primero se enfoca en el notable abaratamiento en la explotación de las energías renovables, lo que ha aumentado su popularidad y ha generado la participación de prosumidores en el mercado, por lo que se requieren sistemas modernos

que permitan la distribución e intercambio de la energía producida por estos nuevos participantes. Otro factor que considerar es la utilización de contratos inteligentes lo que implica procesos más eficientes y menos costosos para la distribución del suministro eléctrico. Finalmente, se puede destacar la creciente penetración del internet de las cosas, ya que, con la ayuda de diversos dispositivos inteligentes como medidores, es posible el control, medición y seguimiento de la actividad energética de los usuarios, generando información valiosa para mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico.

5.1 Uso de la tecnología Blockchain en el Mercado Eléctrico

La tecnología blockchain apareció como mecanismo de verificación de criptomonedas, esta tecnología no es más que una base de datos distribuida entre varios participantes, con protección criptográfica, organizada en bloques de transacciones relacionadas matemáticamente [72]. En 2008 se publica un documento cuyo autor firmaba con el nombre de Satoshi Nakamoto en el que se plantea una metodología matemática de una moneda digital que se denominó Bitcoin, sentando una base para diversas aplicaciones comerciales, sin embargo, su potencial va más allá, ya que se aplica en diversos sectores como salud, seguros, el voto electrónico, entre otros. Empresas tradicionales como MasterCard, Morgan, Visa, WallMart, entre otras, invirtieron más de \$1.2 billones en tecnologías blockchain entre el 2012 y 2017. Para mayo de 2018 se podían encontrar casi 2500 nuevas empresas de blockchain, con una valoración media aproximada de 4,6 millones de dólares [52]. El empleo de la tecnología blockchain permite a las empresas tener acceso a los datos de los clientes para gestionar de manera óptima los recursos, ya que no solo incluyen datos del consumo y demanda de energía, sino dan cuenta del estado de la red eléctrica.

Una de las empresas más prominentes en cuanto a la tecnología blockchain es LO3 Energy, misma que fue mencionada en el caso de la Brooklyn Microgrid, dicha empresa ha creado un mercado energético Peer-to-Peer completamente nuevo e innovador que aplica el concepto de cadena de bloques.

Sin embargo, como cualquier tecnología naciente, el uso de blockchain dentro del sector eléctrico presenta algunas limitaciones. La centralización natural existente dentro del mercado energético dificulta la entrada de competencia y cambios en sus modelos comerciales, reduciendo las oportunidades de escalamiento en el entorno económico. Además, dependiendo de la velocidad requerida para las transacciones y los mecanismos de validación, el costo energético de la utilización de la tecnología blockchain es alto. También, es necesario tener en cuenta que los ataques o manipulaciones de la cadena de bloques podría causar daños a gran escala, a pesar de que blockchain se basa en la idea

de hacer que las manipulaciones sean imposibles, por lo que los desafíos técnicos son muy grandes, ya que ante una falla no se puede asegurar el suministro eléctrico y continúa siendo una tarea extensa detectar al responsable de la falla. Finalmente, al no existir jerarquías dentro de las cadenas de bloques, podrían surgir problemas de protección de datos [49].

5.1.1 ¿Cómo funciona una cadena de bloques?

En general, una cadena de bloques básicamente es un sistema descentralizado que permite el almacenamiento y transferencia segura de datos digitales, esta tecnología se puede describir como un libro mayor que facilita el movimiento de activos (que puedan ser representados digitalmente) en todo el mundo en cuestión de segundos a una tarifa de transacción mínima [73]. Las aplicaciones de blockchain permiten eliminar intermediarios ya que opera en una red de nodos interconectados, rastrear activos, analizar la procedencia de los datos, liquidar transacciones y habilitar un modelo seguro y transparente.

La cadena de bloques está compuesta de bloques individuales, estos contienen datos y un registro de transacciones. Mediante funciones criptográficas se crea una cadena inmutable de bloques, en la que una vez registrada una transacción, es validada y propagada a través de la red y es muy complicado alterarla o eliminarla sin dejar rastro. Cada bloque posee tres elementos, el hash (dirección que puede ser comparada con una huella dactilar que identifica al bloque y su contenido) del bloque, el hash del bloque anterior y los datos que se almacenan dentro del bloque.

La distribución de la cadena de bloques permite aumentar la seguridad del sistema en sí, es por ello que la red peer-to-peer es ampliamente usada, ya que en lugar de una entidad central que administre la cadena, todos los participantes de la red obtienen una copia completa de la cadena de bloques, es decir, cuando un nuevo bloque es creado, dicho bloque es enviado a todos dentro de la red y se verifica la validez del bloque antes de ser agregado a la cadena. Para que la base de datos sea corrompida se requeriría alterar todos los bloques de la cadena, volver a recalcular todos los hash y tomar el control de más del 50% de la red [74]. La Figura 5.1 denota el funcionamiento básico de una red peer-to-peer que utiliza la tecnología blockchain.

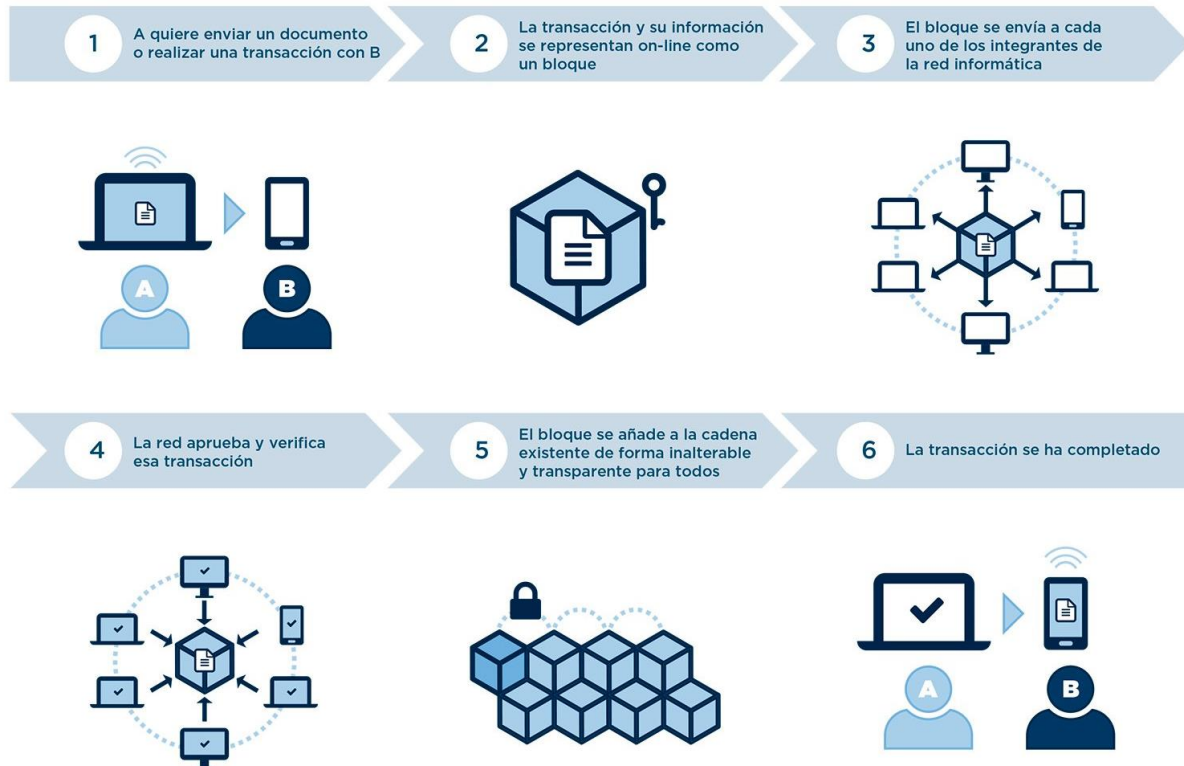


Figura 5.1 Funcionamiento de la red Peer-to-Peer utilizando blockchain
Fuente: IK4 [75]

5.1.2 Componentes centrales de la tecnología blockchain

5.1.2.1 Redes Inteligentes

Dado que la inclusión de una forma de generación de energía más eficiente y descentralizada trae consigo nuevos retos al incorporar las nuevas fuentes de generación renovable a la red, es necesario fomentar la utilización de contadores inteligentes y otros dispositivos de control y automatización dentro de la red para gestionar y supervisar de forma remota la generación, distribución y consumo de electricidad y además, permitir el almacenamiento inteligente de energía y reducir pérdidas. Así, se requieren los datos que permitan su análisis continuo y mejorar con ello la eficiencia del sistema y para ello la “modernización de la red” constituye un factor clave [9].

