

Albert Stefan Radulescu

**ACTUALIDAD Y FUNCIONAMIENTO DEL MERCADO ELÉCTRICO ESPAÑOL Y
LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Dirigido por el Dr. Francisco González Molina

Grado de Ingeniería Eléctrica



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

1.	Historia.....	5
1.1	Introducción.....	5
1.2	Desarrollo de la Electricidad en España.....	5
2.	Organización del Sector Eléctrico.....	7
2.1	Generación de Energía.....	7
2.2	Transporte de energía.....	9
2.3	Distribución de Energía.....	11
2.3.1	Estructura del Sistema de Distribución.....	12
2.4	Comercialización de Energía.....	13
2.4.1	Comercializadoras de Referencia.....	15
2.4.2	Comercializadoras Libres.....	15
2.5	Intercambios Intracomunitarios e Internacionales.....	16
2.5.1	Interconexiones Eléctricas de España.....	16
2.5.2	Beneficios del Intercambio Eléctrico.....	19
2.5.3	Desafíos de la Interconexión Eléctrica.....	19
3.	Modelos de Mercado Eléctrico.....	20
3.1	Mercado Monopolístico.....	20
3.2	Mercado Monopsonístico.....	21
3.3	Competencia Mayorista.....	21
3.4	Competencia Mayorista y Minorista.....	22
4.	Mercado Español.....	22
4.1	OMIE.....	22
4.2	Mercado Mayorista.....	23
4.3	Mercado Minorista.....	24
4.3.1	Mercado Libre.....	25
4.3.2	Mercado Regulado.....	25
5.	Formación del Precio de la Electricidad en España.....	26
5.1	Formación de Precios en el Mercado Mayorista Diario de Electricidad.....	26
5.2	Formación de Precios en los Mercados Mayoristas a Plazo de Electricidad.....	29
5.3	Determinantes del Precio de la Electricidad.....	30
6.	Blockchain.....	32
6.1	¿Qué es? Introducción al Blockchain.....	32
6.2	Funcionamiento y Características.....	33

6.3	Actualidad del Blockchain.....	37
6.4	Desarrollo del Blockchain	38
6.4.1	Ethereum y los Smart Contracts.....	38
6.4.2	Relación con las Tecnologías Emergentes	40
6.5	Integración en el Mundo Energético	41
6.6	Estudio de Casos Nacionales.....	44
6.6.1	Iberdrola y BBVA	45
6.6.2	Proyecto de Blockchain de Red Eléctrica de España (REE).....	46
6.6.3	Pylon Network.....	48
6.7	Estudio de Casos Internacionales	50
6.7.1	Enerchain, Alemania	52
6.7.2	LO3 Brooklyn Microgrid, EE. UU.....	56
6.7.3	RENeW Nexus, Australia.....	60
6.7.4	WePOWER, Lituania	64
6.7.5	Sun Exchange, Sudáfrica.....	68
7.	Comparativa del Mercado Eléctrico Español Actual contra la Integración de Blockchain.....	71
7.1	Transparencia.....	71
7.2	Trazabilidad del Origen de la Energía.....	72
7.3	Eficiencia de Operaciones	72
7.4	Descentralización.....	73
7.5	Seguridad.....	73
7.6	Interacción con el Consumidor.....	74
7.7	Regulación	74
7.8	Posibles Impactos en la Factura de la Luz.....	74
8.	Conclusiones	75

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Distribución de la potencia instalada a nivel nacional.....	8
Figura 2. Evolución anual de la generación renovable y no renovable del sistema eléctrico nacional, en porcentaje.....	9
Figura 3. Evolución mensual de la generación renovable y no renovable del sistema eléctrico nacional, en porcentaje.	9
Figura 4. Evolución de la red de transporte (km) a nivel nacional.....	10
Figura 5. Mapa de la zona de distribución de las principales distribuidoras españolas.....	12
Figura 6. Formato de etiquetado de la electricidad. Fuente: BOE.....	14
Figura 7. Ejemplo curva de la oferta de electricidad del mercado.....	26
Figura 8. Ejemplo curva de la demanda de electricidad del mercado.....	28
Figura 9. Ejemplo de determinación del precio en el mercado mayorista.....	29
Figura 10. Encadenamiento de bloques.....	33
Figura 11. Comparación entre Red Centralizada (izquierda) y Peer to Peer (derecha).....	34
Figura 12. Red centralizada (izquierda), red descentralizada (medio) y red distribuida (derecha).....	35
Figura 13. Etapas Smart Contract en transacciones energéticas P2P.....	42
Figura 14. Ejemplo de un Smart Contract en transacciones energéticas.....	43
Tabla 1. Potencia instalada y generación eléctrica de las fuentes de energía renovables.....	8
Tabla 2. Potencia instalada y generación eléctrica de las fuentes de energía no renovables.....	8
Tabla 3. Instalaciones de la red de transporte en España.....	10
Tabla 4. Resumen de los intercambios internacionales de energía eléctrica.....	18

1. Historia

1.1 Introducción

El mercado eléctrico en España ha experimentado transformaciones significativas en las últimas décadas, impulsado por la liberalización del sector, el aumento de la demanda energética y, más recientemente, la integración de fuentes de energía renovable. Estas energías, particularmente la solar y la eólica, han ganado protagonismo debido a su capacidad para reducir las emisiones de carbono y contribuir a la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, su naturaleza intermitente plantea desafíos técnicos y económicos que afectan la estabilidad y el precio de la electricidad.

En paralelo, la aparición de tecnologías disruptivas como el blockchain ofrece nuevas oportunidades para mejorar la transparencia, eficiencia y descentralización del mercado eléctrico. Esta tecnología tiene el potencial de transformar la forma en que se realizan las transacciones de energía, permitiendo, por ejemplo, intercambios directos entre usuarios (peer-to-peer) y la creación de contratos inteligentes que automatizan la compra y venta de electricidad.

Este trabajo se propone explorar la evolución del mercado eléctrico español con un enfoque especial en el impacto de las energías renovables. Además, se examinará cómo el blockchain podría integrarse en este mercado para superar algunos de los desafíos actuales y potenciar una transición energética más eficiente y justa.

1.2 Desarrollo de la Electricidad en España

La primera referencia de la aplicación práctica de la electricidad en España data de 1852, cuando el farmacéutico Domenech logró iluminar su botica en Barcelona. Ese mismo año, en Madrid, se realizaron pruebas de iluminación en la plaza de la Armería y en el Congreso de los Diputados. En 1875, se instaló una dinamo en Barcelona que permitió iluminar las Ramblas, la Boquería, el Castillo de Montjuic y parte de los altos de Gracia. A partir del año siguiente, comenzó la electrificación industrial en España, lo que llevó a la creación en Barcelona de la Sociedad Española de Electricidad, la primera empresa eléctrica española.

En 1885, se publicó un decreto que regulaba las instalaciones eléctricas y, tres años después, una Real Orden establecía normas para el alumbrado eléctrico de los teatros, prohibiendo el uso de gas y autorizando las lámparas de aceite solo como sistema de emergencia. Este rápido desarrollo de la industria eléctrica llevó a la creación de numerosas empresas en las últimas dos décadas del siglo XIX. En 1901, se publicó la primera estadística oficial que indicaba que el 61% de la potencia instalada era de origen térmico, mientras que el 39% restante utilizaba energía hidráulica. En ese momento, la electricidad se generaba en forma de corriente continua, lo que limitaba su transporte a largas distancias y restringía el desarrollo a las cercanías de las centrales eléctricas.

Con la aparición de la corriente alterna a principios del siglo XX, se hizo posible el transporte de electricidad a largas distancias, permitiendo un desarrollo a gran escala de las centrales hidroeléctricas. Para finales de los años veinte, la estructura de generación eléctrica en España había cambiado: la potencia instalada se multiplicó por 12, alcanzando aproximadamente 1.500 MW, y el 81% de la producción era de origen hidroeléctrico, existiendo un exceso de capacidad de producción.

Durante la Guerra Civil y los primeros años de la posguerra, la capacidad de producción se estancó. La sequía de 1944-1945 impidió satisfacer una demanda creciente, transformando el exceso de capacidad en un déficit significativo. Este déficit se vio agravado por un crecimiento de la demanda del 27% anual. En 1944, se fundó la empresa Unidad Eléctrica S.A. (UNESA) para promover las interconexiones entre los distintos sistemas eléctricos regionales y crear el Centro de Control, encargado de gestionar la explotación conjunta del Sistema Eléctrico Nacional.

La implementación de las Tarifas Tope Unificadas en 1953 incentivó la construcción de nuevas centrales, reduciendo progresivamente el déficit de capacidad de producción. Esto contribuyó a la consolidación y rápido crecimiento de la economía española, con un aumento significativo de la demanda eléctrica. Para 1970, la producción de energía eléctrica se había triplicado, alcanzando los 56.500 GWh y una potencia instalada de 17.925 MW. La estructura de generación se modificó, con la producción hidroeléctrica reduciéndose al 50% y un incremento en la producción con fueloil.

Esta situación cambió en 1973 con el aumento de los precios del petróleo, afectando negativamente a las centrales térmicas que utilizaban derivados del petróleo. En respuesta a la crisis del petróleo, en la década de 1980 se pusieron en servicio centrales de carbón y grupos nucleares. También se comenzó a promover la cogeneración y las energías renovables. A finales de los ochenta, el sector eléctrico español se encontraba con una elevada capacidad ociosa y un alto endeudamiento debido a la política de sustitución del petróleo.

Para estabilizar la situación económico-financiera de las empresas del sector, en 1985 se realizó un intercambio de activos y en 1988 se estableció un nuevo sistema de cálculo de tarifas eléctricas, conocido como Marco Legal y Estable (MLE). Este sistema incluía una metodología de amortización y retribución de las inversiones, y un sistema de compensaciones entre los agentes. La introducción del MLE se considera un avance importante en cuanto a la regulación del sector eléctrico.

En 1996, se aprobó la Directiva europea para el mercado interior de la electricidad, introduciendo criterios de liberalización y de competencia en el sistema eléctrico. España adoptó rápidamente estos criterios, y en 1998 entró en vigor la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico, que introdujo cambios normativos significativos.

Entre 1996 y 2001, la demanda de electricidad aumentó más del 30%, superando las previsiones. Sin embargo, el sector enfrentó dificultades para satisfacer este crecimiento debido a los largos plazos de desarrollo de las infraestructuras eléctricas y la incertidumbre regulatoria.

En el siglo XXI, el sector eléctrico español ha enfrentado numerosos retos, incluyendo la transformación hacia un modelo de generación distribuida y la integración de fuentes de energía renovables. Nuevas tecnologías como las microrredes, vehículos eléctricos, almacenamiento de energía, redes inteligentes y gestión activa de la demanda están siendo implementadas gradualmente, adaptándose a las exigencias medioambientales y mejorando la eficiencia energética.

2. Organización del Sector Eléctrico

El Mercado Ibérico Español opera bajo un modelo marginalista. Cada día, los vendedores y compradores presentan sus ofertas con diferentes precios. El día previo a la entrega de electricidad, las comercializadoras y los productores envían sus ofertas, especificando los precios para cada hora del día siguiente a través del Operador del Mercado Ibérico de la Energía (OMIE).

Una vez que los productores han presentado sus ofertas para cada hora del día siguiente, estas se ordenan de manera ascendente mediante el algoritmo EUPHEMIA, lo que permite conformar la curva de oferta del mercado para cada hora.

De manera similar, las ofertas de los compradores, es decir, las comercializadoras, se organizan por EUPHEMIA en orden descendente según su precio, creando así la curva de demanda del mercado.

El precio del mercado para el día siguiente se determina en el punto de intersección de las curvas de oferta y demanda. A este precio, las comercializadoras deben añadir otros costes, como la potencia contratada, los costes regulados y los impuestos establecidos por el gobierno, para fijar sus precios de venta al consumidor final.

En la actualidad, las actividades del sector eléctrico están divididas en cuatro fases, las cuales operan de manera independiente y separada entre sí. Estas son la producción, transporte, distribución y comercialización de energía. Cada una de estas fases es gestionada por un agente específico que se encarga de llevar a cabo dicha actividad.

2.1 Generación de Energía

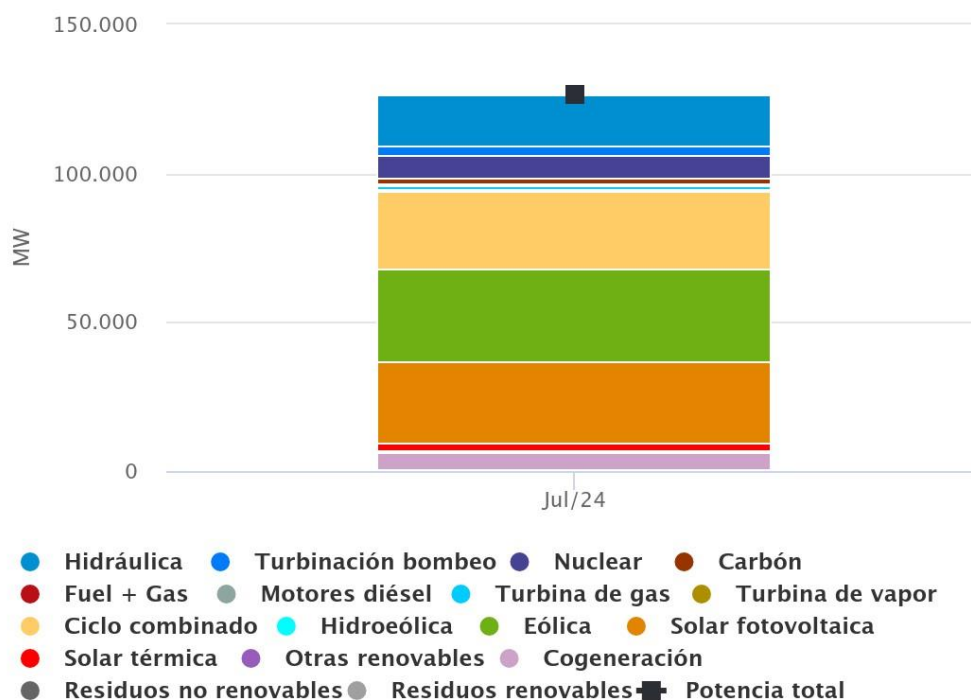
Este es el primer factor que tenemos en el proceso, representado por la mayoría de los generadores mayoristas de energía provenientes de diversas fuentes.

¿Qué fuentes de energía se utilizan en España para generar electricidad? El mix energético incluye fuentes tradicionales como el carbón, la energía nuclear y el gas natural. Además, las energías renovables, que ya representan el 50% de la generación energética, están ganando cada vez más importancia.

El mix energético es la combinación de diferentes fuentes de energía primaria utilizadas para producir electricidad para los consumidores.

El apoyo institucional, la reducción de costes, las subvenciones y los compromisos de reducción de emisiones han impulsado la rápida expansión de las energías limpias y el abandono de las fuentes más contaminantes.

Actualmente, Julio de 2024, la potencia instalada a nivel nacional se distribuye de la siguiente forma:



Fuente: www.ree.es

Figura 1. Distribución de la potencia instalada a nivel nacional.

	Potencia Instalada (MW)	Generación Eléctrica (GWh)
Hidráulica	17.098	25.330
Hidroeléctrica	11	17
Eólica	30.932	62.649
Solar fotovoltaica	25.818	37.472
Solar térmica	2.304	4.696
Otras Renovables	1.098	3.594
Residuos Renovables	170	846
Total renovables	77.431	134.604

Tabla 1. Potencia instalada y generación eléctrica de las fuentes de energía renovables.

	Potencia Instalada (MW)	Generación Eléctrica (GWh)
Turbinación bombeo	3.331	5.204
Nuclear	7.117	54.276
Carbón	3.464	3.868
Fuel+Gas	8	0
Motor diésel	769	2.511
Turbina de gas	1.149	754
Turbina de vapor	483	1.218
Ciclo combinado	26.250	46.050
Cogeneración	5.585	17.314
Residuos no renovables	426	1.319
Total no renovables	48.482	132.509

Tabla 2. Potencia instalada y generación eléctrica de las fuentes de energía no renovables.

A lo largo de los años hemos experimentado una gran evolución de las energías renovables en España, transformando significativamente el panorama energético del país y posicionándolo como líder en la potencia generada en el país.

Durante la década de los 90, cuando empezaron a aparecer la energía solar y eólica, la energía hidráulica era la única renovable y generaba entre el 15 y el 20% de la electricidad. En 2010 las fuentes de energía renovables ya pasaron a representar el 30% de la energía producida, hasta alcanzar en 2020 aproximadamente el 44% de la generación total de electricidad en España. Este porcentaje ha seguido aumentando, y en 2023, alcanzó el 51%, destacando la importancia creciente de estas fuentes en el suministro energético del país.

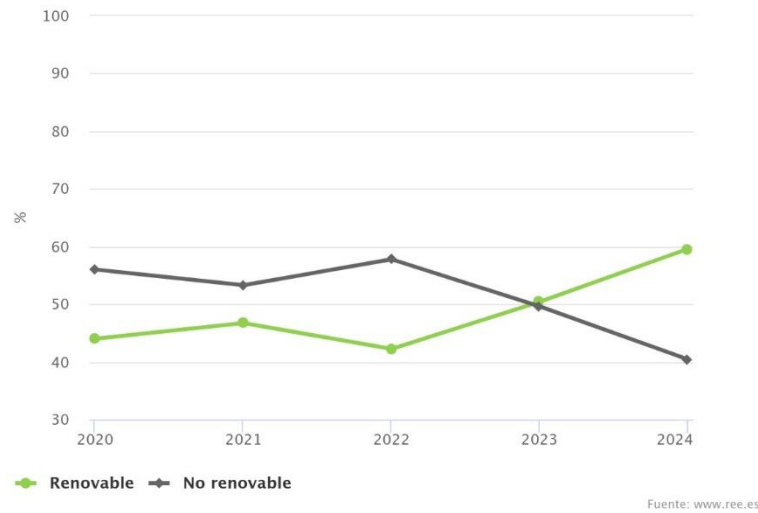


Figura 2. Evolución anual de la generación renovable y no renovable del sistema eléctrico nacional, en porcentaje.

Pero, aunque la infraestructura esté instalada para generar, la producción real aún no está al mismo nivel. A continuación, podemos observar que, dependiendo del período, las energías renovables ya están superando a las energías más tradicionales.

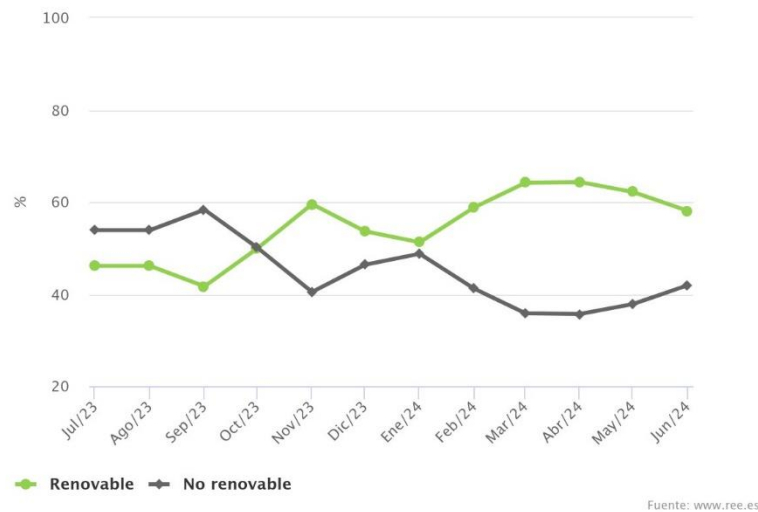


Figura 3. Evolución mensual de la generación renovable y no renovable del sistema eléctrico nacional, en porcentaje.

2.2 Transporte de energía

El segundo actor en el proceso es el transporte de la energía eléctrica generada. Este proceso se lleva a cabo mediante una red de alta tensión, gestionada principalmente por Red Eléctrica de España (REE).

REE es el operador del sistema eléctrico español, responsable tanto en la península como en los sistemas insulares y extrapeninsulares. REE debe garantizar la ejecución de los procedimientos técnicos necesarios para que la electricidad fluya adecuadamente desde los centros de generación hasta los centros de consumo.

La actividad de transporte tiene como objetivo llevar la electricidad desde el punto de generación hasta los puntos de consumo de grandes consumidores industriales conectados directamente a la red de transporte y hasta los puntos de entronque con las redes de distribución (subestaciones). A través de estas subestaciones, la energía se distribuye al resto de los consumidores, garantizando siempre la calidad y mejorando la seguridad del suministro.

La red de transporte de electricidad está constituida por las líneas, transformadores y otros elementos de tensión igual o superior a 220 kV, aquellas otras instalaciones que, siendo de tensión inferior a 220 kV, cumplan funciones de transporte y las instalaciones de interconexiones internacionales y con los sistemas insulares y extrapeninsulares.

	Península	Baleares	Canarias	Total
Líneas Aéreas	40.658	1.142	1.260	43.060
Cable submarino	265	636	45	946
Cable subterráneo	672	227	318	1.217
Total líneas	41.595	2.005	1.623	45.223
Transformación	86.978	3.838	4.165	94.981

Tabla 3. Instalaciones de la red de transporte en España.

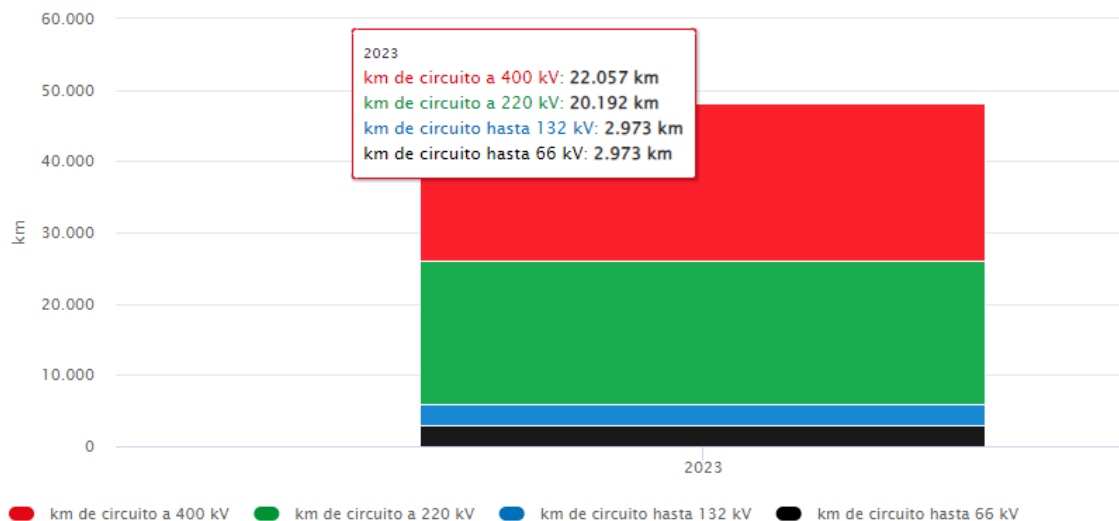


Figura 4. Evolución de la red de transporte (km) a nivel nacional.

Esta está compuesta por más de 43.600 km de líneas, más de 5.400 posiciones de subestaciones y más de 85.000 MVA de capacidad de transformación. Estos activos forman una red mallada, fiable y segura, que actualmente ofrece altos índices de calidad de servicio y cumple una serie de funciones críticas como son:

- Garantizar el equilibrio y la seguridad del sistema eléctrico español
- Transferencia lo más neta posible de energía entre las distintas subestaciones de la red.
- Permite la integración de fuentes de energía renovable, como la eólica y la solar, en el sistema eléctrico.
- Optimización de las pérdidas en el transporte
- Mantenimiento de todos los puntos de la red manteniendo a estos dentro de los límites establecidos.
- Gestión óptima de los medios de producción en cada momento, dependiendo de la topología de la demanda.

La operación segura y eficiente del sistema eléctrico requieren analizar la viabilidad del programa diario de transacciones comerciales del mercado diario y corregir las restricciones en la red de transporte, asegurando el suministro ante posibles indisponibilidades imprevistas de grupos de generación u otras contingencias.

Dado que la electricidad no puede almacenarse económicamente, la oferta y la demanda deben mantenerse prácticamente iguales en todo momento para asegurar las condiciones técnicas (tensión y frecuencia) necesarias para garantizar la calidad y seguridad del suministro. Los procesos operativos implementados por el operador del sistema permiten mantener un equilibrio continuo entre generación y demanda.

2.3 Distribución de Energía

La distribución de la electricidad en España es un proceso clave que abarca desde la transmisión de alta tensión hasta el suministro final a los consumidores. Este sistema es operado por diversas empresas distribuidoras que son responsables de garantizar que la electricidad llegue de manera segura y fiable a hogares, industrias y empresas.

Hasta junio de 2009, las empresas distribuidoras fueron también responsables de realizar el servicio de suministro regulado a tarifa integral para los consumidores acogidos al mismo. A partir de dicha fecha, este suministro regulado desapareció, creándose, el “Suministro de Último Recurso”. Por tanto, en la actualidad, los distribuidores en España solo tienen relación con la actividad de distribución propiamente dicha, no pudiendo realizar ninguna actividad relacionada con actividades liberalizadas (generación o comercialización).

A pesar de que existen muchas distribuidoras en España, este mercado está formado por un oligopolio con 5 distribuidoras principales (Endesa, Iberdrola, Gas Natural Fenosa, HC Energía y EON España) que controlan el 90% del mercado, dejando el otro 10% a otras más de 300 pequeñas distribuidoras con menos de 100.000 clientes.

