



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE UNA PLATAFORMA DE COMPRAVENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: Carmen Domínguez Sanz

Director: Jaime Navarro Ocon

Madrid

Julio de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título *Análisis de una plataforma de compraventa de energía eléctrica* en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2021/2022 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Carmen Domínguez

Fdo.: Carmen Domínguez Sanz

Fecha: 16/07/2022

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

J. Navarro

Fdo.: Jaime Navarro Ocon

Fecha: 16/07/2022

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Carmen Domínguez Sanz

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

“Análisis de una plataforma de compraventa de energía eléctrica”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

ACCEPTA

Carmen Domínguez

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

[illegible]



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE UNA PLATAFORMA DE COMPRAVENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: Carmen Domínguez Sanz

Director: Jaime Navarro Ocon

Madrid

2022

ANÁLISIS DE UNA PLATAFORMA DE COMPRAVENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: Domínguez Sanz, Carmen

Director: Navarro Ocon, Jaime

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

En los últimos años, el sector energético está experimentando muchos cambios debido a la necesidad de crear un mundo más sostenible. Se está viendo como está evolucionando hacia la descentralización, la electrificación, la descarbonización y la digitalización. Diversos organismos se han propuesto objetivos a corto, medio y largo plazo para paliar los efectos que tiene la industria en el cambio climático y en las emisiones de gases contaminantes y gases de efecto invernadero.

Con este objetivo surgen proyectos que buscan lidiar, al menor coste posible y manteniendo un nivel de calidad y seguridad de suministro energético, con el marco actual del sector energético en el que: la red está adquiriendo gran complejidad, los consumidores y los prosumidores están tomando un papel más activo en el sistema, están surgiendo nuevas tecnologías para el almacenamiento de energía y el papel de las energías renovables cada vez es más importante.

Además, el sistema se encuentra en un momento en el que el crecimiento de la potencia instalada de autoconsumo fotovoltaico está batiendo récords. Incluso en el año 2020, a pesar del Covid-19, la capacidad instalada aumentó en un 30% con respecto al año anterior. Instalándose ese año 596 MW y llegando a alcanzar los 1.539 MW de potencia acumulados. Los valores del 2021 no aparecen en la gráfica que se muestra a continuación, pero según datos de la UNEF (Unión Española Fotovoltaica) se instalaron ese año 1.203 MW. Es decir, la capacidad aumentó en un 102% con respecto al 2020, alcanzando en el 2021 los 2.742 MW instalados. Además, de los 1.203 MW de potencia el 32% pertenece al sector doméstico.

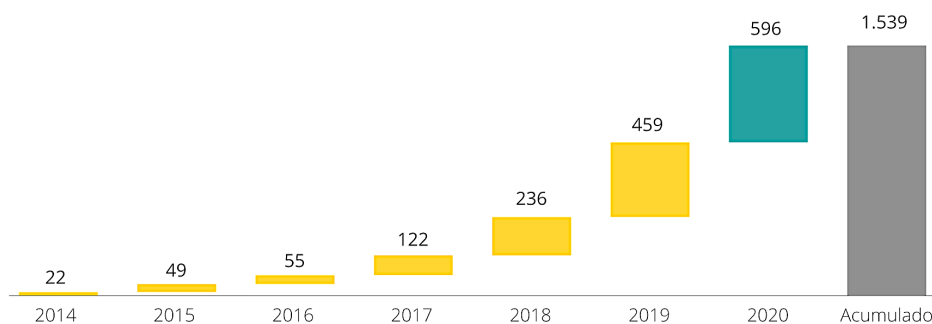


Figura 1: Potencia instalada (MW) de autoconsumo fotovoltaico en España [1]

En este contexto nacen los mercados de energía P2P como una herramienta para integrar las fuentes de generación distribuida, como las instalaciones de autoconsumo fotovoltaico, en el sistema. En estos mercados los vecinos pueden comercializar energía producida localmente por fuentes de origen renovable a precios acordados por la comunidad. Estas iniciativas todavía se enfrentan a muchos retos, pero ofrecen numerosas oportunidades para el sistema energético.

El principal objetivo de este proyecto es estudiar distintos proyectos basados en mercados de energía P2P que utilizan tecnología blockchain. Con el objetivo de poner en común los resultados y las conclusiones de todos los casos de estudio, y poder responder a preguntas sobre:

- La aceptación de estos mercados y el comportamiento de sus participantes.
- Los retos técnicos que plantean.
- Los mecanismos de mercado y de fijación de precios que utilizan.
- Su papel en la integración de los recursos de generación distribuida.
- Su papel en el control de los flujos de energía inversos en la red.
- Su papel en la gestión activa de la demanda.
- El papel que tiene la tecnología blockchain en estos mercados.

2. Metodología

Los proyectos estudiados en este trabajo son mercados de energía P2P que utilizan tecnología blockchain para el intercambio de energía entre sus participantes. En la actualidad, existen diversas iniciativas de este tipo alrededor de todo el mundo. Por eso, antes de empezar a leer información y escribir, hubo que seleccionar los casos que se iban a evaluar. Y antes de esto, hubo que diseñar que estrategia se iba a seguir tanto para seleccionar los proyectos como para realizar el estudio.

Para llevar a cabo el estudio de casos hizo falta una serie de tareas previas:

- I. Diseñar los criterios para seleccionar los proyectos:** Con la finalidad de seguir un procedimiento a la hora de elegir los casos de estudio, y no elegirlos de manera aleatoria se diseñaron unos criterios. Para definirlos, primero, fue necesario leer varios informes sobre distintos proyectos con el objetivo de determinar cuáles eran los aspectos más relevantes que debían ser tomados en cuenta para la investigación. Finalmente, los proyectos se seleccionaron en base a: la tecnología empleada por las plataformas, el grado de madurez del proyecto, su ubicación, la compañía desarrolladora y la información publicada.
- II. Recopilar información:** Este trabajo parte de la información recopilada a través de informes, Whitepapers, Business whitepapers, LinkedIn, etc. Por eso, ha sido especialmente importante tener en cuenta la fiabilidad de las fuentes y utilizar bases de datos, y páginas web en las que se pudiera confiar.
- III. Seleccionar los proyectos:** Una vez determinados los criterios y recopilada la información hubo que seleccionar los casos objeto de estudio. Para ello, primero hubo que identificar los criterios definidos en los diferentes proyectos para eliminar aquellos que no los cumplieran. Y así, finalmente, elegir de entre todos los que los cumplieran aquellos más diversos que enriquecieran el proyecto.

IV. Diseñar el estudio de casos: Otra tarea importante durante el proyecto ha sido diseñar el estudio de casos. Ya que sería la definición del estudio y su posterior realización lo que, posteriormente, determinarían el éxito del trabajo. Por lo tanto, ha sido clave y ha llevado su tiempo, en especial, leyendo y analizando informes para determinar los aspectos más importantes y diferenciadores de cada proyecto. Finalmente, el estudio se ha estructurado de la siguiente manera: Introducción, Contexto global y local del proyecto, Objetivos, Aspectos técnicos, Resumen del Proyecto, Resultados y Conclusiones. Como los proyectos son diferentes entre sí, algunos de ellos cuentan con apartados adicionales que se han considerado importantes e interesantes.

Nombre del Proyecto	
Marco Temporal	
Localización	
Socios y participantes	
Presupuesto	
Contexto Global del Proyecto	
Contexto Local del Proyecto	
Objetivos	
Aspectos técnicos	

Tabla 1: Tabla resumen utilizada en todos los proyectos.

V. Diseñar el análisis DAFO: Por último, se ha llevado a cabo el diseño del análisis DAFO de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades. Se ha decidido realizar este tipo de estudio porque permite evaluar interna y externamente los aspectos positivos y negativos de cada proyecto. Para finalmente, recopilar todos los análisis y definir las conclusiones generales sobre este tipo de iniciativas.

	INTERNO	EXTERNO
NEGATIVO	DEBILIDADES	AMENAZAS
POSITIVO	FORTALEZAS	OPORTUNIDADES

Tabla 2: Matriz DAFO utilizada en todos los proyectos.

Una vez definidos todos los puntos anteriores ya se pudo realizar el estudio de casos y el análisis DAFO de cada proyecto. Y agrupar toda la información recopilada en ambos estudios para determinar unas conclusiones sobre los mercados de energía P2P basados en blockchain.

3. Resultados

El resultado del diseño de la estrategia para elegir los proyectos, la recopilación y lectura de información, y la identificación de los criterios definidos en la literatura de diferentes proyectos fue la selección de los siguientes casos de estudio:

- I. **Caso de Estudio 1:** El primer proyecto es The Brooklyn Microgrid (BMG) que está ubicado en Brooklyn, Nueva York, EEUU. Este proyecto fue elegido por: utilizar tecnología blockchain e IoT, ser uno de los primeros proyectos de este tipo a nivel mundial, localizarse dentro del continente americano y haber sido desarrollado por LO3 Energy, en colaboración con otras entidades, que es una empresa referente en soluciones blockchain.
- II. **Caso de Estudio 2:** El segundo proyecto es RENEW Nexus que se localiza en el pueblo de Fremantle, Perth, Australia. Este proyecto fue seleccionado porque: utiliza tecnología blockchain para llevar a cabo las transacciones energéticas entre vecinos, en él participaron universidades, entidades públicas y privadas de prestigio, se ubica en Australia dentro del continente de Oceanía que es un continente diferente al resto de proyectos lo que aporta información sobre una cultura diferente y porque ha participado en él la compañía de prestigio Power Ledger desarrollando la plataforma blockchain. Power Ledger cuenta con más de 20 proyectos activos en 10 países. Además, este proyecto integra un sistema de gestión de agua al que no se va a hacer referencia en este trabajo.
- III. **Caso de Estudio 3:** El tercer proyecto se denomina Quartierstrom y está ubicado en Wäldstadt, Canton of St. Gallen, Suiza. Este proyecto es de especial interés por: utilizar blockchain para ejecutar el mercado de energía P2P, ser el primer proyecto de este tipo implantado en Suiza, estar ubicado dentro del continente europeo en Suiza que es país perteneciente a la Unión Europea por lo que cuenta con similitudes a España, ser liderado por tres universidades ETH Zürich, Universität St. Gallen y Hochschule Luzern lo que aporta un enfoque de investigación. Además, el proyecto cuenta con un informe [2] de calidad realizado por las tres universidades colaboradoras.
- IV. **Caso de Estudio 4:** El cuarto proyecto es Verv's Hackney Project ubicado en Hackney, Londres, Reino Unido. Este proyecto fue seleccionado, principalmente, por su empresa desarrolladora. A pesar de ubicarse en Europa y no aportar información cultural muy diferente a la del caso de estudio 3, ubicado en Suiza, se ha preferido seleccionar este proyecto y no otros ubicados en Asia u África por los siguientes motivos: haber sido desarrollado por Verv, haber sido implantado en la comunidad de viviendas sociales, y por haber sido el primer proyecto de este tipo realizado en Reino Unido.

4. Conclusiones

Los mercados de energía P2P presentan un gran potencial tanto desde el punto de vista de los expertos, obtenido a través de una gran cantidad de informes y papers, como desde el punto de vista práctico, obtenido tras analizar los cuatro casos de estudio: The Brooklyn Microgrid (BMG), RENeW Nexus, Quartierstrom y Verv's Hackney Project.

La sociedad está acogiendo con gran fuerza este tipo de iniciativas, en especial aquellas personas que cuentan con fuentes de generación en sus hogares y quieren recuperar su inversión lo más rápido posible. El principal motivo de esta acogida es económico. Los participantes están deseando adquirir energía a un menor precio del habitual. Pero, eso sí, siempre que el proceso de compra de energía local sea sencillo y no les lleve mucho tiempo. Los usuarios prefieren no participar en estos proyectos a pesar de ahorrar dinero si eso significa perder comodidad y tener que invertir mucho tiempo interaccionando con la plataforma. Por eso el futuro de estas plataformas tiene que encaminarse hacia la automatización de los procesos.

La participación en estos mercados fomenta la modificando de los patrones de consumo, tanto económicamente, ya que la disponibilidad de energía local se ve reflejada en el precio de la energía, como por la consciencia que toman los usuarios sobre su consumo. Además, los participantes de estas iniciativas entienden que al tomar un rol activo en el sistema tienen una gran responsabilidad ambiental y social.

El comercio P2P tiene un papel clave en la integración de los recursos de generación distribuida. Ya que, según las encuestas, la mayor parte de los consumidores que han participado en los cuatro proyectos están motivados en adquirir paneles solares por los beneficios económicos que obtienen que se traducen en menores tiempos de recuperación de la inversión. Y, porque estos mercados tienen el potencial de resolver los problemas derivados de la masiva inclusión de los DERs en el sistema: flujos de energía inversos, desestabilización de los niveles de tensión, oscilaciones de la frecuencia, etc.

En cuanto a la regulación de los mercados P2P, todavía hay muchos factores que no están contemplados, pero las previsiones son positivas ya que los operadores del sistema muestran su apoyo a este tipo de iniciativas. Con respecto a blockchain, se espera que, con el aumento de las soluciones basadas en esta tecnología, se apliquen regulaciones existentes, o aparezcan nuevas leyes, que podrían ser contrarias a la configuración actual del sistema de smart contracts. Y, como consecuencia las empresas deberían hacer modificaciones en sus plataformas. Blockchain es solo una herramienta que materializa estos mercados, que tiene muchas ventajas, pero que si fuera necesario podría ser sustituida por otras alternativas.

Es todavía muy largo el camino que queda por recorrer en la implantación de estos mercados peer-to-peer, pero de momento se sabe que son muchos más los beneficios que plantea que los inconvenientes.

STUDY OF AN ENERGY TRADING P2P PLATFORM

Author: Domínguez Sanz, Carmen

Supervisor: Navarro Ocon, Jaime

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

1. Introduction

In recent years, the energy sector is experiencing many changes due to the need to build a more sustainable world. The sector is evolving towards decentralization, electrification, decarbonization and digitalization. Many organizations have set short-, medium- and long-term goals to mitigate the effects of industry on climate change and polluting emissions.

Many projects have arisen that seek to deal at the lowest cost and maintaining a quality and secure energy supply, with the current energy framework in which: the grid is acquiring great complexity, consumers and prosumers are taking a more active role in the system, new technologies for energy storage are emerging and the role of renewable energies is becoming more important.

In addition, the growth in installed photovoltaic self-consumption capacity is breaking records. Even in 2020, despite Covid-19, installed capacity increased by 30% over the previous year. That year, 596 MW were installed, reaching 1,539 MW of accumulated power. The values for 2021 do not appear in the graph below but according to data from UNEF (Unión Española Fotovoltaica), 1,203 MW were installed that year. In other words, capacity increased by 102% with respect to 2020, reaching 2,742 MW installed in 2021. In addition, 32% of the 1,203 MW belongs to the domestic sector.

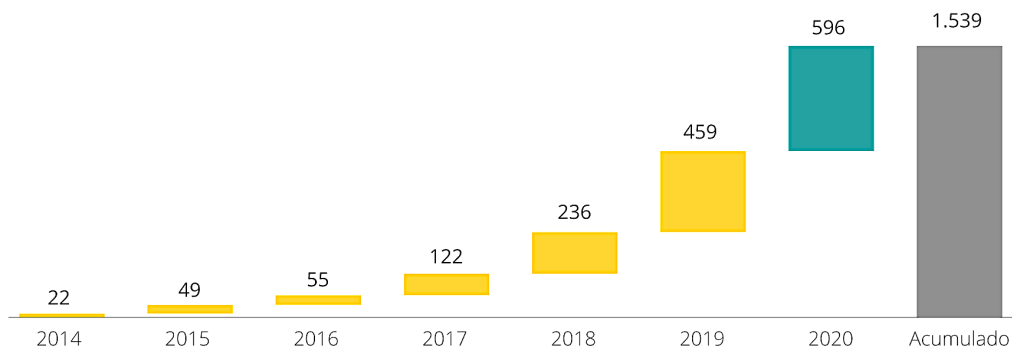


Figure 2: Installed photovoltaic self-consumption capacity (MW) in Spain [1]

In this context, peer-to-peer energy markets are born as a tool to integrate renewable energy sources, such as photovoltaic self-consumption installations, into the system. In these markets, small-scale participants can trade locally produced energy within their community in near real time. These initiatives still face many challenges but also offer many opportunities for the energy system.

The purpose of this project is to study different blockchain-based peer-to-peer energy trading trials. With the aim to collect the results and conclusions of all the projects and be able to answer questions about:

- Perceived benefits for users, participant motivations and user behavior.
- Viability and technical challenges arising.
- Market and pricing mechanisms.
- Their role in the integration of distributed energy resources.
- Their role in dealing with reverse flows of energy in the grid.
- Their role in active demand-side management.
- The role of blockchain in these markets.

2. Methodology

All the trials studied in this document are blockchain-based peer-to-peer energy markets where consumers and prosumers can trade self-produced energy among neighbors. Currently, there are several initiatives of this type around the world. Therefore, firstly, the cases to be evaluated had to be selected. Even before this, it was necessary to design the strategy to be followed both to select the projects and to carry out the study.

To carry out the case study, a series of preliminary tasks were required:

- I. Designing the trial selection criteria:** It was necessary to follow a uniform criterion when choosing the case studies and not choosing them randomly. To define the criteria, it was necessary a first reading of project reports to determine which were the most relevant aspects that should be considered to enrich the study. Finally, the projects were selected based on: the technology used by the platforms, project maturity level, its location, the developer company and the published information.
- II. Gathering information:** This project is based on information gathered through reports, Whitepapers, Business whitepapers, LinkedIn, etc. Therefore, it has been especially important to consider the reliability of the sources.
- III. Selecting the projects:** Once the criteria had been determined and the information gathered, the projects had to be selected. Firstly, it was necessary to identify the criteria in different projects and get rid of those that did not meet the requirements. Then, from among all the remain trials the ones that most enrich the project were selected.
- IV. Designing the case study:** Another important task during the project has been to design the case study. Since the definition of the study and its subsequent implementation are the task that would lead to the success of this project. Therefore, this part has been time consuming especially when reading and analyzing reports to determine the most important aspects of each project.

Finally, the study has been structured as follows: Introduction, Global and local context of the project, Objectives, Technical aspects, Project summary, Results and Conclusions. As all the projects are different from each other, some of them have additional sections that have been considered interesting to include.

Project Name	
Time Frame	
Location	
Partners and Participants	
Budget	
Global Context	
Local Context	
Objectives	
Technical Aspects	

Table 3: Summary table used in all projects

- V. Designing the SWOT analysis:** Last but not least, the SWOT analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats has been designed. It allows to evaluate internally and externally the positive and negative aspects of each project to draw conclusions regarding this type of initiatives.

	INTERNAL	EXTERNAL
N E G A T I V E P O S I T I V E	WEAKNESSES	THREATS
	STRENGTHS	OPPORTUNITIES

Table 4: SWOT Analysis Matrix used in all projects

Once all the above was defined, the case study and the SWOT analysis of each project could be carried out. And group all the information gathered in both studies to determine some conclusions about P2P energy markets based on blockchain.

3. Results

This projects selection has been the result of the designed strategy to choose the projects, the collection and reading of information, and the identification of the criteria defined in the literature.

- I. **Case Study 1:** The first project is The Brooklyn Microgrid (BMG) which is in Brooklyn, New York, USA. This project was chosen for: using blockchain and IoT technology, being one of the first projects of this type worldwide, being located within the American continent and having been developed by LO3 Energy, in collaboration with other entities, which is a benchmark company in blockchain solutions.
- II. **Case Study 2:** The second project is RENEW Nexus which is in the town of Fremantle, Perth, Australia. This project was selected because: it uses blockchain technology to carry out energy transactions between neighbors, it involved universities, prestigious public and private entities, it is in Australia within the continent of Oceania which is a different continent from the rest of the projects which provides information about a different culture and because the prestigious company Power Ledger has participated in it by developing the blockchain platform. Power Ledger has more than 20 active projects in 10 countries. In addition, this project integrates a water management system that will not be referred to in this paper.
- III. **Case Study 3:** The third project is called Quartierstrom and is in Walenstadt, Canton of St. Galle, Switzerland. This project is especially interesting because: it uses blockchain to run the P2P energy market, is the first project of this type in Switzerland, is located within the European Union so the business model may have similarities to the ones developed in Spain, is led by three universities ETH Zurich, Universität St. Gallen and Hochschule Luzern which provides a research approach. In addition, the project has a quality report [2] carried out by the three collaborating universities.
- V. **Case Study 4:** The fourth project is Verv's Hackney Project located in Hackney, London, UK. This project was primarily selected because of its developer company. Although it is in Europe and does not provide different cultural information from case study 3, located in Switzerland, this project was chosen over others located in Asia or Africa for the following reasons: it was developed by Verv, it was implemented in a housing estate, and it was the first blockchain-based peer-to-peer market in the United Kingdom.

5. Conclusions

Peer-to-peer energy trading has great potential both from an expert point of view, obtained through many reports and papers, and from a practical point of view, obtained after analyzing the four case studies: The Brooklyn Microgrid (BMG), RENeW Nexus, Quartierstrom and Verv's Hackney Project.

Society is strongly embracing these types of initiatives, especially those who have generation resources in their homes and want to payback their investment as quickly as possible. The main reason for this acceptance is economic. Participants are willing to acquire energy at a lower price than usual. But, of course, only if the process of buying local energy is simple and does not take too much time. Users prefer not to participate in these projects despite saving money if it means losing convenience and having to spend a lot of time interacting with the platform. That is why the future of these platforms must move towards process automation.