De esta manera, para implementar redes inteligentes se requiere utilizar tecnologías de la información y comunicación para mejorar la eficiencia, confiabilidad, sostenibilidad y seguridad del suministro eléctrico. Las redes inteligentes, a diferencia de las tradicionales, permiten una mayor interconexión, automatización y comunicación bidireccional entre los participantes de la red, que pueden ser tanto generadores, como consumidores, prosumidores y proveedores de servicios energéticos [76]. Con este enfoque se busca

lograr precios más flexibles, opciones de pago y facturación, además fomenta incentivos para un mayor nivel de competitividad en un mercado energético mucho más dinámico.

Así, se vuelve posible responder rápidamente ante fluctuaciones en la demanda, detectar y resolver fallos o eventos anormales e integrar eficientemente las fuentes de energía renovable. En cuanto al almacenamiento inteligente de energía, se tiene la posibilidad de almacenar energía durante periodos de baja demanda y suministrarla cuando dicha demanda incrementa, esto permite estabilizar la red y optimizar el uso de energía. Las redes inteligentes también facilitan la participación activa de los consumidores en la gestión de la demanda, ya que tienen la capacidad de recibir información detallada de su consumo y los precios en tiempo real, esto les permite ajustar su consumo y contribuir a una mayor eficiencia energética. Según [77], un sistema energético climáticamente estable será mucho más descentralizado e integrará incontables recursos de energía distribuida, podrá gestionar flujos de energía multidireccionales y permitirá la penetración de generación renovable intermitente de una manera más rápida a nuevas cargas eléctricas masivas.

5.1.2.2 Recursos Energéticos Distribuidos (DER)

La utilización de redes eléctricas inteligentes para aumentar la eficiencia energética tiene como estrategia clave el concentrar geográficamente dichos sistemas para dar apertura a las fuentes de energía renovable en las redes de distribución. Técnicamente, los DER abarcan una gran diversidad de dispositivos modulares de pequeña escala orientados a la generación de energía como paneles solares, turbinas eólicas, baterías y otras unidades de almacenamiento. Así, los prosumidores juegan un rol fundamental dentro del nuevo sistema descentralizado que plantea la inmersión de los DER, este nuevo enfoque basado en la demanda contribuye al equilibrio entre la oferta y la demanda, al tiempo que reducen la congestión de energía en las líneas de distribución y transmisión, mejorando la estabilidad de los flujos de energía en la red [9].

Además, se conoce que la implementación de fuentes de energía renovable dentro de la matriz eléctrica genera incertidumbre respecto al nivel exacto de generación de energía, de lo que se deriva su carácter volátil, por lo tanto fomentar los DER instalados cerca de los centros de consumo permite minimizar la demanda en horas pico y garantizar un suministro de energía estable e independiente de la red.

5.1.2.3 Contratos Inteligentes

Se define como contrato inteligente a un tipo de contrato debidamente codificado que se encarga de verificar ciertas condiciones predefinidas que dan paso a acciones cuando las

condiciones entre los participantes se cumplen y verifican [78]. Así, dentro de la cadena de bloques, los contratos inteligentes tienen la función de determinar las reglas (restricciones legales y términos del acuerdo) de escritura en el libro mayor.

Las ventajas de los contratos inteligentes se traducen en que son autoejecutables y a prueba de manipulaciones, esto elimina intermediarios y con ello se reducen los costos de transacción, contratación, ejecución y cumplimiento, además minimizan los periodos de tiempo requeridos para llevar a cabo operaciones transactivas [9].

Analizando el futuro mercado eléctrico, en el que diversos participantes tienen un rol activo, la utilización de una plataforma blockchain permitiría a dichos actores personalizar libremente los contratos inteligentes, así como escribir las reglas de compensación y liquidación de las transacciones energéticas. Así, como se presenta en la Figura 5.2, el modelo de liquidación de la compra y venta de energía se puede expresar mediante un contrato inteligente escrito mediante códigos que permiten administrar, gestionar y ejecutar lo estipulado dentro de dicho contrato. Esto otorga flexibilidad a las transacciones requeridas por el mercado eléctrico, en donde una compañía eléctrica minorista puede lanzar un contrato inteligente en una plataforma de ventas y hacer contacto con un consumidor que puede firmar dicho contrato (que incluye la cantidad de electricidad, el precio acordado y la responsabilidad de cumplimiento del acuerdo) utilizando blockchain [79].

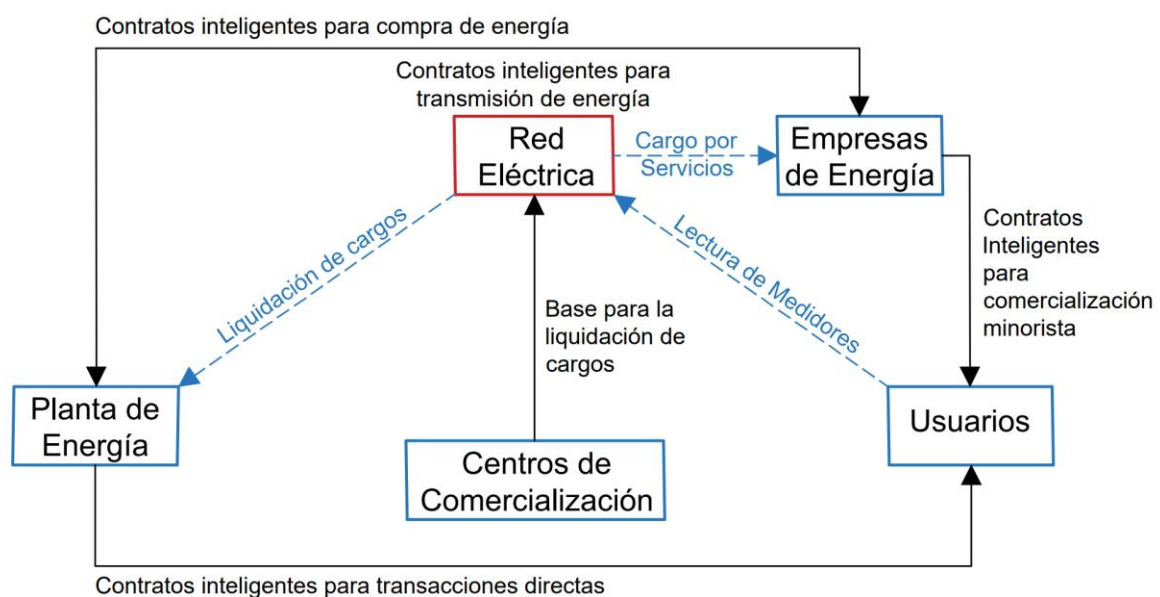


Figura 5.2 Modelo de negociación del mercado eléctrico basado en contratos inteligentes [79]

5.1.3 Clasificación de la tecnología Blockchain

Se pueden distinguir tres tipos de cadenas de bloques en base a quien tiene acceso y participación dentro de la red, estas se describen a continuación.

El primer tipo es la cadena pública, que es aquella que es accesible para cualquier persona y permite que todos los participantes que estén dentro de la red puedan participar en la validación de las transacciones y almacenar una copia completa del libro mayor, ejemplos de este tipo de cadenas son Bitcoin y Ethereum. Estas cadenas están descentralizadas y son de consenso abierto, es decir, no existen restricciones para entrar a la red y cualquier nodo puede validar las transacciones [80].