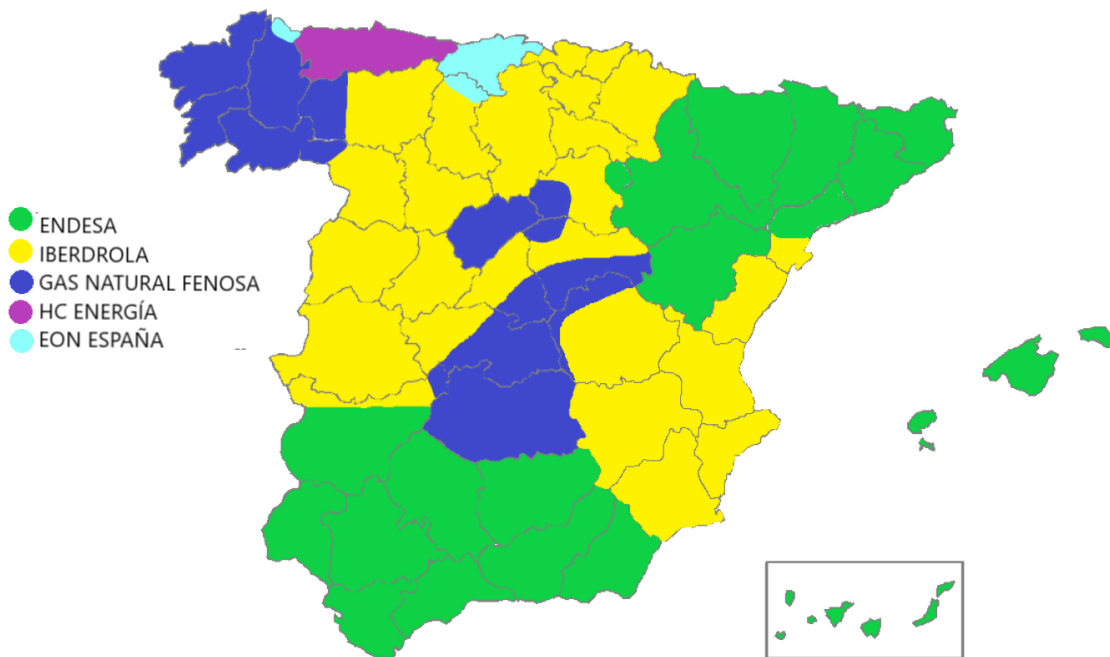


Figura 5. Mapa de la zona de distribución de las principales distribuidoras españolas.

Las funciones del distribuidor según la normativa actual son las siguientes:

- Construir, mantener y operar las redes eléctricas que unen el transporte con los centros de consumo, incluyendo la reparación de averías y la realización de mejoras.
- Ampliar las instalaciones para atender a nuevas demandas del suministro eléctrico y gestionar las solicitudes de conexión de nuevos consumidores de la red eléctrica.
- Asegurar un nivel adecuado de calidad de servicio
- Responder en igualdad a todas las solicitudes de acceso y conexión
- Medir el consumo de electricidad de los usuarios para la facturación
- Aplicar a los consumidores los peajes o tarifas necesarios
- Mantener actualizada la base de datos de puntos de suministro
- Informar a los agentes y clientes involucrados
- Presentar anualmente sus planes de inversión a las Comunidades Autónomas.

2.3.1 Estructura del Sistema de Distribución

En España, tienen consideración de instalaciones de distribución eléctrica las líneas de tensión inferior a 220 kV que no se consideren parte de la red transporte y todos aquellos otros elementos (comunicaciones, protecciones, control, etc.) necesarios para realizar la actividad de forma adecuada y en los términos de calidad que exige la regulación.

La distribución de electricidad en España implica varias etapas desde que la electricidad sale de la red de transporte de alta tensión hasta que llega a los consumidores finales:

1. De Red de Transporte a Red de Distribución: La electricidad se transfiere desde la red de alta tensión a la red de distribución a través de subestaciones que transforman la alta tensión a niveles más bajos adecuados para la distribución.
2. Red de Media Tensión: La electricidad se distribuye a través de líneas de media tensión (generalmente entre 1 kV y 36 kV) hacia subestaciones y transformadores de distribución.
3. Red de Baja Tensión: Finalmente, la electricidad se distribuye a través de líneas de baja tensión (menos de 1 kV) hasta los puntos de consumo.

2.4 Comercialización de Energía

La comercialización es el paso final. Las comercializadoras son el intermediario entre el cliente final y el resto de los agentes del mercado. Estas compran la energía al Operador del Mercado Ibérico Español y la venden al consumidor final. Este proceso se lleva a cabo en un mercado liberalizado, donde diversas empresas compiten por ofrecer electricidad a hogares y empresas bajo distintas condiciones y precios.

Estas comercializadoras deberán cumplir con las siguientes obligaciones:

- Adquirir la energía necesaria para sus operaciones y realizar los pagos correspondientes.
- Contratar y pagar los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución a las empresas distribuidoras según los datos de facturación, independientemente de su cobro al consumidor final, y abonar los precios y cargos reglamentarios.
- Formalizar contratos de suministro con los consumidores según la normativa vigente y facturar de acuerdo con las condiciones de los contratos.
- Implementar programas de gestión de la demanda aprobados por la Administración.
- Procurar un uso racional de la energía
- Tomar medidas de protección del consumidor conforme a la normativa establecida.
- Disponer de un servicio de atención a quejas, reclamaciones e incidencias relacionadas con el servicio, proporcionando una dirección postal, un servicio telefónico gratuito, un fax y/o una dirección de correo electrónico.
- Preservar la confidencialidad de la información comercialmente sensible obtenida durante sus actividades, salvo obligación de divulgación a las Administraciones Públicas.
- Informar a los clientes sobre el origen de la energía suministrada, los impactos ambientales de las diferentes fuentes de energía y su proporción de uso.
- Cumplir los plazos establecidos reglamentariamente para las acciones relacionadas con los cambios de suministrador.

Etiquetado de la Electricidad

Según la normativa europea, las empresas comercializadoras deben informar a sus clientes sobre el origen de la energía suministrada, los impactos ambientales de las diferentes fuentes de energía y la proporción de cada una utilizada.

También está establecido que la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) es la encargada de aprobar un formato de etiquetado estándar que las empresas comercializadoras deben utilizar en sus facturas para reflejar la información sobre el origen de la energía. Este etiquetado también incluye el método utilizado para calcular la contribución de cada fuente energética primaria en el conjunto de la energía eléctrica suministrada y su impacto ambiental asociado.

El método de cálculo, detallado en la Circular 1/2008, se resume en los siguientes pasos:

1. Calcular el mix nacional a partir de la información aportada por el Operador del Sistema. Se usa la información correspondiente al año natural anterior al 1 de abril de cada año.
2. Del mix nacional, se restan las garantías de origen emitidas a favor de la producción procedente de fuentes de energía renovables o de cogeneración de alta eficiencia.
3. Para cada comercializadora, se añaden las garantías de origen transferidas a su favor, partiendo del mix nacional.

Como resultado, cada empresa comercializadora debe informar del origen de su electricidad calculado a partir del mix nacional, al que se suman las garantías de origen adquiridas. Este método implica que la forma de mejorar el mix es adquiriendo garantías de origen de energía renovable o de cogeneración de alta eficiencia.

El formato del etiquetado en las facturas está estandarizado y se presenta en forma de figuras y tablas que reflejan el mix medio del sector y el mix específico de la comercializadora que realiza el suministro. Publicado en el BOE el diciembre de 2021 y con vigor desde abril de 2022, el etiquetado tiene la siguiente apariencia:

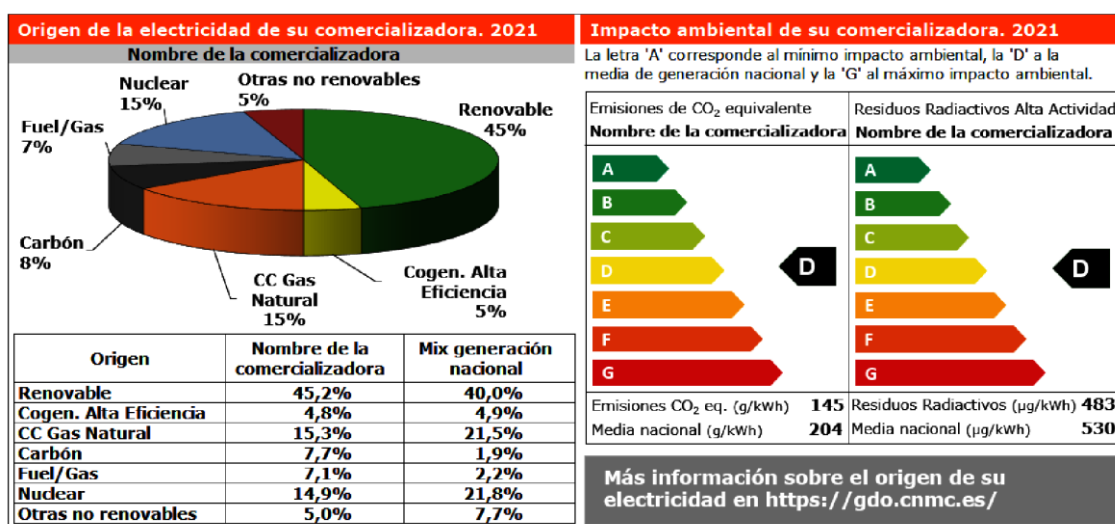


Figura 6. Formato de etiquetado de la electricidad. Fuente: BOE.

Hay 2 tipos principales de comercializadoras en el mercado español: las comercializadoras de referencia y las comercializadoras libres.

2.4.1 Comercializadoras de Referencia

Las comercializadoras de referencia son aquellas designadas por el gobierno para ofrecer tarifas reguladas y servicios específicos destinados a proteger a los consumidores vulnerables. Estas comercializadoras tienen la obligación de ofrecer el Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC) y el Bono Social.

El PVPC es una tarifa regulada por el gobierno que se aplica a consumidores con una potencia contratada menor o igual a 10 kW.

En cambio, el Bono Social es un descuento en la factura eléctrica destinado a proteger a los consumidores vulnerables. Está disponible únicamente para aquellos que tienen contratada la tarifa PVPC con una comercializadora de referencia.

Los beneficios de contratar una comercializadora de referencia son los siguientes:

- **Protección al consumidor:** se aseguran de que los consumidores vulnerables tengan acceso a tarifas asequibles y justas, protegidos contra aumentos excesivos del precio.
- **Acceso a información y transparencia:** proveen información clara y transparente sobre las tarifas y el consumo, lo que facilita a los consumidores tomar decisiones informadas.
- **Estabilidad de precios:** Aunque el PVPC varía cada hora, en general, refleja fielmente los precios del mercado mayorista, evitando márgenes comerciales elevados que pueden existir en el mercado libre.

2.4.2 Comercializadoras Libres

Las comercializadoras libres ofrecen diversas modalidades de tarifas, adaptadas a las necesidades y preferencias de los consumidores. Esta diversidad y competencia en el mercado contribuyen a un sistema energético más eficiente, flexible y orientado al consumidor. Entre estas modalidades encontramos:

- **Tarifas fijas:** estas ofrecen un precio fijo por kilovatio hora durante un periodo de tiempo determinado, generalmente entre uno y tres años. De esta forma, los consumidores saben exactamente cuánto pagarán por kWh durante la duración del contrato, lo que facilita la planificación y gestión del presupuesto.

Una de sus ventajas principales es la protección contra las variaciones en los precios del mercado mayorista, característica la cual puede llegar a ser contraproducente durante los períodos de precios más bajos.

- **Tarifas indexadas:** en este tipo de tarifas, el coste del kWh se ajusta según los precios del mercado mayorista de electricidad, más un margen fijo acordado con la comercializadora. Esta refleja directamente las fluctuaciones del mercado, proporcionando una imagen clara de cómo los cambios en la oferta y demanda afectan a los precios.

Las principales ventajas que ofrece son el potencial ahorro del que se pueden beneficiar los consumidores cuando los precios del mercado disminuyen y es un tipo de tarifa clave para todos aquellos consumidores que pueden ajustar su consumo en función de las variaciones del precio.

Por otro lado, este tipo de tarifas hacen que la gestión del presupuesto mensual pueda llegar a ser complicada debido a la incertidumbre que genera la dependencia de la fluctuación del mercado

- Tarifas planas: en este caso los consumidores pagan una cantidad fija cada mes, la cual no depende de su consumo exacto, siempre que no exceda el límite de consumo establecido. El precio se suele basar en una estimación del consumo anual dividido en pagos mensuales.

De la misma manera que en el primer tipo de tarifas, esta facilita el cálculo de presupuestos, ya que se conoce la cantidad a pagar cada mes. En cambio, la desventaja principal son los límites de consumo, ya que si se sobrepasan pueden aplicarse cargos adicionales no contemplados.

- Tarifas verdes: estas garantizan que la electricidad suministrada proviene de fuentes 100% renovables, como podrían ser la generación eólica, solar o bien hidráulica. Están dirigidas a consumidores comprometidos con la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono.

Aunque en ciertos casos las tarifas verdes pueden ser ligeramente más caras por razones ligadas a la certificación e inversión en energías renovables, o bien por razones de limitación geográficas, es una propuesta atractiva para consumidores que desean promover una imagen de responsabilidad ambiental.

2.5 Intercambios Intracomunitarios e Internacionales

El intercambio intracomunitario e internacional de energía eléctrica en España es una parte vital del sistema energético nacional, permitiendo la optimización del uso de recursos, el aumento de la seguridad del suministro y la integración de energías renovables.

Las interconexiones eléctricas son infraestructuras críticas que permiten el flujo de electricidad entre diferentes países o regiones, facilitando la integración de mercados eléctricos y mejorando la seguridad del suministro. A continuación, se detallan las interconexiones eléctricas de España con sus países vecinos, los beneficios y desafíos asociados, así como las estrategias para mejorar estas interconexiones.

2.5.1 Interconexiones Eléctricas de España

El intercambio de energía eléctrica de España con otros países se limita principalmente a sus vecinos directos: Portugal, Francia, Andorra y Marruecos. Esto se debe a varios factores clave:

- Proximidad geográfica e infraestructura: es un factor clave para el intercambio de electricidad. Las interconexiones eléctricas entre España y sus vecinos más cercanos facilitan un flujo constante de energía.
- Integración en el mercado eléctrico europeo: España, junto con Portugal y Francia, forma parte del mercado eléctrico europeo. Esta integración es crucial porque permite una mayor eficiencia en la gestión de la electricidad a través de fronteras,

facilita el comercio de energía y ayuda a estabilizar los precios. Además, la capacidad de intercambiar energía es vital para manejar la variabilidad de las energías renovables, como la eólica y la solar, que son abundantes en España.

- Limitaciones técnicas y políticas: A pesar de los avances, la capacidad de interconexión de España sigue siendo una de las más bajas de Europa en comparación con su capacidad total instalada. Esto limita su capacidad para expandir el comercio de electricidad con otros países fuera de sus vecinos inmediatos. Las montañas Pirineos han representado un obstáculo físico significativo para aumentar la capacidad de interconexión con Francia.

A corto y medio plazo, no se prevé que España expanda sus interconexiones eléctricas más allá de los países mencionados. Esto se debe a que los desafíos técnicos de conectar con otros países europeos más lejanos son significativos, y la infraestructura existente aún no es suficiente para superar estos retos. Sin embargo, con el impulso de la Unión Europea, se están realizando esfuerzos para mejorar y expandir las interconexiones con Francia, lo que a su vez podría abrir oportunidades para una mayor integración con otros países europeos.

Interconexión con Francia

La interconexión entre España y Francia es la más importante debido a la cantidad de líneas y la capacidad de intercambio que posee. Estas interconexiones permiten una transferencia bidireccional de electricidad, favoreciendo la estabilidad y la integración del mercado eléctrico europeo.

La capacidad de intercambio con Francia ha aumentado en los últimos años gracias a proyectos de ampliación y mejora de infraestructuras. Aun así, se busca seguir incrementándola para cumplir con los objetivos europeos de interconexión.

Hoy en día el intercambio con este país vecino consta de 2 tipos principales de conexiones:

- Líneas de Alta Tensión: Varias líneas de alta tensión cruzan los Pirineos, conectando las redes eléctricas de ambos países. Estas líneas permiten el intercambio de grandes volúmenes de electricidad. Una de las más importantes es la línea de Baixas-Santa Llogaia, una línea de corriente continua de alta tensión (HVDC) que atraviesa los Pirineos orientales.
- Interconexión Submarina: Una de las interconexiones más recientes y significativas es la línea submarina a través del Golfo de Vizcaya. Este proyecto ha incrementado la capacidad de intercambio entre España y Francia, reduciendo los cuellos de botella y mejorando la seguridad del suministro.

Interconexión con Portugal

La integración eléctrica con Portugal es muy fuerte, en parte debido al Mercado Ibérico de Electricidad (MIBEL), que abarca ambos países y facilita un mercado común de electricidad. MIBEL permite una gestión conjunta de la electricidad, facilitando el intercambio fluido y eficiente entre España y Portugal.

Las interconexiones eléctricas entre España y Portugal incluyen tanto líneas aéreas como subterráneas:

- Líneas Aéreas: la mayoría de las interconexiones entre España y Portugal son líneas aéreas de alta tensión, que se extienden por largas distancias y permiten un transporte eficiente de electricidad a través de torres de transmisión.
- Líneas Subterráneas: también existen interconexiones subterráneas, aunque son menos comunes y se utilizan en áreas específicas donde las condiciones geográficas o urbanas lo requieren.

La cooperación entre los dos países es clave. España y Portugal cooperan estrechamente en la gestión y planificación de sus infraestructuras eléctricas, buscando optimizar los recursos y garantizar la estabilidad del suministro. Para ello, múltiples líneas de alta tensión conectan las redes eléctricas de ambos países, permitiendo un flujo constante de electricidad en ambas direcciones.

Intercambio con Marruecos

La interconexión con Marruecos permite el intercambio de electricidad entre Europa y el norte de África, abriendo nuevas oportunidades para el comercio de energía. Según los datos registrados en 2023, el saldo de los intercambios programados a través de la interconexión con Marruecos es mayoritariamente de tipo exportador, poniendo así a España como suministrador de energía para el país norafricano.

La principal vía de intercambio energético es la línea submarina que cruza el Estrecho de Gibraltar. Es de corriente alterna (CA) y consiste en dos cables submarinos que cruzan el Estrecho

Aunque la capacidad de intercambio con Marruecos es menor en comparación con Francia y Portugal, esta interconexión es estratégica para la diversificación de fuentes de suministro y la integración de mercados regionales.

Según los datos registrados en 2023, el saldo de los intercambios programados a través de la interconexión con Marruecos es de tipo exportador, poniendo así a España como suministrador de energía para el país norafricano.

Intercambio con Andorra

Aunque de menor capacidad y relevancia, también existen interconexiones eléctricas con Andorra, facilitando el intercambio y la cooperación energética con este pequeño país.

La interconexión eléctrica entre España y Andorra es una línea aérea de alta tensión. Esta línea conecta la subestación de Adrall en España con la subestación de Encamp en Andorra. La capacidad de esta interconexión es menor en comparación con otras conexiones internacionales, debido a las bajas necesidades de consumo de Andorra.

Resumen intercambios Internacionales 2023

	Importación (GWh)	Exportación (GWh)	Saldo (GWh)
Francia	7.519	9.399	-1880
Portugal	2.420	12.334	-9916
Andorra	0	240	-240
Marruecos	396	2.250	-1854
Total	10.334	24.224	-13.890

Tabla 4. Resumen de los intercambios internacionales de energía eléctrica.

2.5.2 Beneficios del Intercambio Eléctrico

Los intercambios eléctricos entre países están muy presentes en las transacciones hoy en día debido a que proporcionan características beneficiosas como pueden ser:

- Seguridad del Suministro: facilitan la estabilidad y continuidad del suministro eléctrico, permitiendo el intercambio de electricidad en casos de alta demanda o emergencias.
- Integración de energías renovables: permiten exportar excedentes de energía renovable, como la eólica y la solar, y equilibrar la red importando electricidad cuando la producción local es insuficiente.
- Optimización de recursos: mejoran la eficiencia económica al permitir el acceso a electricidad a precios competitivos, optimizando el uso de recursos energéticos disponibles.
- Reducción de emisiones: facilitan la descarbonización al permitir la importación de electricidad producida a partir de fuentes renovables en otros países.

2.5.3 Desafíos de la Interconexión Eléctrica

Aunque las interconexiones eléctricas entre España y los demás países ofrecen numerosos beneficios, también enfrentan una serie de desafíos que deben ser abordados para maximizar su eficiencia y efectividad.

Capacidad insuficiente en Horas Pico

Uno de los principales desafíos es la insuficiente capacidad de interconexión durante los picos de demanda. Aunque se han realizado mejoras significativas en la capacidad de intercambio, aún pueden surgir cuellos de botella en momentos de alta demanda.

La demanda de electricidad puede variar significativamente a lo largo del día y el año. Durante los picos de demanda, como en invierno o durante olas de calor, la capacidad de las interconexiones puede ser insuficiente para satisfacer todas las necesidades.

Esta incapacidad de intercambiar energía crea cuellos de botella que limitan el flujo de electricidad, impidiendo el aprovechamiento óptimo de la capacidad de generación disponible en ambos lados de la frontera.

Inversión y Financiación

La creación y mejora de las interconexiones eléctricas requieren inversiones significativas y una planificación a largo plazo. Los altos costes de los proyectos de interconexión, especialmente aquellos que involucran líneas submarinas o que atraviesan terrenos complejos como los Pirineos, implican altos costes de construcción y mantenimiento.

Asegurar la financiación necesaria para estos proyectos puede ser un desafío. Requiere la colaboración de gobiernos, empresas privadas y entidades financieras, así como el acceso a fondos europeos destinados a mejorar la infraestructura energética.

Desafíos técnicos

La gestión y operación de interconexiones transfronterizas presentan una serie de desafíos técnicos que deben ser abordados para garantizar la eficiencia y estabilidad del sistema.

- Sincronización de redes: las redes eléctricas de diferentes países pueden operar a distintas frecuencias y bajo diferentes regulaciones, lo que complica la sincronización y el flujo estable de electricidad.
- Gestión de flujos: es necesario gestionar de manera eficiente los flujos de electricidad para evitar sobrecargas y garantizar la estabilidad del suministro en ambos países.
- Tecnología avanzada: a implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas de control en tiempo real y almacenamiento de energía, es esencial para superar estos desafíos técnicos. Para ello, se necesitan técnicos cualificados que lleven a cabo las operaciones de manera correcta.

Desafíos de Impacto Ambiental y Social

La construcción de nuevas interconexiones puede tener un impacto significativo en el medio ambiente, especialmente en áreas sensibles como los Pirineos o el Golfo de Vizcaya. Es crucial minimizar este impacto mediante evaluaciones ambientales rigurosas y la implementación de medidas de mitigación.

La oposición local a la construcción de nuevas infraestructuras puede retrasar o incluso bloquear proyectos de interconexión. Es importante involucrar a las comunidades locales y considerar sus preocupaciones desde las primeras etapas de planificación.

3. Modelos de Mercado Eléctrico

3.1 Mercado Monopolístico

En un mercado monopolístico de electricidad, una única empresa, ya sea pública o privada, controla toda la cadena de valor del sector eléctrico. Esta empresa posee las plantas generadoras, diseña el plan de expansión de la generación de energía, posee y opera la red de transmisión y distribución, factura a los clientes minoristas, y gestiona la operación de las plantas generadoras para evitar desequilibrios en la red, actuando también como operador del sistema. Este modelo ha predominado en el mercado eléctrico durante más de 100 años.

Los consumidores reciben una única factura que incluye todos los costos de la electricidad de manera consolidada donde las tarifas pueden basarse en criterios técnicos o políticos. Debido a la naturaleza monopolística, los precios se regulan para proteger a los consumidores. Estos precios pueden ser escogidos basándose en criterios más o menos técnicos, aunque suelen permanecer criterios políticos y de protección al consumidor.

El modelo 2 representa una mejora respecto al modelo 1, ya que los contratos a largo plazo se adjudican generalmente mediante una subasta pública, en la cual los generadores que ofrecen los precios más bajos resultan ganadores. Esto permite descentralizar las decisiones de inversión e introducir criterios económicos en la toma de decisiones para la generación de energía.

3.2 Mercado Monopsonístico

El este segundo modelo persiste en todos los aspectos anteriores excepto en la generación de energía. Se conoce como modelo de comprador único porque la gran empresa o entidad que tiene el monopolio legal es el único comprador de energía eléctrica en el mercado. Esta empresa monopolista mantiene un control total sobre todo el proceso, y los generadores, al tener solo un comprador posible, dependen completamente de ella.

La competencia está tan restringida que el modelo sólo funciona con contratos de largo plazo. Esto se debe a que los generadores privados, sabiendo que se encuentran en un monopsonio (mal llamado monopolio de demanda) evitan hacer cualquier tipo de inversión a no ser que se les garantice una estabilidad en el precio durante el periodo de inversión.

El modelo 3.2 representa una mejora respecto al modelo 1, ya que los contratos a largo plazo se adjudican generalmente mediante una subasta pública, en la cual los generadores que ofrecen los precios más bajos resultan ganadores. Esto permite descentralizar las decisiones de inversión e introducir criterios económicos en la toma de decisiones para la generación de energía.

El modelo 3.2 presenta importantes limitaciones. Los precios de los contratos a largo plazo se transfieren completamente a las tarifas de los consumidores, quienes no pueden negociar directamente con los generadores ni elegir entre diferentes comercializadoras que compitan por ofrecer mejores precios. Los errores en la formación de estos contratos afectan a todos los consumidores por igual. Además, el gran comprador único no tiene incentivos para seleccionar el mejor contrato para sus clientes debido a problemas de agencia. Sin compradores múltiples, no se crea un mercado competitivo y, por lo tanto, no hay inversión privada en la oferta, a menos que el comprador único garantice las compras y sus precios.

3.3 Competencia Mayorista

En el modelo 3.3, se desintegra el monopolio legal, creando un mercado mayorista competitivo y un mercado minorista parcialmente abierto, aunque las distribuidoras aún operan como monopolios regionales. En el mercado mayorista, el operador del sistema es independiente de cualquier empresa pública y garantiza acceso igualitario a la red para todos los participantes. La diversificación de la demanda permite la participación de distribuidores regionales, grandes usuarios y comercializadoras, evitando así la concentración de la demanda en un único ente y eliminando los conflictos de interés. Esto facilita la inversión privada en generación de energía sin la necesidad de garantías de contratos a largo plazo del monopolio, permitiendo la formación de un verdadero mercado mayorista.