These markets encourage participants to change their consumption patterns, both economically, since the availability of local energy is reflected in the price of energy, as well as by the user's awareness on their consumption. In addition, the participants understand that by taking an active role in the system they have a great environmental and social responsibility.

Peer-to-peer energy trading plays a key role in the integration of distributed energy resources. According to surveys, most of the consumers who have participated in the four projects are motivated to purchase solar panels because of the economic benefits they obtain, which translate into shorter payback times. And, because these markets have the potential to solve the problems derived from the massive inclusion of DERs in the system: reverse power flows, destabilization of voltage levels, frequency oscillations, etc.

Regarding peer-to-peer energy trading regulation, there are still many factors that are not contemplated, but the future seems to be positive as system operators show their support on this type of initiatives. Regarding blockchain, it is expected that, with the increase in blockchain-based solutions, existing regulations will be applied, or new regulations will appear, which may be contrary to the current setup of the smart contracts system. And, therefore, companies should make modifications to their platforms. Blockchain is just a tool that materializes these markets, which has many advantages, but, if necessary, it could be replaced by other alternatives.

There is still a long way to go in the implementation of these peer-to-peer energy trading solutions, but for the moment it is known that they represent many advantages for the energy sector.

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA.....	22
2. ANEXOS.....	99

1. MEMORIA

Índice de la Memoria

1. Introducción.....	27
1.1. Motivación del proyecto	27
1.2. Objetivos del proyecto	28
1.3. Planificación del proyecto	28
1.4. Estructura del documento	29
2. Contexto actual del sector energético	31
2.1. Descentralización del sector energético	31
2.2. Electrificación del sector energético	33
2.3. Digitalización del sector energético	35
2.4. Configuración del futuro mix energético	37
3. Fundamentos de la tecnología Blockchain.....	40
3.1. Clasificación de las redes: Blockchain Pública vs. Blockchain Privada	41
3.2. Validación de transacciones y Mecanismos de consenso	41
3.2.1. Criptografía Asimétrica o de Clave Pública	42
3.2.2. Validación y Algoritmos de Consenso	42
4. Blockchain en el Sector Energético.....	45
4.1. Comercio Peer-to-Peer (P2P)	45
4.1.1. Infraestructura física	46
4.1.2. Software	47
4.1.3. Arquitectura blockchain	48
4.1.4. Funcionamiento del mercado.....	48
5. Metodología de estudio	51
5.1. Selección de la tecnología y del tipo de proyecto.....	51
5.2. Criterios de selección de los proyectos	52
5.3. Recopilación de información.....	52
5.5. Diseño del análisis DAFO	54
6. Estudio de Casos	55
6.1. Caso de Estudio 1: Brooklyn Microgrid (BMG)	56
6.1.1. Introducción.....	56
6.1.2. Contexto del proyecto	56
6.1.3. Objetivos del proyecto	57
6.1.4. Aspectos técnicos.....	57
6.1.5. Componentes de la microrred de Brooklyn.....	59
6.1.6. Tabla Resumen del Proyecto	61
6.1.7. Resultados y Conclusiones	62

6.1.8.	<i>Análisis DAFO</i>	63
6.2.	Caso de Estudio 2: RENeW Nexus Australia	64
6.2.1.	<i>Introducción</i>	64
6.2.2.	<i>Contexto del proyecto</i>	65
6.2.3.	<i>Objetivos del proyecto</i>	65
6.2.4.	<i>Aspectos técnicos</i>	66
6.2.5.	<i>Esquema de costes</i>	66
6.2.6.	<i>Tabla Resumen del Proyecto</i>	68
6.2.7.	<i>Resultados y Conclusiones</i>	69
6.2.8.	<i>Análisis DAFO</i>	71
6.3.	Caso de Estudio 3: Quartierstrom	72
6.3.1.	<i>Introducción</i>	72
6.3.2.	<i>Contexto del proyecto</i>	73
6.3.3.	<i>Objetivos del Proyecto</i>	73
6.3.4.	<i>Aspectos técnicos</i>	74
6.3.5.	<i>Tabla Resumen del Proyecto</i>	78
6.3.6.	<i>Resultados y Conclusiones</i>	79
6.3.7.	<i>Análisis DAFO</i>	82
6.4.	Caso de Estudio 4: Verv's Hackney Project	83
6.4.1.	<i>Introducción</i>	83
6.4.2.	<i>Contexto del proyecto</i>	83
6.4.3.	<i>Objetivos del proyecto</i>	84
6.4.4.	<i>Aspectos técnicos</i>	85
6.4.5.	<i>Tabla Resumen del Proyecto</i>	88
6.4.6.	<i>Resultados y Conclusiones</i>	89
6.4.7.	<i>Análisis DAFO</i>	90
7.	Conclusiones y Trabajos futuros	91
7.1.	Conclusiones sobre el comportamiento y la motivación de los usuarios	91
7.2.	Conclusiones acerca del papel de las redes de transporte y distribución	91
7.3.	Conclusiones acerca de los riesgos asociados con la incierta regulación	92
7.4.	Conclusiones acerca de los beneficios obtenidos por la implantación de mercados P2P y del uso de la tecnología blockchain	92
7.5.	Trabajos Futuros	93
8.	Bibliografía	95

Índice de Figuras

Figura 1: Potencia instalada (MW) de autoconsumo fotovoltaico en España [1]	9
Figure 2: Installed photovoltaic self-consumption capacity (MW) in Spain [1]	15
Figura 3: Diagrama de Gantt inicial del proyecto. Elaboración Propia.....	28
Figura 4: Diagrama de Gantt actualizado del proyecto. Elaboración Propia.....	29
Figura 5: % de potencia renovable instalada en España por tecnología y nivel tensión [4].	31
Figura 6: Evolución de los precios de las materias primas energéticas en España [6].....	34
Figura 7: Evolución de los precios de los derechos de emisión de CO2 en España [7].....	34
Figura 8: Aplicaciones de la digitalización en las actividades del Sistema Energético [8]...	35
Figura 9: Comunidad energética peer-to-peer [11]	36
Figura 10: Cabecera y Contenido de los bloques de la cadena Blockchain [16]	40
Figura 11: Registro centralizado vs. Registro distribuido [17].....	43
Figura 12: Funcionamiento de la aplicación de mercado. Elaboración Propia.....	49
Figura 13: Representación gráfica del proceso de compra en un mercado P2P [19]	50
Figura 14: Comunidad de vecinos de BMG [21].....	56
Figura 15: Topología de la Microrred de Brooklyn [22]	57
Figura 16: TransActive Grid Smart Meter (TAGe) [23]	58
Figura 17: Los 7 componentes de un Mercado de Energía a nivel de microrred [22]	59
Figura 18: Socios y entidades que han colaborado en el proyecto.....	64
Figura 19: Proyecto RENEW Nexus en Fremantle	64
Figura 20: Tarifas establecidas en la Fase 1 y Fase 2 de Freo 48.....	67
Figura 21: Comunidad energética Quartierstrom en Suiza [2].....	72
Figura 22: Instalación en los hogares de los participantes [24]	74
Figura 23: Mecanismo de doble subasta con discriminación de precios [24].....	75
Figura 24: Arquitectura blockchain [25]	76
Figura 25: Arquitectura blockchain con la aplicación para la batería [25]	77
Figura 26: Línea temporal de las principales tareas del proyecto [12].....	78
Figura 27: Segmentación de los usuarios según preferencias de fijación de precios [2]	79
Figura 28: Comunidad energética Hackney Banister House Estate (Londres) [26]	83
Figura 29: Verv Home Hub (VHH) [27].....	85
Figura 30: Perfil de consumo de diferentes electrodomésticos [27]	85
Figura 31: Arquitectura Verv Trading Platform (VTP) [27]	87
Figura 32: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	100

Índice de Tablas

Tabla 1: Tabla resumen utilizada en todos los proyectos.	11
Tabla 2: Matriz DAFO utilizada en todos los proyectos.	11
Table 3: Summary table used in all projects	17
Table 4: SWOT Analysis Matrix used in all projects	17
Tabla 5: Evolución de la potencia instalada por tecnología (MW). Elaboración Propia.	37
Tabla 6: Escenarios para la producción de energía en el 2030. Elaboración Propia.....	38
Tabla 7: Comparativa entre distintas arquitecturas blockchain	48
Tabla 8: Tabla resumen del proyecto.....	53
Tabla 9: Tabla Análisis DAFO	54
Tabla 10: Resumen de los Componentes Brooklyn Microgrid	60
Tabla 11: Resumen Caso de Estudio 1 (Brooklyn Microgrid).....	61
Tabla 12: Análisis DAFO Caso de Estudio 1 (Brooklyn Microgrid)	63
Tabla 13: Resumen Caso de Estudio 2 (RENew Nexus)	68
Tabla 14: Análisis DAFO Caso de Estudio 2 (RENew Nexus)	71
Tabla 15: Socios y entidades que han colaborado en el proyecto	72
Tabla 16: Resumen Caso de Estudio 3 (Quartierstrom).....	79
Tabla 17: Análisis DAFO Caso de Estudio 3 (Quartierstrom)	82
Tabla 18: Paso a paso del algoritmo de casación.....	86
Tabla 19: Resumen Caso de Estudio 4 (Verv's Hackney Project).....	88
Tabla 20: Análisis DAFO Caso de Estudio 4 (Verv's Hackney Project).....	90
Tabla 21: Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	101

1. Introducción

En esta primera sección se explican los motivos por los cuales se ha realizado este Trabajo de Fin de Máster, se describen los objetivos del proyecto, la planificación y, por último, la estructura del documento.

1.1. Motivación del proyecto

La Cumbre de París constituye un hecho histórico, en ella 195 países firmaron un acuerdo para combatir el cambio climático llamado el Acuerdo de París.

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático adoptado el 12 de diciembre de 2015 y que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C [3]. Ante este tratado el sector energético no se queda ajeno, dado que sus emisiones suponen dos tercios de las emisiones globales.

El objetivo de reducción de emisiones tiene una complejidad cada vez mayor debido a fenómenos globales como: el crecimiento demográfico, la urbanización y la mejora de las condiciones de vida de los ciudadanos. Por esta razón, la única manera que tiene el sector energético de afrontarlo es mediante la transformación que está experimentando.

La red eléctrica ha ido adaptándose a este cambio en el sector integrando en ella pequeños recursos de generación renovable pertenecientes a los usuarios. De esta manera, son los propios consumidores quienes pueden generar energía para autoabastecerse, e incluso, verter sus excedentes a la red. Desde el punto de vista medioambiental y económico esta evolución de la red es interesante. Ya que, al ser la electricidad generada por el propio consumidor, se reducen drásticamente las distancias y por tanto las pérdidas de transporte y distribución. Y, además, se eliminan los intermediarios que buscan lucrarse durante todo el proceso de generación, transporte, distribución y comercialización de la energía.

Con el incremento de los recursos de generación distribuida aparecen nuevas oportunidades, como los mercados de energía P2P en los que se intercambia energía entre prosumidores y consumidores. Actualmente, existen varios proyectos piloto que se basan en este tipo de comercio y que utilizan la tecnología blockchain para flexibilizar y hacer más eficiente los intercambios de energía dentro del marco de la seguridad.

1.2. Objetivos del proyecto

En este Trabajo de Fin de Máster se persigue la consecución de los siguientes objetivos, algunos de ellos son generales y otros específicos.

- I. En primer lugar, se hará una introducción del contexto actual del sector energético y se analizarán los posibles escenarios futuros, incluyendo la posible configuración del futuro mix energético. Se discutirá también sobre el papel de las energías renovables y el de la digitalización en el proceso de transición energética que se está viviendo. Se expondrá bajo un punto de vista crítico el futuro de la energía nuclear y su relevancia en la transición hacia un sistema energético sostenible.
- II. Se identificarán los principales retos que plantea la digitalización en el sector energético.
- III. Se estudiarán los fundamentos de la tecnología Blockchain. Para ello primero se hará una introducción de esta tecnología, en la que se mencionarán aspectos como: sus características, su funcionamiento o sus principales arquitecturas. Además, se comparará esta tecnología frente a otras y se indicarán los motivos por los cuales la tecnología Blockchain ha sido la elegida.
- IV. Después, se profundizará en las aplicaciones que tiene la tecnología Blockchain en el sector energético y se analizará el estado de esta tecnología en el sector. Se hará especial referencia a los mercados de energía P2P.
- V. Por último, se analizarán distintos proyectos basados en el comercio de energía P2P mediante tecnología Blockchain. Para ello se realizará un análisis DAFO de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades de cada proyecto.

1.3. Planificación del proyecto

Para desarrollar la planificación de trabajo, en el mes de noviembre se establecieron una serie de actividades, que deberían llevarse a cabo a lo largo del proyecto, con sus respectivos tiempos de ejecución. Y, se organizaron las tareas cronológicamente mediante un diagrama de Gantt. La Figura 3 muestra la planificación inicial del proyecto.

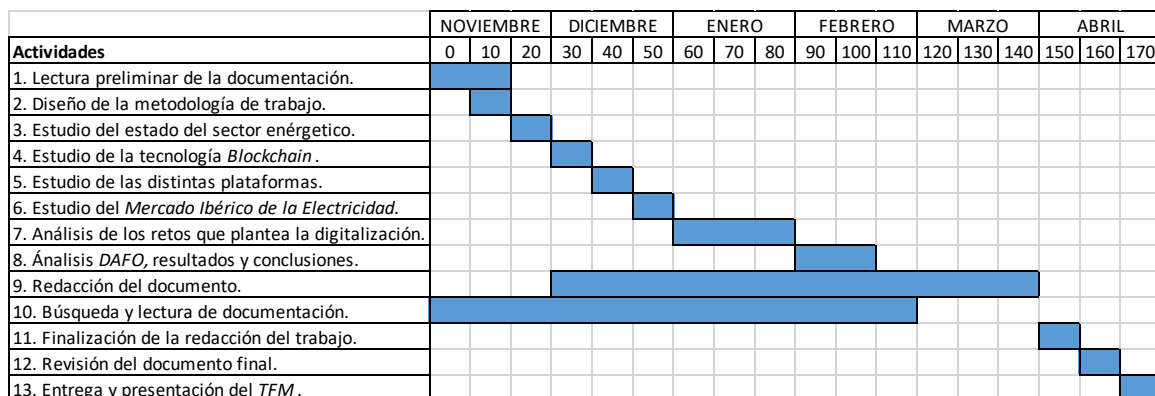


Figura 3: Diagrama de Gantt inicial del proyecto. Elaboración Propia.

Sin embargo, a medida que ha pasado el tiempo y se ha ido trabajando, el proyecto ha cogido forma y las tareas han cambiado. Por eso ha sido necesario realizar algunas correcciones e incorporar nuevas actividades en la planificación. Por ello ha sido necesario actualizar el diagrama de Gantt. La Figura 4 muestra la planificación actualizada del proyecto.

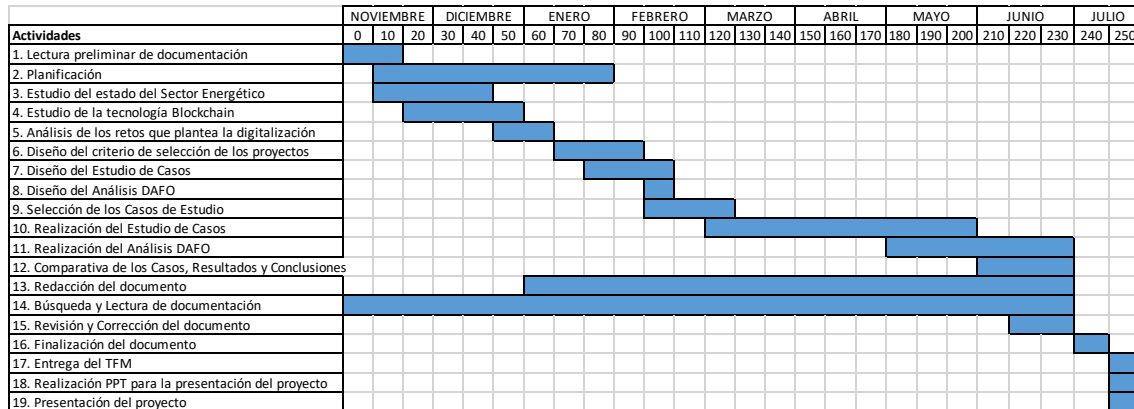


Figura 4: Diagrama de Gantt actualizado del proyecto. Elaboración Propia

1.4. Estructura del documento

El documento se estructura en diferentes secciones de la siguiente manera:

- 1. Introducción:** En esta sección se explica la motivación del proyecto, los objetivos que se pretenden alcanzar, la planificación que se ha seguido y la estructura del documento.
- 2. Contexto actual del sector energético:** Se pretende profundizar en la situación que está viviendo actualmente el sector. Se habla de los cambios que está experimentando, así como las herramientas que está empleando para hacer frente a la transición. Además, esta sección aborda el futuro mix energético y el papel que tiene la energía nuclear en él.
- 3. Fundamentos de la tecnología Blockchain:** En esta tercera sección, se presenta la tecnología blockchain, se explican sus principales características y su funcionamiento.
- 4. Blockchain en el sector energético:** Se analiza el caso concreto de los mercados de energía P2P basados en tecnología blockchain.
- 5. Metodología de Estudio:** En esta sección se muestra la metodología diseñada para llevar a cabo el Estudio de Casos. En el que se incluye: El diseño de la estrategia para la selección de los proyectos, la recopilación de información, el diseño y realización del Estudio de Casos, el diseño y realización del Análisis DAFO, y la obtención de conclusiones.
- 6. Estudio de Casos:** En esta sexta sección se presenta el estudio de cada proyecto individualmente y se incluye también el Análisis DAFO de cada uno de ellos. Lo que se pretende es revisar desde un punto de vista crítico distintos proyectos que utilizan blockchain para el comercio de energía P2P.
- 7. Conclusiones y trabajos futuros:** Se pretende resumir y sacar conclusiones del estudio realizado en la sección seis. Así como mencionar los siguientes pasos.
- 8. Bibliografía:** En esta última sección se recogen las referencias empleadas para la redacción del trabajo por orden de aparición.

2. Contexto actual del sector energético

El sector energético se encuentra en un momento de transición, en gran parte debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la necesidad de eliminar la contaminación atmosférica. Estos objetivos han guiado al sector a una transformación basada en: la descentralización, la descarbonización, la electrificación, y la digitalización.

2.1. Descentralización del sector energético

Típicamente, la generación ha estado conectada a la red de transporte (i.e. red de alta tensión) en forma de grandes centrales eléctricas. Y, como consecuencia, el flujo de energía era unidireccional. Sin embargo, en los últimos años, se está viendo cómo progresivamente se ha ido instalando más capacidad en la red de distribución. Adquiriendo el sistema una mayor complejidad y produciéndose flujos de energía bidireccionales procedentes tanto de las grandes centrales como de los puntos de consumo.

Este fenómeno se denomina descentralización de las fuentes de energía, y se define como el traslado de los puntos de generación, que tradicionalmente se han ubicado lejos de los focos de consumo, hacia los lugares donde se encuentra la demanda eléctrica. Cuando se habla de descentralización del sector aparece el término de recursos de generación distribuida. Los recursos distribuidos son pequeñas fuentes de generación renovable que se encuentran conectados a la red de distribución (i.e. red de media/baja tensión). Esto incluye tanto instalaciones de mediano tamaño, como instalaciones de menor tamaño ubicadas en las propiedades de los consumidores para su propio consumo. Este segundo grupo recibe el nombre de generación residencial.

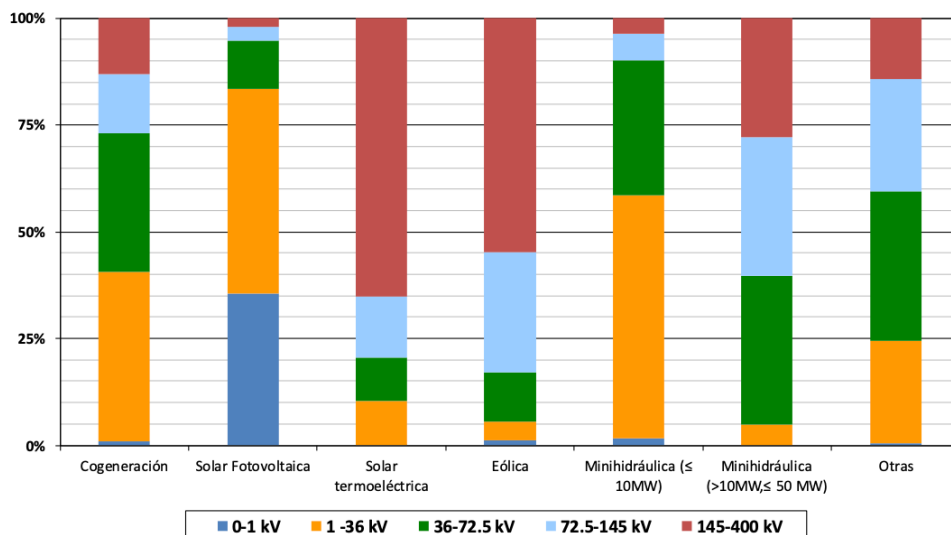


Figura 5: % de potencia renovable instalada en España por tecnología y nivel tensión [4]

Según los datos publicados por la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) y un informe realizado por el Instituto de Investigación Tecnológica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), en el año 2018 más del 23% de la capacidad de generación en España estaba conectada a la red de distribución. En la Figura 5 se detalla el porcentaje de capacidad renovable instalada en España según el nivel de tensión y tecnología: cogeneración, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, minihidráulica y otras.