Por otro lado, en la cadena autorizada o privada el acceso y participación dentro de la red está restringido a un grupo específico de participantes autorizados por instituciones específicas. Este tipo de cadenas puede ser menos descentralizada, sin embargo, también pueden ofrecer mayor eficiencia y privacidad, es por ello que comúnmente son utilizadas por organizaciones o consorcios [49]. Por ejemplo LO3 Energy, mencionado previamente en el caso de la Brooklyn Microgrid, posee una cadena privada para respaldar su modelo de transacciones energéticas entre pares. Entonces, los participantes de la red deben contar con los permisos adecuados para interactuar en el sistema y participar como validadores de las transacciones.

Finalmente el tercer tipo es el de cadena intermedia o consensuada, que básicamente resulta de la combinación de las dos cadenas previamente descritas. Este tipo de cadena es usado cuando se busca mantener un nivel de control y confianza entre los participantes de la red sin ser completamente abiertos al público general. De esta manera un grupo de participantes establece las reglas de la red y se continúa solicitando permisos para unirse a la misma y participar en la validación de transacciones.

La elección de la cadena de bloques depende del caso de estudio, es decir los requisitos necesarios como la privacidad, la escalabilidad, el control y el grado de descentralización deseado.

5.2 Mercado Eléctrico Alternativo Minorista para Ecuador

El marco normativo actual en Ecuador permite incluir Sistemas de Generación Distribuida para el Autoabastecimiento (SGDA), cuyas fuentes primarias deben ser renovables; como su nombre lo indica estos sistemas están pensados para abastecer el consumo del usuario realizando un almacenamiento virtual que permite liquidar los consumos mensualmente.

Esta modalidad no permite inyectar más energía de la que se consume como es requerimiento de un mercado minorista, en este sentido y considerando que los usuarios cuya potencia instalada no exceda los 10 kW, se requieren regulaciones que permitan el desarrollo de un modelo de mercado o modificar sustancialmente la normativa existente.

El uso de la energía en el caso de los usuarios con una potencia máxima instalada menor a 10kW, en su mayoría es de tipo residencial, existen en menor cantidad usuarios con uso comercial y en aún menor cantidad de tipo industrial, por lo que las cargas más comunes se presentan a continuación:

Tabla 2 Cargas Típicas Residenciales

Fuente: Tesis “Sistema de monitoreo y telegestión del consumo eléctrico en cargas residenciales basado en una arquitectura IoT. [81]

Nro.	Carga	Residencial	
		Potencia (kW)	Energía día (kWh)
1	Iluminación	0.5	2.3
2	Tomacorrientes	1.0	4.0
3	Climatización	1.5	6.0
Total			12.3

Los valores de tiempo considerados en la Tabla 2 corresponden a cinco horas de iluminación, cuatro horas de equipos conectados a tomacorrientes y cuatro horas de equipos de climatización, todos estos valores son diarios. Con base en las cargas indicadas en la Tabla 2 se ha graficado una curva de consumo típica para un cliente residencial (para usuarios de Ecuador) la cual se observa en la Figura 5.3, En esta curva se ven incrementos en las primeras horas del día, al medio día y a las siete y quince minutos de la noche, evidenciando un incremento de consumo importante en horas de la noche.

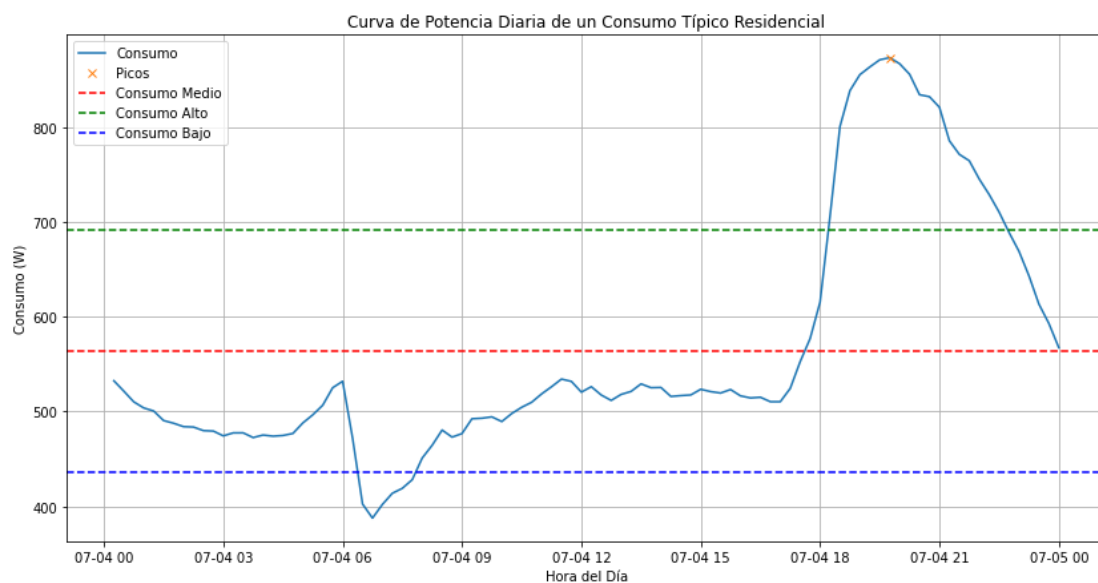


Figura 5.3 Curva de potencia diaria de consumo de un cliente típico residencial
Fuente: Autoría propia

Considerando que para este tipo de usuarios (potencias menores a 10 kW), el acceso a los sistemas de generación con fuente de energía solar es la que se ha diseminado de forma exponencial a nivel mundial, se debe considerar como parte fundamental del modelo de mercado que se describe en el presente capítulo. Para entender como interactúan estos sistemas en el modelo de mercado se presenta a continuación una curva de potencia entregada al sistema por un sistema fotovoltaico de tipo residencial ubicado en Ecuador. En la curva se evidencia que la máxima potencia entregada se presenta en horas del mediodía

Figura 5.4,

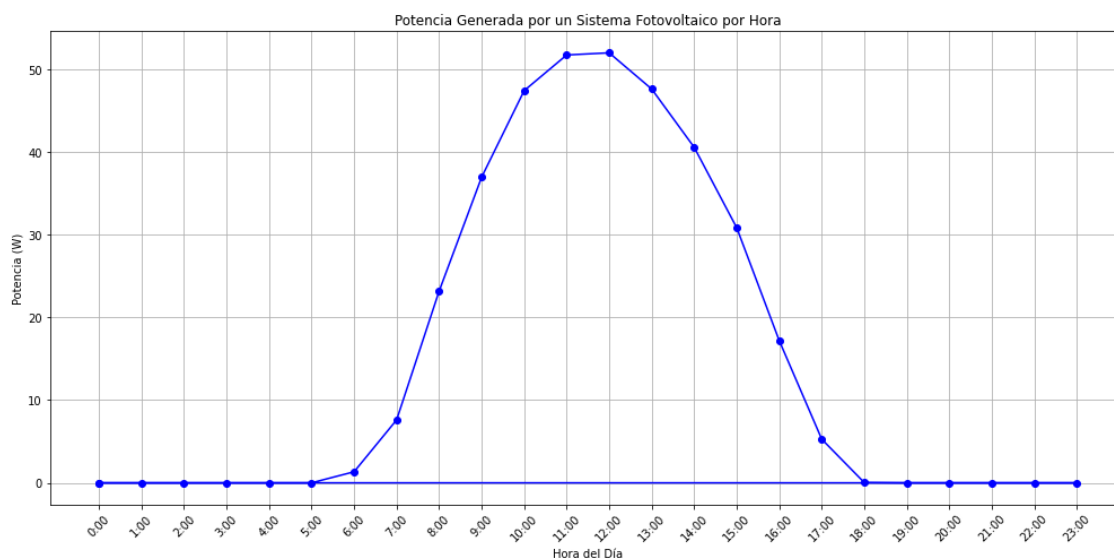


Figura 5.4 Curva de potencia diaria entregada por sistema fotovoltaico
Fuente: Autoría propia

Para la participación de usuarios se requiere un modelo de mercado que reduzca la complejidad del mismo, es decir; que los mencionados usuarios no requieran realizar extensos trámites o tener conocimientos técnicos específicos que le otorguen una ventaja para participar en el mercado minorista.