Sin embargo, el mercado minorista todavía presenta restricciones. Las comercializadoras no pueden atender a pequeños clientes, y las distribuidoras, operando bajo monopolios naturales, también actúan como comercializadoras para estos pequeños usuarios. Los precios que las distribuidoras pueden cobrar a los pequeños consumidores están regulados para protegerlos del monopolio. Los demandantes de energía en este modelo pueden comprar a través de contratos o al precio spot. Las distribuidoras, debido a sus precios de venta regulados y relativamente fijos, prefieren los contratos, mientras que los grandes usuarios tienen la opción de elegir entre ambas modalidades.

A pesar de sus mejoras, el modelo 3.3 enfrenta varios problemas. Definir quién es un pequeño o gran consumidor puede ser arbitrario y complejo, excluyendo a muchos del mercado mayorista de manera injusta. Además, los distribuidores con monopolios regionales pueden no tener incentivos para obtener los mejores precios para sus clientes, creando un problema de principal-agente. Las autoridades deben vigilar constantemente los contratos de las distribuidoras, lo que puede ser costoso y burocrático.

3.4 Competencia Mayorista y Minorista

En el último modelo, cualquier consumidor puede seleccionar directamente al generador de energía que prefiera, eliminando las restricciones para acceder al mercado mayorista y resolviendo los problemas de frontera del modelo 3.3. Dado que los costos de transacción son elevados para los pequeños usuarios, estos suelen negociar a través de intermediarios (comercializadores). A pesar de esto, los consumidores pueden elegir su comercializador sin enfrentar monopolios legales, excepto en el ámbito del transporte de electricidad.

Este modelo amplía significativamente el número de demandantes en el mercado mayorista, reduciendo la dependencia de unos pocos compradores, y elimina los problemas de agencia presentes en el modelo 3.3. Las comercializadoras deben ofrecer buenos contratos para retener a sus clientes, lo que fomenta una mayor competencia y liquidez en el mercado mayorista. Esto minimiza los riesgos para los generadores privados, eliminando la necesidad de contratos a largo plazo para cubrir los costos de generación. En resumen, este modelo promueve una mayor competencia y eficiencia tanto en el mercado mayorista como en el minorista.

4. Mercado Español

4.1 OMIE

Cuando hablamos de OMIE (NEMO según la terminología europea) hablamos de la única entidad responsable de la gestión del mercado mayorista de electricidad en la Península Ibérica, que incluye España y Portugal. Su principal función es organizar y gestionar el mercado mayorista de electricidad en la Península Ibérica. Este desarrolla funciones de:

- Organización de las Subastas de Electricidad, tanto para el mercado diario como para el mercado intradiario.
- Determinación del precio de la electricidad.
- Gestión y validación de restricciones técnicas.
- Gestión de interconexiones internacionales

OMIE forma parte del Mercado Ibérico de Electricidad (MIBEL), una iniciativa conjunta de España y Portugal para integrar sus mercados eléctricos. MIBEL facilita una mayor competencia y eficiencia en el sector eléctrico ibérico. Es una entidad regulada que opera bajo la supervisión de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) en España y de la Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) en Portugal. De esta manera, está sujeta a estrictas normas de transparencia y competencia para asegurar que el mercado funcione de manera justa y eficiente.

La plataforma de subastas proporcionada por OMIE es en línea, línea donde los agentes del mercado pueden participar en los distintos tipos de subastas. La plataforma ofrece datos detallados sobre las ofertas, demandas y precios resultantes, garantizando la transparencia del proceso.

OMIE también publica informes periódicos sobre el funcionamiento del mercado, análisis de precios y tendencias, así como datos históricos y previsiones. Estos informes están disponibles para el público en general, proporcionando información valiosa para analistas, investigadores y otros interesados en el mercado eléctrico.

4.2 Mercado Mayorista

El mercado mayorista es el núcleo donde se determina el precio de la electricidad. Está gestionado por OMIE, que organiza subastas diarias e intradiarias.

Gestión del Mercado Diario

El mercado diario es el principal mercado de electricidad a corto plazo. En este mercado, se determina el precio y la cantidad de electricidad para cada hora del día siguiente. Para ello, es necesario que todos los generadores y comercializadoras del mercado ibérico presten su participación de manera obligatoria para asegurarse que se comercialice la electricidad de manera transparente y eficiente.

El precio se determina mediante subasta, la cual OMIE organiza cada día y los generadores y comercializadoras presentan sus ofertas de venta y compra de electricidad para cada hora del día siguiente. El precio de la electricidad para cada hora se determina en función de la oferta y la demanda. El punto de equilibrio es donde la cantidad ofrecida por los generadores coincide con la cantidad demandada por las comercializadoras.

El precio que se establece es el precio de la última unidad de electricidad necesaria para equilibrar la oferta y la demanda. Todos los generadores cuyo precio de oferta sea inferior o igual al precio marginal venderán su electricidad a este precio, y todas las comercializadoras comprarán al precio marginal. Ver 5.1.

Cuando la capacidad de la interconexión entre dos zonas es suficiente para permitir el flujo de electricidad negociado en una determinada hora del día, el precio de la electricidad será el mismo en ambas zonas. Sin embargo, si la capacidad de la interconexión se ve totalmente ocupada en esa hora, el algoritmo de fijación de precios establecerá un precio diferente en cada zona. Este mecanismo de formación de precios se denomina acoplamiento de mercados.

Los resultados del mercado diario se basan en la libre negociación entre agentes, compradores y vendedores, representando la solución más eficiente desde un punto de vista económico. Sin embargo, debido a las particularidades de la electricidad, estos resultados también deben ser viables desde el punto de vista físico. Por esta razón, una vez obtenidos los resultados del mercado diario, se envían al Operador del Sistema para su validación técnica.

Este proceso, conocido como gestión de las restricciones técnicas del sistema, asegura que los resultados del mercado sean técnicamente factibles dentro de la red de transporte. El Operador del Sistema analiza las restricciones técnicas y, si es necesario, ajusta los resultados

del mercado diario para garantizar la viabilidad técnica. Este análisis puede introducir pequeñas variaciones en los resultados iniciales, resultando en un programa diario viable desde una perspectiva técnica.

Gestión del Mercado Intradía

El mercado intradía permite ajustar las posiciones de compra y venta de electricidad después de que se haya cerrado el mercado diario. Este mercado se divide en varias sesiones de subastas a lo largo del día, permitiendo a los participantes ajustar sus ofertas en respuesta a cambios en la demanda o la oferta.

Al igual que el mercado diario, una vez llevados a cabo estos mercados, los resultados son enviados a los operadores del sistema para que puedan programar sus procesos de balance.

4.3 Mercado Minorista

La principal diferencia entre el mercado mayorista de la electricidad y el minorista radica en los tipos de agentes de mercado que participan en las transacciones. En el mercado mayorista, los generadores venden la electricidad a las comercializadoras. Por otro lado, en el mercado minorista, las comercializadoras venden directamente la energía a los consumidores finales, que incluyen hogares, empresas y entidades públicas.

Los vendedores minoristas deben comprar la electricidad en el mercado mayorista para vender en el minorista. Este mercado está diseñado para ofrecer a los consumidores la posibilidad de elegir entre diversas ofertas y tarifas, promoviendo la competencia y facilitando el acceso a diferentes servicios y precios.

La factura de electricidad se compone de dos conceptos claramente diferenciados:

- Cose variable o consumo de electricidad: este incluye el coste de producción de la energía, el coste de la potencia instalada y otros costes complejos.
- Coste fijo o regulado: incluye los costes de mantenimiento de las redes de transporte y distribución, subsidios a las energías renovables, las anualidades del déficit eléctrico y otros costes menores. Representa aproximadamente la mitad de la factura para un cliente doméstico medio.

La competencia en el mercado minorista se concentra en el primer concepto (el coste de la energía), ya que los costes de acceso son establecidos por la administración. Una multitud de comercializadores de energía que buscan clientes en el mercado minorista ofreciéndoles el mejor precio posible o las mejores condiciones de precios por franjas horarias. Estas comercializadoras a su vez compran la energía en el mercado mayorista. Las comercializadoras, en claro contraste con las distribuidoras operando en régimen de monopolio, tienen el incentivo a proporcionar los mejores precios a sus clientes, ya que corren el riesgo de perderlos en favor de otra comercializadora más eficiente.

Otro aspecto que considerar son las ventas y transacciones. En el mercado mayorista, es necesario adherirse a las reglas establecidas por el operador OMIE. En cambio, en el mercado minorista, las reglas son más flexibles y, a menudo, son acordadas entre las partes interesadas.

La legislación actual del mercado minorista distingue entre dos tipos de clientes finales: los del mercado libre y los del mercado regulado. Ambos mercados ofrecen diferentes opciones y características para los consumidores, permitiendo que cada usuario elija la alternativa que mejor se adapte a sus necesidades y preferencias.

4.3.1 Mercado Libre

Todos los clientes pueden establecer contratos con cualquier comercializadora, las cuales ofrecen distintas cláusulas comerciales, como el precio del kWh, con o sin discriminación horaria, o basado en variaciones del mercado mayorista, condiciones de pago y otros servicios. Esto constituye el mercado libre. Algunas comercializadoras también ofrecen paquetes combinados de gas y electricidad, energía 100% renovable, y servicios adicionales como reparaciones eléctricas o seguros para electrodomésticos.

Estos contratos normalmente fijan una tarifa plana para pagar la electricidad todos los meses del año al mismo precio y evitar así fuertes subidas o bajadas, pero normalmente se suele pagar el coste del kWh a un precio mucho más caro que en el mercado regulado. También existen una gran variedad de otras opciones donde las tarifas y servicios pueden variar según tus necesidades. En este mercado es donde trabajan las comercializadoras libres explicadas con anterioridad.

En este mercado, no existen limitaciones de potencia contratada.

4.3.2 Mercado Regulado

El mercado regulado solo ofrece la tarifa PVPC (precio voluntario al pequeño consumidor), anteriormente llamada Tarifa de Último Recurso (TUR), para aquellos clientes que no excedan los 10kW de potencia contratada.

Esta tarifa cobra el kWh de electricidad al precio establecido por el mercado mayorista de electricidad para cada hora y día del año, resultando en precios que varían cada hora y día, con 24 precios distintos cada día dependiendo de la demanda. En invierno y verano, los precios suelen ser más altos que en primavera y otoño, lo que provoca fluctuaciones significativas. Los consumidores pueden ahorrar concentrando su consumo en las horas de menor demanda, conocidas como franjas valle, y evitando el consumo en las horas de mayor demanda, llamadas franjas punta. Cada hora se calcula un precio distinto utilizando varios factores, y los clientes pueden consultarlos en la página web del Operador del Mercado Ibérico Español y en diversos medios de comunicación que los publican. Si el consumidor no dispone de un contador con discriminación horaria que permita conocer su consumo por horas, se aplicará un perfil horario publicado por Red Eléctrica de España a la energía medida por su contador. Estos clientes solo pueden contratar el servicio con una comercializadora de referencia designada por la Comisión Nacional del Mercado de Valores. (CNMV).

Por otra parte, no existe ningún requisito de permanencia, por lo que los consumidores pueden cambiar a otro proveedor en cualquier momento, sin penalizaciones. Es el único tipo compatible con el bono social eléctrico para quienes necesitan una ayuda en la factura de la luz, con un descuento del 66 % al 80 % para aquellos consumidores considerados vulnerables.

5. Formación del Precio de la Electricidad en España

5.1 Formación de Precios en el Mercado Mayorista Diario de Electricidad

El mercado diario español opera en conjunto con los mercados de Portugal y Francia y está gestionado por OMIE. El mercado diario se realiza el día previo a la entrega de la energía, donde compradores y vendedores negocian energía para cada una de las horas del día siguiente.

Los vendedores, los cuales suelen ser los generadores y comercializadores que actúan como importadores, presentan ofertas de venta y los compradores, que suelen ser comercializadores o consumidores finales que actúan directamente en el mercado mayorista, presentan sus ofertas de compra a OMIE para cada hora del día siguiente. A partir de estas ofertas y demandas, OMIE construye las curvas de precios para cada hora del día siguiente.

Oferta

Después de que los vendedores han presentado sus ofertas para cada hora del día siguiente, OMIE las agrupa y las ordena de menor a mayor precio, formando así la curva de oferta del mercado para cada hora. Esta curva muestra los diferentes tramos que corresponden a ofertas de centrales con la misma tecnología. Es importante destacar que las ofertas de los vendedores reflejan sus costes de oportunidad y no sus costes totales o variables.

Por otro lado, las ofertas de los generadores en el mercado diario deben cumplir con los principios establecidos por la Ley de Defensa de la Competencia. Por esta razón, tanto la disponibilidad de las unidades de generación como los precios ofertados están sujetos a la supervisión de las instituciones reguladoras del mercado.

En España, la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) es la encargada de asegurar que los participantes en los mercados energéticos actúen conforme a los principios de libre competencia. Si la CNMC detecta prácticas restrictivas, tiene la autoridad para iniciar expedientes e imponer sanciones.

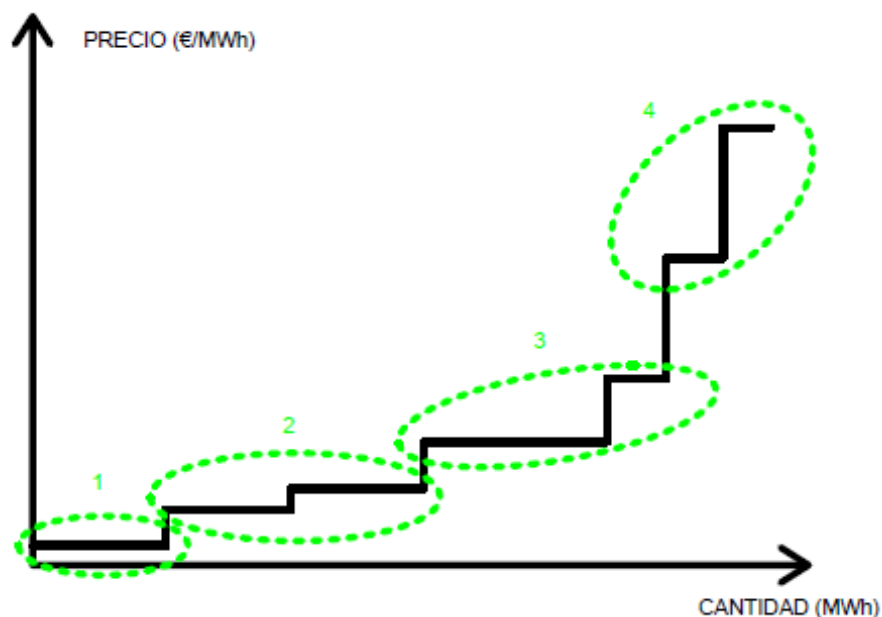


Figura 7. Curva de la oferta de electricidad del mercado.

Podemos observar tramos con diferentes inclinaciones agrupadas. El grupo 1 refleja las ofertas de las centrales nucleares, eólicas e hidráulicas. El segundo grupo agrupa ofertas de centrales de carbón y ciclos combinados competitivos, mientras que en el tercero nos encontramos con centrales y ciclos combinados ya menos competitivos que los anteriores. Por último, en el cuarto grupo podemos encontrar centrales de punta como puede ser el fueloil y otros tipos de centrales obsoletas.

Demanda

Los consumidores finales suelen clasificarse según la cantidad de energía que consumen y el propósito de su uso. Se distinguen entre grandes consumidores industriales, consumidores de tamaño medio en sectores industriales y de servicios, y, finalmente, pequeños consumidores conectados a las redes de baja tensión, como pueden ser hogares.

La participación de los distintos tipos de consumidores en el mercado depende de la modalidad de suministro a la que estén acogidos, ya sea "suministro de referencia" o "mercado liberalizado".

- Bajo la modalidad de suministro de referencia (actualmente accesible solo para potencias contratadas iguales o menores a 10 kW), los consumidores participan indirectamente en el mercado a través del comercializador de referencia que hayan elegido. Este agente es responsable de estimar la demanda de sus consumidores y, en consecuencia, realizar en el mercado las ofertas de compra de energía necesarias para satisfacer su suministro.
- La mayoría de los consumidores en el mercado liberalizado participan indirectamente a través de su comercializador. Este comercializador ofrece precios (fijos o semifijos) adaptados a las preferencias de cada consumidor.

Al igual que la curva de oferta, la curva de demanda también presenta tramos en los que se agrupan indirectamente determinados tipos de consumidores.

- Al principio de la curva, donde el gráfico es plano, nos encontramos las ofertas de compra al máximo precio permitido de 3000 €/MWh. La razón de este procedimiento es garantizar que los consumidores recibirán la energía que demandan (es decir, asegurar que serán abastecidos). Sin embargo, esto no significa que pagarán el precio ofertado, sino el que resulte de la casación en el mercado.
- Por otro lado, en la curva de demanda hay consumidores reflejados en la parte descendiente. Esto es debido a que un grupo reducido de consumidores solo está dispuesto a consumir energía si su precio es menor o igual a un valor específico, que reflejan en sus ofertas al mercado. Estos consumidores tienen la capacidad de ajustar su consumo en función de los precios del mercado.

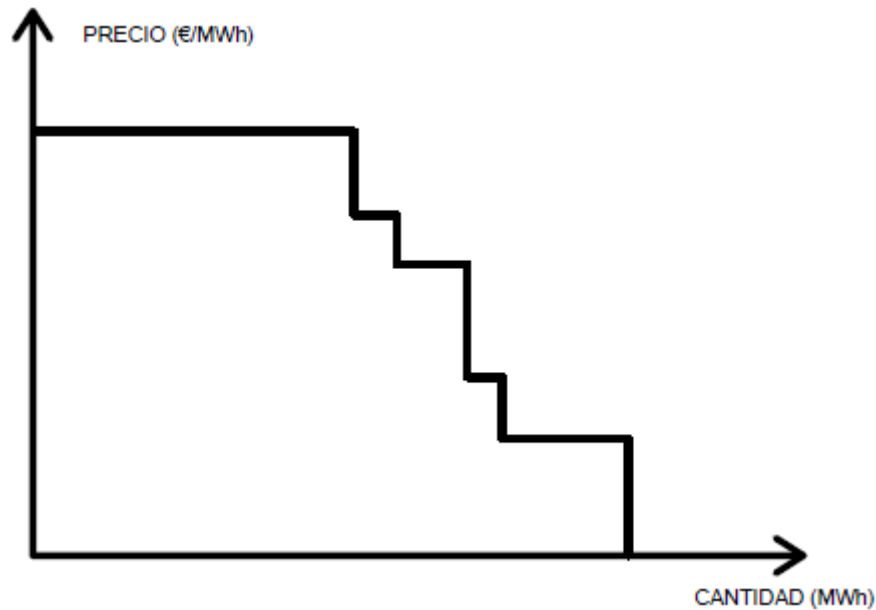


Figura 8. Curva de la demanda de electricidad del mercado.

Casación

Cuando se tienen toda la demanda agregada, desde la oferta más alta hasta la más baja y toda la oferta agregada, desde la oferta más baja hasta la más alta, se obtiene un gráfico como el que se muestra en la figura 9. El precio del mercado para la hora h del día D se establece en el punto de intersección entre la curva de oferta y la curva de demanda de electricidad para esa hora. Este precio determina las ofertas de compra y venta que se ejecutarán, es decir, la energía que se intercambiará al precio del mercado.

Este proceso se conoce como casación, ya que "casa" la demanda de las comercializadoras (o el precio dispuesto a pagar) con la oferta de los generadores (o el precio dispuesto a cobrar), estableciendo un precio de equilibrio o precio "casado" que será el mismo para todos los agentes.

El método de casación descrito anteriormente genera un único precio siempre que no se saturan las interconexiones internacionales entre los nodos conectados. Además, la casación determina los flujos de energía entre estos nodos.

En caso de que se produzca saturación en la interconexión en cualquiera de los sentidos, se aplica la separación de mercados, o market-splitting, que consiste en realizar dos casaciones independientes, una para cada nodo. Esto se hace considerando la cantidad máxima de energía que puede intercambiarse entre los sistemas, lo que da lugar a precios diferentes para cada nodo. Estas limitaciones han disminuido en los últimos años gracias a la inversión en conexiones internacionales para crear un mercado único de energía en Europa y a la homogeneización progresiva de los parques de generación.

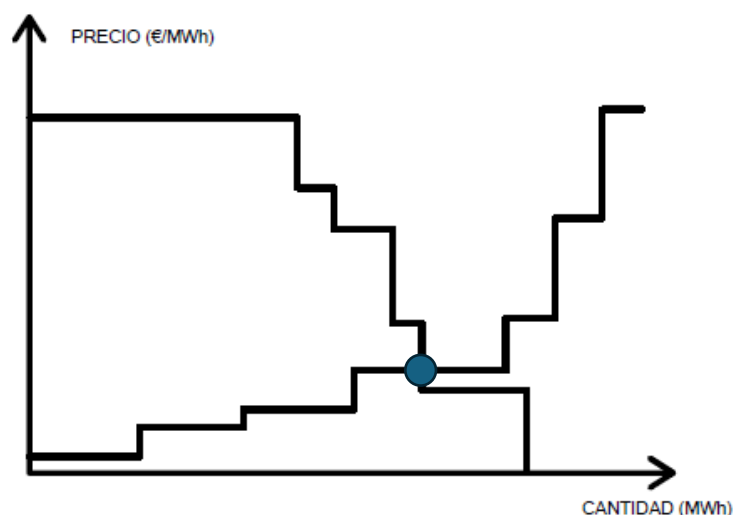


Figura 9. Ejemplo de determinación del precio en el mercado mayorista.

Dado que el mercado mayorista funciona bajo el principio de casación marginalista, solo las ofertas que tienen un precio igual o inferior al precio de casación serán aceptadas. Las ofertas que están a la derecha del punto de casación, es decir, con precios más altos que el precio marginal, no son seleccionadas para producir. Los generadores que quedan fuera del mercado no reciben ingresos, lo que puede afectar su rentabilidad, especialmente si ocurre con frecuencia.

De manera similar, las demandas que están dispuestas a pagar un precio inferior al precio de casación también se encuentran a la derecha del punto de casación. Estas demandas no se satisfacen, porque el precio que están dispuestas a pagar es menor que el precio marginal resultante del mercado. Esto podría forzarlos a recurrir a otras formas de adquisición de energía, como contratos bilaterales o mercados de ajuste, o simplemente no satisfacer esa demanda en ese momento.

5.2 Formación de Precios en los Mercados Mayoristas a Plazo de Electricidad

Los mercados a plazo de electricidad son un conjunto de mercados en los que se negocian contratos de compraventa de electricidad con plazos de entrega superiores a 24 horas.

En el medio y largo plazo, los agentes pueden negociar diferentes tipos de contratos con distintos periodos de entrega, como año, trimestre, mes o semana. En el MIBEL, las unidades de producción que hayan firmado contratos de venta a plazo con entrega física están exentas de presentar ofertas de venta en el mercado diario para la energía vinculada a esos contratos.

Los mercados a plazo desempeñan un papel fundamental en un mercado liberalizado desarrollado. Cuando son suficientemente profundos y líquidos, permiten a los compradores y vendedores gestionar sus riesgos, además de fomentar la competencia tanto en los mercados mayoristas como minoristas.

Un mercado se considera profundo cuando la oferta y demanda del producto es lo suficientemente amplia como para que los agentes no enfrenten limitaciones significativas en la cantidad que pueden comprar o vender.

Un mercado se considera líquido cuando un agente puede comprar o vender cantidades significativas sin alterar el precio del producto.

Estos mercados permiten la gestión de riesgos, ya que, si el comercializador asegura la energía que prevé necesitar por adelantado y a un precio fijo, puede basar sus ofertas en los costos reales en lugar de en estimaciones. Esto elimina el riesgo de pérdidas por errores en la estimación del precio de mercado.

Es importante destacar que contratar a plazo no necesariamente implica obtener precios más bajos que los que se conseguirían en el mercado diario. Más bien, se trata de fijar un precio con el que tanto comprador como vendedor se sientan cómodos para el futuro, estabilizando así los flujos de pagos y cobros. Es posible que, en el momento de la entrega, el precio del mercado diario sea superior al acordado en el contrato a plazo, beneficiando al comprador. Sin embargo, también podría suceder lo contrario.

5.3 Determinantes del Precio de la Electricidad

Una de las peculiaridades que caracterizan el sector de la energía eléctrica es la imposibilidad de almacenar este tipo de energía en grandes cantidades. Debido a ello, el sector eléctrico se encuentra con la necesidad de que la oferta cubra la demanda en todo momento. Así, es común que en los momentos de mayor demanda la electricidad se encarezca, ya que entran en operación tecnologías de generación más costosas.

De igual manera que otros mercados energéticos, el mercado eléctrico es volátil, por lo que es crucial comprender los factores que afectan a los precios. Además de la relevancia de las reglas, diversos factores pueden influir en los precios de la electricidad. Se identifican tres grupos principales: las materias primas empleadas en los procesos de generación, la situación económica y la meteorología y climatología.

Materias primas

Entre las tecnologías de generación de electricidad encontramos dos grandes grupos con características bien diferenciadas en cuanto a términos de estructura de costes. Por un lado, tenemos el grupo de las térmicas convencionales que usan fuentes energéticas como bien puede ser el gas, el carbón o el uranio, y, por otro lado, tenemos al grupo de las renovables, las cuales emplean fuentes naturales y gratuitas.

En el primer grupo, es importante destacar el impacto del precio del crudo. Aunque en el sistema eléctrico español la generación de electricidad a partir de derivados del petróleo ha disminuido drásticamente, sigue siendo un factor relevante tanto por su influencia directa como por su efecto en el precio de otros combustibles.