Según esta figura, algunas tecnologías como la cogeneración, la solar fotovoltaica o la minihidráulica (< 10MW) tienen la mayor parte de su potencia instalada en redes de baja tensión (i.e. 0-1kV) y redes de media tensión (i.e. 1kV-36kV), es decir, en las redes de distribución. Mientras que, otras tecnologías como la solar termoeléctrica o la eólica cuentan con prácticamente toda su capacidad instalada en la red de transporte (i.e. >36kV).

Un sistema energético descentralizado presenta grandes ventajas, frente al sistema convencional:

- I. Los usuarios comienzan a tomar un rol activo en el sistema, pasan de ser meros consumidores, a generar su propia energía y entregar los excedentes a la red. Apareciendo un nuevo tipo de usuario llamado prosumidor que desempeña diferentes funciones, en lugar de un único rol como tenían hasta el momento los usuarios de la red: puede producir energía, consumir energía y vender energía. De esta manera los usuarios contribuyen a la gestión activa de la demanda, modificando sus patrones de consumo y dando flexibilidad al sistema, y a la democratización del sistema energético, reduciendo el poder de los grandes generadores y las comercializadoras
- II. Se minimizan las pérdidas por transporte y distribución. Al situar las fuentes de generación más cerca de los puntos de consumo, la energía recorre distancias más pequeñas lo que reduce las pérdidas. Contribuyendo así, a un uso racional y eficiente de la energía.
- III. Fomenta la integración de fuentes de energía renovable en el sistema ya que son más adecuadas para situarse cerca de los consumidores, ayudando a descarbonizar el sistema.
- IV. Mejora la calidad del suministro energético tanto en zonas urbanas, porque se descongestionan las vías tradicionales de transporte y distribución, como en zonas rurales que se encuentran alejadas de la red eléctrica.
- V. Aumenta la fiabilidad del sistema energético porque al existir pequeñas fuentes repartidas por todo el territorio, si falla una de ellas no supone un grave problema. Sin embargo, en el sistema tradicional el fallo de una fuente de generación de gran tamaño sí que podría suponer un problema en la red.

2.2. Electrificación del sector energético

La electrificación del sistema energético busca reemplazar la energía generada a partir de fuentes fósiles por energía generada por fuentes renovables. Otra forma de definir la electrificación es como la sustitución de aquellas tecnologías que usan combustibles fósiles por otras que funcionan a partir de electricidad [5]. Con ello se busca descarbonizar el consumo final de energía en: el transporte, los edificios y la industria.

La electrificación del transporte juega un papel principal en el futuro de la movilidad por la necesidad de reducir de manera inminente la contaminación y la congestión de las zonas urbanas. Pero, el camino hacia la movilidad eléctrica es un proceso lento, ya que requiere una transformación de la industria automovilística, una infraestructura de recarga adecuada, un sistema de gestión eficiente de la energía y la aceptación por parte de la sociedad [4]. Actualmente, los principales retos con los que se encuentra es la evolución tecnológica de las batería, tanto en términos de velocidad de carga como de autonomía, y el coste de estas.

La electrificación del uso de la energía en edificios implica sustituir los sistemas de calefacción y refrigeración actuales por otros libres de combustibles fósiles. Para el 2050 se espera que, a través del uso de bombas de calor para calentar el agua y los hogares, la electricidad en la demanda final de energía en el sector de la construcción aumente del 42% en 2030 al 72% en 2050 [5]. La bomba de calor es la principal protagonista de la electrificación de la demanda de los edificios porque es una tecnología que transforma la energía eléctrica en energía térmica, aprovechando la energía de la tierra, del aire o del agua. Existiendo, por tanto, tres tipos de bombas: geotérmicas, aerotérmicas e hidrotérmicas.

La electrificación en la industria es más incierta que en los dos sectores anteriores. La penetración de la electricidad en el sector industrial se conseguirá mediante el cambio de combustible en procesos como el del hierro y el del acero haciendo uso de hornos de arco eléctrico. Pero, el mayor potencial de electrificación industrial se encuentra en la producción de calor que requiere en muchos de los procesos.

Los beneficios de la electrificación van más allá de la descarbonización y de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero:

- I.** Es el camino hacia una mayor eficiencia energética. Por ejemplo, los vehículos eléctricos son de media cuatro veces más eficientes que los vehículos con motor de combustión interna. Y, en el sector de la construcción, la instalación de bombas de calor puede generar grandes ganancias de eficiencia ya que consumen cuatro veces menos que las calderas tradicionales.
- II.** Mejora la calidad del aire de las ciudades, y de las zonas densamente pobladas, porque elimina las emisiones procedentes de tubos de escape y calderas.
- III.** Acelera la digitalización mediante la integración de tecnologías inteligentes que dan poder a los clientes.

- IV. La electrificación garantiza la seguridad de suministro para crear un sistema más confiable. Esto se consigue aumentando la estabilidad del sistema gracias a los sistemas de almacenamiento y a la reducción de las dependencias geopolíticas en las importaciones de combustibles.
- V. Por último, en una sociedad electrificada los ciudadanos podrán disfrutar de una energía asequible, transparente y libre de oscilaciones causadas por el encarecimiento de las materias primas energéticas y por los derechos de emisión de carbono. A continuación, aparecen dos figuras haciendo referencia a la evolución de los precios de las materias primas energéticas en España y a evolución de los precios de los derechos de emisiones de CO₂ en España.

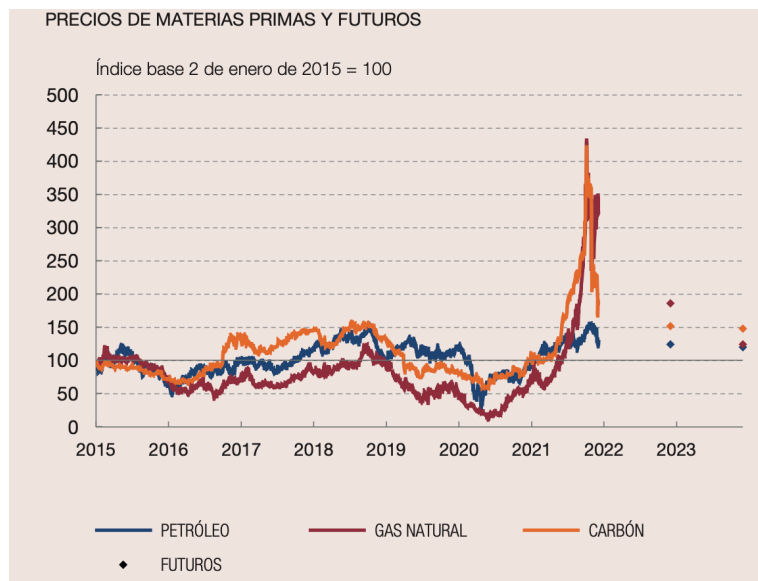


Figura 6: Evolución de los precios de las materias primas energéticas en España [6]

2 PRECIO DE LOS DERECHOS DE EMISIÓN DE CO₂



Figura 7: Evolución de los precios de los derechos de emisión de CO₂ en España [7]

2.3. Digitalización del sector energético

La digitalización es una importante herramienta que tiene el sector energético para responder a la transformación en la que se encuentra invertida. La revolución tecnológica proporciona a la industria soluciones basadas en Big Data, Internet of Things (IoT), Inteligencia Artificial (IA) y Blockchain con las que afrontar el cambio.

La digitalización está presente en cada una de las actividades del sistema eléctrico: generación, transporte, distribución, y consumo.

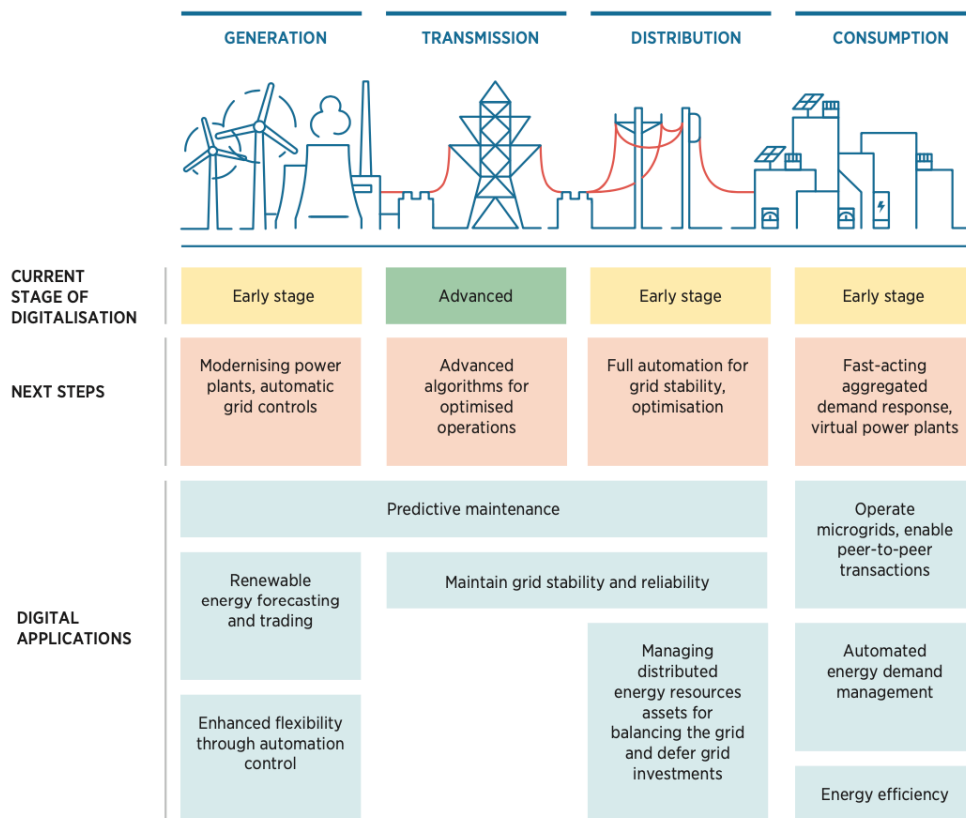


Figura 8: Aplicaciones de la digitalización en las actividades del Sistema Energético [8]

La digitalización de la generación busca incrementar la eficiencia de las plantas y mejorar su integración en el sistema energético. Un ejemplo de aplicación es el mantenimiento predictivo de las centrales de generación. Endesa ha desarrollado un sistema de análisis predictivo de aerogeneradores que estudia las vibraciones de los equipos permitiendo detectar fallos con meses de antelación. Además, permite conocer en todo momento el estado de las máquinas. Este modelo les permite planificar las reparaciones y reducir los costes. Está basado en machine learning, para detectar comportamientos poco habituales de las máquinas, y en Internet of Things (IoT), para transmitir la información desde los dispositivos localizados en los aerogeneradores hasta servidores alojados en la nube [9].

La digitalización de las redes de transporte y distribución está muy relacionada con el término Smart Grid o Red Inteligente. Que busca, mediante tecnología de la información y comunicación (TIC), sensores y actuadores, y tecnología de tratamiento de datos, detectar a distancia cambios en la red y responder a ellos. Todo ello para mejorar la calidad del suministro eléctrico, para operar la red de forma más eficiente y para adoptar estrategias de mantenimiento predictivo. Además, ahora se añaden otros factores a la digitalización de la red de distribución: la generación distribuida y los vehículos eléctricos. Lo que supone la conexión de nuevos dispositivos y el planteamiento de nuevos escenarios (i.e. cambio en la dirección del flujo eléctrico) [10]

En cuanto a la digitalización del consumo, se encuentra en una fase todavía de poca madurez. Existen muchas aplicaciones digitales basadas en eficiencia energética, la automatización en la gestión de la demanda energética, la operación de microrredes para el comercio P2P, etc. En este proyecto se van a analizar en profundidad estos comercios peer-to-peer basados en tecnología blockchain donde prosumidores y consumidores pertenecientes a una comunidad comercializan con energía producida localmente.



Figura 9: Comunidad energética peer-to-peer [11]

2.4. Configuración del futuro mix energético

La configuración del mix energético previsto para el año 2030 está diseñada de acuerdo con la neutralidad de emisiones a la que se aspira en el 2050. Para ese año la Unión Europea espera combatir el cambio climático reduciendo como mínimo en un 80% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con respecto a los niveles de 1990 y conseguir un sistema eléctrico basado en un 90-100% de energías renovables. Pero, esta transición debe ser sólida y por ello no se debe prescindir de manera inminente de energías como la nuclear, centrales térmicas de carbón, etc.

Para ello, se plantea el escenario del 2030 como un punto intermedio entre el actual y el esperado. Un sistema eléctrico basado únicamente en renovables es poco gestionable e impredecible, por eso necesita tecnologías de almacenamiento para dar respaldo en momentos en los que la generación disponible no sea suficiente. Las tecnologías de almacenamiento son capaces de proporcionar este respaldo durante los picos de demanda, pero a corto plazo no parece que puedan proporcionar un completo almacenamiento estacional. Por lo que se prevé que para 2030 todavía sea necesario contar con centrales de gas natural, centrales nucleares e, incluso, con alguna central térmica de carbón si continúan las dificultades actuales con el gas.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima [11] ha previsto la siguiente evolución en la capacidad instalada según tecnología:

Parque de generación del Escenario Objetivo (MW)			
Año	2015	2020	2030
Eólica	22,925	27,968	50,258
Solar fotovoltaica	4,854	8,409	36,882
Solar termoeléctrica	2,300	2,303	7,303
Hidráulica	14,104	14,109	14,609
Bombeo Mixto	2,687	2,687	2,687
Bombeo Puro	3,337	3,337	6,837
Biogás	223	235	235
Geotérmica	0	0	30
Energías del mar	0	0	50
Biomasa	677	877	1,677
Carbón	11,311	10,524	0-1.300
Ciclo combinado	27,531	27,146	27,146
Cogeneración carbón	44	44	0
Cogeneración gas	4,055	4,001	3,000
Cogeneración productos petrolíferos	585	570	230
Fuel/Gas	2,790	2,790	2,093
Cogeneración renovable	535	491	491
Cogeneración con residuos	30	28	24
Residuos sólidos urbanos	234	234	234
Nuclear	7,399	7,399	3,181
Total	105,621	113,151	156,965

Tabla 5: Evolución de la potencia instalada por tecnología (MW). Elaboración Propia.

En la Tabla 5 se observa como la capacidad instalada de eólica para 2030 casi duplica a la del 2020. Más llamativo aún, es el aumento de capacidad solar fotovoltaica que casi cuadruplica los valores del 2020. Otras tecnologías como la solar térmica, el bombeo puro o la biomasa también sufren un aumento de MW instalados. Mientras

que la nuclear y el carbón reducen su capacidad instalada en más de un 50%. El resto de las tecnologías se mantienen más o menos igual.

En cuanto al mix energético del 2030, se sabe que estará muy condicionado por la competitividad de la generación renovable, el cierre de las centrales de carbón por motivos medioambientales y por las grandes inversiones que deberán hacer en equipos de captura de dióxido de carbono para poder cumplir con la regulación, el crecimiento de la demanda de electricidad y las decisiones sobre si extender o no la vida de las centrales nucleares más allá de los 40 años.

Según varios estudios, parece que para el 2030 es posible alcanzar una cuota >70% de generación renovable gracias a tecnologías como la solar fotovoltaica o la eólica. Aunque, existen varios escenarios posibles, unos son más conservadores y otros más optimistas. Por ejemplo, según un informe [12] publicado por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas existen tres escenarios posibles.

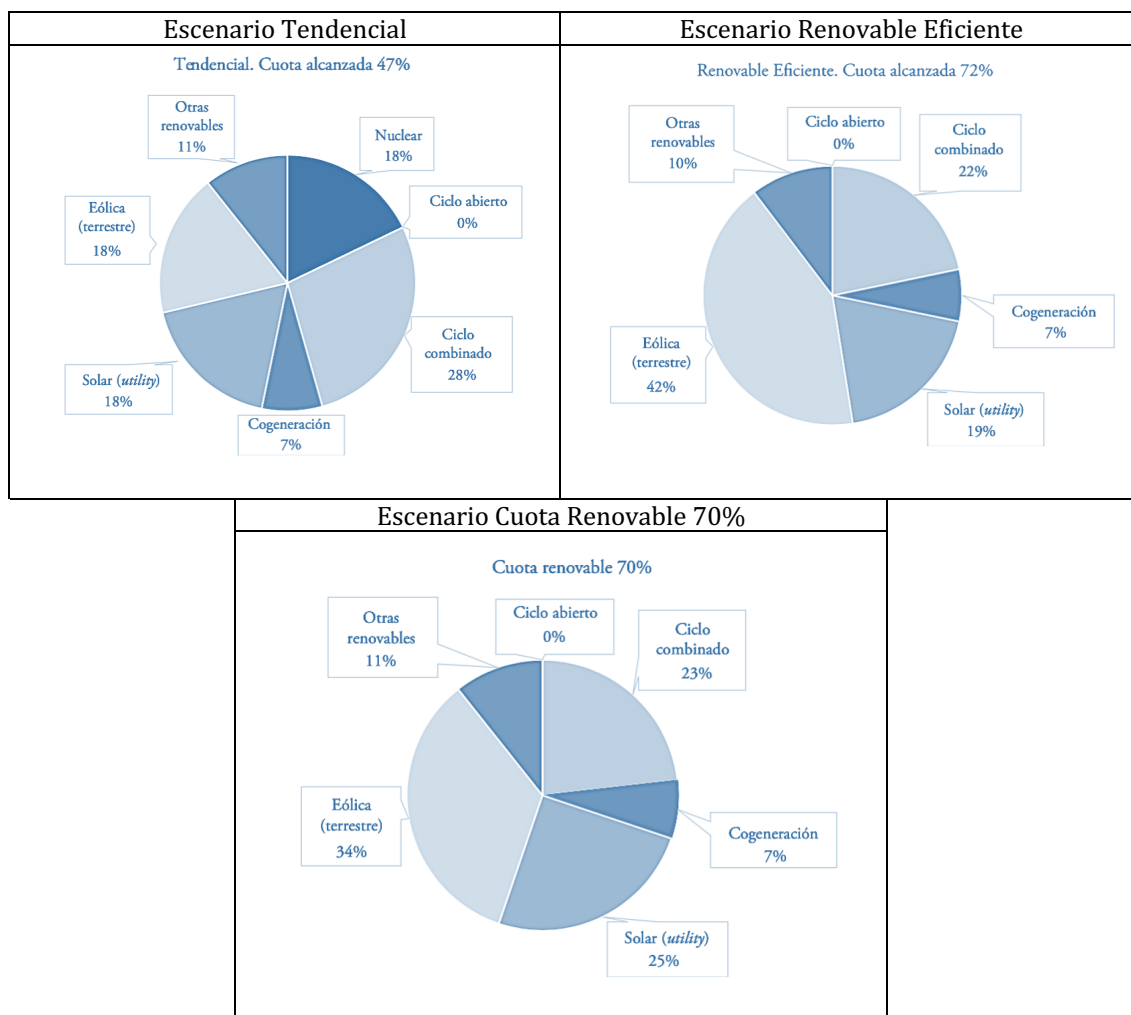


Tabla 6: Escenarios para la producción de energía en el 2030. Elaboración Propia.

En el primer escenario la cuota alcanzada de generación renovable es del 47% y las instalaciones nucleares seguirían produciendo energía. En el segundo escenario la cuota renovable es de 72% y las centrales nucleares quedarían inoperativas. Y, por

último, el tercer escenario, parecido al segundo, en el que se fija en 70% la cuota de generación de origen renovable y las centrales nucleares quedan cerradas antes del 2030. Y, lo que tienen en común los tres escenarios es que se utiliza como generación de respaldo la correspondiente a la procedente de los ciclos combinados. De estos tres escenarios, el informe concluye que el más favorable es el escenario renovable eficiente tanto por los costes asociados como por las emisiones. Sin embargo, este escenario es muy dependiente de los costes de inversión de la eólica y la solar. Y, además, dada la situación actual es utópico prescindir de las centrales nucleares.

Si bien, en dos de los escenarios se eliminaría por completo la generación nuclear, son muchos los que opinan que al ser una fuente que no libera dióxido de carbono su desarrollo debería progresar incluso a un ritmo mayor que el de los últimos años [13]. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) señala que para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París se debería aumentar la capacidad instalada de nuclear. Y, apunta que, para dar respuesta a la situación climática, asegurando el suministro energético a unos costes razonables, hay que contar con todas las fuentes libres de emisiones de carbono disponibles incluyendo la energía nuclear. En países como Alemania se ha visto el error que supone cerrar de manera paulatina las centrales nucleares y eliminar la nuclear del mix energético. Sumándole a esto la crisis del gas, el país se ha visto obligado a volver a generar con centrales térmicas, produciendo grandes cantidades de CO₂ [14]. De hecho, actualmente, se está planteando volver a la nuclear.

Además, países como China, EEUU, Australia, India y Rusia, con grandes densidades de población, mantendrán la generación térmica de carbón en su mix energético.

3. Fundamentos de la tecnología Blockchain

Para explicar en qué consiste la tecnología blockchain, hay que empezar por lo más básico. Blockchain es una manera de registrar transacciones y rastrear activos, tangibles e intangibles, que recibe su nombre por la manera en que lo hace. Básicamente, blockchain es una base de datos en la que se escriben las transacciones entre usuarios dentro de una red. Cada transacción es almacenada en un bloque, de capacidad limitada, junto a todas aquellas transacciones que se realizan en el mismo momento. Los bloques de transacciones se unen entre sí formando una cadena. A medida que el número de transacciones aumenta, la longitud de la cadena hace lo mismo. El proceso de creación de bloques nos es tan sencillo como esta explicación y por ello más adelante se entrará en detalle.