El modelo propuesto es de tipo libre o liberal, esto en razón de que en Ecuador la distribución y comercialización de energía son un monopolio de carácter público y se requiere mayor participación del usuario final, tanto como consumidor como como prosumidor. En la Tabla 3 se presenta una característica fundamental de los modelos de mercados.

Tabla 3 Modelos de mercados
Fuente: Autoría propia

Característica	Modelo		
	Monopsonio	Mayorista	Libre
Un solo comprador de energía en una determinada área geográfica	X		
Generadores compiten para vender a las empresas minoristas		X	
Usuarios finales tienen la libertad de elegir a su proveedor e incluso a la fuente primaria			X

Actualmente en Ecuador, existe un pliego tarifario regulado el mismo que corresponde a una tarifa incremental que comienza en 9.1 centavos y se incrementa de manera gradual a medida que el usuario requiere mayor cantidad de energía. Se cuantifica la energía total registrada por un contador y ésta se liquida de manera mensual. En el caso de los clientes con uso de la energía comercial el costo posee dos escalones que corresponden a 9.2 centavos hasta los 300 kWh y sobre este valor el costo es de 10.3 centavos por cada kilovatio. En el caso de usuarios con uso de la energía de tipo industrial se establece un costo de 7.3 centavos hasta los 300 kWh y sobre este consumo una tarifa de 8.9 kWh por cada kilovatio. Existen usos de la energía adicionales, sin embargo; para este estudio no se los va a considerar debido a que no son de uso masivo.

Es necesario modificar la tarifa existe actualmente en Ecuador para promover el funcionamiento del mercado minorista. La propuesta consiste en un mercado de tipo libre,

que se liquide de manera automática cada hora. No se recomienda liquidar la energía en períodos cuarto-horarios ya que esto requeriría de una gran cantidad de transacciones simultáneas, lo que podría provocar un colapso en los dispositivos de cómputo y no aporta un valor adicional a los participantes del mercado. El proceso de liquidación de energía consiste en que el equipo de procesamiento (contador de energía o equipo de cómputo) obtenga los valores promedio de consumo de manera horaria, discriminando el día de la semana, es decir; obtiene un promedio en base al histórico de consumos de al menos un mes anterior a la fecha de compra que corresponde a la hora 01:00 de los días lunes, luego obtiene un promedio de la hora 02:00 de los días lunes y así sucesivamente hasta obtener los consumos promedio de cada día de la semana. Este valor se utilizará como consumo promedio proyectado para la adquisición de la energía requerida en la siguiente hora.

Con la energía proyectada se genera una orden de compra de energía con un rango de precios de compra propuestos. El rango de precios consiste en valores que el usuario está dispuesto a pagar por la energía horaria que requiere. En los mercados analizados en los puntos anteriores se presentó que los usuarios ingresan rangos de precios en la aplicación de gestión de consumos. Para el mercado propuesto se considera un aspecto similar, el usuario ingresa sus rangos de precios de compra y la energía se subasta.

Tabla 4 Consumos horarios diferenciados por día de la semana

Fuente: Autoría propia, consumos obtenidos de un cliente típico con uso de energía de tipo residencial, ubicado en la región Sierra de Ecuador

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0	526.7	516.2	495.4	521.4	537.1	411.9	401.5
1	505.6	495.7	475.8	495.7	515.5	396.5	386.6
2	486.6	476.9	457.7	481.8	496.2	380.6	371.0
3	499.2	489.7	470.7	475.5	508.8	394.6	385.1
4	494.2	484.7	465.7	475.2	503.7	389.7	380.2
5	544.4	534.4	514.2	504.1	554.5	433.5	423.5
6	493.3	484.3	466.4	448.4	502.3	394.6	385.7
7	478.0	469.7	453.1	415.7	486.4	386.6	378.3
8	560.6	551.3	532.6	467.2	570.0	457.9	448.5
9	538.0	528.3	508.7	489.1	547.8	430.4	420.7
10	525.4	515.4	495.4	500.4	535.4	415.3	405.3
11	548.8	538.3	517.2	527.7	559.4	432.7	422.2
12	596.8	586.5	565.7	519.0	607.2	482.7	472.3
13	617.7	607.2	586.3	523.4	628.1	502.5	492.0
14	596.8	586.4	565.6	518.9	607.2	482.6	472.2
15	574.0	563.6	542.7	521.8	584.5	459.2	448.8
16	539.8	529.5	509.0	514.1	550.1	426.7	416.4
17	557.4	546.6	524.9	541.2	568.2	438.4	427.5

18	747.9	733.0	703.4	740.5	762.7	585.0	570.1
19	1082.7	1065.4	1030.7	866.1	1100.0	892.1	874.8
20	1067.9	1051.0	1017.1	847.6	1084.9	881.5	864.5
21	1021.6	1005.9	974.5	785.9	1037.4	848.7	833.0
22	733.0	718.6	689.8	718.6	747.3	574.9	560.5
23	636.1	623.5	598.3	629.8	648.7	497.5	484.9

Tabla 5 Orden de compra de energía
Fuente: Autoría propia

Orden de compra de energía		
Hora proyectada	6:00	
Energía requerida	493.3	Wh
Precio alto	0.16	USD
Precio bajo	0.12	USD

Una vez abierta la orden de compra, el algoritmo ejecuta una subasta entre los participantes del mercado minorista, considerando que a la hora seleccionada en el ejemplo no existe generación fotovoltaica ofertada por la mayoría de participantes del mercado, la oferta de energía proviene de la distribuidora, la comunidad energética (bancos de baterías cercanos al comprador), o virtual power plant (no necesariamente cercanos al comprador). El algoritmo de compra y venta ejecuta operaciones para minimizar el costo de compra de energía con la consigna de que la mayoría de los participantes satisfacen su demanda hasta la hora de cierre de la orden de compra que corresponde a quince minutos antes de la hora de compra. Si el comprador dispone de un banco de baterías con carga suficiente para satisfacer su requerimiento, la orden de compra tiene un límite de costo, el mismo que corresponde al costo de autoabastecerse con la energía proveniente del banco de baterías. Si al finalizar el periodo el comprador no logra ejecutar su orden de compra el costo a liquidar lo impone el mercado.

Las órdenes de compra y venta para el mercado propuesto son contratos inteligentes que se ejecutan en la cadena de bloques (blockchain), es decir, se registra un algoritmo en la cadena de bloques que ejecuta la subasta de energía, todas las condiciones que se deben tener en consideración se incluyen en el código. Por ejemplo en la orden de compra indicada en la Tabla 5, el algoritmo obtiene al usuario vendedor que oferta el menor precio y cuando registra el pago por parte del comprador se desagrega de acuerdo al contrato inteligente, que la propiedad sobre la cantidad de energía solicitada le corresponde al comprador, todo esto queda registrado en la cadena de bloques la cual se encuentra distribuida entre los participantes del mercado y es fácilmente accesible para cualquier usuario.

La cadena de bloques (blockchain) que se presenta en la Figura 5.5, corresponde a una simulación de una subasta que considera contratos inteligentes, se puede inferir que en la operación del mercado minorista propuesto tendría un comportamiento similar.