Tradicionalmente, se ha reconocido la existencia de una relación entre los precios del crudo y del gas. El comportamiento del mercado sugería que las fluctuaciones en el precio del crudo influían en los precios del gas natural. En cierta medida, el gas y el crudo pueden considerarse sustitutos de la electricidad, lo que implica que los precios de uno pueden afectar a los del otro. Dado que la electricidad se genera, entre otros, a partir de estas dos fuentes energéticas, un aumento en sus costes de obtención, y, por tanto, en sus precios, podría llevar a un incremento en el precio de la electricidad. Sin embargo, en el corto plazo, el principal sustituto del gas no es el crudo, sino el carbón.

El carbón, una fuente tradicional de generación eléctrica, ha ganado relevancia en el mix de generación en los últimos tiempos. Los expertos atribuyen esto a la revolución del shale gas, un tipo de gas natural que, en lugar de encontrarse almacenado en “bolsas” bajo tierra, se halla enquistado dentro de bloques de rocas en Estados Unidos. La disponibilidad de gas barato en ese país ha reducido el precio internacional del carbón, lo que ha revitalizado su uso en Europa. En el caso de España, las plantas de carbón, junto con las de gas natural, son las que en los últimos tiempos actúan como tecnologías marginales en el mercado, y, por lo tanto, suelen ser las que determinan el precio.

El uranio, utilizado en las centrales nucleares, tiene una influencia diferente en el precio de la electricidad. Las centrales nucleares tienen altos costos fijos y operan como carga base, lo que significa que están casi siempre en funcionamiento para proporcionar un suministro constante de energía. Dado que el costo del uranio representa una pequeña parte del costo total de generación nuclear, las fluctuaciones en su precio tienen un impacto limitado en el precio de la electricidad. Sin embargo, la estabilidad del suministro de uranio es importante para garantizar la operación continua de las plantas nucleares, que son cruciales para el mix energético de base en España.

Situación económica y normativa sobre derechos de emisión

La situación económica del país es otro factor clave. Los datos de las últimas dos décadas muestran una significativa correlación entre el crecimiento económico y el consumo eléctrico, tanto en épocas de crecimiento como en momentos de crisis. Por lo tanto, un incremento en la actividad industrial y, en consecuencia, una mejora en la economía conducirá a un aumento de la demanda energética y, por ende, del precio de la electricidad.

Otro factor que puede influir en la estructura de costos son los derechos de emisión (conocidos como European Union Allowances o EUAs). Las plantas generadoras de energía sujetas al régimen de comercio de derechos de emisión de la UE deben adquirir más EUAs en el mercado a medida que incrementan su producción, especialmente si utilizan combustibles fósiles, lo que eleva sus costos variables. Este aumento de costos puede ser trasladado al consumidor, haciendo que el precio de los derechos de emisión sea un factor decisivo en el precio de la electricidad: a mayor precio de estos activos financieros, mayores serán los costos para las plantas.

Estos permisos se negocian en diferentes mercados y su precio, en teoría, debería incentivar la reducción de emisiones de CO₂ y fomentar el uso de fuentes de energía con bajas emisiones de carbono. Sin embargo, los precios decrecientes de estos permisos no han generado el efecto esperado. Los cambios en el precio de los permisos de emisión pueden influir en qué tecnología se prioriza en el mix de producción.

Climatología y Meteorología

En el caso de las fuentes renovables, no hay costos asociados a la materia prima. Por este motivo y añadiendo la prioridad de despacho que tiene este tipo de electricidad, les otorga una influencia significativa en el mercado. De hecho, un período con alta producción de energía renovable (como eólica, hidráulica o solar) debería, en teoría, contribuir a una reducción en el precio de la electricidad.

Siguiendo en la misma línea, otros factores que afectan el precio de la electricidad son la variabilidad climática y meteorológica, que influyen de dos maneras: por un lado, afectan la demanda (verano frente a invierno), y por otro, dado el crecimiento de la capacidad instalada de energías renovables que dependen del clima (como la eólica, solar e hidráulica), los cambios en este impactan en la disponibilidad de los recursos necesarios para la producción de electricidad, como las precipitaciones, el viento y la radiación solar.

Sin ir más lejos, un primer ejemplo lo tenemos en mayo de 2024, donde el precio diario del mercado mayorista español hasta el 20 del mismo mes fue sólo 26,30 euros por megavatio hora (€/MWh). Durante horas solares (entre las 10:00 y las 19:00) el precio medio fue de sólo 3,91 €/MWh, mientras que, en el resto de las horas, el promedio se situó cerca de los 40 €/MWh. Una coyuntura que obedece a que la energía fotovoltaica lidera en lo que va de mayo el mix de generación con el 24% del total.

Por otro lado, las temperaturas son una variable que considerar por su posible impacto en la demanda. No solo pueden provocar picos de consumo en invierno debido a las bajas temperaturas, sino también en verano, cuando las temperaturas elevadas incrementan el uso de equipos de aire acondicionado en el país. Así, un invierno más cálido o un verano más templado podrían reducir la demanda energética, lo que podría llevar a una disminución en el precio de la electricidad.

Circunstancias geopolíticas

La circunstancia geopolítica más relevante en Europa que ha tenido un impacto directo en el precio de la luz es el conflicto entre Rusia y Ucrania. Rusia era uno de los mayores proveedores de gas de la Unión Europea, representando un 40 % del suministro total. Aunque Rusia solo representaba alrededor del 10 % del suministro de gas para España, siendo su cuarto mayor proveedor, la situación tuvo repercusiones en los precios energéticos.

Fuera de Europa, destaca el conflicto en el Sahara Occidental entre Marruecos y Argelia, el principal proveedor de gas de España. Debido a la postura del Gobierno español respecto al conflicto del Sahara Occidental, Argelia limitó el envío de gas a España, reduciendo su suministro a un solo gasoducto y cesando el envío a través del gasoducto Magreb-Europa. Aunque la cantidad de gas suministrado desde Argelia disminuyó, el país sigue siendo el principal proveedor de gas para España a través de esta vía. Este conflicto provocó un aumento del precio del gas aún más pronunciado que el causado por la guerra entre Rusia y Ucrania.

6. Blockchain

6.1 ¿Qué es? Introducción al Blockchain

Profundos cambios económicos y socioculturales, mejora en las comunicaciones, expansión del conocimiento e incluso cambios en la conducta de las personas han venido de la mano de Internet.

Este desarrollo hace que nos replanteemos la llamada cuarta revolución industrial, en la que se busca la eficiencia a través de un uso más consciente y cuidadoso de los recursos y la propiedad.

Dentro de este contexto, las bases de datos han sido un sistema clave y una necesidad en la sociedad con el objetivo de crear sistemas de almacenamiento eficaces. Hasta día de hoy, dichos sistemas estaban centralizados, tradicionalmente tenían un intermediario que las verificaba y controlaba y tenían grandes gastos de mantenimiento. Por ello, se plantean nuevas formas de almacenar la información como es la tecnología DLT.

DLT es la sigla de Distributed Ledger Technology (Tecnología de Libro Mayor Distribuido, en español). Se refiere a un sistema de base de datos que es distribuido entre numerosos participantes, protegida por criptografía y gestionado de manera descentralizada en múltiples nodos o dispositivos en una red. En lugar de un único administrador central, cada participante en la red tiene una copia del libro mayor, y las transacciones son validadas por consenso entre los nodos participantes.

El ejemplo más conocido de DLT es el Blockchain (cadena de bloques), que es la tecnología subyacente de criptomonedas como Bitcoin y Ethereum.

Atendiendo a su origen, en ocasiones esta tecnología se confunde con Blockchain. Sin embargo, a pesar de que podamos afirmar que Blockchain es una DLT, tan solo es una implementación de esta.

6.2 Funcionamiento y Características

El término Blockchain o cadena de bloques describe la forma en que esta tecnología almacena y organiza la información. Así como un libro se divide en capítulos, este "libro mayor" se compone de bloques. Cada bloque almacena información, comúnmente sobre transacciones que involucran un token, el cual puede tener valor en un mercado específico o no. Estas transacciones se agregan a la cadena de manera continua, por lo que el orden cronológico es crucial. Cuando un bloque se completa, se encripta mediante un proceso que genera un hash, un identificador único, que luego se incluye en el siguiente bloque, creando así una cadena de bloques conectados.

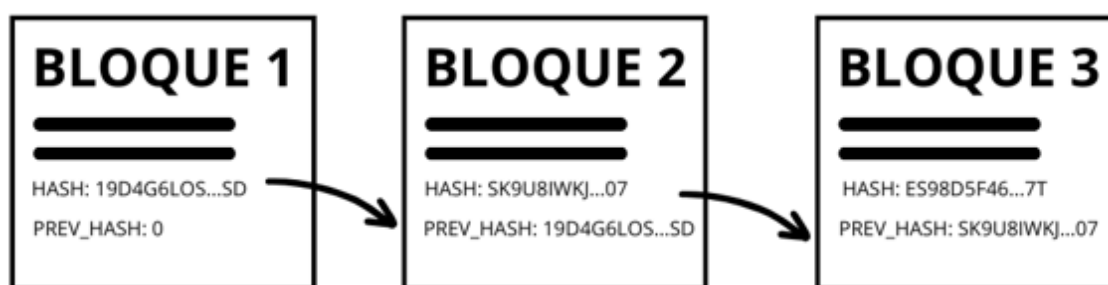


Figura 10. Encadenamiento de bloques.

La Blockchain es un libro mayor distribuido que registra todas las transacciones de un token o criptomoneda de manera cronológica. Los usuarios solo necesitan un número de cuenta en esta cadena para recibir tokens y enviarlos posteriormente. Este sistema garantiza que todas las transacciones sean transparentes y verificables.

Dentro de la cadena de bloques, hay dos tipos principales de participantes: los usuarios, que asignan valor al token a través de la oferta y demanda, y los nodos, que son computadoras que almacenan toda la información de la cadena. Estos nodos verifican cada transacción, asegurándose de que la cuenta que realiza la operación exista, tenga fondos suficientes y sea

válida. Además, los nodos compiten para resolver complejos problemas criptográficos y encontrar el hash que les permita añadir un nuevo bloque a la cadena, siendo recompensados con la creación de nuevos tokens en un proceso conocido como minería.

En este tipo de redes existen dos tipos de nodos, según la cantidad de datos que almacenen:

- Full nodes: son aquellos que mantienen un registro completo de Blockchain
- Light nodes: son aquellos que mantienen un registro parcial de Blockchain

La Blockchain almacena datos utilizando árboles de Merkle, que permiten comprimir y organizar la información de manera eficiente. Los full nodes (nodos completos) almacenan toda la estructura del árbol de Merkle, mientras que los light nodes (nodos ligeros) solo almacenan una parte de la información, como una rama específica del árbol.

Aunque los light nodes no almacenan todos los datos, esto no afecta su capacidad para verificar la veracidad de la información en la red. Gracias a la estructura del árbol de Merkle, los light nodes tienen acceso a suficiente información para comprobar la consistencia y autenticidad de la cadena de bloques, garantizando así la integridad de la red.

El continuo intercambio y actualización de registros entre pares (peer-to-peer o P2P) hace que este proceso sea más rápido, eficiente y económico. La tecnología P2P permite que los datos se compartan directamente entre los usuarios, eliminando la necesidad de un intermediario central. Cuando se realiza una transacción, se transmite un bloque de datos a toda la red para su validación. Una vez validado por consenso, el cambio se refleja en todas las copias del registro, asegurando la integridad del sistema.

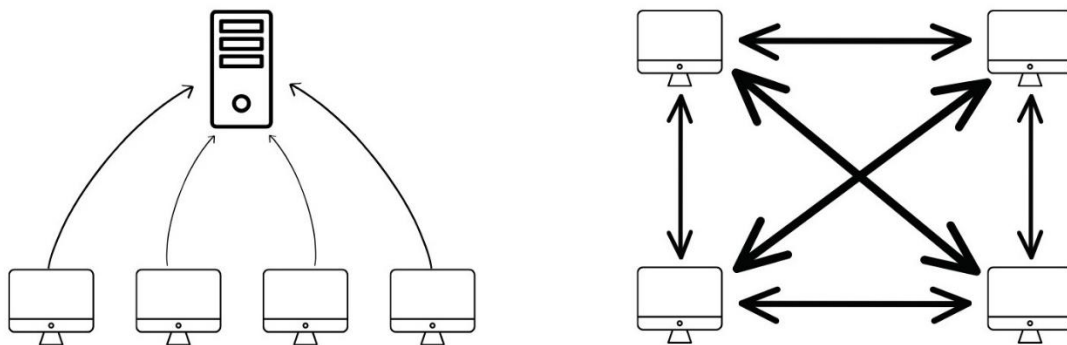


Figura 11. Comparación entre Red Centralizada (izquierda) y Peer to Peer (derecha).

Una característica esencial de la blockchain es su descentralización: no depende de una autoridad central. Esto crea un sistema más "democratizado", donde la seguridad y la confianza en los registros se refuerzan a medida que aumenta el número de nodos en la red. Esto también reduce la posibilidad de que un pequeño grupo de nodos pueda alterar los datos, garantizando que la información sea prácticamente inmutable y resistente a manipulaciones.

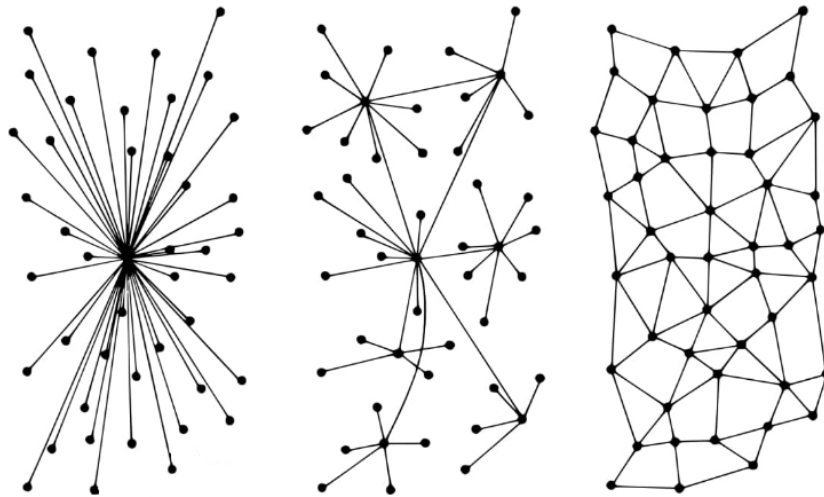


Figura 12. Red centralizada (izquierda), red descentralizada (medio) y red distribuida (derecha).

Cada transacción registrada representa el movimiento de un activo, y cada bloque en la cadena elige qué información registrar (quién, qué, cuándo, cuánto, dónde y cómo). Los bloques están conectados entre sí mediante sus hashes, formando una cadena continua. Cada bloque adicional refuerza la validez del anterior, lo que hace que sea extremadamente difícil modificar la información ya registrada.

En resumen, la blockchain funciona como un proceso en el que los nodos de una red proponen, validan y registran cambios de estado en un libro mayor sincronizado y distribuido entre ellos. Cada nodo tiene una copia de este libro, lo que protege los datos incluso si un nodo falla. La naturaleza descentralizada, pública e inalterable de esta tecnología la hace altamente segura contra hackeos y manipulaciones, permitiendo un registro que es, en esencia, inmutable.

Tipos de blockchain

Los distintos tipos de blockchain pueden clasificarse de dos maneras principales: según el acceso y en función de los permisos.

Según el tipo de acceso tenemos:

- Blockchain pública: estas redes son de acceso libre, lo que significa que cualquier persona puede unirse o salir de la plataforma sin restricciones. No existen limitaciones para participar en la lectura o escritura de datos, lo que las hace extremadamente transparentes. Además, las identidades de los usuarios no son reveladas, lo que otorga un alto grado de anonimato a quienes participan en la red.
- Blockchain privada: en este tipo de blockchain, tanto la lectura como la escritura de datos están restringidas a un grupo definido de participantes cuya identidad es conocida. Estas personas conforman un grupo de confianza, y las reglas de funcionamiento de la red pueden ser modificadas por este grupo, a diferencia de las blockchains públicas, donde cualquier cambio requiere consenso entre todos los participantes.
- Blockchain híbrida o mixta: este tipo de blockchain combina características de las blockchains públicas y privadas, adaptando sus propiedades según las necesidades específicas de la red.

Características

Dada toda la información anterior podemos enumerar las siguientes características que definen Blockchain:

- **Distribuida:** más allá de ser una red descentralizada, es una red distribuida y, por tanto, todos los nodos de la red son iguales y cada uno de ellos tiene una copia de la información de la Blockchain.
- **Trazabilidad:** en un principio se puede conocer el origen de la primera transacción, hacer un seguimiento. Poniendo el ejemplo del Bitcoin, si recibo un Bitcoin puedo ir a la cuenta que me lo ha enviado y puedo seguir ese Bitcoin hasta el minero que recibió la recompensa.
- **Segura:** información de las transacciones realizadas se almacenan en bloques impidiendo la manipulación de información y doble gasto.
- **Inmutable:** esta tecnología está basada en la criptografía, por lo que no se puede alterar la información de un bloque. Si se intentara manipular, se detectaría enseguida por el resto de los nodos.
- **Autosuficiencia:** No necesita un centro de mando que gestione las transacciones, filtre la información de la red o controle su funcionamiento.
- **Transfronteriza:** No necesita un centro de mando que gestione las transacciones, filtre la información de la red o controle su funcionamiento.
- **Rapidez:** permite a los usuarios efectuar transacciones más rápido a lo que estamos acostumbrados con los sistemas bancarios tradicionales, ahorrando así tiempo en el largo plazo.
- **Consensuado:** cada bloque prospera gracias al consenso entre la red y así es como se toman decisiones.

A todo esto, si nos encontramos con el caso de que estamos trabajando con una blockchain pública, se le añaden las siguientes características:

- **Pública:** cualquiera puede ver las transacciones que se realizan.
- **Privada/anónima:** para participar en ella únicamente necesitas acceso a internet y no requiere de identificación alguna. Si bien es cierto, no es del todo correcto indicar que es anónima como tal, ya que actualmente hay gobiernos que están intentando regular plataformas para que los usuarios se deban identificar y así poder hacer un seguimiento de las transacciones para su posterior tributación.
- **Incensurable:** nadie puede impedir que accedas a ella, ya que es una tecnología de código abierto, a disposición de todos (open source).

Ventajas

- Inmutabilidad y transparencia; permite mantener un registro inalterable en el tiempo, sin posibilidad de que los datos desaparezcan o se falsifiquen.
- Seguridad: la descentralización de datos hace que todos los usuarios posean una versión real de la información y no una copia, lo cual aumenta la dificultad de intentar engañar al sistema.
- Reducción de costes, al disminuir la intervención de las entidades que actúan como intermediarios y al permitir un mercado en el cual los precios no están monopolizados, si no adaptables a la situación.
- Autosuficiencia, es capaz de gestionar todas las operaciones de manera automática.
- Optimización, por tratarse de un sistema “de abajo a arriba” (del inglés, bottomup) donde cada elemento del sistema se diseña detalladamente para luego agruparse en componentes hasta llegar a formar un sistema completo. Esto permite conocer todas las variables del sistema.

Desventajas

- Alto consumo energético, necesario para llevar a cabo el consenso dentro del sistema y mantener la seguridad.
- Escalabilidad: por el momento solo se han llevado a cabo proyectos piloto de pequeñas magnitudes. El salto a una integración global de esta tecnología es todavía un reto.
- Regulación, no existe todavía un marco regulatorio ni leyes que contemplen esta tecnología en su totalidad, lo cual impide su integración en las infraestructuras eléctricas.
- Aprehensión social, hacia el uso de esta tecnología, sobre todo en el sector energético, donde los usuarios interactúan directamente con ella y tienen que confiar en una gestión automática, no en una entidad.
- Complejidad técnica: Implementar y mantener una blockchain requiere conocimientos técnicos especializados. Esto puede ser una traba para su adopción.

6.3 Actualidad del Blockchain

Blockchain es una tecnología relativamente reciente, con apenas 11 años de vida, que ha experimentado un crecimiento significativo desde su creación. Actualmente, se encuentra en una fase de expansión y aceptación, con un futuro prometedor en diversas industrias. Su rápido ascenso en popularidad se debe en gran parte a su asociación inicial con la criptomoneda Bitcoin, que sirvió como el primer gran impulso para esta tecnología.

Sin embargo, el verdadero despegue de Blockchain comenzó en marzo de 2015, cuando Nasdaq inició sus primeras pruebas con esta tecnología, marcando un hito en su aplicación fuera del ámbito de las criptomonedas. Otro momento clave fue la creación de los Smart Contracts (contratos inteligentes) gracias a Ethereum, lo que permitió automatizar decisiones mediante fragmentos de código altamente flexibles.

En los últimos años, el desarrollo de Blockchain ha avanzado más allá de las criptomonedas y los contratos inteligentes. Se ha convertido en una tecnología fundamental para la creación de aplicaciones descentralizadas (DApps), finanzas descentralizadas (DeFi), y soluciones para la trazabilidad en cadenas de suministro, entre otros usos. Además, el interés en Blockchain ha crecido exponencialmente en sectores como la banca, la salud, y la logística, donde se está explorando su potencial para mejorar la seguridad, la transparencia, y la eficiencia operativa.

Aunque el progreso tecnológico ha sido notable, es esencial considerar todos los factores que influyen en su desarrollo. Actualmente, Blockchain se encuentra en una etapa donde las expectativas han sido ajustadas a la realidad, y las empresas están trabajando en superar los desafíos técnicos y regulatorios.

El intervalo estimado para la adopción masiva de Blockchain es un tema de debate. Empresas como IBM predicen que la adopción generalizada podría ocurrir en los próximos 5 a 10 años. Por otro lado, firmas como PricewaterhouseCoopers (PwC) sugieren que este plazo podría extenderse debido a la falta de confianza del público, que a menudo es causada por un desconocimiento de la tecnología. No obstante, a medida que crece la educación y la familiaridad con Blockchain, y se desarrollan marcos regulatorios más claros, es probable que su adopción continúe acelerándose en los próximos años.

6.4 Desarrollo del Blockchain

6.4.1 *Ethereum y los Smart Contracts*

El concepto de Smart Contract fue introducido por primera vez en 1994 por Nick Szabo, quien lo definió como un "protocolo de transacción computarizado que ejecuta los términos de un contrato". Los principales objetivos de los Smart Contracts son cumplir con las condiciones contractuales de manera automática, reducir al mínimo las excepciones, ya sean malintencionadas o accidentales, y disminuir la dependencia de intermediarios de confianza.

Este se materializó en 2014, con la creación de Ethereum. Un Smart Contract es esencialmente un código que representa un acuerdo entre dos o más partes, que se ejecuta automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones, garantizando que los términos acordados se respeten sin intervención humana. El mayor potencial que presentan es la posibilidad de crear de un nuevo modelo de negocio, controlados completamente a través de dichos contratos.

Ethereum es una plataforma descentralizada que permite a los usuarios desarrollar sus propios proyectos en su blockchain, sin necesidad de construir una nueva desde cero. Fue la primera plataforma en ofrecer esta herramienta, revolucionando el modo en que las aplicaciones descentralizadas y las transacciones digitales se pueden gestionar.

Aunque la descentralización y la eliminación de intermediarios son características inherentes de la blockchain, el uso de los Smart Contracts introduce un cambio significativo en el modelo de negocio. Estos contratos inteligentes permiten realizar acciones con una lógica compleja y autoejecutable, sin necesidad de confianza entre las partes.

En el ecosistema de Ethereum, los Smart Contracts son fundamentales para integrar la tecnología blockchain en sectores tan variados como el financiero, legal, y energético. Ethereum ofrece dos tipos de cuentas para interactuar con su red:

- Cuentas Externas (EOA): estas cuentas representan a los usuarios individuales y están definidas por un par de claves: una clave pública, que permite a otros identificar la cuenta, y una clave privada, que es conocida solo por el titular de la cuenta. La clave privada es necesaria para acceder a la cuenta y realizar cualquier transacción en la plataforma. Las cuentas externas pueden interactuar tanto con otras EOA como con cuentas de contratos (CA).
- Cuentas de Contratos (CA): estas cuentas están controladas por código y representan a los Smart Contracts. A diferencia de las cuentas externas, las CA no están directamente controladas por un usuario sino por el código del contrato. Los Smart Contracts pueden ser activados o invocados por otra CA o por una EOA, lo que permite la automatización de procesos complejos dentro de la red.

En la blockchain de Ethereum, los nodos pueden asumir diferentes roles o funciones, cada uno con un propósito específico dentro de la red:

- Validadores: los validadores son responsables de verificar las transacciones que ocurren en la blockchain. Su tarea es crucial para mantener la integridad y seguridad de la red.
- Desarrolladores: los desarrolladores en la red Ethereum son los encargados de escribir el código necesario para implementar diferentes tipos de transacciones y aplicaciones dentro de la blockchain. Una de sus principales responsabilidades es la creación de Smart Contracts, que son programas autoejecutables que facilitan, verifican y hacen cumplir acuerdos entre las partes. Los desarrolladores también pueden contribuir al código base de Ethereum o crear aplicaciones descentralizadas (*DApps*) que aprovechan la infraestructura de la blockchain para ofrecer servicios innovadores en diversos sectores.
- Usuarios: Los usuarios son quienes utilizan la red de Ethereum para realizar transacciones, interactuar con Smart Contracts, o utilizar aplicaciones descentralizadas (*DApps*). Estos usuarios pueden ser tanto individuos como empresas que ven en Ethereum una plataforma segura y confiable para llevar a cabo sus operaciones digitales. A medida que la red y sus capacidades crecen, el número de usuarios también aumenta, impulsando la adopción de Ethereum a nivel global.