Cada bloque se compone de una cabecera de bloque y un contenido. Y utiliza un identificador único llamado *hash*. El *hash* es una clave alfanumérica de longitud fija que se obtiene al aplicar un algoritmo matemático al conjunto de datos de la cabecera del bloque. De manera que, si se altera cualquier dato de una transacción, el *hash* del bloque que la contiene se modifica. Es importante aclarar que en la cabecera de cada bloque se encuentra, entre otros datos, el *hash* del bloque anterior. Por lo tanto, la identidad de un bloque “hijo” cambia si la identidad del bloque anterior o bloque “padre” lo hace. Es decir, al modificar la información de un bloque, se modifica su *hash* y con él la información de la cabecera del bloque siguiente, y por tanto también su *hash*. Produciendo un efecto cascada que requiere una carga computacional tan grande que hace que la cadena de bloques sea inmutable.

Además de aportar inmutabilidad, el escribir el *hash* del bloque anterior en la cabecera del siguiente bloque, se utiliza para enlazar bloques e impedir que un nuevo bloque se inserte entre dos existentes. En la cabecera también aparecen otros datos como el sello temporal o *timestamp*, la dificultad, el *nonce* o la raíz del árbol de Merkle.

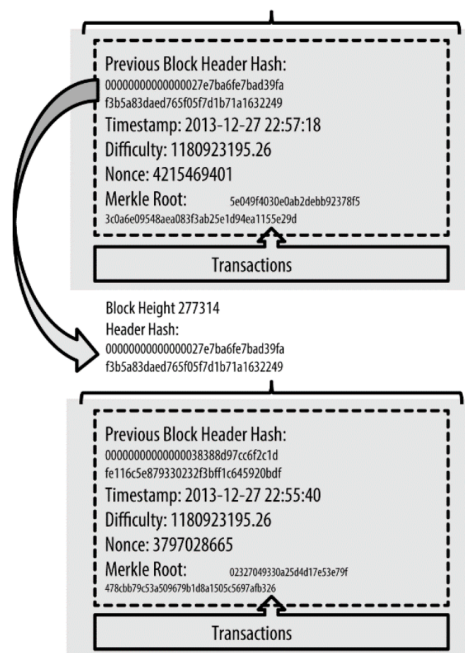


Figura 10: Cabecera y Contenido de los bloques de la cadena Blockchain [16]

3.1. Clasificación de las redes: Blockchain Pública vs. Blockchain Privada

Existen dos posibles clasificaciones de redes basadas en conceptos distintos. La primera clasificación se basa en el acceso y lectura de datos almacenados: Red pública o Red privada. En una red pública cualquier usuario tiene acceso a los datos. En ella puede participar todo aquel que lo desee sin necesidad de cumplir ningún requisito especial. Mientras que en las redes privadas la lectura de datos está reservada a usuarios determinados que disponen de permiso.

La segunda clasificación se basa en la capacidad para generar y agregar nuevos bloques: Red sin permisos o Red con permisos. En las redes sin permisos o *permissionless* no hay restricciones que impidan a los usuarios de la red realizar transacciones y crear bloques. De manera que aquellos usuarios que realicen la función de *minero*, es decir, que participen en la escritura de datos y creación de bloques, son recompensados con activos digitales o *tokens*. El segundo tipo de redes son las redes con permisos o *permissioned*. En este tipo de redes la tarea de procesar transacciones es realizada por participantes conocidos que necesitan el permiso de los administradores de la red. Este tipo de redes son desarrolladas y controladas por entidades privadas.

Pero, normalmente, cuando se hace referencia a los tipos de blockchain que existen se hace una clasificación más sencilla que agrupa conceptos de los dos párrafos anteriores: Blockchain pública y Blockchain privada.

- Blockchain pública: Es una red pública sin permisos (i.e. *permissionless*). Como se ha descrito anteriormente, esto quiere decir que cualquier persona puede acceder y leer los datos, y, además, puede escribir y crear bloques.
- Blockchain privada: A diferencia de la anterior, una Blockchain privada es una red privada con permisos (i.e. *permissioned*). La lectura y escritura de datos se mantiene reservada a aquellos miembros de la organización.

3.2. Validación de transacciones y Mecanismos de consenso

La validación de las transacciones es una de las tareas claves dentro de una red blockchain. Para ello, esta tecnología utiliza criptografía asimétrica y algoritmos de consenso.

Mediante la criptografía asimétrica se puede comprobar la autenticidad de las transacciones y conocer las cuentas de las que proceden. De manera que, cuando un usuario ejecuta una transacción queda firmada con su clave privada para que cualquiera, mediante la clave pública del emisor, pueda verificar su autenticidad.

Y, mediante los algoritmos de consenso los nodos de la red se ponen de acuerdo para determinar la veracidad de una transacción. A continuación, se explican en mayor detalle ambos aspectos.

3.2.1. Criptografía Asimétrica o de Clave Pública

A la hora de realizar transacciones, blockchain hace uso de la criptografía asimétrica o criptografía de clave pública para garantizar la privacidad e incluso el anonimato. Este sistema consiste en la utilización de fórmulas matemática complejas, casi irreversibles, para la creación de un par de claves, una clave privada y una clave pública. Que sea irreversible quiere decir que dichas funciones matemáticas pueden calcularse en una dirección, pero es prácticamente imposible calcularlas en la dirección contraria. Por lo que en este caso es posible calcular la clave pública a partir de la privada, pero no es posible calcular la clave privada a partir de la pública.

La clave privada la posee únicamente el creador del par de claves. Se utiliza para firmar transacciones. Mientras que la clave pública, derivada de la clave privada, puede compartirse con terceras personas. Se utiliza para verificar las firmas. Además de estas dos claves para autenticar una transacción se hace uso de la firma digital. La criptografía asimétrica es de gran importancia porque permite proteger las claves privadas que son la única manera de firmar transacciones. Si terceras personas pudieran tener acceso a estas claves y realizar transacciones, la titularidad de los activos podría cambiar.

3.2.2. Validación y Algoritmos de Consenso

Para que una transacción sea válida todos los participantes deben estar de acuerdo en su validez. El proceso de validación de los bloques, es decir, de los conjuntos de transacciones se lleva a cabo a través de un protocolo o algoritmo de consenso.

- **Proof of Work (PoW):** Este algoritmo de consenso es el utilizado por la famosa red *Bitcoin* y está orientada a redes públicas en las que los nodos mineros invierten su tiempo y consumen electricidad a cambio de un incentivo económico. La forma que tienen los mineros de obtener *tokens* o recompensas es mediante una prueba de trabajo en la que resuelven problemas complejos expuestos por la red (i.e. puzzles criptográfico).

Estos puzzles criptográficos consisten en encontrar, mediante prueba y error, un *hash* para el bloque que se desea crear que cumpla con unas restricciones dadas. De esta manera varios nodos compiten de manera simultánea para encontrar la solución, obtener el derecho de crear el bloque y así, ganar la recompensa. Como la única forma de resolver estas pruebas para generar el *hash* del bloque es gastando tiempo y carga computacional, el objetivo de este algoritmo es prevenir ataques manteniendo a los miembros de la red conectados mediante la resolución de estos problemas.

Una vez generado el *hash* del bloque correctamente, se envía al resto de la red. La aceptación de dicho bloque se consigue cuando los mineros comienzan a utilizar dicho *hash* como *hash* del bloque anterior. Aquellos bloques creados por nodos que han llegado a la solución del *hash*, pero que no han conseguido formar parte de la cadena son denominados bloques huérfanos.

Este mecanismo de consenso consume grandes cantidades de electricidad y de potencia computacional, haciendo que sea una forma cara de consenso.

- **Proof of Stake (PoS):** El algoritmo de prueba de pertenencia se desarrolló con el objetivo de mejorar el algoritmo *PoW* en cuanto a eficiencia energética y computacional se refiere. Este mecanismo de consenso concede el derecho de crear un bloque basándose en el compromiso de los usuarios con la red medido con el número de participaciones. Este mecanismo de consenso basa su seguridad en el compromiso, es decir, aquellos nodos que poseen más monedas tienen más interés en la supervivencia y el buen funcionamiento de la red. Por lo tanto, tiene sentido que sean ellos quienes protejan la red frente a posibles ataques. Además de la pérdida de las participaciones en juego en el caso de que el nodo intentase algún ataque. Por el contrario, si el bloque es correctamente validado el validador gana intereses sobre las participaciones en juego.
- **Proof of Authority (PoA):** Este protocolo de consenso, denominado prueba de autoridad, es una solución dirigida en especial a blockchains privadas. Se basa en el conocimiento de las identidades de los validadores como mecanismo de garantía. Es decir, los nodos validadores utilizan su identidad y reputación para asegurar la transparencia y el buen funcionamiento de la red, de manera que cualquier acto que atente contra la red recae sobre los validadores.

3.3. Propiedades de la tecnología blockchain

Todos los aspectos mencionados sobre blockchain llevan a que esta tecnología tenga las siguientes características:

Registro distribuido: A la hora de realizar transacciones en una red tradicional como la que se muestra a la izquierda, cada participante guarda su propio libro mayor y sus propios registros. Mientras que, como se observa en la imagen de la derecha, en una red que utiliza la arquitectura blockchain todos los participantes tienen la misma replica actualizada del libro mayor. Cada participante, o nodo del sistema, dispone de la misma base de datos en la que se registran las transacciones que se realizan en la red.

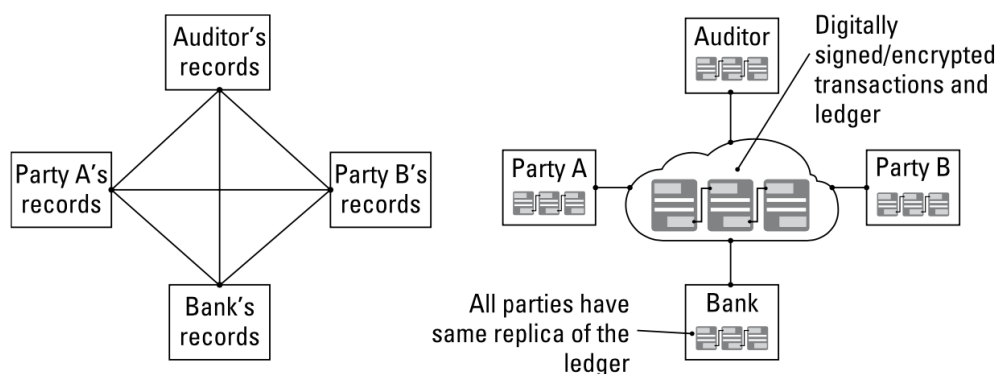


Figura 11: Registro centralizado vs. Registro distribuido [17]

- I. Inmutabilidad:** Como se ha explicado previamente, la tecnología blockchain permite mantener un registro inalterable de todas las transacciones realizadas a lo largo del tiempo en una red. Esta inmutabilidad de los datos es posible gracias a la extrema dificultad y carga computacional necesaria para modificar o eliminar los datos de la cadena.

- II. Seguridad y Privacidad:** Los tipos de permisos y la criptografía impiden el acceso de personas no autorizadas a la red y aseguran que los participantes sean quienes afirman ser. La privacidad dentro de blockchain se consigue mediante la criptografía, que ofrece a los participantes de la red una visibilidad selectiva dentro del registro; tanto las transacciones como la identidad de las partes involucradas en ellas pueden ser enmascaradas.

- III. Rapidez:** El tiempo de ejecución y validación de una transacción se reduce enormemente en comparación con un sistema centralizado gracias a la eliminación de intermediarios.

- IV. Transparencia y auditabilidad:** Todos los participantes de la red tienen acceso al registro de transacciones en tiempo real, por lo que en todo momento pueden conocer el estado de la cadena sin necesidad de contar con una entidad central.

3.4. Smart Contracts

El concepto de smart contract lo introdujo Nick Szabo en 1994, pero no se desarrolló al no haber infraestructura tecnológica que lo hiciera posible. Sin embargo, en la actualidad blockchain ha vuelto a sacar a la luz este término.

Los smart contracts se diferencian de los contratos del mundo real en que son completamente digitales. Esto quiere decir que al igual que cualquier contrato representa un acuerdo entre varias partes, pero tienen como particularidad que se encuentran escritos en líneas de código en lugar de en lenguaje legal sobre documentos impresos.

Estos contratos se ejecutan por sí mismos automáticamente ya que funcionan bajo la condición If-Then, es decir, si se dan unas situaciones entonces ocurren unas acciones. Y, al almacenarse en blockchain heredan las mismas características de esta tecnología.

Los smart contracts son una herramienta clave para los mercados de energía P2P que se van a analizar en este proyecto.

4. Blockchain en el Sector Energético

El potencial de la tecnología blockchain en el sector eléctrico reside en su capacidad para transformar el sector hacia un modelo más descentralizado. Un modelo en el que los participantes de la red puedan realizar transacciones energéticas, que se completen a gran velocidad, sin la necesidad de intermediarios ni la presencia de una figura central. Un modelo en el que esta eliminación o reducción en el número de intermediarios conduzca a un descenso de los costes.

Blockchain sale a la palestra en el sector energético en un momento en el que la red empieza a adquirir gran complejidad y es necesario plantearse como manejar las dificultades que surgen sin que los costes se disparen. De ahí surge la idea de que para manejar de manera rentable la red no es necesario comprar y operar cada activo que se encuentra en ella, sino que puede existir una colaboración con los recursos distribuidos, prosumidores y consumidores. Y de esta manera, utilizar su deseo de producir o consumir electricidad, y su deseo de ser flexibles, para reducir los costes eléctricos. La tecnología blockchain aparece en este planteamiento porque se necesita contar con un mecanismo para mantener la confianza entre las partes, a la hora de realizar transacciones, en un sistema en el que se busca desplazar la figura central para limitar los costes.

En la actualidad, el objetivo de sector energético frente al blockchain es evaluar y probar los posibles usos que se le pueden dar. Para que, en un futuro en el que esta tecnología sea más madura puedan implantarse en el mundo real los casos que sean satisfactorios.

En la actualidad, existen varias iniciativas que se están llevando a cabo con esta tecnología. Según un informe publicado en el 2018 por el World Energy Council en asociación con PwC [18], en el que entrevistan a líderes del sector energético pertenecientes a 39 entidades diferentes, se identifican siete tipos de usos de blockchain en el sector: plataformas flexibles para el comercio energético, comercio de emisiones, rastreo de la cadena de suministro, e-mobility, tokenización y financiación de proyectos, minería bitcoin y comercio P2P. Pero, la mayoría de las compañías entrevistadas, aproximadamente el 45%, están probando proyectos dirigidos al comercio Peer to Peer (P2P).

4.1. Comercio Peer-to-Peer (P2P)

Al observar el sistema energético del pasado en el que sólo existían grandes plantas generadoras y el flujo iba en un único sentido (i.e. del generador al consumidor), y compararlo con el sistema energético actual en el que, además de las grandes centrales, existen pequeños recursos de generación distribuida, el flujo ya no es unidireccional, y los prosumidores obtienen beneficios por los subsidios y las tarifas de alimentación. Es posible pensar en un sistema energético futuro en el que los propietarios de paneles solares u otros DERs puedan vender su electricidad a sus vecinos, de manera que ambos se beneficien por comercializar con energía local.

Este modelo de comercio se llama Peer to Peer (P2P), o de Igual a Igual, y es similar a los conceptos de Transactive Energy, o Energía Transactiva, y Community Self-Consumption, o Comunidades Energéticas de Autoconsumo. Ya que todos buscan conseguir el balance generación demanda en tiempo real, de forma autónoma y descentralizada, utilizando recursos flexibles de generación distribuida controlados por sus propietarios. Permitiendo a consumidores y prosumidores comercializar electricidad, sin intermediarios, a un precio acordado por ambos y siguiendo el orden de prioridad que se explica a continuación.

En primer lugar, siempre se prioriza el autoconsumo por parte del propietario del recurso generador. En segundo lugar, si hay exceso de generación por parte del prosumidor, dicho excedente es ofrecido para la venta P2P. Por último, en caso de que la demanda sea inferior a la generación dentro de la comunidad P2P o el precio de venta sea superior al de compra, el excedente es vertido a la red al precio de la tarifa de alimentación/compensación acordada con la empresa comercializadora.

El papel del consumidor P2P es mucho más activo que el del autoconsumidor. En el autoconsumo tradicional el propietario únicamente tiene que conectar su sistema (i.e. recurso de generación), y es la empresa comercializadora quien, mediante un medidor, calcula la cantidad neta de energía importada y realiza la compensación en la factura eléctrica. Mientras que en el comercio P2P la compraventa de energía se hace en tiempo real mediante un sistema de pagos y cobros, y no mediante compensaciones en la factura. De esta manera, se crea un mayor interés en convertirse en prosumidor, en invertir en instalaciones solares y en formar parte activa del sistema.

4.1.1. Infraestructura física

- I. Participantes:** La comunidad debe estar formada por un número suficiente de consumidores y prosumidores. Los prosumidores son los usuarios propietarios de los recursos de generación.
- II. Fuentes de generación distribuida:** Las fuentes o recursos de generación son los sistemas responsables de producir energía para responder a la demanda local. Son generadores de pequeña capacidad localizados en las inmediaciones de la comunidad o incluso en los hogares de los participantes. Normalmente, son de origen renovable ya que las fuentes de este tipo son más aptas para ubicarse cerca de los puntos de consumo. Ejemplos de recursos de generación distribuida son los paneles solares PV, generadores eólicos de eje vertical, baterías de almacenamiento o vehículos eléctricos.
- III. Inversores:** Los inversores son equipos que transforman la corriente continua (CC) procedente de la generación de fuentes como los paneles solares en corriente alterna (CA). Para que la electricidad pueda ser inyectada a la red y consumida.
- IV. Red de distribución:** La red de distribución permite transportar energía entre prosumidores y consumidores. Suele utilizarse la red eléctrica tradicional perteneciente a la empresa distribuidora, de forma que sea la empresa quien se encargue de su gestión y mantenimiento. Pero, también existen proyectos que

utilizan una microrred para la comunidad, construida de manera adicional y separada de la red tradicional. Aunque, en este segundo caso el funcionamiento normal de la comunidad es conectada a la red tradicional, funcionando en modo isla únicamente en situaciones de contingencias en la red.

- V. Conexión a la red:** Los participantes deben mantenerse conectados a la red para que en todo momento haya balance entre generación y demanda (i.e. Dentro de la comunidad P2P la suma de la generación y las importaciones de la red debe ser igual a la suma de la demanda y las exportaciones).
- VI. Transactive Meter/Smart Meter:** Todos los participantes deben contar con uno de estos dispositivos. Se pueden instalar de manera sencilla junto al cuadro eléctrico sin modificar la infraestructura existente y manteniendo el contador tradicional. Estos aparatos, son los nodos del sistema, es decir, son los nodos de la red blockchain y miden los kWh consumidos y generados, envían y reciben la información del resto de participantes, y crean una máquina virtual en la que vive el blockchain y la aplicación de mercado. Además, estos medidores tienen la capacidad de enviar información a cualquier dispositivo que se desee mediante el protocolo de comunicación que se requiera (i.e. Wifi, ZigBee, etc.).

4.1.2. Software

- I. Aplicación de Mercado, Mecanismo de Mercado y Fijación de los precios:** La aplicación de mercado es la parte de código que describe los mecanismos de mercado y de fijación de precios, es decir, la manera en la que se distribuye virtualmente la electricidad dentro de la comunidad y se determinan los precios.

Existen distintos mecanismo de mercado, pero el mecanismo de doble subasta es el más común en este tipo de iniciativas. Consiste en una subasta en la que los vendedores indican el volumen de energía que ofrecen y el precio mínimo al que están dispuestos a cobrarla, y los compradores indican el volumen de energía que desean adquirir y el precio máximo al que están dispuestos a comprarla. De esta manera, organizando la curva de oferta de menor a mayor precio de venta, y la curva de demanda de mayor a menor precio de compra, se casa la energía hasta el punto de corte de ambas curvas. Asociando a cada casación un volumen de energía, un comprador, un vendedor y, por último, un precio. El precio de la energía puede determinarse de manera uniforme para todas las casaciones, por ejemplo, con el precio de la energía de la última casación, es decir, el precio de la energía del punto de corte (i.e. precio de la energía más cara casada). O también, puede determinarse de manera discriminatoria, en la que el precio de cada casación se obtiene como la media entre la oferta del compra y la oferta de venta.

Otro mecanismo de mercado es el mecanismo de precio uniforme, en el que la asignación de energía se realiza en base a la demanda y a la generación de la comunidad. De manera que, si la producción local representa un 40% del consumo total, se adjudica a cada consumidor la energía local correspondiente al 40% de su demanda y el sobrante 60% deben comprarlo al precio de su tarifa de red. De esta manera, todos los participantes pagan el mismo precio por la energía local y se trata a todos de igual manera.

- II. Interfaz de usuario:** La interfaz de usuario puede ser una app o una aplicación web mediante la cual los participantes pueden obtener información sobre el consumo y la generación de la comunidad, pueden establecer sus limitaciones de precios y sus preferencias. Además, a través de la interfaz se pueden obtener las opiniones de los usuarios mediante encuestas, entrevistas, datos sobre la participación de los usuarios, patrones de conducta, etc.
- III. Otras aplicaciones:** Como se verá más adelante hay proyectos que además de los dos elementos mencionados cuentan con otro tipo de aplicaciones (i.e. aplicación para el control del nivel de carga de las baterías, etc.)