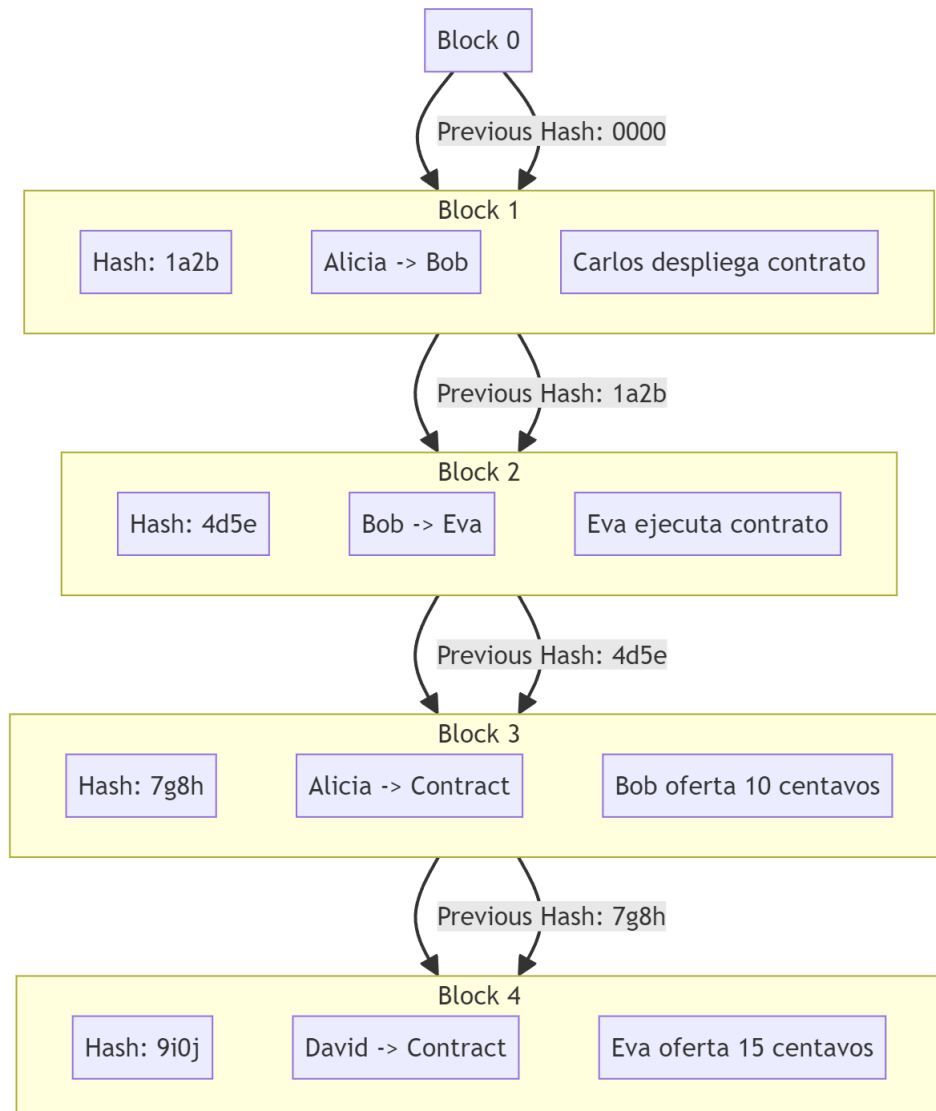


Figura 5.5 Ejemplo de subastas con contratos inteligentes
Fuente: Autoría propia

El término “hash”, hace referencia a la función hash de un algoritmo utilizado para transformar datos de entrada, cuya longitud o cantidad de caracteres puede tener cualquier tamaño, sin embargo; la cadena de caracteres de salida es fija y suelen ser cadena de caracteres de tipo alfanumérico. Comúnmente el valor de salida con un número de caracteres fijos se le conoce como “hash”.

La cadena de bloques cumple un papel fundamental en la operación del mercado eléctrico minorista facilitando las transacciones entre los participantes del mercado, siendo un libro contable público y con alta confiabilidad contra manipulaciones, adicionalmente agregaría un valor adicional para usuarios que tenga preferencias por ciertas tecnologías de generación ya que aseguran una trazabilidad evidente entre el proveedor y el consumidor.

El usuario final participa como consumidor o como prosumidor, es decir; si un consumidor no dispone de un sistema de generación puede participar poniendo a disposición la gestión de su carga, ofertando un valor de compra de energía, u ofertando el espacio que disponga para que un tercero participe con un sistema de generación distribuida (la distribuidora dispone de esta nueva oportunidad de negocio). Un prosumidor participa poniendo su carga a disposición para la gestión respectiva, aportando energía a la red, también pone a disposición servicios adicionales a la red como la inyección de reactivos o autoabasteciendo su carga. Cualquier usuario que disponga de un banco de batería gestionable automáticamente podría participar brindando un servicio de almacenamiento de energía el mismo que pone a disposición cuando otro participante lo requiera para lo cual parametriza su rango de precios de venta de la energía almacenada. Este servicio también lo podría ofertar un usuario que disponga de un vehículo eléctrico. Las “virtual power plants” no participan directamente en el modelo de mercado planteado ya que estas interactúan en el mercado eléctrico mayorista, sin embargo; estas empresas pueden poner a disposición tanto su capacidad de provisión de energía como su capacidad de compra.

Tabla 6 Participantes del mercado minorista
Fuente: Autoría propia

Participantes del mercado minorista			
Característica	Consumidor	Prosumidor	Generador
Compra de energía	X	X	
Gestión de demanda	X	X	
Landowners	X		
Generación de energía		X	X
Servicios adicionales a la red		X	X
Autoconsumo		X	
Almacenamiento de energía	X	X	X

Como se puede observar en la Tabla 6, cada participante cumple con una función dentro del mercado minorista, sin embargo; los actores que jugarían un rol principal para la operación

del mercado minorista son las llamadas “comunidades energéticas”, las mismas que agrupan a manera de un agregador varios servicios dentro del mercado minorista y lo ejecutan en un área geográfica definida. Las “comunidades energéticas” tomarían decisiones para gestionar o compartir la energía. Para este modelo en particular estas organizaciones ejecutarían las veces de fiscalizadores y supervisores de las transacciones ejecutadas, entre los participantes del mercado que operan bajo la misma comunidad. Un rol fundamental que se les asigna a estas comunidades es el desarrollo de los algoritmos para la ejecución de los contratos inteligentes, los cuales requieren un minucioso trabajo, además deben ejecutar el debug de errores que se puedan presentar en la ejecución de los diversos algoritmos. Por otra parte estos actores ejecutarían las inversiones correspondientes para instalar sistemas fotovoltaicos en los espacios que los usuarios designen para esta utilidad, por ende también deben gestionar el financiamiento correspondiente para la ejecución de los proyectos. Los ingresos obtenidos del desarrollo y operación de los proyectos aportarían a cubrir los costos operativos de las comunidades y lo restante sería el beneficio para la comunidad energética, con lo que esta pagaría lo correspondiente al costo de inversión de los sistemas de generación.

Adicionalmente la comunidad energética o la virtual power plant ponen a disposición servidores dedicados a aportar con el procesamiento y registros de las cadenas de bloques. Las compañías distribuidoras también pondrían a disposición su capacidad de procesamiento y almacenamiento para el registro y computo de los contratos inteligentes. Es importante mencionar que las empresas distribuidoras generalmente disponen de sistemas de comunicación y capacidad de procesamiento informático con altos niveles de confiabilidad aspecto que es de suma importancia en esta actividad.

La comunidad energética tiene la capacidad de actuar como un comercializador adicional, lo que presenta un cambio sustancial en el marco regulatorio y constitucional del Ecuador.

6 Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones generales

El presente trabajo amplía la comprensión sobre las transacciones energéticas en un mundo globalizado que requiere de respuestas inmediatas y donde aspectos burocráticos y de negociación compleja no son aceptados por la sociedad actual. Esta realidad obliga a plantear un modelo de mercado liberal, que opere sin intermediarios y de manera autónoma y automática.

En el mercado eléctrico minorista, los usuarios buscan reducir costos para satisfacer sus necesidades básicas y emprender actividades que impacten positivamente en su desarrollo personal y en la sociedad en general. Según lo revisado en esta investigación, se puede inferir que en las comunidades donde se han implementado sistemas de generación distribuida basados en fuentes renovables y con la posibilidad de ejecutar transacciones con estos recursos, ha habido un desarrollo significativo de la sociedad, con un impacto positivo en sus habitantes y modos de vida.

Los modelos de mercados estudiados presentan diferencias notables, como en el caso de los monopolios y mercados competitivos, que parecen no tener puntos en común. Sin embargo, dado que en Ecuador predomina un mercado monopolístico en prácticamente todo el sistema eléctrico nacional, es necesario entrelazar ambos modelos para obtener los aspectos positivos de cada uno.