El desarrollo de los Smart Contract en Blockchain impulsó su acogida en diversos sectores, además del sector financiero. Las diferentes industrias comenzaron a realizar sus propios estudios, adaptando esta tecnología a sus propias actividades. Entre los sectores que se presentan como líder en Blockchain se encuentra el sector energético, junto con el sector industrial

Su uso no se limita tan solo a ellas. Industrias, tales que, la petrolífera o la gasista, pueden ser revolucionadas gracias al uso de Blockchain a lo largo de su cadena de producción. El uso de Blockchain permite revolucionar la gestión y administración de este tipo de industrias,

simplificando la cadena de producción al proponer un único registro, ordenado históricamente, que facilitaría tareas tales que:

- Pagos transfronterizos: al ser Blockchain una tecnología de carácter mundial, el uso de estas permite reducir costes y tiempos, al no necesitar intermediarios para la verificación de los requisitos, además de aportar transparencia en las facturas, evitando la malversación de ellas (inflación de costes o elusión de impuestos).
- Gestión de registros: focalizándose en la adquisición de los derechos para acceder al suelo donde se llevan a cabo las actividades de extracción, dichas transacciones de terrenos son vulnerables al fraude, sobre todo en países con elevados niveles de corrupción, al no existir un historial preciso de las transacciones y almacenarse estas mayoritariamente en papel.
- Contratación: esta es una operación compleja, que se puede prolongar durante grandes periodos de tiempo, por ejemplo, hay contratos que se acuerdan años antes de su ejecución. El uso de Smart Contracts facilita el seguimiento de ellos y la interpretación de las condiciones legales a cumplir.
- Auditorías: esta operación se facilitaría gracias al uso de Blockchain, ya que los bienes o activos quedarían representados a través de tokens, lo cual permite realizar su seguimiento a través de su recorrido en la cadena de suministro, desde su origen hasta la llegada al cliente, incluyendo los cambios de titularidad y conservándose todo ello en un registro inmutable.

6.4.2 Relación con las Tecnologías Emergentes

En los últimos años, Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), Inteligencia Artificial (AI), y Big Data han experimentado un crecimiento exponencial debido a su gran potencial tanto de forma individual como en combinación entre ellas. Este avance ha sido impulsado por el aumento del poder computacional, reflejado en la Ley de Moore, así como por las significativas inversiones realizadas en estas tecnologías.

En el ámbito de IoT, la tecnología Blockchain ofrece una plataforma segura para el registro de datos, lo que aumenta la seguridad y fiabilidad al almacenar y rastrear los cambios de titularidad de los objetos entre dispositivos conectados. Esto es crucial para garantizar la integridad de las transacciones y la comunicación entre dispositivos IoT.

En cuanto a la AI, su integración con Blockchain permite mejorar la capacidad de aprendizaje de los sistemas, reduciendo el margen de error humano. Al utilizar Blockchain como una base de datos compartida y encriptada, los sistemas de AI dentro de la red pueden acceder a datos seguros y verificados para entrenar modelos sin comprometer la privacidad. Esto es especialmente relevante en sectores como la salud, finanzas y logística, donde la integridad y seguridad de los datos son fundamentales.

Por su parte, Big Data facilita la gestión eficiente de grandes volúmenes de información. Sin embargo, su verdadera potencia se alcanza cuando se combina con Blockchain, que garantiza la procedencia y la trazabilidad de los datos, además de su inalterabilidad. Esto es crucial para prevenir errores, fraudes y manipulación de datos, asegurando que la información analizada sea precisa y confiable.

La convergencia de Big Data, AI, IoT y Blockchain está transformando múltiples sectores, desde la industria hasta los servicios, creando un ecosistema tecnológico interconectado que no solo optimiza procesos, sino que también establece nuevos estándares de seguridad, transparencia y eficiencia.

6.5 Integración en el Mundo Energético

Una de las características más importantes de los Smart Contracts es su naturaleza determinística, lo que significa que, ante las mismas variables de entrada, siempre generan la misma salida o respuesta. Esto se debe a que estos contratos funcionan bajo la lógica condicional IF/THEN (SI ocurre una condición, ENTONCES se ejecuta una acción específica). Los Smart Contracts residen en la blockchain y poseen una dirección única. Cuando un usuario envía una transacción a la dirección de un Smart Contract, este se ejecuta de forma automática e independiente en cada nodo de la red, siguiendo los datos incluidos en la transacción desencadenante.

Cada nodo de la blockchain ejecuta una máquina virtual (VM), y toda la red actúa como una VM distribuida. En el caso de Ethereum, todos los participantes de la red, independientemente de su software o hardware, operan una Ethereum Virtual Machine (EVM). La EVM es un entorno virtual que permite la ejecución de los Smart Contracts. Para implementar un Smart Contract, su código, escrito en un lenguaje de programación llamado Solidity, diseñado específicamente para estos contratos, se traduce a código EVM y se despliega en la blockchain. Al residir en la blockchain, el código es accesible y verificable por todos los nodos, lo que permite confirmar su correcto funcionamiento antes de ser añadido a la cadena. Una vez incorporado, el Smart Contract es inmutable, garantizando la integridad del acuerdo.

Los Smart Contracts son particularmente valiosos en operaciones complejas que pueden requerir la verificación de condiciones externas. Para integrar información del mundo real, estos contratos recurren a Oráculos, que actúan como puentes entre plataformas externas y la blockchain, actualizando el estado del contrato con datos externos.

En el sector energético, los Smart Contracts están transformando la forma en que se gestionan y distribuyen los recursos. Un ejemplo destacado es su aplicación en las Microgrids, redes eléctricas locales que pueden operar de manera independiente o en conexión con una red central. Estas microgrids permiten a comunidades o vecindarios generar, consumir y vender energía de manera más eficiente y descentralizada.

En el contexto de transacciones energéticas P2P (peer-to-peer), los Smart Contracts facilitan la compra y venta automática de energía entre los participantes de una Microgrid sin necesidad de intermediarios. Este proceso, gestionado por Smart Contracts, asegura transparencia, eficiencia y un mercado energético más justo.

Cuando los Smart Contracts se aplica en el sector energético, concretamente, en las Micro Grids para llevar a cabo transacciones energéticas P2P, se siguen las etapas siguientes:

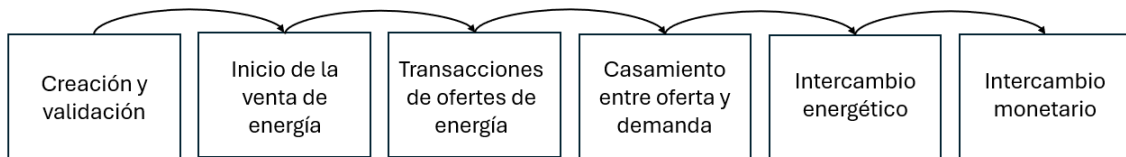


Figura 13. Funcionamiento del Smart Contract en transacciones energéticas P2P.

Para una mayor comprensión se explica el funcionamiento mediante un ejemplo [1]. Este ejemplo consta de dos posibles compradores y un solo vendedor de energía. En él, se utiliza el sistema de apuestas llamado Vickrey, un sistema donde los productores de energía ofertan su excedente, mientras que los compradores hacen “apuestas” o pujas por la cantidad de energía que desean adquirir. Cada comprador establece una oferta sin conocer las de los demás, y la energía se vende al postor que ha hecho la oferta más alta.

Las etapas que siguen son las siguientes:

1. Creación del Smart Contract

El proceso comienza con la creación del código del contrato inteligente, en el que se incluyen:

- Funciones principales: Ejecutar transacciones, verificar condiciones y aplicar penalizaciones si se incumplen los términos del contrato.
- Variables por verificar: Cantidad de energía a vender, tiempos de la transacción, depósitos de seguridad, etc.
- Condiciones: Por ejemplo, que el comprador tenga suficiente crédito o que la energía esté disponible.
- Penalizaciones: Se aplican si alguna de las partes no cumple con sus compromisos, como la entrega de energía o el pago.

El contrato inteligente se despliega en la blockchain mediante la función Create, generando una dirección única para que los usuarios puedan interactuar con él. En esta etapa, el vendedor de energía establece:

- Depósito de seguridad (s.deposit): Garantiza que no se produzcan fraudes; en caso contrario, el comprador puede ser indemnizado con este depósito.
- Cantidad de energía a vender (kWh): Define la oferta energética.
- Tiempo de aceptación de ofertas (bTime): El periodo durante el cual se pueden enviar ofertas de compra.
- Tiempo para la transacción energética (tTime): El plazo durante el cual debe completarse la transacción.

2. Inicio del proceso de subasta

El contrato inteligente inicia el tiempo de subasta mediante la función Init, estableciendo:

- Lista de ofertas (bids): Recopila las ofertas de compra de los participantes.
- Registro de las dos ofertas más altas (hB y hB2): Mantiene un seguimiento de las pujas más competitivas.
- Variable de estado del ganador (w): Indica si hay o no un ganador de la subasta.

3. Proceso de Oferta y Descubrimiento

Los compradores de energía realizan sus ofertas utilizando las funciones CommitBid y RevealBid:

- CommitBid: El comprador establece su oferta (b) y un depósito de seguridad (deposit) para prevenir acciones fraudulentas. Usa una función hash ($hbid = H(bid, nonce)$) para cifrar la oferta y un número aleatorio (nonce) para garantizar privacidad.
- RevealBid: En esta etapa, los compradores revelan sus ofertas y el contrato inteligente verifica que corresponden con las enviadas previamente. A continuación, se utiliza el modelo de subasta Vickrey para determinar al ganador, devolviendo los depósitos a los participantes que no ganaron la subasta mediante la función Award.

4. Finalización de la Transacción

Una vez que ha transcurrido el tiempo de transacción ($tTime$), el contrato inteligente procede a finalizar la operación mediante la función Finalize. Este proceso incluye:

- Verificación de la transferencia de energía: Se revisan los niveles de energía en los medidores inteligentes (Smart Meters) del ganador (mw) y del vendedor (ms).
- Cálculo de penalizaciones: Si alguna de las partes incumple las condiciones, se aplican las penalizaciones correspondientes.
- Ejecución del pago: El pago se realiza automáticamente al vendedor, junto con la devolución de su depósito de seguridad. De igual manera, se devuelve el depósito de seguridad al comprador que ganó la subasta.

```
Init:      bids =[], hB = 0, hB2 = 0,
           kwh=0, tTime=0, bTime=0, w=0,
Create:    INPUT: (s.deposit, kwh, tTime, bTime)
           Verify s.deposit
CommitBid: INPUT: (b, hbid, deposit, nonce)
           Verify b ∉ bids
           Verify b.deposit ≥ deposit
           bids[b] = (hbid, nonce)
RevealBid: INPUT: (b, bid, nonce)
           Verify t ∈ bTime
           Verify b ∈ bids
           Verify hash(b.bid, b.nonce) == b.hbid
           Verify b.bid ≥ b.deposit
           Vickrey(b, b.bid) → (w, hB, hB2)
Award:    INPUT: ()
           price = hB2
           send(i, i.deposit) ∀ i ∈ bids | i ≠ winner
Finalize: INPUT: ()
           Verify t > tTime
           Penalty(kwh, m(s), m(w), mktPrice)
           → (bPenalty, sPenalty)
           send(w, w.deposit - price + bPenalty)
           send(s, s.deposit + price - sPenalty)
```

Figura 14. Ejemplo de código de un Smart Contract en transacciones energéticas.

Ventajas y desventajas

Por un parte tenemos las ventajas que aporta este tipo de contratos:

- **Confianza:** Los smart contracts están encriptados, lo que garantiza que solo las partes implicadas puedan leerlos. Además, al ser deterministas, su comportamiento es predecible bajo condiciones específicas, permitiendo la interacción entre usuarios desconocidos sin necesidad de intermediarios.
- **Reducción de Costes y Tiempos:** Al eliminar la necesidad de terceros para la validación y ejecución de contratos, se reducen significativamente tanto los costos como el tiempo requerido para completar las transacciones.
- **Seguridad:** Una vez registrados en la blockchain, los smart contracts son inmutables, eliminando el riesgo de manipulación y proporcionando una capa adicional de seguridad.
- **Velocidad:** La ejecución automática de los contratos permite agilizar procesos y acciones predefinidas, lo que optimiza las operaciones.
- **Automatización:** Los smart contracts operan de manera autónoma, lo que minimiza el error humano y asegura que ninguna de las partes pueda manipular los resultados en su favor.
- **Transparencia y Trazabilidad:** Al estar en una blockchain pública, todos los participantes pueden verificar el estado y las transacciones realizadas, lo que aporta mayor transparencia.

Por otro lado, tenemos las desventajas que presentan este tipo de contratos:

- **Territorialidad:** Los smart contracts no están sujetos a una localización específica, lo que puede generar conflictos legales, ya que cada nodo de la red puede estar bajo diferentes jurisdicciones y regulaciones.
- **Obsolescencia:** Debido a su naturaleza inmutable, si surgen nuevas condiciones no contempladas originalmente, el contrato debe rehacerse desde cero, haciendo el anterior obsoleto e inutilizable.
- **Marco Regulatorio y Legal:** Aún no existe un marco regulatorio claro y definido para los smart contracts, lo que genera incertidumbre sobre su validez y aplicación legal en distintos países.
- **Complejidad Técnica:** La creación de smart contracts requiere conocimientos avanzados de programación y blockchain, lo que puede limitar su adopción masiva.
- **Riesgo de Bugs y Errores:** Cualquier error en el código del smart contract puede llevar a resultados no deseados o incluso a la pérdida de activos, ya que una vez desplegado no puede ser modificado.

6.6 Estudio de Casos Nacionales

En el marco de la transición energética y la creciente demanda por parte de empresas de asegurar un suministro de energía 100% renovable, surge la necesidad de garantizar la trazabilidad y transparencia en la procedencia de la energía. Para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y reducir su huella de carbono, muchas empresas buscan contratos de suministro que aseguren el origen renovable de la energía.

6.6.1 Iberdrola y BBVA

El proyecto de compra de energía verde con blockchain entre Iberdrola y BBVA comenzó a gestarse en 2018, en un contexto en el que la sostenibilidad y la transparencia en el origen de la energía se estaban convirtiendo en prioridades estratégicas tanto para las empresas como para los gobiernos. BBVA, comprometido con reducir su huella de carbono y cumplir con los estándares de sostenibilidad, buscaba garantizar que la energía que consumía en sus instalaciones proviniera de fuentes 100% renovables.

Por su parte, Iberdrola, como líder en generación de energía renovable en España y una de las principales empresas energéticas del mundo, vio en la tecnología blockchain una oportunidad para innovar y ofrecer un servicio diferenciado a sus clientes. La posibilidad de certificar el origen de la energía en tiempo real y de manera inmutable mediante blockchain representaba un valor añadido significativo para su oferta de energía verde.

Los principales objetivos del proyecto eran:

- Garantizar la trazabilidad del origen de la energía verde suministrada por Iberdrola a BBVA, certificando que toda la energía provendría de fuentes renovables.
- Utilizar la tecnología blockchain para automatizar y registrar las transacciones de energía de forma transparente, segura e inmutable.
- Demostrar la viabilidad y los beneficios del uso de blockchain en el sector energético, tanto en términos de reducción de costos como en la mejora de la eficiencia operativa.

La energía suministrada provenía de dos plantas renovables específicas seleccionadas por Iberdrola: una planta hidroeléctrica en el río Tajo y uno de los parques eólicos más grandes de Europa, en El Andévalo, Huelva. La energía generada en estas instalaciones se inyectaba a la red eléctrica, y el sistema blockchain permitía rastrear y certificar que la energía consumida por BBVA provenía exclusivamente de estas fuentes renovables. Aunque los detalles específicos sobre el volumen total de energía transaccionada no fueron ampliamente divulgados, se sabe que cubrió el suministro de varias instalaciones clave de BBVA durante el período del proyecto.

La solución técnica diseñada para este proyecto se basó en la blockchain pública de Ethereum, conocida por su capacidad de ejecutar contratos inteligentes (smart contracts). En el caso de este proyecto, los contratos inteligentes se utilizaron para automatizar y registrar las siguientes operaciones:

- Asignación de Energía: Cada MWh de energía generada por Iberdrola en sus plantas renovables fue registrado en la blockchain, vinculando la generación de energía con su correspondiente origen.
- Certificación de Origen: Una vez que la energía era generada y transferida a la red, el contrato inteligente emitía automáticamente un certificado digital en la blockchain, garantizando que la energía entregada a BBVA provenía de las plantas renovables específicas asignadas al proyecto.
- Registro de Transacciones: Toda la información relativa al flujo de energía, incluyendo la cantidad de energía suministrada, las fechas de generación y consumo, y el origen específico de la energía, fue registrada en la blockchain. Esta información

se almacenó de forma inmutable, lo que significa que no podía ser alterada ni manipulada, asegurando la transparencia total del proceso.

El desarrollo del proyecto requirió la colaboración estrecha entre los equipos tecnológicos y operativos de Iberdrola y BBVA. Uno de los desafíos principales fue integrar la solución blockchain con los sistemas de gestión de energía existentes, asegurando que la certificación digital del origen de la energía pudiera ser fácilmente rastreada y auditada. Por otro lado, se enfrentaron desafíos relacionados con la adopción de una tecnología relativamente nueva como blockchain en un sector tradicionalmente conservador como el energético.

Una vez llevado a cabo, el resultado obtenido fue positivo, llevando así la certificación y suministro de energía de manera exitosa. El proyecto permitió a BBVA certificar que la energía consumida en sus instalaciones durante el período del contrato era 100% renovable, cumpliendo con sus objetivos de sostenibilidad.

Por otra parte, este proyecto ayudó a Iberdrola y BBVA a realzar su reputación y colocarse como unos de los líderes en innovación y sostenibilidad, demostrando cómo la tecnología blockchain puede transformar la industria energética.

El éxito del proyecto sentó las bases para que Iberdrola escalara esta solución a otros clientes y contratos, promoviendo el uso de blockchain para garantizar la transparencia y trazabilidad en el mercado energético. Tras el proyecto con BBVA, Iberdrola continuó investigando y desarrollando soluciones basadas en blockchain, pero la implementación de contratos energéticos con esta tecnología sigue siendo limitada. La empresa ha utilizado blockchain principalmente en proyectos piloto y en iniciativas específicas para certificar el origen renovable de la energía. Estas iniciativas se centran en mercados y clientes que valoran la transparencia, la trazabilidad y la sostenibilidad, como parte de su estrategia de responsabilidad corporativa.

En conclusión, este proyecto no solo logró sus objetivos inmediatos, sino que también abrió nuevas oportunidades para la aplicación de blockchain en el mercado eléctrico, posicionando a España como un referente en la integración de tecnologías emergentes en la transición hacia un sistema energético más sostenible.

6.6.2 Proyecto de Blockchain de Red Eléctrica de España (REE)

El Proyecto de Red Eléctrica de España (REE) con Blockchain es una iniciativa que surge en el contexto de la digitalización y modernización de la red eléctrica española. El mercado eléctrico español ha experimentado un crecimiento significativo en la integración de energías renovables, lo que ha planteado nuevos desafíos para la gestión de la red eléctrica. La variabilidad y la intermitencia de fuentes de energía como la solar y la eólica requieren un sistema más ágil y transparente para garantizar el equilibrio entre la oferta y la demanda. Además, la creciente digitalización y descentralización de la red impulsan la necesidad de soluciones tecnológicas avanzadas que puedan gestionar de manera eficiente el flujo de energía y la información asociada.

En este contexto, Red Eléctrica de España (REE), el operador del sistema eléctrico español, ha explorado el uso de la tecnología blockchain como una herramienta para mejorar la trazabilidad y la coordinación entre los diferentes actores del sistema eléctrico, incluyendo generadores, distribuidores, y consumidores.

El proyecto de REE con blockchain fue diseñado con varios objetivos clave:

- **Mejorar la Trazabilidad:** Facilitar el seguimiento en tiempo real de la energía que fluye a través de la red, asegurando que la información sobre el origen y el destino de la energía sea transparente y verificable.
- **Optimizar la Gestión de Energías Renovables:** Permitir una integración más eficiente de las energías renovables en la red, mejorando la previsión y la respuesta ante la variabilidad en la generación.
- **Facilitar la Respuesta a la Demanda:** Implementar mecanismos automáticos para gestionar la demanda en función de la oferta disponible, utilizando contratos inteligentes para ejecutar decisiones sin intermediarios.
- **Garantizar la Seguridad del Sistema:** Utilizar la inmutabilidad de blockchain para registrar y auditar todas las transacciones y eventos en la red, reduciendo el riesgo de fraudes y mejorando la ciberseguridad.

El desarrollo del proyecto de blockchain en la gestión de la red eléctrica por Red Eléctrica de España (REE) es un proceso complejo que se ha llevado a cabo en varias fases, involucrando la colaboración de múltiples actores y la integración de tecnología avanzada.

El primer paso en el desarrollo del proyecto fue la identificación de necesidades y oportunidades en la red eléctrica que podrían beneficiarse de la tecnología blockchain. Red Eléctrica de España, como operador del sistema eléctrico y transportista único, se enfrentaba a varios desafíos:

- **Trazabilidad del Origen de la Energía:** Con el aumento de la energía renovable, surgió la necesidad de garantizar que los consumidores pudieran verificar que la energía que compraban provenía de fuentes limpias.
- **Eficiencia en la Gestión de la Red:** La variabilidad de las fuentes renovables requería una mejor coordinación y optimización de la oferta y la demanda.
- **Seguridad en las Transacciones Energéticas:** Dado el rol crítico de la red eléctrica, era fundamental asegurar la inmutabilidad y seguridad de los registros de transacciones y decisiones operativas.

Una vez conocidos los desafíos a los que se enfrentaban, se implantaron los siguientes objetivos:

- Implementar un sistema de trazabilidad de la energía que permitiera a los generadores, distribuidores y consumidores rastrear el origen de la energía en tiempo real.
- Optimizar la respuesta a la demanda mediante la automatización de procesos utilizando contratos inteligentes.

- Aumentar la seguridad en la gestión de la red, reduciendo el riesgo de fraude y ciberataques a través del uso de blockchain.

Una vez definidos los objetivos, la siguiente fase implicó la selección de la plataforma tecnológica y el desarrollo de la infraestructura blockchain. REE optó por usar Hyperledger Fabric, una plataforma de blockchain diseñada para entornos empresariales que permite configuraciones de red privada y contratos inteligentes.

Para el desarrollo de la plataforma, se configuró una red blockchain tipo “permissioned” en la que solo los actores autorizados, como generadores, distribuidores y REE, podían participar y validar transacciones. Esta configuración permitía mantener el control y la seguridad del sistema. La plataforma blockchain se integró con los sistemas de gestión de la red eléctrica ya existentes, permitiendo que los datos operativos se sincronicen con la blockchain sin interrupciones.

Por otro lado, los contratos inteligentes se programaron para automatizar diversas operaciones, como la certificación del origen de la energía y la ejecución de medidas de respuesta a la demanda en función de la oferta disponible.

En esta misma fase, y antes de llevarlo a cabo a una escala mayor, el proyecto se desplegó inicialmente como piloto en áreas controladas, donde se realizó un seguimiento detallado del rendimiento del sistema. En estas pruebas piloto se evaluó la capacidad de la plataforma para gestionar transacciones en tiempo real sin afectar la estabilidad de la red, la fiabilidad y seguridad de los contratos inteligentes y el sistema blockchain en su conjunto y la interoperabilidad con las infraestructuras existentes, asegurando que la nueva tecnología no afectara las operaciones diarias.

Tras el éxito de las pruebas piloto, se procedió a la implementación del sistema blockchain a mayor escala, integrándolo en las operaciones regulares de REE. La implementación se llevó a cabo de manera gradual, priorizando áreas donde la tecnología ofrecía los mayores beneficios inmediatos.

El resultado del proyecto cumplió con los objetivos establecidos, haciendo que los consumidores y otros actores del sistema eléctrico pudieran rastrear el origen de la energía en tiempo real, mejoraron la eficiencia del sistema gracias a la automatización mediante contratos inteligentes y por último proporcionó un sistema robusto e inmutable para el registro de transacciones y decisiones operativas.

El éxito de la implementación inicial llevó a REE a considerar la expansión de la tecnología blockchain a otras áreas del sistema eléctrico. Esto incluye la gestión de redes inteligentes (smart grids) y la posibilidad de establecer mercados energéticos descentralizados, donde pequeños productores y consumidores puedan intercambiar energía directamente utilizando la blockchain como plataforma de confianza.

6.6.3 Pylon Network

De entre los factores que forman el contexto en el que se desarrolló el proyecto encontramos, por una parte, a la creciente adopción de energías renovables, donde España, con su abundancia de sol y viento, ha experimentado un crecimiento significativo en la capacidad

instalada solar y eólica. Por otra parte, con la aprobación del Real Decreto 244/2019, que eliminó el “impuesto al sol”, se facilitó el autoconsumo energético y se abrieron nuevas oportunidades para los consumidores interesados en producir y gestionar su propia energía.

Con estas características nació el proyecto Pylon Network, un ejemplo pionero en el ámbito de la energía y blockchain en España. Pylon Network fue iniciado por Klenergy, una startup española fundada por un grupo de ingenieros con experiencia en energías renovable de tecnología limpia, en colaboración con varios socios del sector energético, incluyendo cooperativas de energía renovable como GoiEner. El proyecto buscaba crear un ecosistema energético descentralizado donde los consumidores pudieran intercambiar energía directamente entre ellos, utilizando la tecnología blockchain para asegurar la transparencia y la seguridad de las transacciones.

Los objetivos que tuvo el proyecto son:

- Descentralización del Mercado Energético: Permitir que los consumidores puedan comprar y vender energía entre sí sin depender de grandes compañías eléctricas.
- Facilitar el Autoconsumo Energético: Proporcionar una plataforma que apoye a los hogares y pequeñas empresas a maximizar el uso de la energía que generan.
- Transparencia y Trazabilidad: Utilizar blockchain para garantizar que todas las transacciones energéticas sean transparentes, trazables y seguras.

El corazón del proyecto es la Pylon Network, una plataforma blockchain diseñada específicamente para el sector energético. Esta red blockchain es de tipo permissioned, es decir, solo participantes autorizados (como cooperativas, prosumidores, y distribuidores) pueden validar transacciones.