4.1.3. Arquitectura blockchain

La elección de la arquitectura blockchain en este tipo de proyectos tiene un papel esencial. Ya que existen muchos tipos de arquitecturas muy diferentes entre sí, pero no hay ninguna de ellas que sirva para todos los casos, sino que cada arquitectura soluciona un problema específico.

Por eso, hay que conocer los requerimientos del mercado P2P para testear distintas arquitecturas y elegir la que mejor se adapte a los requisitos. Algunos requisitos que debe tener la arquitectura blockchain para aplicaciones energéticas son: bajo consumo eléctrico del mecanismo de consenso, bajo coste de las transacciones, una arquitectura ligera y gran velocidad en el procesamiento de las transacciones. A continuación, se muestra una tabla con una comparativa entre arquitecturas.

	Velocidad	Coste de transacción	Seguridad	Tamaño de la red
IOTA	Muy alta	Muy alto	Media	Pequeño
Tendermint	Baja	Medio	Alta	Pequeño
Hyperledger	Alta	Medio	Alta	Pequeño
Ethereum	Media	Bajo	Muy alta	Muy grande

Tabla 7: Comparativa entre distintas arquitecturas blockchain

4.1.4. Funcionamiento del mercado

En este apartado se va a exponer, en muy alto nivel, el funcionamiento de un mercado local de energía P2P genérico.

En los mercados de energía P2P existen dos tipos de participantes: prosumidores y consumidores. Los primeros se diferencian de los segundos en que además de consumir energía, poseen recursos de generación que les permiten, en ocasiones, abastecerse por sí mismo e incluso vender sus excedentes a la comunidad.

El proceso comienza con la lectura de datos de los smart meters de los participantes. Básicamente los datos que se leen son las limitaciones de los precios impuestas por el usuario y la energía que genera o demanda. Por ello, antes de todo, los consumidores deberán indicar en su smart meter el precio máximo que están dispuestos a pagar por la energía local, y los prosumidores deberán delimitar el precio mínimo al que están dispuestos a cobrar su energía. Pero, en un futuro esto podría ir incluso más allá. Por ejemplo, los usuarios podrían establecer sus propias

preferencias en cuanto al mix energético deseado (i.e. solar, eólica, energía procedente de la red, etc.).

Una vez establecidos los límites de precios por los usuarios y realizadas las lecturas, se envían a la aplicación de mercado, ubicada en blockchain, las órdenes de compra y venta de todos los participantes. La aplicación de mercado se encarga, mediante el mecanismo de mercado y el mecanismo de fijación de precios establecido, de casar las ofertas de compra con las de venta y determinar los precios de cada casación. Generando las casaciones y asignando a cada una de ellas: comprador, vendedor, volumen y precio por unidad.

Por ejemplo, en un mecanismo de doble subasta las ofertas de compra se ordenan de mayor a menor precio, y las de venta de menor a mayor precio. Con ambas curvas se realiza la casación de la energía hasta el punto de corte de ambas, dejando fuera la energía más cara (i.e. energía que no ha sido casada) para ser vertida a la red. Y posteriormente se determinan los precios de las casaciones según el mecanismo de fijación de precios de la comunidad.

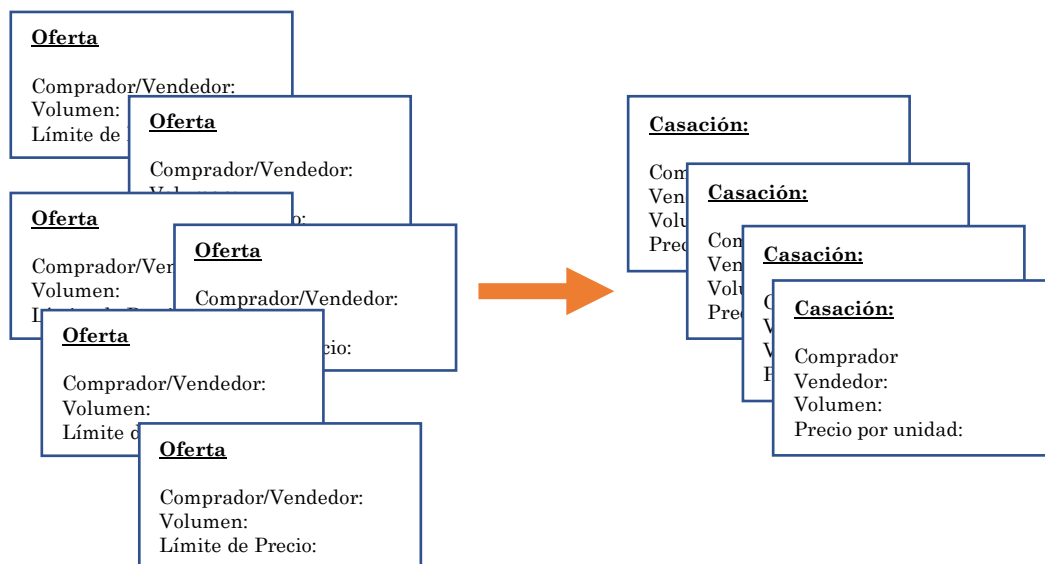


Figura 12: Funcionamiento de la aplicación de mercado. Elaboración Propia.

El siguiente paso es convertir las casaciones en transacciones financieras conforme lo pactado en los contratos inteligentes (i.e. smart contracts) generados durante el proceso de compra. Estos contratos verifican, mediante los smart meters, que la energía inyectada a la red por parte de vendedor, y la energía absorbida por el comprador es la indicada en la casación. Y una vez realizada dicha comprobación el nodo vendedor recibe la transacción financiera y la almacena en su cuenta. Todo el proceso (i.e. todas las transacciones) queda almacenado en la cadena de bloques, de manera que existe un registro de todas las órdenes de compra, las casaciones y las transacciones financieras que se han llevado a cabo durante toda la vida del mercado P2P.

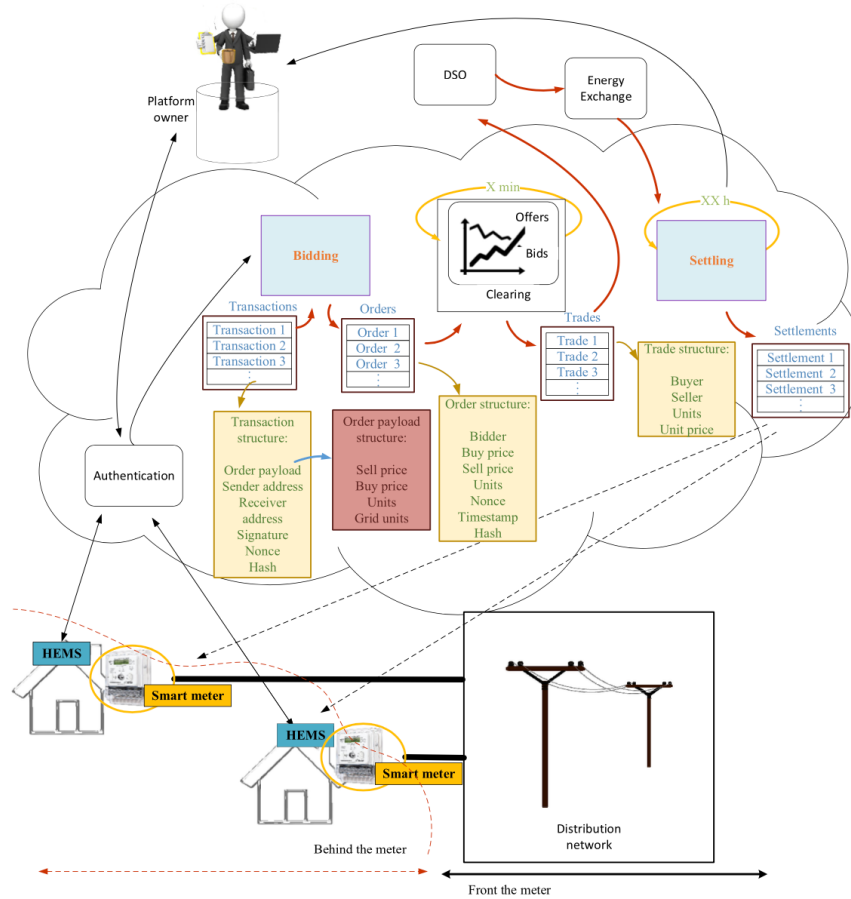


Figura 13: Representación gráfica del proceso de compra en un mercado P2P [19]

Con todo esto, es importante tener claro que este ejemplo y cualquier otro comercio local de energía se realiza únicamente de forma virtual en blockchain. En ningún momento estos mercados tienen influencia en la distribución física de la energía en la red. De manera que si un vecino X compra energía a un vecino Y, la energía que recibe X no proviene de Y, sino que X está pagando para que Y inyecte su energía a la red. De este modo, se promueve el comercio de energía local en la comunidad y se consigue que aumente la demanda de generación local. Y así, verdaderamente, la probabilidad de recibir energía producida localmente aumenta.

5. Metodología de estudio

En esta sección se describe la metodología llevada a cabo en el proyecto.

5.1. Selección de la tecnología y del tipo de proyecto

En este apartado se explican los motivos por los cuales se ha decidido realizar un estudio basado en distintos proyectos que utilizan la tecnología blockchain para el comercio de energía P2P. Para ello se va a responder a dos preguntas, la primera pregunta es: ¿Por qué se ha elegido blockchain en lugar de otra tecnología? Y la segunda: ¿Por qué proyectos de comercio de energía P2P?

Para responder a la primera pregunta se parte del informe realizado por el World Energy Council en asociación con PwC [8], mencionado en apartados anteriores. En el que se explica el interés que están mostrando muchas compañías del sector por esta tecnología, tanto start-ups como compañías más establecidas. Este informe revela que, en 2017, se invirtieron entre \$100M y \$300M en más de 100 aplicaciones blockchain relacionadas con la industria energética. Además de que, actualmente, existen 122 start-ups de blockchain que operan en el sector de la energía.

En esta misma entrevista se hace referencia a la poca madurez que tiene la tecnología blockchain en este sector energético. Lo que significa que todavía queda mucho por investigar y, por tanto, que ahora es el momento de decidir hacia donde deben encaminarse los estudios sobre el uso de esta tecnología.

Por lo tanto, se ha decidido basar este trabajo en proyectos que utilizan blockchain por la innovación que presenta, por el interés que están mostrando grandes empresas y pequeñas start-ups del sector, porque se adapta de mejor manera que otras tecnologías a las necesidades de los mercados de energía P2P y por todas las características que tiene blockchain, que han sido expuestas en un apartado de este proyecto titulado Fundamentos de la Tecnología Blockchain.

En cuanto a la segunda pregunta: ¿Por qué proyectos de comercio de energía P2P?

En primer lugar, porque los mercados de energía P2P pueden ser una potente herramienta para integrar los recursos de generación distribuida en la red y de esta manera, beneficiarse de todas las ventajas que esto conlleva. Otro motivo es, que estos mercados también podrían contribuir a posicionar al consumidor en el centro del sistema. Permitiéndoles participar en decisiones como la procedencia de su energía o el precio máximo que están dispuestos a pagar. Además, educan al consumidor dándole a conocer la evolución de la generación, el consumo y el precio de la energía de la red a lo largo del día. Fomentando que modifiquen sus patrones de consumo en función de la energía disponible.

Es mucha la teoría sobre los posibles beneficios de estos mercados, pero son pocos los estudios prácticos llevados a cabo sobre ellos. Por lo tanto, el principal motivo por el que se ha elegido el comercio P2P es para realizar un análisis exhaustivo de diferentes proyectos desarrollados para compararlos y obtener conclusiones fundamentadas sobre la veracidad de todos los posibles beneficios.

5.2. Criterios de selección de los proyectos

Los casos que se analizan en este trabajo son proyectos piloto, lo que permite evaluar la viabilidad de este tipo de propuestas en base a estudios que han sido probados en el mundo real y no son simplemente teóricos. Además, el carácter internacional del estudio permite analizar diferencias a nivel sociocultural, técnico y regulatorio, que surgen en los proyectos mientras buscan enfrentarse a una misma problemática.

El procedimiento para escoger los casos de estudio se ha basado en:

- 1. La tecnología empleada por las plataformas:** Los proyectos seleccionados están basados en *blockchain*, pero algunos de ellos además hacen uso de otras tecnologías como Inteligencia Artificial (AI) o *machine learning*.
- 2. El grado de madurez o desarrollo de los proyecto:** Se han elegido proyectos piloto que ya han realizado alguna transacción para analizar la viabilidad de este tipo de proyectos mediante estudios funcionales que han sido aterrizados en el mundo real. Con la posterior intención de ajustar y mejorar cada diseño individualmente.
- 3. La ubicación del proyecto:** Los tres proyectos de estudio están localizados en tres continentes distintos para analizar la respuesta y la acogida, por parte de diferentes sociedades y culturas, a estas iniciativas. Además, se han seleccionado proyectos ubicados en países que han demostrado un mayor grado de innovación y que por tanto se encuentran en el top 25 de los países más innovadores del mundo según el Global Innovation Index 2021 [20].
- 4. La compañía que ha desarrollado el proyecto:** Se han seleccionado aquellas plataformas desarrolladas por empresas de prestigio que han realizado varios proyectos y que tienen experiencia en el sector. Además, muchos de los proyectos han sido llevados a cabo por varios socios colaboradores. Lo que ha permitido que cada uno de ellos, dentro del proyecto, haya trabajado en su campo de especialización. Por otro lado, alguno de los proyectos se ha elegido por haber sido liderado por una universidad, con el objetivo de obtener un enfoque distinto sobre el tema, no tan comercial y más basado en investigación.
- 5. Información publicada.** Se ha intentado seleccionar proyectos que tienen suficiente información publicada para realizar el estudio con el mayor detalle posible. Sin embargo, al ser proyectos piloto la información es bastante escasa y por eso hay que poner el foco en la tarea de investigación.

5.3. Recopilación de información

Una vez establecido el criterio para seleccionar las plataformas, la elección de los casos de estudio se ha realizado mediante un estudio bibliográfico a nivel mundial. Y se han elegido únicamente aquellos proyectos que cumplen con todos los requisitos mencionados. En este proceso de selección y de recopilación de información se ha utilizado como material bibliográfico:

- *White Papers* y *Technical White Papers* de las compañías que han desarrollado los proyectos.
- Bases de datos como *IEE Xplorer* y *ScienceDirect*.
- Buscador académico *Google Scholar*.
- Páginas web de los propios proyectos.
- LinkedIn, YouTube y otras redes sociales.

5.4. Diseño del estudio de casos

Todos los casos de estudio han sido presentados siguiendo la misma estructura para poder comparar todos los proyectos de manera precisa. En primer lugar, se expone la información más relevante del proyecto separada en seis puntos:

1. **Introducción:** En la introducción se hace referencia al momento en el que se desarrolla el proyecto, su ubicación, se explica muy brevemente sus fases y se menciona alguna característica que le diferencia del resto de proyectos.
2. **Contexto del proyecto:** En este punto se explica el contexto global y el contexto local del proyecto. El primero hace referencia a los motivos por los cuales la empresa decidió empezar el proyecto, suelen ser motivos muy generales y venir impulsados por la situación que atraviesa el planeta, la tecnología, el medioambiente o la sociedad. Mientras que, el contexto local explica las razones concretas por las cuales la empresa eligió una localización específica para el proyecto. Puede ser por facilidades técnicas, regulatorias, por infraestructura existente o por razones sociales.
3. **Objetivos del proyecto:** En este punto se define el objetivo general u objetivo final del proyecto y los objetivos específicos que han sido necesarios para dar respuesta al objetivo final. Por ejemplo, evaluar la viabilidad técnica, la respuesta de la sociedad o identificar las limitaciones del proyecto.
4. **Aspectos técnicos:** Aunque habría gran cantidad de información técnica que se podría mencionar sobre cada proyecto, no ha sido objeto de este trabajo discutir sobre este tema por su complejidad. Por eso, en este punto se hace una breve descripción del hardware, software y de la arquitectura blockchain empleada en el proyecto.
5. **Tabla resumen del proyecto:** Para favorecer la visión global del proyecto, después de todas las explicaciones se recoge en una tabla resumen los aspectos más relevantes del proyecto. Los campos de la tabla se muestran a continuación.

Nombre del Proyecto	
Marco Temporal	
Localización	
Socios y participantes	
Presupuesto	
Contexto Global del Proyecto	
Contexto Local del Proyecto	
Objetivos	
Aspectos técnicos	

Tabla 8: Tabla resumen del proyecto

- 6. Resultados y conclusiones:** En este último punto se exponen la interpretación de los resultados y las conclusiones obtenidas del proyecto

5.5. Diseño del análisis DAFO

El análisis DAFO es una técnica que busca analizar las condiciones internas de un proyecto (i.e. fortalezas y debilidades) y las condiciones externas del entorno de un proyecto (i.e. oportunidades y amenazas). En este trabajo se pretende, con ayuda de esta herramienta, analizar factores positivos y negativos que tengan cada uno de los proyectos. Por ejemplo, la contribución del proyecto a la integración de los DERs en la red, la acogida del proyecto, la competencia en su entorno, posibles problemas que pueda crear el proyecto, problemas que solucione, etc.

Para ello, se ha rellenado una matriz como la que aparece a continuación por cada caso de estudio para identificar sus limitaciones y sus posibilidades en un futuro. Con el objetivo, de poner en conjunto los resultados y determinar la viabilidad del comercio P2P, su capacidad para solucionar los problemas presentes y futuros de la red, su contribución para mejorar la situación medioambiental y para integrar los recursos de generación distribuida en la red.

N E G A T I V O P O S I T I V O	INTERNO	EXTERNO
	DEBILIDADES	AMENAZAS
	FORTALEZAS	OPORTUNIDADES

Tabla 9: Tabla Análisis DAFO

6. Estudio de Casos

Los casos seleccionados en base a los requisitos mencionados anteriormente fueron cuatro: The Brooklyn Microgrid (EEUU), REnW Nexus (Australia), Quartierstrom (Suiza) y Verv's Hackney Project (Londres).

- I. **Caso de Estudio 1:** El primer proyecto es The Brooklyn Microgrid (BMG) que, como su propio nombre indica, está ubicado en Brooklyn, Nueva York, EEUU. Este proyecto fue elegido por ubicarse en el continente americano, por haber sido desarrollado por una LO3 Energy, empresa referente en soluciones blockchain para el comercio P2P, y por ser uno de los primeros proyectos de este tipo a nivel mundial.
- II. **Caso de Estudio 2:** El segundo proyecto es REnW Nexus que se localiza en el pueblo de Fremantle, Perth, Australia. Este proyecto fue seleccionado porque en él participaron universidades, entidades públicas y privadas. Además, porque se ubica en un continente diferente al resto de proyectos lo que enriquece mucho la investigación y por haber participado Power Ledger desarrollando la plataforma blockchain.
- III. **Caso de Estudio 3:** El tercer proyecto se denomina Quartierstrom y está ubicado en Walenstadt, Canton of St. Gallen, Suiza. Este proyecto es de especial interés porque fue liderado por tres universidades: ETH Zürich, Universität St. Gallen y Hochschule Luzern por lo que tiene un enfoque de investigación. Además, hay un informe [10] publicado de este proyecto muy detallado.
- IV. **Caso de Estudio 4:** El cuarto, y último, caso de estudio es Verv's Hackney Project ubicado en Hackney, Londres, Reino Unido. Este proyecto fue seleccionado, a pesar de encontrarse en el continente europeo y ya contar con otro caso de estudio ubicado en este continente, por los siguientes motivos: por haber sido desarrollado por la start-up londinense Verv que ha ganado múltiples premios en los últimos años gracias a su capacidad de innovación, por haber sido implantado en la comunidad de Hackney Banister House Estate que es una comunidad de viviendas sociales, y por haber sido el primer proyecto de este tipo realizado en Reino Unido.

6.1. Caso de Estudio 1: Brooklyn Microgrid (BMG)

6.1.1. Introducción

El primer caso que se va a exponer es la microrred de Brooklyn, Nueva York, EEUU. Este proyecto desarrollado por LO3 Energy nació en el año 2015 con la finalidad de crear un mercado local P2P donde los miembros pudieran comprar y vender energía renovable procedente de paneles solares mediante la tecnología blockchain. Y, año más tarde, en el 2017, se incluyó en el proyecto el tema de la eficiencia energética de la demanda basada en la comercialización de dispositivos que utilizan IoT para desactivar automáticamente elementos y reducir el consumo eléctrico.



Figura 14: Comunidad de vecinos de BMG [21]

6.1.2. Contexto del proyecto

Este proyecto nace hace 7 años en un contexto global en el que la mayor parte de la energía estaba siendo producida por grandes centrales de generación no renovable, y las consecuencias medioambientales estaban siendo evidentes. Por ese motivo, había aumentado la instalación de recursos de generación distribuida de origen renovable en la red como solución al dilema energético que se estaba viviendo. Pero, debido al carácter intermitente de las fuentes renovables, para favorecer su incorporación en el sistema energético, estaban surgiendo nuevas propuestas de mercado basadas en un enfoque más local. Formas diferentes al tradicional de mercado mayorista nacional.

Los mercados P2P reflejan a nivel local la escasez o el exceso de energía, y permiten responder en tiempo real a la volatilidad de los DERs. Este modelo de mercado posibilita un balance de generación demanda local, fiable y sostenible, incentiva las inversiones en DERs y da poder a los pequeños prosumidores y consumidores.