El desarrollo de esta investigación permite generar una visión global de los participantes actuales del mercado, como consumidores, prosumidores y propietarios de tierras, quienes ya forman parte de la estructura actual del sistema de distribución. No obstante, la falta de un mercado en el que puedan participar limita la capacidad de crear un nuevo nicho de negocio que dinamice un sector económico, potencialmente fundamental en la economía futura.

El modelo propuesto de un mercado liberal, en el cual los usuarios finales con potencias inferiores a 10 kW tengan una participación activa, se presenta con un esquema estructurado. En este modelo, los usuarios deben registrarse en una base de datos, indicando su modelo de gestión y cumpliendo con los requisitos técnicos establecidos para participar en el mercado minorista. Estos requisitos incluyen la instalación de equipos de medición inteligente, disponer de equipos de computación adecuados, y contar con inversores con gestión remota, entre otros.

Además, los usuarios, en colaboración con las entidades denominadas “comunidades energéticas”, gestionan sus contratos inteligentes a través de una cadena de bloques para realizar transacciones en el mercado. Este enfoque garantiza una gestión eficiente y segura de las transacciones, promoviendo la transparencia y la confianza en el mercado eléctrico minorista.

6.2 Conclusiones asociadas a los objetivos específicos

Como se planteó en la investigación, se realizó un estudio del estado del arte sobre el desarrollo de los mercados eléctricos minoristas en Estados Unidos y España. Entre los

casos analizados, se presentó "The Brooklyn Microgrid (BMG)", un proyecto ambicioso que busca solucionar problemáticas contemporáneas como redes eléctricas obsoletas, la integración de sistemas de generación fotovoltaica y la inclusión de diversas cargas especiales, tales como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Este proyecto incorpora mercados locales que permiten a los miembros de la comunidad intercambiar energía de manera directa entre dos participantes.

En Nevada, se examinó "Statewide Ballot Question 3", que profundiza en la reducción de la regulación al mínimo posible. Este enfoque ha llevado a incrementos de precios en algunas áreas donde se ha desregulado, generando crisis energéticas. Muchos opositores señalan que se requiere un período prolongado de arduo trabajo y una gran cantidad de recursos para estabilizar el sistema.

En el caso de España, existen varios proyectos enfocados en las microrredes, destacando especialmente el conocido como "Comunidades Energéticas" de la empresa Power Ledger. Este proyecto propone facilitar el intercambio energético entre los usuarios que disponen de generación fotovoltaica y desean realizar transacciones en una plataforma basada en tecnología blockchain.

En conclusión, la investigación resalta la importancia de adaptar los modelos de mercado eléctrico a las necesidades y características específicas de cada región. Proyectos como "The Brooklyn Microgrid" y "Comunidades Energéticas" demuestran el potencial de las microrredes y las tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del suministro eléctrico. Sin embargo, es crucial abordar los desafíos regulatorios y técnicos para garantizar la viabilidad y el éxito a largo plazo de estos modelos innovadores.

En cuanto a las características del marco regulatorio en el Ecuador se puede indicar que a lo largo de la historia el sector eléctrico nacional ha experimentado una transformación, comenzando con la creación del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) en 1961. Este evento es fundamental para consolidar un sistema eléctrico nacional y elaborar un plan nacional de electrificación. La Ley Básica de Electrificación de 1973 y la Ley de Régimen del Sector Eléctrico de 1996 marcaron un cambio importante en la estructura del sector, fomentando la privatización y competencia en la generación de energía. No obstante, la liquidación del INECEL en 1999, producto de la liberalización del sector energético, evidenció la necesidad de obtener también recursos estatales para continuar con los diversos proyectos energéticos.

La Constitución de la República del Ecuador de 2008 tiene una clara tendencia hacia el control estatal sobre los sectores estratégicos (electricidad, hidrocarburos, agua, etc.), imponiendo medidas que en teoría pretenden garantizar la igualdad y la solidaridad en la prestación de servicios públicos, como es el caso de la tarifa única nacional por consumo de energía eléctrica. Sin embargo, actualmente en Ecuador el 90% de la energía es generada por empresas de carácter estatal, cuyo accionista mayoritario es el Ministerio de Energía, el porcentaje restante corresponde a una participación reducida de empresas privadas. El ente que ejecuta la transmisión de energía a nivel nacional es una entidad de carácter estatal y en la distribución y comercialización de energía se presentan también entidades estatales con área de influencia regionales. En este sentido no se puede denominar mercado eléctrico mayorista ya que la estructura descrita no permite la libre competencia. En este esquema el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) realiza el despacho basado en una prelación de costos, limitando así la competitividad dinámica que se podría presentar en el mercado eléctrico.

En los últimos años, la Agencia de Regulación ha emitido normativas, como la ARCERNR-001/2021, que regulan la conexión de pequeños sistemas de generación distribuida para autoabastecimiento (SGDAs). Sin embargo, estas regulaciones imponen trámites administrativos significativos y no proporcionan un esquema efectivo de remuneración por los excedentes de energía, lo que reduce el incentivo a la inversión en estos sistemas por parte de los usuarios o consumidores. Ante esta situación, las empresas distribuidoras y comercializadoras de Ecuador se ven obligadas a adaptarse al modelo de negocio actual el cual no explota el potencial de estas tecnologías, considerando que los consumidores podrían generar energía eléctrica para su autoabastecimiento y con la ventaja de comercializar sus excedentes. La participación activa de los consumidores en el mercado, mediante sistemas de generación distribuida, requiere de un marco regulatorio que permita la compensación por excedentes de generación, incentivando así la inversión y dinamizando el mercado eléctrico.

La evolución tecnológica y empresarial en el sector eléctrico introduce nuevos agentes de mercado, como los agregadores, prosumidores y consumidores con gestión de demanda. Estos agentes amplían la visión de un mercado eléctrico tradicional y obligan a considerar nuevas formas de transacciones comerciales. Para fomentar una mayor participación de los prosumidores y atraer inversiones en sistemas de generación distribuida, es esencial que el marco regulatorio permita la compensación por los excedentes de generación. Esto proporcionaría incentivos efectivos y abriría nuevas oportunidades para los servicios que pueden ser ofertados desde el lado de la demanda.

Es importante destacar que el marco regulatorio en Ecuador se presenta como un blindaje para un modelo de mercado como el que se propone en el presente documento, debido a que según lo analizado existe una contradicción regulatoria desde la constitución para ejecutar un proyecto como el expuesto. Se requiere un cambio de paradigma para considerar nuevos modelos de mercados que se presenten como oportunidades para la sociedad en general.

6.3 Trabajos Futuros

Un trabajo primordial para que las alternativas expuestas sea viables es el análisis y propuesta de cambio regulatorio en cuanto al funcionamiento del mercado eléctrico minorista. Este aspecto se convierte en un trabajo arduo que se debe ejecutar de manera urgente en vías de crear el mencionado mercado.

Adicionalmente en los países que disponían de modelos de mercado minorista que fueron objeto del presente estudio se exponen varias dificultades en la operatividad del mercado, por ejemplo, la dificultad tecnológica que presenta el mantener el sistema de cadenas de bloques operando, corregir los errores que pudiera generar el algoritmo en la operación y realizar los ajustes correspondientes en lo que se refiere al debug de los algoritmos empleados, el uso de la energía que se requiere para mantener operando los equipos de cómputo requerido; representan un gran desafío a resolver para implantar este tipo de modelos. Se requiere estudiar a detalle los algoritmos de los contratos inteligentes que se requieren para ejecutar tracciones en mercado eléctricos.