Se introdujo una criptomoneda, PylonCoin, utilizada para facilitar las transacciones dentro de la red. Los usuarios utilizan PylonCoin para comprar y vender energía entre ellos, facilitando las transacciones de manera rápida y segura. Además, se desarrollaron e implementaron medidores inteligentes compatibles con blockchain, que permiten un seguimiento en tiempo real de la energía producida, consumida y compartida. Los datos se almacenan de manera inmutable en la blockchain, asegurando transparencia y confianza en el sistema.

Tuvieron una primera fase de desarrollo en la que llevaron a cabo pruebas internas para validar la tecnología y asegurar su funcionamiento en un entorno real. Se centraron en la seguridad de la red blockchain, la fiabilidad de los medidores utilizados y la eficiencia de las transacciones de PylonCoin.

Tras el éxito en la fase de desarrollo, Pylon Network se asoció con GoiEner, una cooperativa energética en el País Vasco, para implementar un piloto a gran escala. GoiEner, con su enfoque en energía renovable y participación comunitaria, fue el socio ideal para probar el modelo de mercado energético descentralizado. El piloto se llevó a cabo en comunidades que formaban parte de GoiEner, involucrando a cientos de hogares y pequeñas empresas. El objetivo de este primer piloto fue el evaluar la viabilidad del sistema en un entorno real, medir el impacto en la eficiencia energética y la satisfacción del usuario, y ajustar la tecnología según las necesidades del mercado.

Los resultados obtenidos fueron prometedores. Primero consiguieron aumentar la eficiencia energética, ya que los participantes lograron optimizar su consumo energético, utilizando más eficientemente la energía generada localmente. Por otro lado, la eliminación de intermediarios y la posibilidad de vender energía directamente a otros usuarios resultó en una reducción significativa de los costos para los prosumidores. Además, los usuarios apreciaron la capacidad de rastrear en tiempo real el origen de la energía que consumían, asegurando que era renovable.

Basado en el éxito del piloto, Pylon Network comenzó a considerar la expansión de la red a otras cooperativas y comunidades en España, así como a nivel internacional. Para soportar un mayor número de transacciones y participantes, se realizaron mejoras en la infraestructura blockchain, enfocándose en la escalabilidad y la reducción de costos operativos. También se desarrollaron APIs y herramientas para integrar la plataforma con sistemas de gestión de energía existentes, facilitando la adopción por parte de nuevos usuarios.

En conclusión, este proyecto ha sentado un precedente en la integración de blockchain en el sector energético. Pylon Network se estableció como la primera red de energía descentralizada que utiliza blockchain en el país y los usuarios pasaron de ser simples consumidores a prosumidores activos en el mercado energético, con mayor control sobre su energía.

6.7 Estudio de Casos Internacionales

Como bien se ha explicado en los apartados anteriores, el Blockchain es una tecnología emergente, la cual tiene mucha oportunidad de desarrollo en los próximos años. Para entender cómo de efectiva es esta herramienta se han seleccionado diferentes casos para analizar cómo se implementa y utiliza una tecnología en diferentes contextos.

El criterio utilizado para escoger los casos se ha basado en dos grandes ejes principales: la ubicación del proyecto, para poder hacer una pequeña aproximación de hasta qué punto se ha globalizado esta energía, y el tipo de implementación realizada, para tener un abanico más amplio de posibilidades que estudiar.

Finalmente, se seleccionaron los siguientes casos:

- Enerchain (Alemania): Proyecto colaborativo que permite el comercio de energía P2P a través de Blockchain, con la participación de grandes empresas energéticas europeas. Representa un enfoque hacia la desintermediación en el mercado energético.
- LO3 Energy (EE. UU.): Pioneros en la implementación de microgrids y comercio de energía local en Brooklyn, Nueva York. Este caso es fundamental para entender cómo Blockchain facilita la energía P2P en áreas urbanas.
- Power Ledger (Australia): Plataforma que habilita la comercialización de energía solar entre vecinos y la certificación de energía renovable. Es un ejemplo clave de cómo Blockchain puede integrar fuentes de energía renovable en el mercado.
- WePower (Lituania y España): Plataforma que permite a los productores de energía renovable tokenizar la electricidad futura y venderla de forma anticipada. Este caso destaca el uso de tokens energéticos en el mercado mayorista.

- Sun Exchange (Sudáfrica): Plataforma que facilita la inversión en energía solar mediante microinversiones globales en proyectos solares en África. Ofrece una perspectiva única sobre la democratización de la energía a través de Blockchain.

Este estudio pretende analizar la implementación y resultados de varios proyectos europeos que han utilizado blockchain en el sector energético. El objetivo principal es entender cómo diferentes tecnologías y enfoques han sido aplicados, qué resultados han producido, y cómo estos conocimientos pueden ser útiles para el mercado energético español.

Cada caso en concreto será estudiado de manera que se pueda entender en profundidad el proyecto y hasta qué punto es interesante y viable su implementación en España. Se realizará un análisis DAFO, con el objetivo de poder llevar a cabo un examen más detallado de todos los factores, tanto internos como externos, que juegan un papel importante en el desarrollo de esta tecnología.

Además, se hará una propuesta general de los pasos a seguir para la posible integración de cada tipo de proyecto dentro del mercado español.

Para su integración, es necesario entender cuál es el contexto en España, común entre todos los casos.

- Contexto regulatorio:

España ha avanzado significativamente en su transición hacia las energías renovables, impulsada por la legislación de la Unión Europea y las políticas nacionales. En particular, el marco regulatorio fomenta la generación distribuida, el autoconsumo y las comunidades energéticas. La Ley de Cambio Climático y Transición Energética y el Real Decreto 244/2019 sobre autoconsumo son pilares fundamentales. Las directivas europeas, como la Directiva (UE) 2018/2001 sobre energías renovables, también apoyan la transición hacia un mercado energético más abierto y digitalizado.

Por otro lado, la regulación en España sobre el uso de criptomonedas y blockchain, aunque está en desarrollo, todavía presenta incertidumbres. Aunque blockchain no tiene una regulación específica en España, las criptomonedas y los criptoactivos están sujetos a la normativa general sobre activos financieros, incluyendo la Ley de Prevención de Blanqueo de Capitales y el Reglamento MiCA (Markets in Crypto-Assets) que está en proceso de implementación en la UE. Esta normativa establece un marco para la emisión y el intercambio de tokens.

- Contexto tecnológico:

España cuenta con una infraestructura digital avanzada y un ecosistema digital en crecimiento, lo que podría facilitar la adopción de tecnologías blockchain. Además, la penetración de internet y la digitalización son altas, lo que es favorable para un modelo basado en plataformas digitales.

En España, la adopción de blockchain está en una fase de crecimiento, con proyectos piloto en diversos sectores, incluidos los mercados energéticos. El uso de blockchain para garantizar la transparencia y seguridad en las transacciones de energía es tecnológicamente viable, y existe un interés creciente por explorar esta tecnología en el sector.

Sin embargo, la adopción masiva de blockchain y criptomonedas en España aún no es tan amplia como en otros países. Aunque existe un interés creciente, los usuarios comunes y las empresas podrían mostrar desconfianza inicial hacia modelos financieros basados en blockchain, lo cual podría retrasar el impulso inicial del proyecto.

6.7.1 Enerchain, Alemania

Contexto

En respuesta al desafío de lograr un suministro energético seguro, rentable y sostenible, Alemania introdujo el concepto de transición energética, conocido como Energiewende. Esta iniciativa tiene como objetivo incrementar significativamente el uso de fuentes de energía renovable en la generación eléctrica. La meta establecida para 2050 es que al menos el 60% del consumo eléctrico provenga de fuentes renovables.

En este contexto, nació Enerchain, un proyecto innovador lanzado por PONTON, una empresa de software con sede en Hamburgo, Alemania. Este proyecto pionero contó con el respaldo de un consorcio de más de 40 compañías energéticas europeas, que incluían tanto grandes eléctricas como operadores de mercados más pequeños. Entre las empresas participantes destacan E.ON, Enel, Iberdrola y Vattenfall. Enerchain se implementó en Europa, con una base operativa en Alemania, y se enfocó en el mercado energético europeo.

Previo al lanzamiento de Enerchain, la mayoría de las transacciones de energía en Europa se realizaban a través de intercambios centralizados, lo que conllevaba altos costos de transacción y procesos lentos. A medida que las energías renovables y la descentralización ganaban importancia, se hizo evidente la necesidad de explorar tecnologías innovadoras que facilitaran un mercado energético más flexible y eficiente.

La tecnología Blockchain, con su capacidad para registrar transacciones de forma segura y descentralizada, surgió como una solución idónea para estos desafíos. Enerchain representó uno de los primeros intentos en Europa por aplicar Blockchain en un entorno de mercado energético real, marcando un hito en la evolución del sector energético hacia una mayor descentralización y sostenibilidad.

Objetivos

El proyecto Enerchain tenía como objetivo principal desarrollar y validar un modelo descentralizado para la negociación de energía entre empresas utilizando tecnología Blockchain. Específicamente, se proponía:

- Descentralizar el mercado energético: eliminar la dependencia de intermediarios centralizados en las transacciones energéticas, facilitando la interacción directa entre las partes involucradas.
- Reducir costos y aumentar la eficiencia: implementar un sistema donde las transacciones de energía se realicen de manera directa entre los interesados, sin necesidad de cámaras de compensación ni intercambios centralizados, optimizando así los recursos y tiempos.

- Fomentar la transparencia y seguridad: garantizar que todas las transacciones energéticas sean rastreables, seguras y transparentes mediante el uso de la tecnología Blockchain.
- Explorar nuevos modelos de negocio: investigar cómo Blockchain podría habilitar nuevas formas de negociación de energía, como mercados locales o transacciones peer-to-peer (P2P), promoviendo la innovación en el sector.

Desarrollo y resultados

Enerchain fue una plataforma innovadora de comercio de energía basada en tecnología Blockchain, diseñada para que múltiples actores del sector energético pudieran comprar y vender electricidad directamente entre ellos sin la necesidad de intermediarios. La plataforma utilizaba contratos inteligentes para automatizar las transacciones, asegurando el cumplimiento de las condiciones pactadas por ambas partes de forma eficiente y segura.

El proyecto comenzó en 2017 con pruebas iniciales, donde se simulaban transacciones entre diferentes participantes del consorcio. La plataforma utilizada estaba construida sobre una versión privada de Ethereum, adaptada específicamente para satisfacer los requisitos del mercado energético europeo. Esta configuración permitía a los participantes intercambiar productos energéticos, como contratos de suministro a corto plazo, de manera directa. Cada transacción era verificada por los nodos participantes, eliminando la necesidad de un ente centralizado, lo que marcaba un cambio radical en el modelo tradicional de comercio de energía.

Enerchain alcanzó un hito significativo al realizar transacciones de energía sin intermediarios, lo cual fue un logro significativo para la industria. Sin embargo, dado que se trató de un proyecto piloto, no involucró la comercialización de energía a gran escala para los consumidores finales, sino que sirvió como una demostración tecnológica.

Este proyecto se prolongó hasta 2018, cuando se llevó a cabo su primer comercio de energía real utilizando Blockchain, demostrando así la viabilidad técnica del sistema. No obstante, los desafíos regulatorios y la necesidad de adaptar la infraestructura del mercado energético a gran escala fueron obstáculos que impidieron su adopción más amplia. Como resultado, Enerchain no continuó hacia una implementación comercial regular a largo plazo.

Enerchain fue un proyecto innovador que exploró cómo la tecnología Blockchain podría transformar el mercado energético en Europa. Este proyecto marcó un avance significativo hacia la descentralización de las transacciones energéticas en la región. Aunque la adopción masiva de esta tecnología aún enfrenta obstáculos, Enerchain demostró el potencial de un mercado energético más eficiente, transparente y dinámico.

A pesar de que el proyecto tuvo una duración limitada y no incluyó a consumidores residenciales, estableció un precedente valioso para futuras iniciativas en el sector energético que buscan integrar Blockchain. La experiencia obtenida en Enerchain no solo inspiró otros desarrollos en el ámbito energético, sino que también destacó el poder transformador de Blockchain en industrias altamente reguladas, mostrando las posibilidades para un futuro con mercados más flexibles y menos dependientes de intermediarios.

Análisis DAFO

Fortalezas
Pionero en Blockchain para Energía Mayorista: fue uno de los primeros proyectos en explorar el uso de blockchain para la negociación de energía en el mercado mayorista europeo. Esta posición pionera le ha permitido establecer una base sólida y ser un referente en el sector.
Red participación amplia: cuenta con la participación de más de 40 empresas energéticas europeas, incluyendo líderes del sector como E.ON y Vattenfall. Esta amplia colaboración asegura una fuerte base de usuarios iniciales y facilita la interoperabilidad entre los mercados energéticos de diferentes países.
Demostración práctica: ha completado con éxito pruebas piloto que demostraron la viabilidad técnica del comercio de energía peer-to-peer (P2P) utilizando blockchain. Esto reduce la incertidumbre tecnológica y aumenta la confianza en la implementación real.
Optimización de costos y eficiencia: al eliminar intermediarios tradicionales en la negociación de energía, Enerchain reduce costos operativos y tiempos de transacción, lo que ofrece una ventaja competitiva en un mercado altamente regulado y costoso.
Flexibilidad y adaptabilidad: la arquitectura del sistema Enerchain es modular y adaptable, permitiendo su escalado a diferentes mercados y su integración con sistemas existentes de negociación energética.
Debilidades
Retos de estandarización: lograr una estandarización técnica y operativa entre empresas con diferentes infraestructuras y procesos internos es complejo. Esta falta de estandarización podría limitar la interoperabilidad y retrasar la adopción a gran escala.
Escalabilidad: se ha demostrado ser viable en pruebas piloto, su capacidad para escalar a un mercado totalmente operativo y cubrir una gran cantidad de transacciones en tiempo real aún está por comprobarse. El sistema debe demostrar que puede manejar volúmenes altos sin sacrificar la velocidad ni la eficiencia.
Dependencia de la colaboración de actores: el éxito de Enerchain depende en gran medida de la colaboración continua entre las empresas participantes. La falta de consenso o de compromiso por parte de alguno de los actores clave podría retrasar el desarrollo o incluso comprometer el proyecto.
Regulación y Conformidad Legal: Enerchain debe navegar por un entorno regulatorio complejo y en evolución en cada país participante, lo que puede crear incertidumbre y dificultades en la implementación.
Oportunidades
Alineación con Políticas Energéticas Europeas: a Unión Europea está impulsando políticas que fomentan la descentralización y la digitalización del mercado energético. Enerchain está bien posicionado para beneficiarse de estos marcos regulatorios que promueven la innovación y la sostenibilidad.
Expansión a nuevos mercados: tiene la oportunidad de expandirse a nuevos mercados energéticos dentro y fuera de Europa, especialmente en regiones donde el comercio de energía P2P aún no está plenamente desarrollado, capitalizando su experiencia y la red de socios ya establecida.
Amenazas
Competencia: otros proyectos de blockchain en el sector energético, como Power Ledger o WePower, están avanzando rápidamente y podrían captar una mayor cuota de mercado o atraer a los mismos socios que Enerchain.

Barreras regulatorias: regulaciones energéticas varían significativamente entre países europeos. Cualquier cambio desfavorable en las políticas regulatorias podría limitar la operación de Enerchain o imponer costos adicionales de cumplimiento.

Riesgos de seguridad y privacidad: como plataforma basada en blockchain, Enerchain debe gestionar adecuadamente los riesgos relacionados con la seguridad cibernética y la privacidad de los datos de transacciones, especialmente en un sector tan crítico como el energético.

Estudio de aplicabilidad en España

España tiene un mercado mayorista de electricidad organizado (OMIE) en el que los actores del mercado compran y venden energía. Un proyecto como Enerchain, que permite la negociación bilateral directa (OTC) utilizando blockchain, podría integrarse en este entorno, pero necesitaría alinearse con las regulaciones existentes sobre el mercado mayorista y las operaciones OTC.

La Unión Europea, a través de su paquete de energía limpia, promueve un mercado energético más descentralizado y participativo. Enerchain encaja bien con esta visión, pero su adopción en España dependerá de cómo las autoridades reguladoras, como la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC).

- **Sugerencias de implementación.**

Primero de todo debemos tener en cuenta que mientras que Enerchain se centra en la negociación entre grandes actores del mercado mayorista, muchos proyectos en España se enfocan en consumidores residenciales y pequeñas comunidades. Por ello, este tipo de proyectos tiene el potencial para ayudar a escalar las transacciones P2P más allá de las comunidades locales, conectando grandes productores y consumidores a través de una plataforma segura y transparente. Esto podría complementar las iniciativas de comunidades energéticas, creando un ecosistema energético más interconectado y eficiente en España.

La implementación de Enerchain en España necesitará el apoyo de actores clave dentro del mercado energético español, así como de reguladores.

Por un lado, CNMC y OMIE serían socios cruciales para garantizar que la adopción de la plataforma blockchain cumpla con las normativas y no afecte negativamente la estabilidad del mercado. También sería fundamental coordinar con REE para integrar la tecnología en la infraestructura de la red.

Por otro lado, Enerchain podría comenzar con un proyecto piloto dirigido a grandes consumidores y productores de energía que ya participan en el mercado mayorista español. Empresas como Endesa, Iberdrola o Naturgy podrían ser actores estratégicos para validar la tecnología en un entorno controlado. Este primer paso serviría para evaluar la funcionalidad, eficiencia y seguridad de la plataforma blockchain.

Tras una prueba piloto exitosa, la plataforma podría ampliarse gradualmente para incluir más participantes del mercado, ajustando la normativa si es necesario.

Finalmente, un proyecto de estas características podría integrarse plenamente en el mercado mayorista, permitiendo que todos los actores realicen transacciones P2P descentralizadas.

6.7.2 LO3 Brooklyn Microgrid, EE. UU.

Contexto

En Estados Unidos, se está promoviendo la reestructuración de la red eléctrica, motivada en gran medida por la necesidad de mejorar la fiabilidad en situaciones críticas, como desastres naturales. Un ejemplo significativo es la tormenta Sandy en 2012, que dañó severamente las líneas de transmisión, provocando apagones masivos y dejando a muchos residentes sin acceso a electricidad. Además, la creciente integración de energías renovables está ejerciendo presión sobre la red eléctrica existente.

Estos factores, junto con las pérdidas inherentes a la transmisión de energía, han dado lugar a proyectos innovadores como el discutido en esta sección. Dichos proyectos permiten, entre otras cosas:

- Una mejor integración de las energías renovables.
- La capacidad de autoabastecimiento en situaciones críticas cuando la red eléctrica general no puede suministrar suficiente energía.
- La participación de los consumidores y prosumidores en el mercado energético.

Uno de los proyectos más destacados en este contexto es Brooklyn Microgrid, desarrollado por la empresa estadounidense LO3 Energy. Este proyecto, lanzado en 2016, se encuentra en el distrito de Brooklyn, Nueva York, y fue diseñado como una red eléctrica comunitaria que facilita el intercambio de energía entre vecinos utilizando tecnología blockchain.

Brooklyn fue elegido para este proyecto por dos razones clave. En primer lugar, la fuerte cohesión comunitaria, donde los residentes apoyan iniciativas locales como "local buying" (compra local). En segundo lugar, el área seleccionada es particularmente vulnerable a fallos en la red eléctrica, dado que la capacidad eléctrica de la zona está cerca de su límite debido a su alto nivel de utilización.

El proyecto se desarrolló en un entorno urbano con acceso limitado a fuentes de energía renovable, como la solar, pero donde la necesidad de modelos energéticos más sostenibles es crítica. Además, en 2016, el contexto económico y tecnológico favorecía la integración de tecnologías disruptivas como blockchain en sectores tradicionales. LO3 Energy aprovechó esta oportunidad para presentar un modelo de microgrid basado en blockchain que puede ser replicado en otras ciudades.

Objetivos

El proyecto Brooklyn Microgrid tenía como principales objetivos:

- Descentralización del suministro energético: desarrollar un sistema donde los residentes locales pudieran generar, vender y comprar energía de manera directa entre ellos, eliminando la necesidad de intermediarios tradicionales.
- Fomento de energías renovables: crear incentivos económicos para la producción y consumo de energía solar dentro de la comunidad, con el objetivo de disminuir la dependencia de fuentes de energía no renovables.
- Resiliencia y autosuficiencia energética: dotar a la comunidad de Brooklyn de una red energética robusta y autónoma, capaz de seguir operando incluso en situaciones de emergencia.

- Modelo de energía democrática: implementar un sistema en el que los consumidores tengan mayor control sobre su suministro de energía y los precios, promoviendo un acceso más equitativo y participativo al mercado energético.

Desarrollo y resultados

En 2015, la empresa LO3 Energy lanzó un proyecto piloto en alianza con Siemens Digital Grids, que se encargó de desarrollar los sistemas de control, y la start-up Next47, que aportó la financiación, el asesoramiento y la experiencia técnica. El proyecto, conocido como Brooklyn Microgrid, despegó en abril de 2016. Actualmente, se está trabajando en el marco regulatorio, ya que las transacciones P2P (peer-to-peer) de energía, sin la intervención de un servicio público, aún no están cubiertas por la normativa vigente.

El proyecto conecta a 60 instalaciones y a unos 500 usuarios que pueden comercializar energía de manera P2P. Cada usuario cuenta con un dispositivo llamado TAG-e (TransActive Grid elements), desarrollado por Siemens. Este dispositivo, también conocido como medidor inteligente o Smart Meter, se conecta tanto a la microgrid física como al entorno digital basado en blockchain, registrando datos de consumo y transacciones, que luego son enviados a la blockchain. Además, se integra con una aplicación móvil que permite a los consumidores establecer sus condiciones para la compraventa de energía y acceder a sus datos energéticos, otorgando un control sin precedentes sobre su suministro eléctrico.

Las transacciones energéticas se gestionan a través de Smart Contracts en una plataforma blockchain privada denominada TransActive Grid, donde se utilizan unos tokens llamados Exergy (XRG) como unidad de valor. La microgrid opera en paralelo con la red eléctrica general, permitiendo que en modo conectado se pueda vender el exceso de energía o comprar en caso de déficit. También puede operar en modo aislado, proporcionando resiliencia en situaciones de emergencia.

El sistema de mercado empleado en la Brooklyn Microgrid se asemeja al de las subastas. Los prosumidores (productores y consumidores de energía) ofertan sus excedentes de energía a un precio determinado. Los consumidores, por su parte, presentan sus ofertas de compra basadas en la cantidad de energía que desean y el precio que están dispuestos a pagar. En la susodicha apuesta los consumidores se ordenan colocándose en primer lugar quién esté dispuesto a pagar mayor cantidad de energía. El precio de la última persona de dicha lista será el precio de liquidación de mercado y de comienzo del próximo ciclo de venta de energía. Aun así, el mecanismo de mercado se estudia y analiza según la eficiencia que pueda tener en el lugar de aplicación y, por lo tanto, queda sujeto a posibles cambios. Este proyecto, que comenzó como un piloto con un grupo reducido de hogares y negocios en Brooklyn, ha ganado atención internacional como un ejemplo de cómo las microgrids y la tecnología blockchain pueden transformar el sector energético.

Brooklyn Microgrid sigue en desarrollo, habiéndose expandido desde su lanzamiento. A medida que avanza la tecnología blockchain y se incrementa la demanda de soluciones energéticas sostenibles. Este tipo de proyectos están destinados a crecer y a replicarse en otras comunidades urbanas y rurales.

El desarrollo de la Brooklyn Microgrid continúa y ha sentado las bases para futuras microgrids en otras partes del mundo. Este proyecto es un referente en la aplicación de la tecnología blockchain en sistemas energéticos descentralizados y ha sido ampliamente

estudiado y discutido por su potencial transformador. Combina innovación tecnológica con una visión de sostenibilidad y autonomía comunitaria, demostrando cómo las microgrids basadas en blockchain pueden ser un componente esencial en el futuro energético global.

Análisis DAFO

Fortalezas
Innovación en la comunidad: permite a los residentes locales generar su propia energía a través de paneles solares y vender el exceso a sus vecinos mediante una plataforma basada en blockchain. Este enfoque comunitario fortalece la independencia energética y la sostenibilidad.
Transparencia: utilizando blockchain, todas las transacciones de energía son transparentes y verificables, lo que genera confianza entre los participantes y asegura un registro claro de la compraventa de energía.
Modelo descentralizado: fomenta un modelo descentralizado en el que los consumidores pueden convertirse en "prosumidores" (productores y consumidores) de energía, desafiando la dependencia de las grandes empresas de servicios públicos.
Independencia energética: mejora la resiliencia local al permitir que la comunidad opere de forma autónoma durante cortes de energía a través de un microgrid que puede funcionar en modo "isla", desconectado de la red principal.
Debilidades
Escala limitada: actualmente, Brooklyn Microgrid opera en una escala relativamente pequeña, lo que limita su impacto y su capacidad para ser replicado rápidamente en otras comunidades o a gran escala.
Desafíos regulatorios: enfrenta desafíos regulatorios, ya que la legislación sobre microgrids y el comercio P2P de energía no está completamente desarrollada o adaptada para este tipo de iniciativas. Las regulaciones actuales en Nueva York y en otras áreas pueden no estar alineadas con este modelo innovador.
Dependencia de la infraestructura: la viabilidad del proyecto depende en gran medida de la infraestructura local, como la disponibilidad de paneles solares en los hogares y la disposición de los residentes a participar. Si la adopción no es suficientemente alta, el modelo puede no ser sostenible.
Costos iniciales: los costos de instalación de la infraestructura necesaria para participar en la microgrid, como paneles solares y sistemas de almacenamiento, pueden ser prohibitivos para algunos residentes, limitando la participación.
Oportunidades
Demanda energía verde: a medida que aumenta la concienciación sobre el cambio climático, la demanda de energía renovable y soluciones sostenibles está en auge. Brooklyn Microgrid puede capitalizar esta tendencia ofreciendo una alternativa verde y local.
Expansión: el éxito del proyecto en Brooklyn podría servir como un modelo replicable para otras comunidades urbanas y rurales, tanto en los EE. UU. como en otras partes del mundo.
Integración de tecnologías emergentes: con el paso del tiempo y tras cierta evolución, la plataforma podría integrar tecnologías adicionales como almacenamiento de energía a gran escala (baterías) o vehículos eléctricos, creando un ecosistema energético más dinámico y adaptable.