En cuanto al contexto local, la ubicación seleccionada para el proyecto fue Brooklyn por los siguientes motivos:

- I. Durante los últimos años el aumento de eventos climáticos en Nueva York (i.e. Huracán Sandy, olas de calor, etc.) estaba provocando problemas de operación en las obsoletas redes de Brooklyn.
- II. Estaban surgiendo nuevas dificultades en la red provocadas por la integración de los recursos de energía distribuida (i.e. baterías almacenamiento de energía, vehículos eléctricos, etc.).
- III. El área de BMG es especialmente vulnerable a los fallos en la red porque, debido a su ratio de utilización, la capacidad eléctrica está aproximándose a su límite.
- IV. Se había iniciado en Nueva York un proceso regulatorio muy agresivo llamado *Reforming The Energy Vision* bajo el cual se estaba forzando a las utilities a desarrollar nuevos modelos de negocio para integrar los DERs en la red.
- V. Brooklyn es un vecindario muy diverso formado por ciudadanos de elevados y bajos ingresos. Además, muchos vecinos contaban en ese momento con recursos de energía distribuida. Por lo tanto, era un buen lugar para poner a prueba esta solución y para demostrar que sirve para todo tipo de usuarios de la red independientemente de su poder adquisitivo.

6.1.3. Objetivos del proyecto

En este contexto surge BMG con el objetivo de crear un red limpia, local, resiliente y confiable. En la que se promueve la economía circular manteniendo el dinero dentro de la comunidad y creando trabajos a nivel local. BMG es una organización en la que no sólo se tiene en cuenta el beneficio económico, sino también la comunidad y el medioambiente. Brooklyn Microgrid quiere formar parte y asistir la proliferación de generación y consumo solar en la ciudad de Nueva York.

6.1.4. Aspectos técnicos

BMG es posible gracias a una infraestructura física y a una plataforma virtual que están claramente separadas. En la primera ocurre todo el flujo de electricidad, mientras que en la segunda ocurre la transferencia de información.

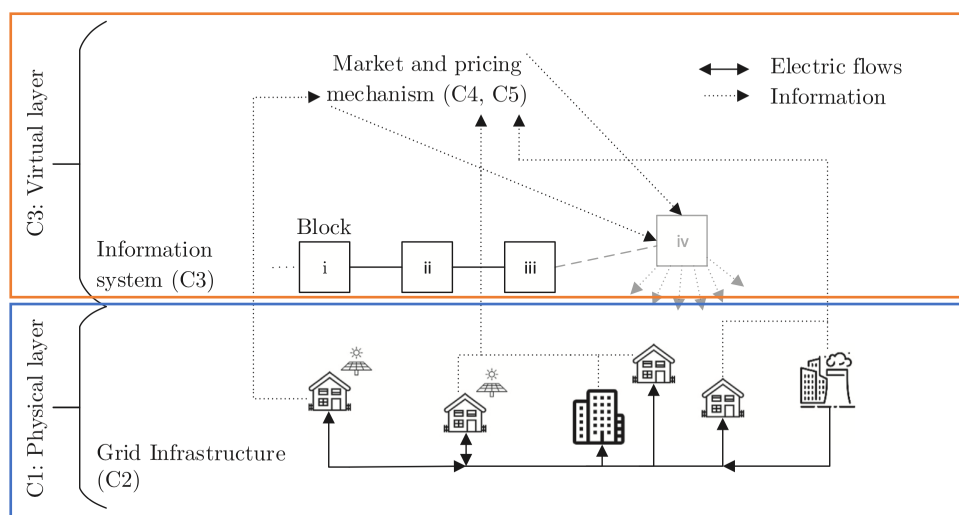


Figura 15: Topología de la Microrred de Brooklyn [22]

Hardware:

La infraestructura o capa física de este proyecto, consistía principalmente en:

- **Una microrred adicional a la red de distribución:** Esta microrred podía operar de dos maneras. La primera es en forma de isla, actuando como respaldo ante posibles interrupciones o cortes de suministro, y la segunda es conectada a la red de distribución.

La situación normal de operación es la segunda, en la que la conexión entre la red de distribución tradicional y la red de distribución de BMG, que se utiliza para balancear la generación y la demanda de la microrred, está activa. Sin embargo, en situaciones de emergencia esta conexión se desacopla.

- **TAGe o TransActive Grid elements:** son smart meters que se instalan en la red, en las viviendas y en los edificios. Estos dispositivos permiten medir y ofrecer para el comercio los kWh de energía generada por los paneles solares en la comunidad. Además, almacenan datos referentes a consumos y generaciones de energía para luego enviarlos a blockchain y facilitar las transacciones entre vecinos. Básicamente, son los nodos de la red blockchain que sirven de enlace entre la parte física de la red y la plataforma virtual.

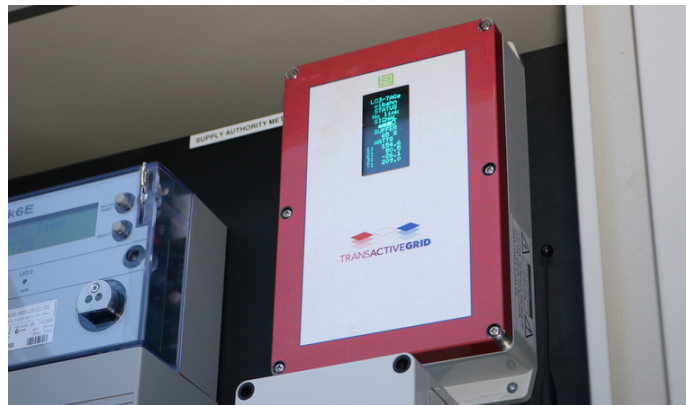


Figura 16: TransActive Grid Smart Meter (TAGe) [23]

En la capa física de BMG se incluyen también la red tradicional, los paneles solares (PV) y los medidores tradicionales que se mantienen instalados para verificar las medidas de los smart meters.

Software:

- **Aplicación de Mercado y Mecanismo de Mercado:** El mecanismo de mercado implementado por la aplicación es un mecanismo de doble subasta en franjas horarias uniformes de 15 minutos, donde los precios son adjudicados para cada periodo.

La aplicación funciona de la siguiente manera, primero los consumidores y prosumidores envían su oferta de compra/ venta que incluye una cantidad de energía y un precio límite. Los consumidores fijan en la oferta el precio máximo de compra y los prosumidores fijan el precio mínimo de venta. Una vez enviadas todas las ofertas para la siguiente franja horaria se casa oferta y demanda, siguiendo un orden de despacho de mayor a menor precio. Es decir, como en toda subasta, se organizan las ofertas de venta de menor a mayor precio y las de compra de mayor a menor precio. De manera que se casan todas las ofertas previas al punto de corte de ambas curvas. Así que, aquellos consumidores cuyos precios de compra son inferiores al adjudicado en la franja tienen que comprar su energía a la red. Lo mismo ocurre con los vendedores que no son casados, que virtualmente vierten su energía a la red. El mecanismo de fijación de precios se rige de forma que la última oferta casada es la que determina el precio de la franja horaria.

- **Interfaz de usuario:** no existe mucha información referente a las características de la interfaz de usuario de BMG. Sin embargo, se sabe que es una aplicación que permite a los usuarios leer la información referente a la generación y al consumo de la comunidad, y establecer las limitaciones en los precios de la energía.

Arquitectura Blockchain:

La tecnología blockchain proporciona la infraestructura técnica necesaria para la comercialización local de energía. Funciona mediante la arquitectura TransActive Grid que utiliza una red privada blockchain, el protocolo Tendermint y Tokens XRG. La arquitectura recibe su nombre de TransActive Grid, *joint venture*¹ entre LO3 Energy y Consensus Systems.

6.1.5. Componentes de la microrred de Brooklyn

En un informe sobre BMG [9] se identifican los siete componentes necesarios en un mercado de energía a nivel de microrred como BMG. A continuación, aparecen una figura y una tabla que explican los siete componentes que hacen que BMG sea posible.

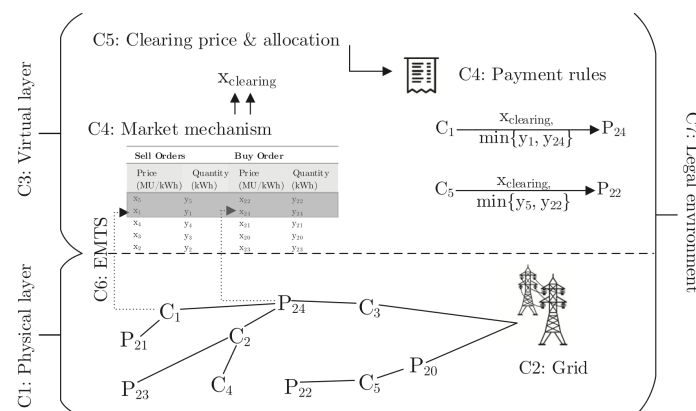


Figura 17: Los 7 componentes de un Mercado de Energía a nivel de microrred [22]

¹ *Joint venture* es una asociación estratégica temporal o colaboración empresarial que se realiza entre empresas que buscan introducirse en un nuevo mercado o desarrollar un negocio durante un tiempo.

BROOKLYN MICROGRID		
Componentes de un Mercado de Energía Microrred		BMG y su estado de desarrollo
C1	Configuración de la Microrred <i>Microgrid Setup</i>	Los participantes del mercado son consumidores y prosumidores locales. Actualmente, solo se comercializa electricidad, aunque en un futuro se pretende distribuir calefacción.
C2	Conexión a la Red Tradicional <i>Grid Connection</i>	La red tradicional balancea generación y demanda, la situación normal es la conexión entre red y microrred, sin embargo, en caso de emergencia la microrred puede funcionar de manera aislada.
C3	Sistema de Información <i>Information System</i>	El sistema de información está implementado vía TransActive Grid basada en tecnología blockchain y utiliza el protocolo Tendermint. Conecta a todos los participantes, proporciona la plataforma de mercado, monitoriza las operaciones, etc.
C4	Mecanismo de Mercado <i>Market Mechanism</i>	El mecanismo de mercado incluye la casación del mercado, las reglas de pago y el formato de oferta. Está implementado por el sistema de información. BMG utiliza un Mecanismo de Doble Subasta en franjas horarias uniformes de 15 minutos y con precios adjudicados a cada franja horaria
C5	Mecanismo de Fijación de Precios <i>Pricing Mechanism</i>	El mecanismo de valoración está implementado vía el mecanismo de mercado. Cada franja horaria se determina un precio de la electricidad. Los precios dependen de varios factores la generación, la demanda, factores socioeconómicos etc.
C6	Sistema de Gestión del Comercio de Energía <i>Energy Management Trading Systems (EMTS)</i>	El EMTS buscar asegurar automáticamente el suministro de energía para un participante del mercado mientras implementa su estrategia de oferta. Para ello necesita acceso a los datos de demanda y suministro del participante. Basado en esto el EMTS pronostica el consumo y generación, y desarrolla su estrategia de oferta. En BMG los participantes establecen las limitaciones de precio y eligen su mix de generación.
C7	Ambiente Legal <i>Legal Environment</i>	BMG se encuentra trabajando con la compañía de suministro eléctrico de Nueva York, Consolidated Edison, Inc. para determinar el marco regulatorio necesario para legalizar un mercado de energía P2P a nivel de microrred.

Tabla 10: Resumen de los Componentes Brooklyn Microgrid

6.1.6. Tabla Resumen del Proyecto

Nombre del Proyecto	Brooklyn Microgrid (BMG)
Marco Temporal	2015 – Actualidad El proyecto comenzó en el año 2015, pero no fue hasta abril del año 2016 cuando se realizó la primera transacción.
Localización	Brooklyn, Nueva York, EEUU
Socios y Participantes	• LO3 Energy • Consensus Systems • Siemens - Next47 • Edison
Presupuesto	-
Contexto Global del Proyecto	En 2015, las consecuencias medioambientales derivadas de la masiva generación de energía con grandes centrales de origen no renovable estaban siendo evidentes. Como solución al dilema energético había aumentado la instalación de recursos de generación distribuida de origen renovable en la red. Y, para favorecer su incorporación en el sistema energético estaban surgiendo nuevas propuestas de mercado, diferentes al mercado mayorista nacional, basadas en un enfoque local. Dentro de los nuevos modelos, aparecen los mercados P2P reflejan a nivel local la escasez o el exceso de energía, y permiten responder en tiempo real a la volatilidad de los DERs.
Contexto Local del Proyecto	• El aumento de eventos climáticos en Nueva York estaba provocando problemas de operación en las redes de Brooklyn. • Nuevas dificultades en la red provocadas por la integración de los recursos de energía distribuida. • Área vulnerable a los fallos en la red porque la capacidad eléctrica está aproximándose a su límite. • La ciudad de Nueva York se encontraba en un procesos regulatorio muy agresivo llamado <i>Reforming The Energy Vision</i>. • Vecindario muy diverso formado por ciudadanos con elevados y bajos ingresos. Además, muchos vecinos contaban en ese momento con recursos de energía distribuida. Por lo tanto, era un buen lugar para demostrar que sirve para todo tipo de usuarios de la red independientemente de su poder adquisitivo.
Objetivos	• Crear una red limpia, local, resiliente y confiable. • Promover la economía circular. • Participar y asistir en la propagación de la generación y el consumo solar en Nueva York.
Aspectos Técnicos	Hardware: TAGe smart meter, medidores tradicionales y paneles solares. Software: Aplicación de mercado e Interfaz de usuario Arquitectura Blockchain: • TransActive Grid • Blockchain Privada • Protocolo Tendermint • Token Exergy (XRG), ERC20.

Tabla 11: Resumen Caso de Estudio 1 (Brooklyn Microgrid)

6.1.7. Resultados y Conclusiones

Comportamiento y aceptación por parte de los usuarios:

- I. El nivel de participación en BMG y la percepción positiva por parte del público demuestra que existe un potencial mercado para la energía local y renovable.
- II. Este proyecto no se ha centrado en estudiar en nivel de aceptación de los participantes. Por lo que, todavía queda por investigar los incentivos económicos y socioeconómicos que motivan a los miembros de la comunidad a participar en este tipo de proyectos.

Tecnología blockchain y aspectos técnicos:

- I. Se ha demostrado que la arquitectura blockchain privada con protocolo Tendermint implantada en este proyecto puede operar satisfactoriamente un mercado de energía P2P.
- II. El consumo energético de blockchain no ha representado un problema en el proyecto. Ya que, al utilizar una red privada el mecanismo de consenso requiere mucho menos consumo que el necesario en una red pública con PoW.
- III. Los mecanismos de mercado y de fijación de precios todavía necesitan ser adaptados y testeados para conseguir una asignación de energía más eficiente. Además, la aplicación de mercado desarrollada es muy simple y se necesita trabajar más en ella para implementar estrategias de casación más inteligentes.

Modelo de negocio, regulación y divulgación del proyecto:

- I. El modelo de negocio de las comunidades energéticas varía según el país. Por eso, este proyecto no puede sacar conclusiones globales con respecto a este tema. Ya que dependiendo del país varía la regulación, la cultura, las necesidades y los servicios ofrecidos por las utilities. Por eso, es necesario primero hacer varios proyectos piloto en distintas localizaciones para ver como una solución como esta genera nuevos modelos de negocio y nuevos ingresos en ellas.
- II. Una cuestión importante en la mayoría de los países es el ambiente regulatorio. La regulación debe cambiar antes de que los mercados de energía P2P puedan ser implementados comercialmente. Ya que, a nivel legal, actualmente, no se permite realizar transacciones energéticas.
- III. Aunque la regulación siga siendo un problema, los reguladores se muestran muy comprensivos con este tipo de iniciativas. Esto lleva a pensar que en un futuro la situación legal va a cambiar, lo que no se sabe es el camino que va a tomar.
- IV. La primera transacción, en abril de 2016, fue cubierta por múltiples medios de comunicación como: The New York Times, Fox News, Scientific American, Greentech Media y PBS.

6.1.8. Análisis DAFO

		INTERNO	EXTERNO
NEGATIVO		DEBILIDADES	AMENAZAS
		- Mecanismos de mercado y de fijación de precios muy simples que deben ser mejorados. - Falta de investigación referente al comportamiento de los participantes, a sus preferencias y a los factores socioeconómicos que llevan a los usuarios a participar en comunidades energéticas.	- Obsolescencia tecnológica. - Obstáculos regulatorios y legales. - Modelo de negocio muy dependiente de la ubicación. Es complicado trasladarlo a otros países y comunidades.
POSITIVO		FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
		- Autoabastecimiento en caso de contingencia o incidencia en la red de distribución tradicional, esto se refleja en un aumento de la seguridad del suministro eléctrico, la fiabilidad y la resiliencia - Reducción del número de intermediarios en el proceso de compraventa de energía. Conecta al comprador y al vendedor de manera directa. - Mayor poder de decisión de los consumidores. - Apoyo a la economía local. - Los precios de la energía local incentivan a los participantes a mover sus consumos a periodos en los que haya energía local solar disponible.	- Integración de los recursos de generación renovable distribuida en el sistema energético. - Implantación en comunidades vulnerables a cortes de suministro eléctrico. - Implantación en comunidades alejadas de las redes de distribución. - Implantación de proyectos piloto similares a BMG en otros países para demostrar a los reguladores y las utilities que, tarde o temprano, este modelo de mercado llegará. - Implantación de otras tecnologías de generación (i.e. eólica de eje vertical, cargador de VE, etc.) y sistemas de almacenamiento energético. - Aumento de la sensibilización sobre el consumo energético en la sociedad. - Proyecto muy escalable a nivel de participantes dentro de la comunidad si se utiliza la arquitectura Blockchain adecuada. - Actualmente, los consumidores esperan una experiencia de abastecimiento energético muy diferente a la que han tenido en el pasado. Las cifras revelan que, en EEUU, el 69% de los consumidores tienen interés en participar en este tipo de proyectos. - En un futuro, se podría investigar sobre la posibilidad de conectar varias comunidades energéticas para facilitar el balance generación demanda entre ellas.

Tabla 12: Análisis DAFO Caso de Estudio 1 (Brooklyn Microgrid)

6.2. Caso de Estudio 2: RENeW Nexus Australia

6.2.1. Introducción

El segundo caso es RENeW Nexus en Fremantle, Perth, Australia. Este proyecto nació en el año 2017 y en él participaron entidades públicas, universidades y numerosas empresas privadas como:

Entidades públicas	Universidades	Socios industriales
• City of Freemantle • Australian Government • Western Power • AEMO (Australia Energy Market Operator)	• Curtin University • Murdoch University	• Power Ledger • Low Carbon Living CRC • CISCO • CSIRO Data 61 • EnergyOS • Synergy • DevelopmentWA

Figura 18: Socios y entidades que han colaborado en el proyecto

A continuación, se muestra el papel de algunas de las entidades colaboradoras del proyecto:

- City of Fremantle, responsable de administrar la granja solar de 5MW
- Australian Government, el gobierno australiano ayudó a financiar el proyecto incluyéndolo en el programa *Smart Cities and Suburbs Program*
- Western Power, operador de la red eléctrica del oeste de Australia (WA)
- Curtin University, responsable de la parte técnica y administrativa del proyecto
- Murdoch University, responsable de la gestión del sistema de aguas.
- Power Ledger, empresa desarrolladora de la plataforma Blockchain que permite realizar transacciones entre los participante P2P
- CISCO y CSIRO Data 61, responsables de conducir el análisis de datos para la toma de decisiones en el proyecto
- Synergy, empresa generadora y comercializadora de energía en el SWIS (South West Interconnected System), ayudó al balance generación-demanda de la comunidad, comprándole y vendiéndole energía en caso de excedente o déficit.



Figura 19: Proyecto RENeW Nexus en Fremantle

El proyecto consta de tres partes Freo 48, Loco 1 y Loco 2, pero este trabajo se va a centrar únicamente en la primera de ellas. En la primera parte del proyecto, llamada Freo 48, formada por dos etapas, participaron 48 hogares intercambiando energía producida por placas solares utilizando la plataforma de Power Ledger. Con esta plataforma consumidores y prosumidores podían cambiar su tarifa de compra y venta de energía, de manera dinámica. De esta manera según los precios fijados por ambos cada 30 minutos se casaban la oferta y la demanda asignando a cada participante la energía que le correspondiera según los resultados de la casación.

6.2.2. Contexto del proyecto

Este proyecto surge en un contexto global en el que la inmensa instalación y conexión a la red de distribución de paneles solares en los tejados está derivando en inestabilidades eléctricas y económicas. A nivel eléctrico, la programación de la generación se puede ver afectada a ciertas horas del mediodía cuando hay un exceso de generación solar fotovoltaica, creando un flujo inverso de energía que puede provocar armónicos, fluctuaciones de tensión, etc. Y a nivel económico, por la variación en los precios entre las diferentes horas del día, además del aumento de costes debido a la necesidad de elementos y servicios auxiliares para controlar la estabilidad de la frecuencia. Por ello surgen iniciativas, que buscan solucionar estos problemas, en entornos como el SWIS en los que hay una gran cantidad de potencia solar local instalada. La ubicación seleccionada para este proyecto fue Fremantle por su contexto local:

- I. La ciudad de Fremantle participa y es líder global desde el año 2014 en una iniciativa llamada *One Planet Living* bajo la cual incentiva y hace un seguimiento de la sostenibilidad de sus operaciones. Esta iniciativa promueve la participación de Fremantle en diversos proyectos relacionados con la adopción de energías renovables y la reducción de las emisiones de carbono.
- II. La ciudad de Fremantle cuenta con muchos prosumidores con instalaciones de generación solar distribuida. Además, cuenta con una granja de paneles solares de 5 MW de potencia instalada.
- III. Cuenta con unos ciudadanos preocupados por situación medioambiental y con predisposición para participar en este tipo de proyectos de prueba.