7 Referencias

- [1] zwsavoltae, “Las ‘Virtual Power Plants’ Pueden Ser Poderosas”, Avolta Energy. Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.avoltaenergy.com/las-centrales-electricas-virtuales-pueden-ser-poderosas-para-america-latina/>
- [2] A. Monacchi y W. Elmenreich, “Assisted energy management in smart microgrids”, *J Ambient Intell Human Comput*, vol. 7, núm. 6, pp. 901–913, dic. 2016, doi: 10.1007/s12652-016-0392-1.
- [3] T. Chen, Q. Alsafasfeh, H. Pourbabak, y W. Su, “The Next-Generation U.S. Retail Electricity Market with Customers and Prosumers—A Bibliographical Survey”, *Energies*, vol. 11, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2018, doi: 10.3390/en11010008.
- [4] D. S. Kirschen, “Demand-side view of electricity markets”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, núm. 2, pp. 520–527, may 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.810692.
- [5] A. S. S. Gorostidi, “ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN MERCADO PEER TO PEER (P2P) DE ENERGÍA EN EL MERCADO MINORISTA DE ELECTRICIDAD EN ESPAÑA”.
- [6] E. Mengelkamp, J. Gärtner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, y C. Weinhardt, “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid”, *Applied Energy*, vol. 210, pp. 870–880, ene. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.054.

- [7] C. Lo Prete y B. F. Hobbs, "A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets", *Applied Energy*, vol. 169, pp. 524–541, may 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.099.
- [8] J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal, y A. G. de Muro, "Architecture of a microgrid energy management system", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, núm. 2, pp. 1142–1158, 2011, doi: 10.1002/etep.443.
- [9] A. Freier, "Blockchain in the energy sector. An analysis of the Brooklyn case.", el 3 de enero de 2022, *Rochester, NY*: 3998651. doi: 10.2139/ssrn.3998651.
- [10] M. Swan, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [11] R. Beck, J. Czepluch, N. Lollike, y S. Malone, *BLOCKCHAIN – THE GATEWAY TO TRUST-FREE CRYPTOGRAPHIC TRANSACTIONS*. 2016.
- [12] M. Moran, "Energía", *Desarrollo Sostenible*. Consultado: el 8 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [13] J. A. Llorente Gallardo, "Análisis del mercado eléctrico en España", 2016, Consultado: el 8 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/21734>
- [14] R. F. Uvidia Galván y W. A. Tacle Albán, "Comercialización independiente en los mercados mayorista y minorista de energía eléctrica, aplicada en el Ecuador", bachelorThesis, QUITO/ EPN/ 2007, 2007. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/392>
- [15] S. Valero Verdú, "Desarrollo y evaluación de técnicas y modelos para la identificación y clasificación de segmentos de consumidores de energía, aplicación al análisis de las posibilidades de participación de sectores de la demanda de energía eléctrica en mercados competitivos", <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2007. Consultado: el 4 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=140314>
- [16] "Competition in Electricity Markets – Analysis", IEA. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/competition-in-electricity-markets>
- [17] J. L. G. Delgado, "EL REGULADOR ANTE LOS NUEVOS DESAFÍOS DE LA ENERGÍA EN IBEROAMÉRICA".
- [18] "Electricity Sector Deregulation in the APEC Region".
- [19] L. Tagliaferre y S. Greenwood, "Electric Utility Restructuring: What Does It Mean for Residential and Small Retail Consumers in Maine?", *Maine Policy Review*, vol. 8, núm. 2, pp. 64–72, 1999.
- [20] "751774.pdf". Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/servlets/purl/751774>
- [21] "Prosumidores y agregación de demanda, el futuro del mercado eléctrico", Interempresas. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/252174-Prosumidores-y-Agregacion-de-Demanda-el-futuro-del-mercado-electrico.html>
- [22] "The_Promises_and_Challenges_of_Community_Choice_Aggregation_in_CA.pdf". Consultado: el 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/The_Promises_and_Challenges_of_Community_Choice_Aggregation_in_CA.pdf
- [23] "Producto 1 Agregador Demanda 26sep2022.pdf". Consultado: el 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/2a772017c282d781052588e900723ec1/\\$FILE/Producto%201%20Agregador%20Demanda%2026sep2022.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/2a772017c282d781052588e900723ec1/$FILE/Producto%201%20Agregador%20Demanda%2026sep2022.pdf)
- [24] "Qué son los contratos de compraventa de energía PPA, energía limpia de empresa a empresa". Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/que-son-los-contratos-de-compraventa-de-energia-ppa/>

- [25] “Qué son los PPAs y cómo ayudan a las empresas en su proceso de descarbonización”, Endesa. Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/transicion-ecologica/que-son-ppas-como-ayudan-descarbonizacion-empresas>
- [26] A. O. Gallardo, “Libre Mercado Y Regulación: La Experiencia En El Sector Eléctrico Español / Market and Regulation: The Experience in the Spanish Electricity Sector”, *Revista Chilena de Derecho*, vol. 41, núm. 1, pp. 205–228, 2014.
- [27] “Sistemas de medición avanzada en Colombia: beneficios, retos y oportunidades”. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612018000200469
- [28] “(27) What distinguishes feed-in tariffs from net metering? | LinkedIn”. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/what-distinguishes-feed-in-tariffs-from-net-metering-engineerinc/>
- [29] E. Inga Ortega y J. Rodríguez, “ESTRATEGIAS DE NEGOCIO PARA MEDICIÓN INTELIGENTE ACOPLANDO ENERGÍAS RENOVABLES”, *Primer Congreso Internacional y Expo Científica*, nov. 2013.
- [30] A. Poullikkas, “A comparative assessment of net metering and feed in tariff schemes for residential PV systems”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 3, pp. 1–8, sep. 2013, doi: 10.1016/j.seta.2013.04.001.
- [31] M. A. Omar y M. Mahmoud, “Economic evaluation of residential grid connected PV Systems based on Net- Metering and Feed-in- Tariff schemes in Palestine”, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 8, pp. 2106–2115, dic. 2018.
- [32] M. J. A. Baig, M. T. Iqbal, M. Jamil, y J. Khan, “Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading System Using Open-Source Angular Framework and Hypertext Transfer Protocol”, *Electronics*, vol. 12, núm. 2, Art. núm. 2, ene. 2023, doi: 10.3390/electronics12020287.
- [33] “Comunidades Energéticas | Idae”. Consultado: el 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/comunidades-energeticas>
- [34] A. G. Francisco José y M. R. Lorenzo, *Estudios sobre cambio climático y transición energética: Estudios conmemorativos del XXV aniversario del acceso a la cátedra del Prof. Íñigo del Guayo Castiella*. Marcial Pons, 2022.
- [35] “Las Virtual Power Plants, una nueva forma de generar y gestionar la energía”, IMNOVATION. Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.imnovation-hub.com/es/energia/que-es-una-virtual-power-plant/>
- [36] “A Virtual Power Plant Built With Solar and Storage Is a Blueprint for Australia’s Energy Future”. Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/virtual-power-plant-is-a-blueprint-for-australia>
- [37] “Virtual Power Plant VPP Demonstrations”. Consultado: el 11 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://aemo.com.au/initiatives/major-programs/nem-distributed-energy-resources-der-program/der-demonstrations/virtual-power-plant-vpp-demonstrations>
- [38] “Landowners”. Consultado: el 2 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/countries/north-america/united-states/landowners>
- [39] C.-H. Tsai y Y.-L. Tsai, “Competitive retail electricity market under continuous price regulation”, *Energy Policy*, vol. 114, pp. 274–287, mar. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.12.012.
- [40] C. Defeuilley, “Retail competition in electricity markets”, *Energy Policy*, vol. 37, núm. 2, pp. 377–386, feb. 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2008.07.025.
- [41] W. Gonzalez, “Restructured States, Retail Competition, and Market-Based Generation Rates”.
- [42] “The Future of Energy | Pando”, LO3 Energy. Consultado: el 17 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://lo3energy.com/>