Amenazas
Competencia con redes eléctricas tradicionales: las grandes empresas de servicios públicos podrían ver proyectos como Brooklyn Microgrid como una amenaza a su modelo de negocio y ejercer presión para frenar su expansión mediante influencias regulatorias o económicas.
Evolución regulatoria comprometida: cambios en la legislación o la aparición de nuevas normativas desfavorables podrían limitar la operación de microgrids comunitarias, especialmente en cuanto a la comercialización directa de energía entre vecinos.
Incertidumbre económica: fluctuaciones en los precios de la energía o crisis económicas, podrían afectar la viabilidad financiera del proyecto y reducir la disposición de los residentes a invertir en tecnologías necesarias para participar.

Estudio de aplicabilidad en España

La legislación permite la creación de comunidades energéticas que pueden compartir la energía generada a nivel local, lo que es esencial para la implementación de un mercado P2P. Aunque no se menciona explícitamente en la normativa española, las microgrids encajan dentro del marco regulatorio actual si se integran como comunidades energéticas. No obstante, la legislación necesitaría evolucionar para dar más claridad sobre la operación autónoma de estas redes, especialmente en relación con la conexión y desconexión de la red general.

- **Sugerencias de implementación.**

Para que Brooklyn Microgrid tenga éxito en España, es esencial identificar los mercados adecuados para la implementación inicial. Al igual que en Brooklyn, las zonas urbanas en España con alta densidad poblacional, como Madrid o Barcelona, podrían ser ideales para un piloto inicial. Estas áreas tienen una gran cantidad de consumidores potenciales y están más abiertas a adoptar tecnologías innovadoras.

Por otro lado, también tenemos Cataluña, País Vasco y Andalucía son regiones con iniciativas de comunidades energéticas activas que podrían ser adecuadas para la implementación de microgrids locales utilizando blockchain.

Lanzar un proyecto piloto en una comunidad urbana o periurbana podría ser una estrategia efectiva para probar el modelo y ajustar su implementación antes de una expansión a nivel nacional. Un barrio o comunidad con un interés activo en energías renovables y sostenibilidad, como los barrios ecológicos en Valencia o Vitoria, y lanzar un proyecto piloto que integre microgrids y blockchain. Estos pilotos proporcionarían datos valiosos sobre la viabilidad económica y técnica del modelo.

Mostrar casos de éxito y realizar pilotos con resultados tangibles en términos de ahorro y sostenibilidad ayudará a generar confianza y atraer la participación de más usuarios.

Un desafío clave será asegurar la interoperabilidad entre la microgrid y la red general gestionada por Red Eléctrica de España (REE). La microgrid debería poder operar de manera autónoma en situaciones específicas, como cortes de energía, y reconectarse a la red principal cuando sea necesario. Brooklyn Microgrid se enfoca en la creación de microgrids que pueden operar de manera autónoma, incluso desconectadas de la red principal si es

necesario. En contraste, las iniciativas en España aún dependen principalmente de la red general para garantizar la estabilidad y el suministro continuo de energía.

Hay que tener en cuenta que el modelo de Brooklyn Microgrid está diseñado para funcionar en barrios urbanos densos, mientras que muchos proyectos en España están más orientados hacia comunidades rurales o pequeñas, lo que podría requerir ajustes para un entorno urbano. Por tanto, integrar el enfoque de este tipo de proyectos con otros proyectos ya existentes podría acelerar la adopción del modelo P2P en áreas urbanas.

6.7.3 RENEW Nexus, Australia

Contexto

Australia se destaca como líder en la adopción de energías renovables. Un estudio de la Universidad Nacional de Australia estima que el sector eléctrico del país podría ser 100% renovable para 2030. El apoyo público a las energías limpias, junto con los ahorros asociados, ha impulsado la adopción masiva de sistemas de autoconsumo en los hogares australianos. Angus Taylor, ministro de Energía, afirmó que, con la continua caída de los precios de la energía fuera de la red, será más económico suministrar energía de esta manera que invertir en nuevas líneas de transmisión.

Un ejemplo notable de innovación es el proyecto RENEW Nexus, liderado por Power Ledger, una empresa australiana que utiliza la tecnología Blockchain en la industria energética. Este proyecto cuenta con la colaboración de socios clave como Curtin University y Western Power. Según el director general de Power Ledger, Australia, por su gran tamaño, está cerca de un punto de inflexión donde resulta más rentable instalar sistemas de almacenamiento solar y microrredes en áreas regionales que mantener la infraestructura de la red a largas distancias.

El proyecto se implementó en la ciudad de Fremantle, reconocida por su liderazgo en sostenibilidad y por iniciativas como el "City's One Planet Action Plan", que promueve la neutralidad de carbono y el uso de energía renovable.

Objetivos

- Crear una plataforma descentralizada que permita a los usuarios intercambiar energía renovable directamente, utilizando tecnología blockchain.
- Evaluar la viabilidad de las microrredes energéticas para mejorar la gestión y distribución de la energía, reduciendo la dependencia de la red eléctrica central.
- Ofrecer una solución segura y transparente para la gestión y comercio de energía, con el fin de reducir los costos operativos.
- Promover la adopción de energías renovables, facilitando la participación directa de consumidores y productores en un mercado energético local.

Desarrollo y resultados

Este proyecto constituye un ecosistema que, además de enfocarse en la energía, incorpora un sistema de gestión del agua. Los roles de los participantes son los siguientes:

- Universidad de Curtin: Encargada de la coordinación general del proyecto, actúa como el Application Host de blockchain y gestiona los datos mediante Big Data para coordinar el sistema en su totalidad. También proporciona vehículos eléctricos (EV) y puntos de recarga.
- Ciudad de Fremantle: Contribuye al proyecto con una granja solar de 8 hectáreas que generará aproximadamente 5 MW de energía.
- LANDCORP: Colabora en la instalación de sistemas de energía y agua en las viviendas residenciales.
- Universidad de Murdoch: Se ocupa de la gestión del sistema de aguas.
- Synergy: Empresa dedicada a la generación y comercialización de energía, que ayuda a equilibrar la red al comprar el excedente de energía de la comunidad y vender la cantidad necesaria para cubrir el déficit energético.
- Power Ledger: Desarrolla y mantiene la tecnología blockchain utilizada en el proyecto.

El proyecto RENEW Nexus en Fremantle, Australia, se desarrolló en tres fases principales, cada una centrada en aplicar la tecnología blockchain y la energía distribuida para innovar en la gestión energética.

Primera fase es Freo 48. Esta fase incluyó a 48 viviendas en Fremantle que usaron la plataforma blockchain de Power Ledger para intercambiar energía solar de manera peer-to-peer (P2P). La energía provenía de paneles solares instalados en los techos de las casas. Aprovechando la red eléctrica existente y colaborando con el minorista local de energía, el software de Power Ledger permitió a los hogares comprar y vender su excedente de energía solar casi en tiempo real. Los participantes podían monitorear su consumo eléctrico cada 30 minutos, brindándoles un control detallado sobre su uso de energía. Además, el diseño del ensayo permitía una expansión fácil mediante la instalación de medidores inteligentes, sin necesidad de grandes inversiones adicionales. Se evaluó cómo los patrones de consumo podrían cambiar y si surgirían actividades de arbitraje energético, donde los consumidores ajustan su demanda para aprovechar las fluctuaciones de precios, aliviando así la carga sobre la red.

La segunda fase se llamó Loco 1. En esta fase se modeló una planta de energía virtual (VPP) residencial. Aunque no fue un ensayo en vivo, se desarrolló un modelo matemático para simular y analizar los posibles beneficios económicos para los prosumidores (quienes producen y consumen energía) que instalan baterías en sus hogares y participan en una VPP. Este estudio evaluó cómo las baterías distribuidas podrían integrarse en la red eléctrica para mejorar su estabilidad y eficiencia. También se examinó el tiempo de recuperación de la inversión en baterías y cómo este podría reducirse al utilizar colectivamente las baterías a través de una plataforma VPP habilitada por blockchain, permitiendo a los prosumidores contribuir al equilibrio de la red y mejorar la resiliencia del sistema energético.

Según el estudio, se determinó que la recuperación de la inversión en baterías se podría lograr en un plazo aproximado de siete años. Este cálculo se basa en las condiciones del mercado energético en Australia, incluyendo los costos de las baterías, el ahorro en facturas de electricidad y las tarifas de inyección de energía excedente a la red.

Tercera fase - Loco 2: fue ejecutado en East Village, otra comunidad en Fremantle. Esta fase se centra en una microgrid que incluye un sistema de batería compartida de 670 kWh. Este sistema permite que 36 viviendas intercambien el excedente de energía entre ellas utilizando la batería como medio de almacenamiento y distribución. Este modelo de microgrid optimiza el uso de energía a nivel local, asegurando que el excedente de energía solar producido por algunas viviendas pueda ser utilizado por otras, creando un ciclo de consumo y producción altamente eficiente.

En resumen, el proyecto RENEW Nexus demuestra cómo la integración de blockchain, energías renovables, baterías y modelos de mercado P2P puede transformar el sector energético, creando redes locales más resilientes y eficientes. La escalabilidad del sistema y su capacidad de adaptación a diferentes contextos subraya su potencial para convertirse en un estándar en futuras comunidades energéticas.

Análisis DAFO

Fortalezas
Enfoque en energías renovables: se centra en el comercio de energía renovable, alineándose con la creciente demanda de soluciones sostenibles y reduciendo la dependencia de fuentes de energía no renovables. La participación de hogares con paneles solares y baterías refuerza la producción y consumo local de energía verde.
Transacciones eficientes: la plataforma blockchain utilizada en Renew Nexus facilita transacciones directas entre los participantes, eliminando la necesidad de intermediarios, lo que reduce costos y tiempos de transacción. Además, blockchain garantiza transparencia y trazabilidad en cada transacción.
Apoyo Gubernamental: el proyecto cuenta con el apoyo del gobierno australiano y la colaboración de la Universidad de Curtin, lo que le otorga legitimidad y acceso a recursos académicos y tecnológicos. Este respaldo institucional es clave para su desarrollo y éxito a largo plazo.
Capacidad de desconexión de la red principal: mejora la resiliencia energética de la comunidad al permitir que los hogares operen de manera independiente de la red principal durante cortes de energía, utilizando la energía almacenada en sus baterías.
Debilidades
Escalabilidad local: aunque el proyecto es innovador, su implementación inicial está limitada a una comunidad específica en Fremantle.
Dependencia de la infraestructura: la participación en Renew Nexus requiere que los hogares tengan paneles solares y baterías, lo cual implica un alto costo de entrada. Esto puede limitar la participación y el impacto general del proyecto si la adopción no es suficientemente alta.
Complejidad técnica: la integración de múltiples tecnologías, desde blockchain hasta sistemas de energía y almacenamiento, presenta desafíos técnicos complejos. La interoperabilidad entre estas tecnologías es crucial para el funcionamiento fluido del sistema.
Oportunidades
Expansión: existe una oportunidad significativa para expandir este modelo a otras comunidades en Australia y a nivel internacional. Las lecciones aprendidas en Fremantle pueden ser aplicadas en nuevos contextos.

Integración con políticas nacionales: el gobierno australiano está promoviendo políticas que favorecen la adopción de energías renovables y tecnologías emergentes. Renew Nexus podría alinearse con estas políticas para acceder a subsidios, incentivos y apoyo adicional.
Demanda de energía sostenible: la creciente conciencia sobre el cambio climático y la demanda de soluciones sostenibles crean un entorno favorable para proyectos como Renew Nexus, que puede aprovechar esta tendencia para atraer más usuarios y socios.
Amenazas
Competencia: otros proyectos de comercio de energía P2P y blockchain podrían surgir, tanto a nivel local como internacional. La competencia podría desviar la atención y los recursos hacia alternativas que ofrezcan mejores funcionalidades o menor costo.
Incertidumbre regulatoria: aunque Australia ha mostrado apoyo a las energías renovables, la regulación sobre blockchain y comercio P2P de energía aún está en desarrollo. Cambios desfavorables en la legislación podrían limitar la operación o viabilidad del proyecto.
Volatilidad de los precios energéticos: fluctuaciones en los precios de la energía a nivel nacional e internacional pueden afectar la economía del comercio P2P, haciendo que el modelo de Renew Nexus sea menos atractivo para los participantes si los precios caen drásticamente.

Estudio de aplicabilidad en España

La legislación española también ha avanzado en la regulación de microgrids, permitiendo la creación de comunidades energéticas locales que pueden compartir y gestionar su propia producción de energía. Esto es crucial para la implementación de un modelo como RENEW Nexus, que depende de la existencia de microgrids activas.

Aunque España tiene un marco regulatorio favorable para la energía renovable y el autoconsumo, la adopción del modelo de este proyecto requeriría ajustar ciertos aspectos regulatorios relacionados con la gestión de datos, la monetización de energía P2P y la integración con el operador del sistema eléctrico.

- **Sugerencias de implementación.**

Al igual que en Australia, se ha demostrado que una estrategia efectiva sería comenzar con proyectos piloto en regiones rurales o semiaisladas en España, como zonas de Galicia, Castilla y León o Extremadura. Estas áreas suelen tener una alta disponibilidad de recursos renovables (solar, eólica) y pueden beneficiarse enormemente de la implementación de microgrids que mejoren su autonomía energética.

Por otro lado, otro enfoque sería que en España existe un creciente número de comunidades energéticas que buscan gestionar su propio suministro de energía. Implementar RENEW Nexus en comunidades activas, como aquellas en Cataluña o el País Vasco, sería un primer paso para probar el modelo de energía peer-to-peer (P2P) y la gestión de datos mediante blockchain.

Mientras que las iniciativas locales suelen centrarse en la promoción del autoconsumo compartido o la venta directa de energía renovable, RENEW Nexus se enfoca en la creación de microgrids completamente autónomas y descentralizadas, lo que podría ofrecer un mayor

control a las comunidades sobre su suministro energético. Además, va más allá al integrar blockchain no solo para la transacción de energía, sino también para la gestión avanzada de datos energéticos, lo que podría ofrecer un nivel adicional de optimización y eficiencia que aún no se ha explorado en profundidad en los proyectos locales. Es así como un proyecto con estas características podría integrarse con iniciativas locales como Pylon Network para combinar la trazabilidad y transparencia de la energía con la gestión de microgrids. Esto podría mejorar la eficiencia operativa y expandir las capacidades de ambas plataformas.

Por tanto, un paso inicial sería lanzar proyectos piloto en pequeñas comunidades que ya están interesadas en la energía renovable y la sostenibilidad, como las aldeas ecológicas en Andalucía o comunidades de autoconsumo en Navarra. Estos pilotos podrían demostrar la viabilidad del modelo RENEW Nexus y proporcionar datos para ajustar la plataforma a las necesidades y desafíos específicos del mercado español.

Si este primer paso tiene resultados positivos, podría expandirse gradualmente a áreas urbanas y periurbanas, así como a otras regiones donde la energía renovable y las microgrids tengan un alto potencial de adopción. El escalado podría incluir la incorporación de nuevos actores y la expansión de la red P2P a consumidores y pequeños productores de energía.

Un desafío clave para este proyecto en España será la integración de microgrids con la red eléctrica nacional. Trabajar en estrecha colaboración con Red Eléctrica de España (REE) para asegurar la interoperabilidad entre las microgrids y la red principal será crucial. Esto permitirá que las comunidades puedan vender excedentes de energía a la red o recibir energía cuando sea necesario, asegurando una operación eficiente y estable.

6.7.4 WePOWER, Lituania

Contexto

En los últimos años, la industria de la energía renovable ha experimentado un crecimiento destacado, con numerosos países comprometidos en reducir su huella de carbono y avanzar hacia un futuro energético más sostenible. No obstante, uno de los principales obstáculos que enfrentan los productores de energía renovable es asegurar la financiación para sus proyectos.

WePower, una innovadora startup tecnológica con sede en Lituania, se ha propuesto resolver varios problemas fundamentales del mercado energético tradicional, como la falta de transparencia, la dificultad para acceder a los mercados de energía verde y los elevados costos de intermediación. Con el incremento de la demanda de energía renovable, ha surgido una necesidad crítica de mejorar la gestión, comercialización y seguimiento de esta energía. El objetivo del proyecto es no solo mejorar la eficiencia del mercado, sino también democratizar el acceso a la energía limpia. Para ello, WePower ha desarrollado una plataforma de comercio de energía verde que permite a los productores emitir tokens energéticos, facilitando la recaudación de capital directamente de los inversores.

Objetivos

El proyecto WePower fue concebido para investigar cómo la tecnología blockchain puede transformar el comercio de energía renovable. Sus principales objetivos son:

- Digitalización y tokenización de la energía verde: establecer un mercado en el que la energía renovable se represente mediante tokens digitales, permitiendo así la compra y venta directa entre productores y consumidores.
- Transparencia y trazabilidad: garantizar que los consumidores puedan rastrear el origen de su energía, verificando que esta proviene de fuentes renovables.
- Acceso simplificado al mercado: ofrecer a pequeños y medianos productores de energía renovable una forma más directa y equitativa de acceder a los mercados energéticos, eliminando la necesidad de intermediarios.

Desarrollo y resultados

El proyecto WePower transformó la producción de energía renovable al utilizar contratos inteligentes basados en blockchain. Esta tecnología permitió descomponer la energía en unidades más pequeñas, tokenizándolas, con cada token representando una cantidad específica de energía verde, como 1 kWh. Estos tokens podían ser adquiridos directamente por consumidores y empresas, proporcionando mayor flexibilidad y permitiendo a los productores financiar sus proyectos directamente desde el mercado, sin la necesidad de intermediarios tradicionales.

Los tokens, que representan la energía generada por proyectos renovables, se compran y venden en la plataforma de WePower, basada en Ethereum, ofreciendo una alternativa de financiación y permitiendo a los inversores apoyar la energía sostenible. Además, WePower simplificó los acuerdos de compra de energía (PPA) al conectar directamente a compradores y productores. Los compradores pueden asegurar energía verde a precios anticipados y bajo el mercado, eligiendo la cantidad que desean contratar. Esta plataforma elimina intermediarios, reduce costos y optimiza el proceso de PPA, facilitando el acceso a la energía verde para empresas e individuos.

En 2018, WePower llevó a cabo un proyecto piloto en Lituania, donde tokenizó 39 millones de kWh de energía verde. Se desplegaron aproximadamente 26,000 contratos inteligentes para gestionar la producción y venta de energía por parte de productores locales. Este piloto no solo validó la eficacia de la tecnología, sino que también demostró la capacidad de la plataforma para manejar grandes volúmenes de transacciones con alta eficiencia.

El éxito obtenido en Lituania permitió a WePower expandir su modelo a nuevos mercados. En colaboración con Elewit, WePower evaluó la implementación de su plataforma en mercados importantes de Europa, buscando ofrecer acceso directo a pequeños productores y mejorar la trazabilidad y transparencia de la energía verde. La expansión atrajo a numerosos productores de energía renovable que buscaban diversificar sus fuentes de financiación y permitió a los consumidores adquirir energía renovable a precios competitivos, apoyando así la transición hacia un sistema energético más sostenible.

El proyecto WePower ha demostrado cómo la tecnología blockchain puede transformar el sector energético al proporcionar acceso directo al mercado para los productores de energía renovable, incrementar la transparencia y reducir los costos. La tokenización de la energía verde y la plataforma de comercio digital han abierto nuevas posibilidades tanto para productores como para consumidores.

Análisis DAFO

Fortalezas
Innovación: WePower permite a los productores de energía renovable financiar sus proyectos a través de la venta anticipada de su energía en forma de contratos tokenizados en blockchain. Esto proporciona un mecanismo innovador para asegurar financiamiento sin necesidad de intermediarios tradicionales.
Operación Multinacional: ha demostrado su capacidad para operar en diferentes entornos regulatorios y económicos, como Lituania y España. Su experiencia en estos dos mercados le otorga flexibilidad y conocimientos valiosos para expandirse a otros países.
Pionero en tokenización de energía verde: es uno de los primeros en implementar la tokenización de energía a gran escala. En Lituania, WePower tokenizó con éxito 1 GWh de energía, convirtiendo la producción de energía en tokens comerciales en la plataforma blockchain. Este logro posiciona a WePower como un referente en la innovación energética digital.
Alianzas estratégicas: cuenta con alianzas con operadores de red y empresas energéticas en Lituania y otros países de Europa. Estas colaboraciones fortalecen su posición en el mercado y facilitan la integración de la tecnología blockchain en las infraestructuras energéticas existentes.
Debilidades
Adopción inicial limitada: la adopción inicial ha sido limitada, especialmente entre los pequeños productores y consumidores de energía. Convencer a un número grande de usuarios para que adopten esta nueva forma de financiar y comercializar energía sigue siendo un desafío.
Complejidad para usuarios no técnicos: la tecnología blockchain y la tokenización de la energía son conceptos complejos que pueden ser difíciles de entender para los usuarios no técnicos. Esta complejidad puede limitar la adopción, ya que requiere que los participantes comprendan cómo funciona la plataforma y los contratos inteligentes.
Desafíos regulatorios: WePower opera en un entorno regulatorio que aún está en desarrollo para tecnologías blockchain. La necesidad de cumplir con normativas diferentes en cada país puede ralentizar la expansión y requerir recursos adicionales para asegurar el cumplimiento normativo.
Dependencia de Ethereum: depende de la red Ethereum para operar, lo que puede ser problemático debido a las fluctuaciones en los costos de transacción y la escalabilidad de la red. En momentos de alta congestión, las tarifas de gas en Ethereum pueden elevarse, afectando la rentabilidad de las transacciones.
Oportunidades
Expansión global: el éxito en Lituania y la implementación en países de Europa abren la puerta a la expansión hacia otros mercados en Europa y más allá. Países con un alto compromiso con la energía renovable, como Alemania o los países nórdicos, podrían ser mercados ideales para la expansión.
Nuevos productos financieros: puede desarrollar nuevos productos financieros basados en la tokenización de energía, como podrían ser contratos de futuros, lo que diversificaría sus ofertas y atraería a una base más amplia de inversores.
Integración con energía descentralizada: a medida que el mercado avanza hacia modelos energéticos descentralizados, WePower podría integrarse con microgrids y soluciones de energía distribuida, potenciando su plataforma como un facilitador clave en la nueva economía energética.

Amenazas
<p>Competencia: otros proyectos como Power Ledger están explorando el uso de blockchain en el sector energético, lo que podría intensificar la competencia. Diferenciarse y mantener una ventaja competitiva será crucial para el éxito a largo plazo de WePower.</p>
<p>Volatilidad de las criptomonedas: la plataforma depende del ecosistema de criptomonedas, que es conocido por su volatilidad. Los cambios abruptos en el valor de Ethereum o las fluctuaciones en el mercado criptográfico en general podrían impactar negativamente la operativa y la percepción del proyecto.</p>

Estudio de aplicabilidad en España

La implementación de WePower en España requeriría garantizar la interoperabilidad con los sistemas energéticos existentes y resolver problemas de escalabilidad asociados con la tecnología blockchain. La plataforma debería ser capaz de manejar un alto volumen de transacciones energéticas, manteniendo la eficiencia y la seguridad.

La emisión de tokens energéticos y su comercialización a través de contratos inteligentes es compatible con la normativa española, siempre y cuando se cumplan las exigencias legales relacionadas con los contratos y la compraventa de energía. Sin embargo, la supervisión de estos tokens como instrumentos financieros podría requerir un registro ante la CNMV, lo que agrega una capa de complejidad regulatoria.

- **Sugerencias de implementación:**

Primeramente, debemos conocer la segmentación del mercado a la que nos dirigimos. Los principales clientes para una empresa como WePower en España serían grandes consumidores de energía (empresas, industrias) que buscan asegurar el suministro de energía renovable a largo plazo. También se podría explorar la participación de cooperativas de energía y comunidades energéticas que busquen mayor transparencia y control sobre la energía que consumen.

Para facilitar la adopción del proyecto, sería esencial establecer alianzas con compañías eléctricas españolas, comercializadoras de energía verde, y cooperativas de energía. Estas alianzas ayudarían a integrar WePower en el ecosistema energético local y aumentarían la confianza en la plataforma. La colaboración con entidades financieras para la custodia y administración de tokens energéticos, y con reguladores para asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes, sería crucial para el éxito del proyecto.

Hay que tener en cuenta que este proyecto se distingue por su uso de tokens energéticos, que representan un contrato de compra de energía futura. Este enfoque de tokenización es una innovación que actualmente no se ha implementado de manera significativa en proyectos locales españoles. Por tanto, podría colaborar con proyectos existentes locales para ofrecerles este mecanismo de tokens energéticos con la finalidad de realizar un movimiento transparente y automatizado a la hora de compra de energía renovable.

La implementación podría comenzar con proyectos piloto en regiones con alta producción de energía renovable, como Andalucía o Castilla-La Mancha. Estos proyectos ayudarían a adaptar la plataforma a las necesidades específicas del mercado español y a resolver cualquier barrera técnica o regulatoria antes de una expansión a mayor escala.

Otro punto clave sería la educación del mercado sobre las ventajas de los contratos inteligentes y los tokens energéticos. Esto incluiría talleres, seminarios y campañas de marketing dirigidas tanto a grandes consumidores como a usuarios residenciales interesados en participar en mercados energéticos descentralizados.

6.7.5 Sun Exchange, Sudáfrica

Contexto

Sudáfrica enfrenta una serie de desafíos en su sector energético, caracterizados por una alta dependencia de los combustibles fósiles, especialmente el carbón, una infraestructura obsoleta y problemas significativos en la fiabilidad del suministro eléctrico. Estos problemas se intensifican debido a la creciente demanda energética en un país en desarrollo.

Como uno de los mayores productores y consumidores de carbón del mundo, Sudáfrica obtiene gran parte de su energía de este recurso. Esto no solo tiene graves consecuencias ambientales, sino que también expone al país a la volatilidad de los precios y a la presión internacional para reducir las emisiones de carbono.