6.2.3. Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es hacer un estudio de los mercados de energía localizados que utilizan tecnología blockchain para analizar su potencial y sus beneficios. Más específicamente, el proyecto busca:

- I. Realizar una prueba de concepto sobre los mercados de energía P2P.
- II. Analizar el valor del comercio de energía P2P para los participantes y los socios involucrados en el proyecto.
- III. Probar la interoperabilidad entre la plataforma Power Ledger, la empresa comercializadora de energía Synergy y el operador de la red Western Power.
- IV. Probar las posibilidades que ofrece la plataforma Power Ledger como cliente de un mercado P2P.

- V. Investigar sobre el potencial del comercio de energía P2P para incentivar a los consumidores a cambiar sus patrones de consumo durante el día para apoyar a la red y tratar los flujos inversos de energía causados por el exceso de generación solar que se produce durante el día.

6.2.4. Aspectos técnicos

Hardware:

- **Smart meters:** Cada participante contaba con un medidor inteligente Saturn South de tres fases para leer los valores en tiempo real del flujo de energía bidireccional, es decir, este medidor tomaba valores tanto de generaciones como de consumos. Los medidores eran instalados en los cuadros eléctricos de los hogares de los participantes. Las lecturas de los contadores se comunicaban de forma inalámbrica a la plataforma blockchain.
- **Recursos de generación:** En RENew Nexus algunos participantes poseían sus propios paneles solares para la generación, y, además, la comunidad contaba con una granja solar de 8 hectáreas y una capacidad de 5 MW.

Software:

- **Aplicación de mercado y Mecanismo de mercado:** La aplicación de mercado ejecutaba el mecanismo de mercado cada 30 minutos. El mecanismo de mercado no aparece especificado en ningún informe.
- **Interfaz de usuario:** Cumplía con las mismas funcionalidades que las interfaces de los anteriores proyectos: representación de datos referentes a los consumos y generaciones de la comunidad, y configuración de las preferencias (i.e. límite en los precios) de los usuarios.

Arquitectura blockchain:

Sobre la arquitectura empleada en este proyecto no existe mucha información pública. Se sabe que convivieron dos arquitecturas diferentes, una pública y otra privada, que utilizaban tokens distintos: SPARKZ y POWR. La arquitectura pública era Ethereum y la privada fue desarrollada por Power Ledger.

6.2.5. Esquema de costes

El esquema de costes se divide en costes fijos y costes variables. Los participantes pagaban unos costes fijos correspondientes al cargo de capacidad, destinado a la empresa comercializadora de energía, y al cargo de red, destinado al operador de red para cubrir el mantenimiento, la reparación y la operación de las redes de transporte y distribución. En la Figura 20 aparecen los costes fijos que debían pagar los participante P2P recuadrados en color verde, que ascienden a \$3.30 / día, este valor es superior a los costes fijos que debían pagar los hogares con la tarifa habitual del SWIS. Este valor fue calculado por el operador de la red y por la empresa comercializadora para recupera los costes de servir energía a la comunidad P2P.

Como costes variables, según si los participantes compraban energía local o procedente de la red, se incurría en costes diferentes. Si la energía era comprada a los prosumidores, además del coste de la energía procedente de la casación, se debía pagar una tasa de transacción a Power Ledger. Estos costes aparecen en la Figura 20 recuadrados en azul. Por el contrario, si la energía era adquirida de la red el precio de la energía varía según si el consumo se produce en periodo pico o valle (i.e. Discriminación horaria). Estos costes fueron calculados según el precio medio del BM (Balancing Market) durante los 12 meses previos al proyecto y aparecen en la Figura 20 recuadrados en naranja. Además, también recuadrada en naranja, aparece la tasa de recompra del minorista que hace referencia al precio de la energía que es exportada por los prosumidores a la red, cuando el consumo es inferior a la generación. Esta tasa es mucho mayor en la tarifa típica de los residentes de WA que para los participantes P2P.

Rate	Time	Phase 1 Price	Phase 2 Price	Typical flat rate WA residential tariff*
Retailer Everyday Peak Rate	3:00pm - 9:00pm	9.90 c/kWh	7.80 c/kWh	28.8229 c/kWh
Retailer Everyday Off-peak Rate	All other times	5.72 c/kWh	4.90 c/kWh	28.8229 c/kWh
Retailer Buyback Rate	Daily	4.00 c/kWh	3.50 c/kWh	7.135 c/kWh
RENeW Nexus P2P Energy Rate	Any time	Set by participants	Set by participants	N/A
Power Ledger Transaction Fee	Any time	0.50 c/kWh	0.50 c/kWh	N/A
Retailer Capacity Charge	Daily	\$1.10 / day	\$1.10 / day	N/A
Network Operator Network Charge	Daily	\$2.20 / day	\$2.20 / day	N/A
Supply Charge	Daily	N/A	N/A	\$1.033263 / day

Figura 20: Tarifas establecidas en la Fase 1 y Fase 2 de Freo 48 [24].

6.2.6. Tabla Resumen del Proyecto

Nombre del Proyecto	RENew Nexus		
Marco Temporal	El proyecto nació en el año 2017 • Freo 48 – Fase 1 de noviembre 2018 a junio 2019 • Freo 48 – Fase 2 de octubre 2019 a enero 2020 • Loco 1 – enero 2020 hasta el final del proyecto • Loco 2 - enero 2020 hasta el final del proyecto		
Localización	Fremantle, Perth, Oeste de Australia		
Socios y Participantes	Entidades públicas • City of Freemantle • Australian Government • AEMO (Australia Energy Market Operator)	Universidades • Curtin University • Murdoch University	Socios industriales • Power Ledger • Low Carbon Living CRC • CISCO • CSIRO Data 61 • EnergyOS • Synergy • DevelopmentWA
Presupuesto	El presupuesto asciende a un total de \$8.25M • \$2.57M financiados por el Gobierno Australiano • \$5.68M financiados por socios del proyecto		
Contexto Global del Proyecto	RENew Nexus nace en un momento en el que la inmensa instalación de paneles solares que está provocando problemas eléctricos y económicos. Ante esto surgen proyectos como los mercados de energía P2P que buscan reducir el impacto de la instalación masiva de recursos de generación distribuida en el sistema.		
Contexto Local del Proyecto	• La ciudad de Fremantle participa y es líder global de una iniciativa llamada One Planet Living que promueve su participación en proyectos relacionados con la adopción de energías renovables y la reducción de las emisiones de carbono. • Gran número de prosumidores con instalaciones de generación solar distribuida. Además, Fremantle cuenta con una granja de paneles solares de 5 MW de potencia instalada. • Ciudadanos preocupados por situación medioambiental y con predisposición para participar en este tipo de proyectos de prueba.		
Propósito/Objetivos	El objetivo del proyecto es hacer un estudio de los mercados de energía P2P que utilizan blockchain, con ello busca: • Realizar una prueba de concepto sobre los mercados de energía P2P. • Analizar el valor que aportan estos mercados para sus participantes y socios • Probar la interoperabilidad entre Power Ledger, Synergy y Western Power. • Probar las posibilidades que ofrece la plataforma Power Ledger. • investigar sobre el potencial del comercio de energía P2P para incentivar a los consumidores a cambiar sus patrones de consumo y tratar los flujos inversos de energía.		
Aspectos Técnicos	Hardware: Smart meters de diseño propio. Software: Aplicación de mercado e Interfaz de usuario. Arquitectura Blockchain: • Token POWR, ERC20. • Token Sparkz. • Mecanismo de consenso PoS.		

Tabla 13: Resumen Caso de Estudio 2 (RENew Nexus)

6.2.7. Resultados y Conclusiones

Comportamiento y aceptación por parte de los usuarios:

- I.** Durante la fase de reclutamiento del proyecto se pudo comprobar que es mucho más sencillo reclutar prosumidores que consumidores, a pesar de existir muchos menos hogares pertenecientes a este primer grupo que al segundo. Pero, esto es lógico si se tiene en cuenta que los prosumidores están más motivados por entrar en este tipo de proyectos al haber realizado grandes inversiones en paneles solares y querer obtener retorno.
- II.** Los encuestas preliminares realizadas a los participantes mostraron que la mayoría de ellos estaban motivados por unirse a la prueba por razones no financieras. La razón clave fue que estaban entusiasmados con la idea de formar parte de un proyecto basado en una comunidad sostenible e innovadora.
- III.** El consumo diario de los participantes es un parámetro de gran importancia. En este proyecto, los costes fijos eran elevados, mientras que los costes variables eran inferiores a la tarifa habitual en el SWIS. Lo que sucede en estos casos es que pertenecer al mercado P2P es beneficioso únicamente para aquellas personas con consumos elevados (>11 kWh/día).
- IV.** El punto anterior se vio reflejado en pérdidas financieras para la mayoría de los participantes. El 94% de los hogares experimentaron costes mayores que los que habrían obtenido con la tarifa habitual.
- V.** Los resultados de las encuestas mostraron que la mayoría de los encuestados estaban descontentos con la estructura de la tarifa, siendo esta la principal causa de las bajas del proyecto. La tarifa eliminó cualquier incentivo de intercambiar energía entre participantes y de cambiar su consumo. Por eso, cuando se les preguntó a los participantes sobre si continuarían o no en el proyecto, el 78% de ellos respondieron que solo si iban a ahorrar dinero o por lo menos si no iban a incurrir en pérdidas.
- VI.** El 69% de los usuarios indicaron que durante el proyecto consideraron modificar sus patrones de consumo para aumentar la demanda en periodos en los que había energía local disponible. Y, el 75% de este grupo declararon que no solo lo pensaron, sino que, además, hicieron un esfuerzo para modificar sus hábitos de consumo.
- VII.** Las encuestas también mostraron que muchos participantes no habían entendido ni el funcionamiento de los mercados P2P ni el de la red eléctrica. De esta conclusión se extrae la necesidad de educar a la sociedad en este tipo de aspectos para poder evolucionar hacia otras maneras de generar, consumir y comercializar la energía.

Tecnología blockchain y aspectos técnicos:

- I. Los resultados de Freo 48 mostraron que desde un punto de vista técnico el comercio de energía P2P es viable.
- II. La tecnología blockchain permite realizar transacciones energéticas más rápido que el operador de mercado en los mercados eléctricos tradicionales. Esto abre las posibilidades de los mercados permitiendo crear soluciones de prepago, pago en el momento de la transacción y automatización en la factura de consumidores.
- III. El coste de la instalación de los smart meters Saturn South de manera adicional a los ya existentes, para obtener una visión en tiempo real del uso de la energía de los usuarios, no fue justificado por los beneficios obtenidos con ellos. Es decir, según los socios la proporción coste-beneficio fue demasiado alta. Además, 19 participantes tuvieron problemas durante la instalación de estos dispositivos.
- IV. Existe una gran diferencia en la generación de energía entre las horas de sol y el resto. Mientras que de 7 pm a 6 am toda la energía es adquirida de la red por no haber generación P2P procedente de las placas solares, entre las 9 am y las 4 pm la mayor parte de la generación P2P es vendida a la red. De estos resultados, se pueden sacar dos conclusiones. La primera conclusión es que en este proyecto el ratio prosumidor-consumidor es muy elevado y la segunda conclusión es que este aspecto no tiene por qué ser negativo, ya que el exceso de energía puede ser almacenado en baterías para posteriormente ser consumido.
- V. El ratio prosumidor-consumidor es un parámetro que afecta a los resultados y que hay que tener en cuenta a la hora de crear mercados localizados. Un número elevado de prosumidores puede llevar a un exceso de producción a determinadas horas del día en las que hay mucha exposición solar y, por tanto, en caso de que no haya baterías, la energía ha de ser exportada a la red. Además, en este tipo de estudios esta proporción debe ser representativa y adecuarse a la realidad, y en la actualidad el número de consumidores es mucho mayor que el de prosumidores.

Modelo de negocio, regulación y divulgación del proyecto:

- I. La regulación en Australia y en muchos países para este tipo de proyectos es muy restrictiva.
- II. La creación de comunidades energéticas similares a RENew Nexus no representa un modelo de negocio realista a corto-medio plazo.

6.2.8. Análisis DAFO

		INTERNO	EXTERNO
NEGATIVO	DEBILIDADES	- Estructura de costes, con cargos fijos elevados y cargos variables bajos, que no incentiva el comercio P2P. - Sistema que recompensa a los grandes consumidores. - Las encuestas preliminares muestran que la motivación de los participantes al entrar en este tipo de proyectos no es financiera. Sin embargo, la mayoría de las bajas fueron por motivos económicos. - Los participantes están dispuestos a formar parte de proyectos como RENew Nexus siempre y cuando ahorren, o por lo menos no incurran en gastos. - Elevados costes derivados de la instalación de nuevos smart meters que no fueron justificados por los beneficios obtenidos de ellos. - Elevado ratio prosumidor-consumidor.	AMENAZAS - La regulación en este tipo de iniciativas es muy restrictiva. - A corto plazo, no es viable la implantación de un modelo de negocio basado en los mercados de energía P2P porque no generan ingresos y, además, el marco regulatorio es todavía muy incierto. - Es difícil reclutar a nuevos consumidores para este tipo de proyectos, sin embargo, los propietarios de PV están deseando participar.
	FORTALEZAS	- Participantes involucrados y entusiasmados con los proyectos de innovación y sostenibilidad. - Participantes con una mayor conciencia del consumo energético, y con intención de modificar sus patrones de consumo. - La mayoría de los participantes tienen intención de adquirir paneles PV en los próximos 5 años. - El proyecto contaba con un sistema de gestión de agua.	OPORTUNIDADES - Uso de baterías para almacenar la energía producida en las horas de mayor exposición solar, y fomentar su posterior comercialización P2P, en lugar de ser vertida a la red - Uso de baterías para monetizar el exceso de energía solar y dar servicio a la red (mercado de capacidad) - Integración de otros recursos de generación diferentes a os PV.

Tabla 14: Análisis DAFO Caso de Estudio 2 (RENew Nexus)

6.3. Caso de Estudio 3: Quartierstrom

6.3.1. Introducción

El tercer caso es Quartierstrom, que fue el primer mercado local de energía P2P en Suiza, y uno de los primeros a nivel mundial. El proyecto comenzó en abril del 2018, pero la fase de campo no se inició hasta enero del 2019. En él colaboraron numerosas entidades públicas, universidades y socios industriales:

Entidades públicas	Universidades	Socios industriales
Swiss Federal Office of Energy (SFOE)	- ETH Zürich - Universität St. Gallen - Hochschule Luzern	- WEW - SCS - Sprachwerk - Planar - Bosch - Cleantech21 - BKW - Swibi

Tabla 15: Socios y entidades que han colaborado en el proyecto

En este proyecto participaron 37 hogares y una residencia de ancianos ubicados en Walenstadt, Canton of St. Galle, Suiza. En él los prosumidores con exceso de generación podían vender sus excedentes directamente a sus vecinos. Haciendo uso de la aplicación de usuario, los participantes podían establecer los precios que estaban dispuestos a pagar o cobrar por la energía local procedente de los paneles solares. Y mediante blockchain las transacciones eran automáticamente calculadas, realizadas y almacenadas en tiempo real. Además, durante algunos periodos el proyecto contó con varias baterías de almacenamiento de energía que se utilizaron con dos objetivos. El primero, probar la viabilidad técnica de conectarlas al resto del sistema de Quartierstrom y de operarlas como baterías comunitarias, en lugar de operarlas como sistemas de almacenamiento para hogares individuales. Y el segundo, estimar en qué medida podría aumentarse la autosuficiencia de la comunidad disponiendo de ellas según la situación de la comunidad.



Figura 21: Comunidad energética Quartierstrom en Suiza [2]

6.3.2. Contexto del proyecto

Este proyecto nace en un contexto global en el que los costes de las fuentes de energía distribuida, como la generación solar, están cayendo considerablemente. Como consecuencia, las fuentes de energía distribuida se están utilizando como elemento clave para transformar el sistema energético, y pasar de una estructura verticalmente integrada a un sistema descentralizado. Sin embargo, que la generación deba ser igual a la demanda en todo momento es una restricción física de la propia red que no se puede cambiar. Por ello, el incremento de estos recursos distribuidos requiere hacer cambios en el sistema como comenzar a tener una coordinación más autónoma de abajo a arriba. [25]

Los avances técnicos y los cambios en las regulaciones de los mercados eléctricos han impulsado la coordinación de abajo a arriba creando mercados locales P2P donde los prosumidores puedan vender sus excedentes de energía directamente a otros consumidores de su vecindario, a un precio que beneficie a ambos.

A pesar de que los desarrollos técnicos basados en la tecnología blockchain hayan sido centro de las conversaciones sobre la descentralización de la coordinación del sistema, pocas de las soluciones que han sido implementadas han resultado satisfactorias. Porque en la teoría son atractivas, pero en la práctica se enfrentan a muchos retos (i.e. privacidad de los datos, regulación, complejidad técnica, etc.)

Por ello surge este proyecto, con la intención de evaluar la viabilidad de este tipo de iniciativas en el entorno de Suiza. En concreto, dentro de todo el país, Walenstadt fue la ubicación elegida para el proyecto por su contexto local:

- I.** La razón principal fue Water and Electricity Walenstadt (WEW), la empresa distribuidora de energía de Walenstadt. Esta utility, muy innovadora, estaba dispuesta a participar y a apoyar a este proyecto.
- II.** La comunidad estaba formada por unos edificios y una infraestructura de comunicación moderna que facilitaría el desarrollo del proyecto.
- III.** Elevado número de prosumidores en la comunidad, 31 de los 37 hogares ya poseían paneles solares antes de que se comenzase el proyecto. Por lo que no hizo falta instalarlos.
- IV.** Además, 9 de los 37 hogares disponían de baterías de almacenamiento de energía, y también había estaciones de recarga de vehículos eléctricos en la zona.

6.3.3. Objetivos del Proyecto

El propósito de este proyecto fue crear un prototipo de mercado P2P que buscase balancear, sin intermediarios, de manera local generación y demanda, para evaluar la viabilidad de los mercados locales de energía P2P en el mundo real desde distintas perspectivas: viabilidad técnica, diseño de mercado, aceptación y comportamiento de los participantes, aspectos de privacidad y regulatorios, y potenciales modelos de negocios.

- I. **Evaluar la viabilidad técnica:** La primera parte del proyecto consistió en evaluar la viabilidad de la tecnología blockchain para mercados de energía P2P e identificar los requerimientos de infraestructura hardware, poniendo el foco en la generación solar fotovoltaica. Además de examinar los consumos de energía y la escalabilidad técnica de la solución para entender el impacto ecológico de la tecnología blockchain.
- II. **Investigar sobre el diseño de mercado:** Con el objetivo de establecer un mecanismo de mercado y un sistema de precios que incentivase entre los participantes el consumo de energía local.
- III. **Estudiar el comportamiento y la aceptación de estas iniciativas por parte de los usuarios:** En particular la interacción con la interfaz de usuario, las preferencias en los precios y la motivación que lleva a los participantes a comprometerse con este tipo de proyectos. Para ello se desarrolló una interfaz de usuario donde los participantes podían visualizar datos en tiempo real y datos históricos sobre el desempeño de la comunidad (i.e. consumos, generaciones, precios, etc.) Además, se testearon distintas opciones de diseños y contenidos durante el proceso, en las que se incluyeron entrevistas y encuestas para los participantes.
- IV. **Analizar el ambiente regulatorio en Suiza y en otros países.**
- V. **Evaluar la viabilidad de diferentes modelos de negocio:** En el contexto de la situación regulatoria y técnica presente y futura.
- VI. **Evaluar métricas relativas a la divulgación del proyecto:** Con el objetivo de comunicar y asegurar la visibilidad del proyecto tanto a nivel nacional como internacional, y más allá del ámbito académico.

6.3.4. Aspectos técnicos

Hardware:

El hardware empleado en Quartierstrom fue desarrollado por el propio equipo porque no se encontraron dispositivos en el mercado que cumplieran con las expectativas del proyecto. Para tomar medidas en los hogares de los participantes se emplearon los siguientes dispositivos: Smart-Pis y Read-out tools.

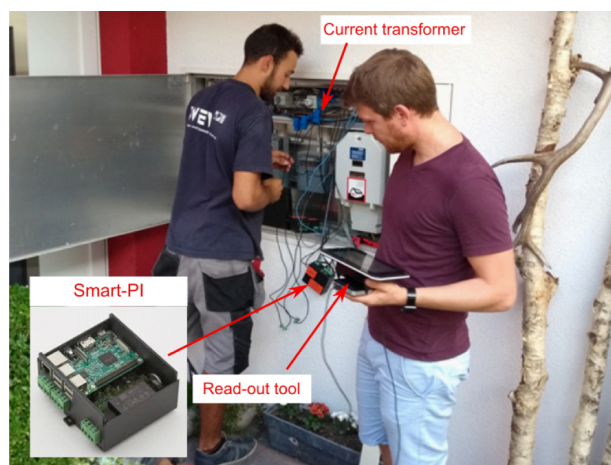


Figura 22: Instalación en los hogares de los participantes [25]

- **Smart-Pi:** Todos los hogares fueron equipados con un máximo de tres prototipos de smart meters capaces de tomar las medidas de corriente, tensión, energía y frecuencia en cada fase, para medir de manera separada el consumo neto, la generación y la carga de la batería. Además, este dispositivo cuenta con una placa SBC que actúa como nodo de la red blockchain, es decir, estos aparatos alojan la plataforma blockchain y los módulos software.
- **Read-out tool:** Estos dispositivos, similares a una tablet, fueron colocados conectados por cable a los SmartPis sin necesidad de conexión a internet, simplemente para utilizarlos como pantalla donde leer las medidas de los smart meters.