- [43] silicon, “New York neighbours power up blockchain-based Brooklyn Microgrid”, Silicon Republic. Consultado: el 19 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.siliconrepublic.com/machines/brooklyn-microgrid-blockchain-energy-networks>
- [44] J. Kennedy, “Siemens establishes €1bn Next47 super fund for start-ups”, Silicon Republic. Consultado: el 19 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.siliconrepublic.com/start-ups/siemens-next47-startup-fund>
- [45] “¿Qué es Tendermint?”, Bybit Learn. Consultado: el 17 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://learn.bybit.com/es/blockchain/tendermint/>
- [46] “An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods”. Consultado: el 16 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/document/6227918>
- [47] “A Market Mechanism for Energy Allocation in Micro-CHP Grids”. Consultado: el 16 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/document/4438876>
- [48] H. Singh, S. Hao, y A. Papalexopoulos, “Transmission congestion management in competitive electricity markets”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, núm. 2, pp. 672–680, may 1998, doi: 10.1109/59.667399.
- [49] M. Gough, R. Castro, S. F. Santos, M. Shafie-khah, y J. P. S. Catalão, “Chapter 2 - A panorama of applications of blockchain technology to energy”, en *Blockchain-based Smart Grids*, M. Shafie-khah, Ed., Academic Press, 2020, pp. 5–41. doi: 10.1016/B978-0-12-817862-1.00002-6.
- [50] C.-T. Li, C.-Y. Weng, C.-C. Lee, y C.-C. Wang, “A Hash Based Remote User Authentication and Authenticated Key Agreement Scheme for the Integrated EPR Information System”, *J Med Syst*, vol. 39, núm. 11, p. 144, nov. 2015, doi: 10.1007/s10916-015-0322-3.
- [51] “Con Edison - Powering New York City and Westchester”. Consultado: el 18 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.coned.com/en>
- [52] M. C. Lacity, “Many enterprises have not progressed their blockchain solutions beyond proofs-of- concept. Daunting managerial challenges in the areas of standards, regulations, shared governance models and viable ecosystems impede progress. We describe the strategies that LO3 Energy, Moog, Inc. and the Center for Supply Chain Studies are pursuing to address these challenges.1,2”, 2018.
- [53] “Brooklyn Microgrid | Community Powered Energy”, Brooklyn Microgrid. Consultado: el 19 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.brooklyn.energy>
- [54] “Exergy - Home”, Exergy. Consultado: el 19 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://exergyenergy.wpcomstaging.com/>
- [55] K. Siemon-Martin, “STATEWIDE BALLOT QUESTIONS 2016”.
- [56] “Nevada Legislature to Minimize Regulations on the Energy Market and Eliminate Legal Energy Monopolies, Question 3 (2016)”, Ballotpedia. Consultado: el 15 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://ballotpedia.org/Nevada_Legislature_to_Minimize_Regulations_on_the_Energy_Market_and_Eliminate_Legal_Energy_Monopolies,_Question_3_\(2016\)](https://ballotpedia.org/Nevada_Legislature_to_Minimize_Regulations_on_the_Energy_Market_and_Eliminate_Legal_Energy_Monopolies,_Question_3_(2016))
- [57] “Negocio eléctrico en España | Red Eléctrica”. Consultado: el 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/conocenos/actividades-de-negocio/negocio-electrico-en-espana>
- [58] P. de Mergelina, I. Lemus-Aguilar, P. de Mergelina, y I. Lemus-Aguilar, “Current Innovation Sources Driving The Spanish Electric Power Sector”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 41, núm. 3, dic. 2021, doi: 10.15446/ing.investig.v41n3.85377.
- [59] “Greenchain: el origen de la energía”, ACCIONA Energía. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://soluciones.acciona-energia.com/por-que-acciona/greenchain/>

- [60] Dynamic, “Holaluz | Carlota Pi | Con una cultura verde salieron a bolsa”, DYNAMIC. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dynamicgc.es/holaluz-carlota-pi-energia-renovable-fotovoltaica/>
- [61] “Instalar placas solares - Holaluz”. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.holaluz.com/placas-solares/>
- [62] RedacciónT21, “Electricidad comunitaria se enciende en España • Tendencias21”, Tendencias21. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://tendencias21.levante-emv.com/electricidad-comunitaria-se-enciende-en-espana_a33542.html
- [63] “Comercializadora de electricidad - Zencer, S.Coop.And.” Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.zencer.es/>
- [64] E. Press, “Powerledger lanza uno de los primeros proyectos de ‘Comunidad Energética’ en España”. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.notimerica.com/comunicados/noticia-comunicado-powerledger-lanza-primeros-proyectos-comunidad-energetica-espana-20220323173715.html>
- [65] “Powerledger anuncia el lanzamiento del proyecto ‘Comunidad Energética’ basado en tecnología Blockchain en España”, Cointelegraph. Consultado: el 5 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.cointelegraph.com/news/powerledger-announces-the-launch-of-the-energy-community-project-based-on-blockchain-technology-in-spain>
- [66] “(PDF) Catalogo Generación Eléctrica Ecuador 1a Parte Sep 05”, dokumen.tips. Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dokumen.tips/documents/catalogo-generacion-electrica-ecuador-1a-parte-sep-05.html>
- [67] “LEY_REGIMEN_SECTOR_ELECTRICO.pdf”. Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/Normativa/LEY_REGIMEN_SECTOR_ELECTRICO.pdf
- [68] S. D. Diaz Perez, Y. Gomez Charris, J. I. Silva Ortega, y E. M. Noriega Angarita, “Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de America Latina”, sep. 2017, Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11323/1926>
- [69] “resolucion_nro._arcernnr-013-2021ed.pdf”. Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/09/resolucion_nro._arcernnr-013-2021ed.pdf
- [70] “GENERACIÓN DISTRIBUIDA PARA AUTOABASTECIMIENTO – Centrosur”. Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.centrosur.gob.ec/requisitos-instalacion-panel-fotovoltaico/>
- [71] D. Miller y P. Mockel, *Using Blockchain to Enable Cleaner, Modern Energy Systems in Emerging Markets*. International Finance Corporation, Washington, DC, 2018. doi: 10.1596/31200.
- [72] C. Kuchkovsky y G. Gómez Lardies, *Blockchain: la revolución industrial de internet*, 6ª ed. Barcelona: Gestión 2000, 2018.
- [73] “Blockchain: Powering the Internet of Value”, The Shared Ledger. Consultado: el 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://sharethelledger.com/whitepaper/>
- [74] S. Khalili, V. Disfani, y M. Ahmadi, “Impact of Blockchain Technology on Electric Power Grids -- A case study in LO3 Energy”, el 9 de junio de 2021, *arXiv*: arXiv:2106.05395. doi: 10.48550/arXiv.2106.05395.
- [75] chruid, “Como Funciona Blockchain ▷ ➡ IK4 ▷ ➡”, IK4 ▷ ➡. Consultado: el 22 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ik4.es/como-funciona-blockchain/>
- [76] W.-P. Schill, A. Zerrahn, y F. Kunz, “Prosumage of solar electricity: pros, cons, and the system perspective”, *Economics of Energy & Environmental Policy*, vol. 6, núm. 1, pp. 7–32, 2017.

- [77] M. Horn y M. Mirzatuny, "Mining Big Data to Transform Electricity", en *Broadband Networks, Smart Grids and Climate Change*, E. M. Noam, L. M. Pupillo, y J. J. Kranz, Eds., New York, NY: Springer, 2013, pp. 47–58. doi: 10.1007/978-1-4614-5266-9_6.
- [78] P. De Filippi, M. Mannan, y W. Reijers, "Blockchain as a confidence machine: The problem of trust & challenges of governance", *Technology in Society*, vol. 62, p. 101284, ago. 2020, doi: 10.1016/j.techsoc.2020.101284.
- [79] J. Lu, S. Wu, H. Cheng, B. Song, y Z. Xiang, "Smart contract for electricity transactions and charge settlements using blockchain", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, vol. 37, núm. 3, pp. 442–453, 2021, doi: 10.1002/asmb.2570.
- [80] B. Mika y A. Goudz, *Blockchain-Technologie in der Energiewirtschaft: Blockchain als Treiber der Energiewende*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-60568-4.
- [81] L. F. Carrasco Chipantiza, "SISTEMA DE MONITOREO Y TELEGESTIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN CARGAS RESIDENCIALES BASADO EN UNA ARQUITECTURA IoT.", Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2018. [En línea]. Disponible en:
https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/28809/1/Tesis_%20t1486ec.pdf