La ineficiencia en la generación y distribución de energía ha llevado a frecuentes apagones en Sudáfrica. Eskom, la empresa nacional de electricidad, ha tenido dificultades para mantener su infraestructura, resultando en un aumento de las interrupciones de suministro. Esta situación afecta tanto a los hogares como a las empresas, dificultando el crecimiento económico y la estabilidad social.

A pesar de estos problemas, Sudáfrica está en proceso de transición hacia fuentes de energía más sostenibles. El gobierno ha iniciado la promoción de energías renovables a través de iniciativas como el programa de productores independientes de energía renovable. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías ha sido lenta debido a la falta de infraestructura adecuada y la complejidad en la financiación de proyectos de energía renovable a gran escala.

En este contexto, con una urgente necesidad de diversificar sus fuentes de energía y asegurar un suministro eléctrico fiable, Sudáfrica representa una oportunidad ideal para evaluar la viabilidad de la plataforma Sun Exchange, ofreciendo una solución innovadora en un entorno que demanda urgentemente mejoras en el sector energético.

Objetivos

- Ampliar el acceso a la energía solar: Sun Exchange permite a los inversores adquirir fracciones de propiedad en paneles solares, los cuales se alquilan a escuelas, empresas y comunidades en Sudáfrica.
- Descentralizar la financiación de energía limpia: utilizando tecnología blockchain, Sun Exchange facilita que personas de todo el mundo participen en la inversión en energía solar, eliminando intermediarios y simplificando el proceso de inversión.

- Generar ingresos sostenibles: Los inversores ganan criptomonedas a partir de la venta de la energía producida por los paneles solares en los que invierten, estableciendo un modelo de negocio que se mantiene de manera autónoma.

Desarrollo y resultados

Sun Exchange ofrece un enfoque revolucionario para financiar y distribuir energía solar en África, combinando la tecnología solar con blockchain para crear un sistema accesible a nivel global. Este modelo permite a cualquier persona, sin importar su ubicación, participar en la transición hacia una energía limpia y, a su vez, obtener beneficios financieros.

La propuesta de Sun Exchange es tanto simple como eficaz. La plataforma permite a los usuarios adquirir fracciones de paneles solares que se instalan en ubicaciones específicas en Sudáfrica. Estos paneles, una vez comprados, se alquilan a escuelas, empresas y otras entidades que necesitan energía renovable a bajo costo. Los ingresos generados por la venta de esta energía se distribuyen a los inversores en forma de criptomonedas.

Para invertir, los usuarios se registran en la plataforma de Sun Exchange, eligen un proyecto solar y compran una parte de los paneles solares. Cada parte corresponde a una celda solar que forma parte de un panel más grande instalado en un lugar determinado, como una escuela o una empresa.

Una vez en funcionamiento, los paneles solares generan electricidad que se vende a la entidad arrendataria. Los ingresos de la venta de esta electricidad se reparten mensualmente entre los inversores, en función del número de celdas solares que posean.

La tecnología blockchain garantiza la transparencia y seguridad de las transacciones, mientras que las criptomonedas facilitan los pagos internacionales, eliminando barreras geográficas y reduciendo los costos de las transferencias tradicionales.

Hasta la fecha, Sun Exchange ha llevado a cabo con éxito numerosos proyectos en Sudáfrica, como la electrificación solar de escuelas, comunidades rurales y empresas. La plataforma ha atraído a miles de inversores de más de 160 países, democratizando el acceso a la inversión en energía solar.

Este proyecto no solo impulsa la sostenibilidad ambiental, sino que también fomenta la justicia económica al ofrecer a comunidades desfavorecidas acceso a energía limpia y asequible. Sun Exchange es un ejemplo destacado de cómo las nuevas tecnologías pueden transformar el sector energético, abordando simultáneamente desafíos sociales, económicos y ambientales.

Análisis DAFO

Fortalezas
Modelo de negocio disruptivo: este modelo de microfinanciación permite una participación inclusiva en la energía solar, incluso para aquellos que no pueden instalar paneles solares en sus propias propiedades.
Accesibilidad Global: a través de su plataforma digital, Sun Exchange permite a inversores de todo el mundo participar en proyectos solares en Sudáfrica. Los inversores pueden recibir pagos en moneda local o en Bitcoin, lo que añade flexibilidad y atrae a una base de usuarios más amplia.

<p>Impacto social y económico: no solo promueve la energía renovable, sino que también apoya el desarrollo económico local. Al financiar proyectos solares para escuelas y comunidades rurales, el proyecto contribuye a reducir los costos energéticos y aumenta el acceso a energía limpia en áreas desatendidas.</p>
<p>Debilidades</p>
<p>Dependencia de inversores internacionales: aunque la participación global es una fortaleza, también significa que Sun Exchange depende en gran medida de inversores internacionales. Factores como la fluctuación de divisas, cambios en la regulación financiera global o una percepción negativa del mercado sudafricano pueden afectar la captación de fondos.</p>
<p>Riesgos en la infraestructura energética: Sudáfrica enfrenta desafíos significativos en su infraestructura energética, incluida la inestabilidad de la red eléctrica y los frecuentes cortes de energía. Estos factores pueden afectar la producción de energía solar y, por lo tanto, los ingresos esperados por los inversores.</p>
<p>Oportunidades</p>
<p>Creciente demanda de energía renovable en África: países africanos están viendo una creciente demanda de energía renovable debido a la necesidad de diversificar sus fuentes energéticas y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Sun Exchange está bien posicionado para capitalizar esta tendencia y expandir sus operaciones en toda la región.</p>
<p>Ampliación en nuevos sectores: podría expandirse a otros sectores como la agricultura, la manufactura y el comercio minorista, donde la energía solar puede ofrecer ahorros significativos y una mayor resiliencia energética.</p>
<p>Desarrollo de nuevos productos financieros: podría diversificar su modelo ofreciendo nuevos productos financieros como bonos solares o contratos a largo plazo. Esto podría atraer a un perfil más amplio de inversores.</p>
<p>Amenazas</p>
<p>Competencia con otros proyectos solares: a medida que el mercado de energía solar crece, Sun Exchange enfrenta competencia de otros modelos de financiamiento solar, tanto dentro de Sudáfrica como globalmente. La diferenciación y la innovación continuas serán esenciales para mantener su ventaja competitiva.</p>
<p>Volatilidad del mercado de criptomonedas: dado que los pagos a inversores pueden realizarse en Bitcoin, la volatilidad del mercado de criptomonedas representa un riesgo significativo. Fluctuaciones drásticas en el valor de Bitcoin podrían afectar la rentabilidad percibida por los inversores y su disposición a participar.</p>

Estudio de aplicabilidad en España

El modelo de microfinanciación solar de Sun Exchange se podría adaptar al entorno español, siempre que se cumpla con las normativas relativas a la producción y venta de energía solar y se apliquen las regulaciones adecuadas en materia de criptomonedas. La necesidad de registrar y supervisar las transacciones en blockchain, y asegurar que los pagos en criptomonedas cumplan con las normativas financieras, sería crucial.

En cuanto a la energía solar, España es uno de los países europeos con mayor capacidad de generación solar debido a su clima favorable. Esto ofrece una excelente oportunidad para proyectos solares descentralizados. Además, la red eléctrica española es robusta y está bien interconectada, lo que facilita la integración de nuevas instalaciones solares.

- **Sugerencias de implementación:**

Para empezar, una idea similar implementada en España podría adaptarse su modelo para atraer a pequeños y medianos inversores españoles, en lugar de enfocar directamente hacia inversores internacionales. Este enfoque alinearía el proyecto con las iniciativas locales de generación distribuida y autoconsumo colectivo, que están creciendo en popularidad. La creación de alianzas con entidades reguladoras y tecnológicas para llevar a cabo proyectos piloto podría ser una estrategia efectiva para validar el modelo en un entorno controlado antes de escalarlo a nivel nacional.

Podría crear sinergias con proyectos locales como las comunidades energéticas, permitiendo la micropropiedad de celdas solares dentro de un contexto comunitario. Esto integraría el enfoque global del proyecto con las necesidades y la identidad locales, y colaborando con plataformas locales que ya tienen la confianza del público podría facilitar la integración del modelo de Sun Exchange en España.

Como añadido, la plataforma también podría ofrecer pagos en euros además de criptomonedas para mitigar la desconfianza hacia la volatilidad de las criptomonedas y adaptarse mejor a las expectativas del mercado español.

Por otra parte, podrían lanzarse campañas de educación y concienciación con el fin de informar al público sobre los beneficios de la tokenización de energía y la micropropiedad. Esto podría involucrar a universidades, centros de investigación y organizaciones medioambientales que quisieran unirse.

7. Comparativa del Mercado Eléctrico Español Actual contra la Integración de Blockchain

Tras indagar tanto en el mercado eléctrico español como en la tecnología Blockchain, y más concretamente aplicada en las transacciones energéticas, a continuación, presento una comparativa entre el actual sistema de funcionamiento del mercado eléctrico español y un supuesto mercado basado en blockchain, seguido de cómo podría cambiar la factura de la luz y de qué manera se vería reflejado el cambio.

7.1 Transparencia

Mercado eléctrico actual

En el mercado actual, la transparencia es moderada. Los consumidores y las empresas pueden acceder a cierta información, como los precios del mercado mayorista y detalles de su consumo, pero gran parte de las transacciones y decisiones operativas se manejan de manera centralizada y a menudo opaca. La complejidad del sistema y la intermediación de varias entidades (comercializadoras, distribuidoras, y operadores de mercado) pueden dificultar que los consumidores finales comprendan completamente cómo se determinan sus facturas o cómo se distribuye la energía. Además, los consumidores tienen un acceso limitado a la información en tiempo real, lo que les impide tomar decisiones informadas sobre su consumo.

Mercado eléctrico basado en Blockchain.

En este caso La transparencia sería significativamente mayor. Con blockchain, todas las transacciones de energía se registran en un libro mayor distribuido, accesible para todas las partes interesadas. Esto incluye detalles sobre la producción, distribución, y consumo de energía, así como los precios pagados en cada transacción. Los consumidores podrían rastrear exactamente de dónde proviene la energía que utilizan (por ejemplo, si es de fuentes renovables o fósiles) y verificar que los precios que pagan están justificados por las condiciones del mercado.

7.2 Trazabilidad del Origen de la Energía

Mercado eléctrico actual

Actualmente, los consumidores pueden acceder a cierta información sobre el origen de la energía a través de certificados como las Garantías de Origen (GdO) en el caso de la energía renovable. Sin embargo, este sistema no es totalmente transparente ni fácil de verificar por parte del consumidor medio. Además, el proceso de certificación y verificación puede ser lento y costoso.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

Con blockchain, la trazabilidad sería completa y en tiempo real. Cada unidad de energía podría ser etiquetada digitalmente con su origen, permitiendo a los consumidores verificar instantáneamente si proviene de fuentes renovables, fósiles, o nucleares. Esto facilitaría la toma de decisiones informadas por parte de los consumidores, permitiéndoles elegir conscientemente qué tipo de energía desean consumir. También podría incentivar a los productores de energía a invertir más en energías renovables, ya que los consumidores podrían preferir fuentes limpias y estar dispuestos a pagar más por ellas.

7.3 Eficiencia de Operaciones

Mercado eléctrico actual

El mercado actual es eficiente en términos de operatividad, pero depende en gran medida de procesos burocráticos y la intervención de varios intermediarios (como operadores de mercado, distribuidores, y comercializadores). Estos intermediarios se encargan de la verificación y liquidación de las transacciones, lo cual añade complejidad y costos al sistema. Aunque el mercado mayorista es capaz de manejar grandes volúmenes de transacciones diarias, los procesos pueden ser lentos y los costos administrativos son elevados.

Los consumidores finales no ven estos costos directamente, pero los pagan indirectamente a través de tarifas más altas.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

La tecnología blockchain permitiría automatizar y simplificar muchos de estos procesos. Los contratos inteligentes (smart contracts) podrían ejecutar automáticamente transacciones basadas en condiciones preestablecidas, eliminando la necesidad de intermediarios y reduciendo el tiempo y los costos asociados.

Esto podría traducirse en menores costos administrativos, que a su vez podrían reflejarse en tarifas más bajas para los consumidores.

7.4 Descentralización

Mercado eléctrico actual

El mercado eléctrico español es bastante centralizado, con grandes compañías energéticas que dominan la producción y distribución de energía. Los consumidores tienen poco control sobre el origen de su energía y sobre cómo interactúan con el mercado. La compra y venta de energía se realiza en mercados mayoristas y minoristas centralizados, con poca o ninguna participación directa de los consumidores individuales.

Esta centralización limita la capacidad de los consumidores para participar activamente en el mercado, por ejemplo, vendiendo su propia energía excedente (como la generada por paneles solares) o eligiendo proveedores específicos.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

Blockchain permitiría un mercado mucho más descentralizado. Los consumidores podrían interactuar directamente entre ellos (por ejemplo, a través de plataformas de comercio P2P), comprando y vendiendo energía sin necesidad de intermediarios. Los pequeños productores de energía (como los hogares con paneles solares) podrían vender su excedente directamente a otros consumidores o al mercado, creando una red más distribuida de producción y consumo.

7.5 Seguridad

Mercado eléctrico actual

La seguridad en el mercado actual depende en gran medida de sistemas centralizados, que, aunque robustos, pueden ser vulnerables a ciberataques o fallos sistémicos. Los datos y operaciones están concentrados en unos pocos puntos críticos, lo que significa que un ataque exitoso podría tener consecuencias graves para todo el sistema. La centralización aumenta el riesgo de ciberataques dirigidos a puntos específicos del sistema.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

Blockchain mejora la seguridad a través de su naturaleza descentralizada. Los datos se almacenan en múltiples nodos, y cada transacción es validada y registrada de manera inmutable. Esto hace que sea extremadamente difícil para los atacantes manipular los datos o interrumpir el sistema, ya que tendrían que comprometer simultáneamente la mayoría de los nodos de la red.

7.6 Interacción con el Consumidor

Mercado eléctrico actual

Los consumidores tienen un rol pasivo en el mercado actual. La mayoría simplemente pagan sus facturas y no participan activamente en el comercio de energía ni en la toma de decisiones sobre el origen o la gestión de su consumo energético. Las opciones de participación se limitan a cambiar de proveedor o a implementar medidas de eficiencia energética en sus hogares. Esta pasividad limita las posibilidades de los consumidores para influir en el mercado y aprovechar oportunidades de ahorro o de ingresos adicionales.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

En un sistema basado en blockchain, los consumidores podrían participar de manera mucho más activa en el mercado. Podrían, por ejemplo, comprar y vender energía directamente a través de plataformas P2P, ajustar su consumo en respuesta a señales de precios en tiempo real, o participar en comunidades energéticas locales que gestionen colectivamente su producción y consumo de energía. Además, el empoderamiento de los consumidores podría acelerar la adopción de tecnologías renovables y de autogeneración, contribuyendo a un sistema energético más sostenible.

7.7 Regulación

Mercado eléctrico actual

El mercado eléctrico español está fuertemente regulado. Existen múltiples organismos reguladores, como la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), que supervisan las actividades del mercado, establecen normas y garantizan la competencia leal. Las leyes y regulaciones cubren aspectos como la fijación de tarifas, la gestión de la red, y la protección del consumidor.

Mercado eléctrico basado en Blockchain

La implementación de blockchain en el mercado requeriría una adaptación significativa del marco regulatorio existente. Sería necesario desarrollar nuevas normas y regulaciones que aborden la descentralización y la automatización que blockchain implica. Los contratos inteligentes y las transacciones descentralizadas necesitan ser regulados para garantizar la legalidad y la seguridad. Además, la supervisión del mercado tendría que evolucionar para abarcar nuevas formas de interacción y transacciones.

7.8 Posibles Impactos en la Factura de la Luz

Desglose

La factura incluiría un desglose detallado de cada transacción energética que ha contribuido a la energía consumida, con información verificable sobre los precios en tiempo real y el origen de cada kilovatio-hora (kWh) consumido. Esto podría dar lugar a una mayor comprensión y control sobre el consumo de energía por parte del usuario.

Reducción de costes por intermediarios

Los ahorros generados por la reducción de intermediarios podrían trasladarse a los consumidores en forma de facturas más bajas. Esto se reflejaría en una reducción del coste total de la energía o en la eliminación de ciertos cargos que actualmente se incluyen en la factura.

Mecanismos de incentivos dinámicos

Actualmente, los consumidores pueden beneficiarse de tarifas dinámicas o discriminación horaria, donde el precio de la energía varía en función del momento del día. Con el blockchain, sería posible implementar sistemas más sofisticados de precios dinámicos en tiempo real, basados en la oferta y la demanda instantánea de energía.

La factura de la luz podría incluir nuevas secciones que muestren los ingresos generados por la venta de energía excedente o los ahorros obtenidos por ajustar el consumo en respuesta a precios dinámicos. También podría mostrar recomendaciones automáticas para optimizar el consumo según las tendencias de precios del mercado.

Simplificación de la facturación

La facturación actual implica una serie de procesos administrativos que incluyen la recolección de datos de consumo, la aplicación de tarifas, y la emisión de facturas, todo gestionado por múltiples entidades. Este proceso puede ser complejo y propenso a errores.

Blockchain podría simplificar y automatizar el proceso de facturación. Los datos de consumo podrían registrarse automáticamente en la blockchain, y los contratos inteligentes podrían calcular y emitir facturas de manera inmediata y precisa, sin la intervención manual de diversas entidades. Con ello, la factura sería más sencilla, con menos errores y potencialmente emitida en tiempo real, facilitando la gestión del consumo por parte del usuario y reduciendo los tiempos de espera para la facturación.

8. Conclusiones

El mercado eléctrico español, aunque bien estructurado y regulado, enfrenta desafíos significativos en su transición hacia un modelo más sostenible y eficiente. Actualmente, se caracteriza por una centralización de la producción, donde la mayor parte de la energía proviene de grandes centrales, tanto renovables como convencionales. Aunque ha habido avances en la integración de energías renovables, la producción sigue siendo mayoritariamente centralizada, lo que plantea dificultades en la gestión de la intermitencia y la adecuación de la red para manejar la distribución descentralizada. Además, el mercado mayorista, basado en un sistema de casación, presenta limitaciones en cuanto a flexibilidad y transparencia, y es susceptible a fluctuaciones que pueden no reflejar el costo real de generación o las condiciones del mercado.

En este contexto, el comercio de energía en España está evolucionando, impulsado por la creciente participación de prosumidores, la digitalización y nuevas formas de transacción energética. Los consumidores están empezando a convertirse en productores de energía, especialmente a través de instalaciones de autoconsumo fotovoltaico, lo que introduce nuevas dinámicas en la oferta y la demanda que el mercado eléctrico tradicional no estaba diseñado para manejar de manera óptima. A pesar de la existencia de contratos a largo plazo

para asegurar precios y suministro, la falta de transparencia y flexibilidad limita el potencial del mercado. Además, el sistema actual ofrece poca flexibilidad para adaptarse rápidamente a cambios en la oferta y demanda o para facilitar transacciones más dinámicas entre pequeños actores, restringiendo así la innovación en modelos de negocio energético.

La tecnología blockchain, aplicada al sector energético, tiene el potencial de abordar muchas de estas limitaciones, ofreciendo beneficios significativos. Blockchain puede habilitar un mercado más descentralizado, donde los prosumidores puedan comercializar energía directamente entre sí, reduciendo la necesidad de intermediarios y aumentando la eficiencia del mercado. La transparencia y trazabilidad inherentes a blockchain permitirían a los consumidores verificar el origen de la energía que compran, aumentando la confianza y facilitando el cumplimiento regulatorio. Además, la automatización de transacciones a través de contratos inteligentes podría reducir costos operativos y eliminar procesos manuales propensos a errores.

No obstante, la implementación de blockchain en el mercado eléctrico español presenta desafíos, especialmente en cuanto a la adaptación del marco regulatorio, la infraestructura y la escalabilidad de las soluciones blockchain. Es esencial que la regulación española evolucione para integrar esta tecnología, garantizando transacciones legales y seguras, mientras se fomenta la innovación. La infraestructura eléctrica existente también debe modernizarse para soportar un sistema más descentralizado y permitir la comunicación en tiempo real y una integración fluida de las tecnologías blockchain. Además, es crucial que los consumidores comprendan y adopten esta tecnología, lo que requiere estrategias efectivas de educación y concienciación.

Uno de los impactos más tangibles de la implementación de blockchain en el mercado eléctrico sería en la factura de la luz. Los consumidores podrían beneficiarse de una reducción de costos gracias a la automatización de procesos y la eliminación de intermediarios, lo que se traduciría en facturas más bajas. La transparencia también mejoraría, con un desglose más claro de los costos en la factura, incluyendo la procedencia de la energía y los costos asociados a su producción y distribución. Los consumidores podrían elegir directamente la fuente de energía que desean consumir, influyendo en su impacto ambiental y apoyando fuentes renovables. Además, con sistemas de tokenización, podrían recibir incentivos por comportamientos sostenibles, como la reducción del consumo en horas pico o la inversión en proyectos de energías renovables, lo que se reflejaría en descuentos o recompensas en su factura.

En conclusión, un mercado eléctrico español basado en blockchain ofrecería mejoras sustanciales en términos de eficiencia, transparencia y empoderamiento del consumidor. Sin embargo, la transición a este modelo requiere superar desafíos regulatorios, técnicos y de adopción. España, como líder en la transición energética, tiene la oportunidad de explorar e implementar soluciones basadas en blockchain para modernizar su mercado eléctrico, asegurando que los beneficios de esta tecnología se traduzcan en mejoras reales para los consumidores y el sistema en su conjunto. La implementación de blockchain podría representar un cambio transformador, llevando al país un paso más allá en su transición hacia un sistema energético más sostenible, eficiente y justo, beneficiando tanto a los consumidores como al sistema en general.

Referencias y Webgrafía

- [1] A. Hahn, R. Singh, C. -C. Liu and S. Chen, "Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions," *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT.2017.8086092.
- Energía y Sociedad. (s.f.). *Historia de la electricidad en España*. Recuperado de <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/1-2-historia-de-la-electricidad-en-espana/> [Consultado: 2 de julio de 2024].
- CYE Energía. (s.f.). *¿Cómo funciona el mercado eléctrico español?* . Recuperado de <https://cye-energia.com/como-funciona-el-mercado-electrico-espanol/> [Consultado: 4 de julio de 2024].
- Red Eléctrica de España (REE). (s.f.). *Red Eléctrica de España - Datos y análisis del sistema eléctrico*. Recuperado de <https://www.ree.es/es/datos> [Consultado: 6 de julio de 2024].
- DEXMA. (s.f.). *El mix energético en España: el crecimiento de las energías renovables*. Recuperado de <https://www.dexma.com/es/blog-es/el-mix-energetico-en-espana-el-crecimiento-de-las-energias-renovables/> [Consultado: 9 de julio de 2024].
- Red Eléctrica de España (REE). (s.f.). *Red Eléctrica de España - Informe del sistema eléctrico*. Recuperado de <https://www.sistemaelectrico-ree.es> [Consultado: 11 de julio de 2024].
- Fundación Endesa. (s.f.). *Fundación Endesa - Recursos educativos sobre energía*. Recuperado de <https://www.fundacionendesa.org/> [Consultado: 16 de julio de 2024].
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Distribuidores y comercializadores de energía eléctrica en España*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/energia/energia-electrica/electricidad/distribuidores/comercializadores.html> [Consultado: 18 de julio de 2024].
- Fernández, D. (s.f.). *Los 4 modelos de mercado eléctrico*. Recuperado de <https://danifernandez.org/articulo/los-4-modelos-mercado-electrico/> [Consultado: 21 de julio de 2024].
- Plena Energía. (s.f.). *Mercado mayorista: Pool*. Recuperado de <https://www.plena-energia.com/post/mercado-mayorista-pool> [Consultado: 21 de julio de 2024].
- OMIE. (s.f.). *Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE)*. Recuperado de <https://www.omie.es/> [Consultado: 22 de julio de 2024].
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2009). *Economía Industrial: Revista de Economía Industrial*. Recuperado de <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/364/39.pdf> [Consultado: 30 de julio de 2024].
- Energía y Sociedad. (s.f.). *Formación de precios en el mercado mayorista diario de electricidad*. Recuperado de <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/6-1->

[formacion-de-precios-en-el-mercado-mayorista-diario-de-electricidad/](#) [Consultado: 2 de agosto de 2024].

Energías Renovables. (2024). *El precio de la luz en horas*. Recuperado de <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/el-precio-de-la-luz-en-horas-20240521> [Consultado: 4 de agosto de 2024].

IBM. (s.f.). *Blockchain*. Recuperado de [https://www.ibm.com/es-es/topics/blockchain#:~
=Blockchain%20es%20un%20libro%20de%20derechos%20de%20autor%2C%20marca](https://www.ibm.com/es-es/topics/blockchain#:~:q=Blockchain%20es%20un%20libro%20de%20derechos%20de%20autor%2C%20marca) [Consultado: 8 de agosto de 2024].

IEBS. (s.f.). *Blockchain: La cadena de bloques que revoluciona el sector financiero*. Recuperado de <https://www.iebschool.com/blog/blockchain-cadena-bloques-revoluciona-sector-financiero-finanzas/> [Consultado: 8 de agosto de 2024].

Finect. (s.f.). *¿Qué es blockchain y criptomonedas? Guía fácil*. Recuperado de <https://www.finect.com/usuario/vanesamatesanz/articulos/que-blockchain-criptomonedas-guia-facil> [Consultado: 8 de agosto de 2024].

Cuerva Energía. (s.f.). *Blockchain en el sector eléctrico*. Recuperado de <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/innovacion/blockchain-en-el-sector-electrico/> [Consultado: 10 de agosto de 2024].

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Recuperado de <https://www.wikipedia.org/>

OpenAI. (2024). *ChatGPT*. Recuperado de <https://www.openai.com/chatgpt>

YouTube. (s.f.). *YouTube*. Recuperado de <https://www.youtube.com/>