También fue necesario colocar varios dispositivos en distintos puntos de la red para medir sus niveles con fines de investigación.

Software:

- **Aplicación de Mercado y Mecanismo de mercado:** La aplicación de mercado alojada en blockchain ejecuta el mecanismo de mercado empleado en la comunidad. El mecanismo de mercado describe la manera en la que se determinan los precios y se distribuye la electricidad dentro de la comunidad P2P. En este proyecto se optó por un mecanismo iterativo de doble subasta con discriminación de precios mediante el cual se permitía a los participantes establecer las limitaciones en los precios según lo que estuvieran dispuestos a pagar o cobrar por la energía. De esta manera, los smart meters de los participantes enviaban las ofertas que contenían las limitaciones de precio y la cantidad de energía demandada u ofrecida. Posteriormente, se organizaban todas las ofertas de compra de mayor a menor precio, y todas las ofertas de venta de menor a mayor precio. Casando así las ofertas de compra y de venta. Por último, se establecían los precios como valor medio entre la oferta de compra y la de venta. Este proceso subasta era ejecutado por cada nodo de la red blockchain cada 15 minutos, para reubicar las casaciones y los precios del mercado.

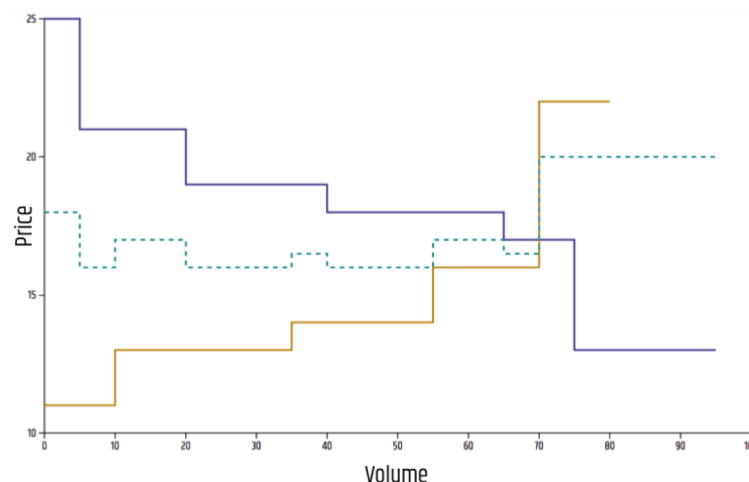


Figura 23: Mecanismo de doble subasta con discriminación de precios [25]

Durante un corto periodo del proyecto se deshabilitó, con previo aviso, la función de limitar los precios, y se aplicó el mecanismo de precio uniforme. Con este mecanismo la distribución de la energía local se hacía en función de la oferta y la demanda de la comunidad, y los precios se establecían de manera uniforme para todos los participantes.

- **Interfaz de usuario:** La interfaz de usuario utilizada en Quartierstrom fue una aplicación web con distintas funcionalidades. Entre ellas, los participantes podían acceder a información en tiempo real y datos históricos sobre su consumo y/o su producción e información sobre la comunidad.
- **Aplicación para el control de la batería de almacenamiento:** Esta aplicación alojada en blockchain fue utilizada para controlar el nivel de carga de la batería. De manera que, este módulo podía leer en cualquier momento los ratios de producción y consumo de la comunidad, y en base a eso cargar la batería si la comunidad estaba exportando energía y descargarla si la comunidad estaba importando.

Arquitectura blockchain:

En Quartierstrom se utilizó una red blockchain privada con protocolo Tendermint con el objetivo de cumplir cuatro requisitos: reducir el consumo energético frente a las redes públicas que utilizan como protocolo de validación PoW, ancho de banda suficiente, protocolo de consenso fiable y hardware de coste reducido.

La plataforma blockchain cuenta con: la aplicación de mercado, cuatro módulos distintos (i.e. Adquisición de datos, Manejo de datos, Procesamiento de datos y Manejo de datos) y la tecnología Tendermint.

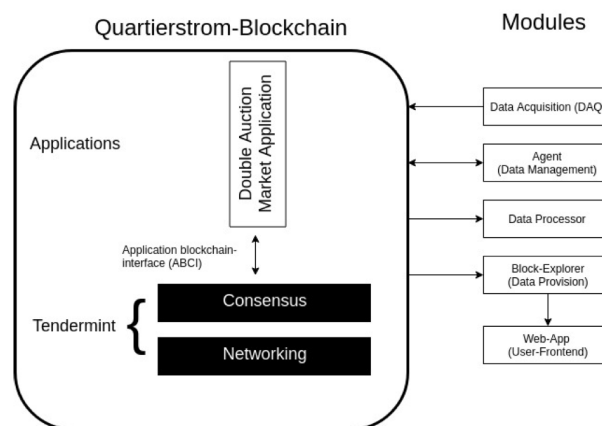


Figura 24: Arquitectura blockchain [26]

- **Aplicación de mercado:** Esta aplicación, como se ha mencionado previamente, ejecuta en intervalos de 15 minutos una subasta con las cantidades de energía y los precios establecidos por los participantes, asignando las generaciones a los consumos con sus respectivos precios. En resumen, recibe las ofertas de compra y venta (i.e. volumen y precio) y emite acuerdos de comercio (i.e. comprador, vendedor, volumen y precio)

- **Módulo de Adquisición de Datos:** Se encarga de la lectura de los datos de consumo de energía de los smart meters y de la obtención de las limitaciones de los precios establecidas por los usuarios. Los smart meters alojan este módulo.
- **Módulo de Manejo de datos:** Este módulo contiene la información referente a las preferencias de los usuarios, como las limitaciones en los precios, y sigue una estrategia en base a la información recolectada. Emite órdenes de compra o de venta basándose en los precios y los datos de consumo o producción.
- **Módulo de Procesamiento de datos:** En este módulo se realiza la validación de los bloques. La autoridad de emisión y firma del mecanismo de consenso es derivada a la utility y a los prosumidores. La utility se encarga de registrar a los participantes en su respectivas comunidades y asignar autoridad a los nodos prosumidores para la validación de bloques. Se decidió que únicamente fueran validadores los prosumidores porque como habían realizado una inversión en sus equipos de generación, se pensaba que estos usuarios iban a estar más comprometidos para que todo fuera bien.
- **Módulo de Manejo de datos:** Este módulo se encarga de ofrecer información a los usuarios sobre su producción y consumo.

Además, hubo una fase del proyecto en la que se hizo uso de la batería más grande que había instalada en uno de los edificios de la comunidad. La batería tenía una capacidad de 37 kWh y podía cargar/descargar aproximadamente 28 kW. Para ello fue necesario desarrollar una aplicación e incluirla en la arquitectura blockchain.

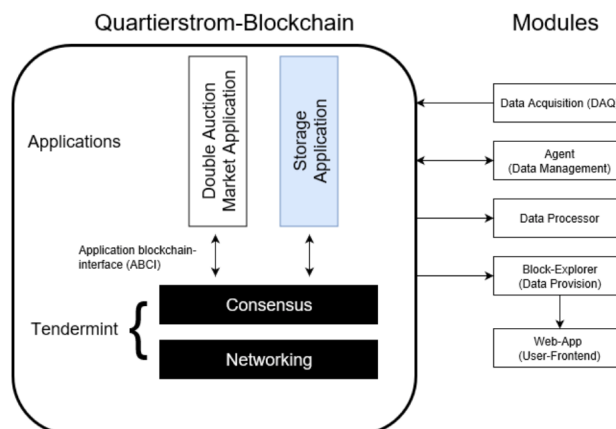
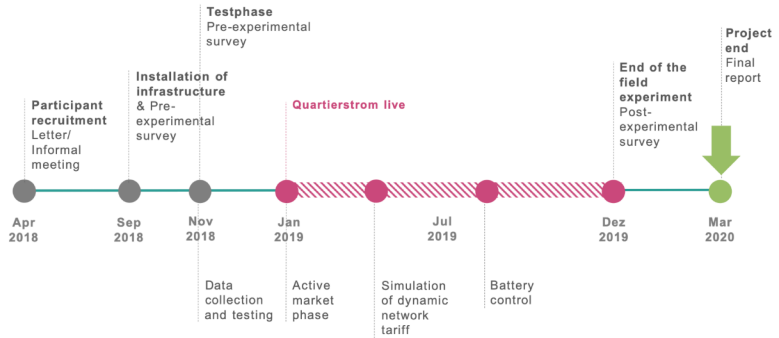


Figura 25: Arquitectura blockchain con la aplicación para la batería [26]

- **Aplicación para el control de la batería de almacenamiento:** Dentro de la arquitectura blockchain se encuentra la aplicación de control de carga-descarga de la batería mencionada previamente.

6.3.5. Tabla Resumen del Proyecto

Nombre del Proyecto	Quartierstrom		
Marco Temporal	Abril 2018 – Julio 2020  Figura 26: Línea temporal de las principales tareas del proyecto [12]		
Localización	Walenstadt, Canton of St. Galle, Suiza		
Socios y Participantes	Entidades públicas Swiss Federal Office of Energy (SFOE)	Universidades - ETH Zürich - Universität St. Gallen - Hochschule Luzern	Socios industriales - WEW - SCS - Sprachwerk - Planar - Bosch - Cleantech21 - BKW - Swibi
Presupuesto	-		
Contexto Global del Proyecto	Este proyecto nace en un contexto global en el que las fuentes de generación de origen renovable están disminuyendo sus precios, y por tanto se está incrementando la instalación de recursos de generación distribuida. Este aumento trae consigo problemas en la operación de las redes, y la necesidad de una gestión descentralizada en la que participen los consumidores. Por este motivo surge mucha literatura en torno a los mercado de energía P2P basados en tecnología blockchain, pero pocos proyectos que se hayan implantado y hayan sido satisfactorios. Así surge Quartierstrom, para evaluar la viabilidad de la implantación de estos mercado, pese a que otros proyectos no lo hayan conseguido.		
Contexto Local del Proyecto	- Water and Electricity Walenstadt (WEW), la empresa distribuidora de energía de Walenstadt es una utility muy innovadora, dispuesta a participar y a apoyar a este proyecto. - Edificios e infraestructura de comunicación moderna. 31 de los 37 hogares ya poseían paneles solares antes de que se comenzase el proyecto. 9 de los 37 hogares disponían de baterías de almacenamiento de energía, y también había estaciones de recarga de vehículos eléctricos en la zona.		
Propósito/Objetivos	Crear un prototipo de mercado P2P para evaluar la viabilidad de los mercados locales de energía P2P en el mundo real desde distintas perspectivas: viabilidad técnica, diseño de mercado, aceptación y comportamiento de los participantes, aspectos de privacidad y regulatorios, y potenciales modelos de negocios.		

Aspectos Técnicos	Hardware: Smart-Pis, Read-out tools y dispositivos para medir los valores de la red. Software: Aplicación de mercado (JavaScript), Interfaz de usuario y la Aplicación para controlar el de nivel de carga de las baterías. Arquitectura Blockchain: • Blockchain Privada • Protocolo Tendermint • Los prosumers (i.e. propietarios de paneles PV) son los nodos validadores de la red
--------------------------	--

Tabla 16: Resumen Caso de Estudio 3 (Quartierstrom)

6.3.6. Resultados y Conclusiones

Comportamiento y aceptación por parte de los usuarios:

- I. En base a una entrevista preliminar los participantes de Quartierstrom tenían una alta disposición a pagar por la energía local. Sin embargo, analizando los datos de las preferencias en los precios, los vendedores pedían precios más altos por vender su energía en Quartierstrom que el precio de la tarifa de alimentación. Y los compradores, estaban dispuesto a pagar precios más bajos que su tarifa habitual. Por lo tanto, esto demuestra que los participantes no estaban dispuestos a pagar precios superiores por energía generada localmente.
- II. Con respecto al mecanismo de fijación de precios, para la mayor parte de los usuarios el coste de oportunidad de invertir tiempo en ajustar las preferencias en los precios era demasiado alto con respecto los beneficios financieros que podían obtener. Desde el punto de vista de los usuarios, ajustar de forma manual los precios requiere un esfuerzo extra que no todos están dispuestos a asumir.

Esto se demostró en un pequeño experimento llevado a cabo durante el proyecto en el que se deshabilitó la funcionalidad de limitación de precios y se estableció un mecanismo de fijación de precios uniforme. Después del experimento, 11 de los 28 usuarios prefirieron participar activamente en la fijación de los precios de la energía P2P. Mientras que, 13 de los 28 prefirieron la automatización en los precios por motivos de simplicidad.

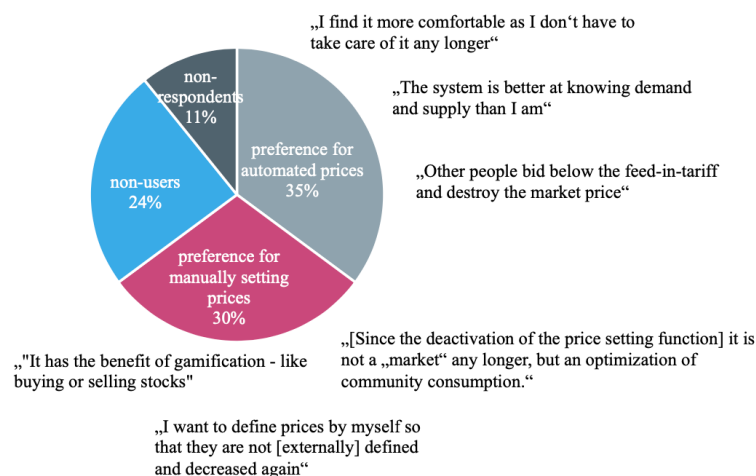


Figura 27: Segmentación de los usuarios según preferencias de fijación de precios [2]

Es interesante destacar, que a medida que fueron pasando los meses, el interés en ajustar los precios de manera manual decreció. Ya que al volver a preguntar a los usuarios acerca de sus preferencias, la mayoría eligieron el mecanismo de automatización de los precios.

- III.** Con relación a la interacción de los usuarios con la aplicación web del mercado, el nivel de actividad fue sorprendentemente alto, con una media de 20 usuarios activos al mes. Los datos de uso también mostraron que la actividad variaba considerablemente entre usuarios. Un pequeño grupo de 7 usuarios utilizaban la aplicación web de Quartierstrom varias veces por semana, mientras que 13 participantes la utilizaban de manera más o menos regular, y el resto casi nunca. Aunque casi todos los participantes, 28, entraron al menos una vez en la app.

Es interesante mencionar que los participantes recibían por mail mensualmente resúmenes informativos, pero la recepción de estos informes no incrementaba la actividad de la aplicación web. A pesar de que los hogares entrevistados apreciaban recibir estos informes.

- IV.** En cuanto a los beneficios percibidos, la mayoría de los participantes del estudio observaron fuertes ventajas en términos medioambientales, económicos y en la dimensión de independencia en las políticas.
- V.** A pesar de todo, los participantes recibieron el proyecto positivamente teniendo en cuenta su complejidad. La mayoría interactuó en mayor o menor medida con la interfaz y con participó activamente en el ajuste de las preferencias de precios. Pero, para que los mercados de energía P2P funcionen en un futuro deben funcionar con un mayor grado de automatización.

Tecnología blockchain y aspectos técnicos:

- V.** La implementación técnica de este proyecto fue satisfactoria demostrando la viabilidad de los mercado de energía P2P basados en blockchain.
- VI.** La tecnología blockchain aporta valor en sistemas de abajo a arriba, en los que grupos de consumidores y productores privados comercializan energía, sin la participación de su distribuidor eléctrico. Ya que, en estos casos, el mecanismo de consenso ofrece a los participantes la seguridad de que el sistema funciona de la manera que desean.
- VII.** La tecnología blockchain presenta una ventaja frente a una aplicación que se ejecuta en un sistema centralizado cuando hay una falta de confianza entre los participantes, ya que la solución centralizada requiere un operador responsable.
- VIII.** En teoría, un mercado descentralizado basado en tecnología blockchain contribuye a que los usuarios participen y hagan propuestas que sean votadas, de manera que cambien las normas si la mayoría de los participantes lo considera. Sin embargo, en algunos casos, blockchain requiere que los participantes tengan conocimiento de programación, o por lo menos tengan capacidad de lectura del lenguaje de programación, de los smart contracts. Esta

es una gran desventaja de blockchain porque los participantes no entienden bien el funcionamiento del sistema y, por tanto, no pueden participar activamente.

- IX.** Con relación a la creencia popular sobre el elevado consumo de energía de la tecnología blockchain. En este proyecto el consumo de la arquitectura seleccionada es mucho menor que el de blockchains públicas, como bitcoin. Además, si se hubiera utilizado una solución centralizada también se habría requerido consumo energético por parte de los dispositivos de medida y para la provisión de datos en tiempo real con alta resolución. Por eso, en este proyecto se ha determinado que apenas habría diferencia de consumo energético, entre una solución centralizada y una solución descentralizada basada en una arquitectura blockchain privada con protocolo Tendermint.
- X.** A pesar de todo, dada la complejidad que implica el uso de blockchain en los mercado de energía P2P, una solución centralizada donde los participantes confíen en el operador puede ser una buena alternativa. Lo importante no es la tecnología empleada, sino el habilitar nuevas interacciones entre usuarios que den valor a la red y que ponga a consumidores y prosumidores en el centro del sistema

Modelo de negocio, regulación y divulgación del proyecto:

- I.** Actualmente, la regulación vigente en Suiza, que es más progresista que en el resto de la Unión Europea, no permite a las comunidades energéticas expandirse a través de parcelas de tierra no adyacentes utilizando la infraestructura de red pública. Pero, se espera que dentro de 2-3 años se abra la regulación a nivel europeo en el contexto de comunidades energéticas.
- II.** En el marco regulatorio actual, la creación de comunidades energéticas con la misma configuración que Quartierstrom no representan un modelo de negocio realista a corto-medio plazo. Ya que los periodos de recuperación de la inversión son muy altos.
- III.** El futuro de una estrategia energética de abajo a arriba que se centra en el prosumidor tiene sentido, tanto si sigue existiendo una autoridad central, como si la gestión es puramente descentralizada. El sistema, en su conjunto, gana valor al permitir un aumento de las interacciones entre consumidores y prosumidores en la red pública.
- IV.** La divulgación de este proyecto ha sido llamativa. Entre otros datos, al menos 246 medios de comunicación han publicado contenido referente al proyecto y la página web de Quartierstrom ha obtenido de media 400-600 visitas mensuales.

6.3.7. Análisis DAFO

INTERNO		EXTERNO	
NEGATIVO	DEBILIDADES	AMENAZAS	
	• La complejidad de la tecnología blockchain hace que los usuarios no sean tan activos como se esperaba. • El comportamiento de los usuarios difiere mucho de las encuestas preliminares. • A pesar de la buena intención que tienen los participantes al entrar en este tipo de proyectos, los datos muestran que no están dispuestos a pagar más por energía local que por energía procedente de la red.	• La regulación vigente en Suiza y en el resto de Europa es muy restrictiva con las comunidades energéticas. • En un futuro cercano no es realista la creación de un modelo de negocio similar a Quartierstrom.	
POSITIVO	FORTALEZAS	OPORTUNIDADES	
	• El consumo energético de la arquitectura blockchain seleccionada es mucho menor que el de otras redes blockchain públicas como bitcoin. • La utilización de un sistema de control comunitario para la batería aumenta los ratios de autosuficiencia y autoconsumo de la comunidad. • Este proyecto utiliza hardware propio diseñado a medida según los requerimientos del proyecto. • Los precios en tiempo real reflejan la disponibilidad de energía solar, lo que incentiva a los participantes a mover sus consumos a periodos en los que haya energía local solar disponible. • Los participantes y los colaboradores de este proyecto siempre se mostraron muy positivos.	• Las plataformas blockchain para el comercio P2P pueden ser sustituidas por soluciones centralizadas más simples, siempre y cuando se cuente con un operador de confianza. • Una mayor automatización de los mercados P2P puede aumentar el interés de los usuarios en participar en ellos. • Desarrollo de nuevos mecanismos de mercado que se adapten mejor a las necesidades de los participantes. • Configuración de las tarifas de red en función del nivel de su tensión. Con el objetivo de estabilizar la tensión y no añadir estrés a la red. De manera que, se penalice el consumo en momentos de bajo voltaje, para incentivar menores demandas, y se recompense en momentos de elevada tensión, para fomentar el consumo. • En un futuro lejano, son interesantes los modelos de negocio centrados en el prosumidor, independientemente de la tecnología que utilicen. • Los mercados locales pueden ser un vehículo de valor para la integración de recursos de generación distribuida	

Tabla 17: Análisis DAFO Caso de Estudio 3 (Quartierstrom)

6.4. Caso de Estudio 4: Verv's Hackney Project

6.4.1. Introducción

El cuarto, y último, caso de estudio que se va a exponer es Verv's Hackney Project ubicado en Hackney, Londres, Reino Unido. Este proyecto fue desarrollado por la start-up londinense Verv en colaboración con Repowering London, entidad que desde 2011 promueve la creación de comunidades energéticas de autoconsumo. El proyecto comenzó en noviembre del 2017 en la comunidad de Hackney Banister House Estate. Y, en abril del 2018 tuvo lugar la primera transacción energética, siendo la primera vez que en Reino Unido comercializaba legalmente energía haciendo uso de una plataforma basada en blockchain.



Figura 28: Comunidad energética Hackney Banister House Estate (Londres) [27]

La comunidad está formada por 17 bloques de edificios, de los cuales, 14 cuentan con una instalación de paneles solares PV en la azotea. Con esos paneles solares se abastecía de energía las zonas comunes de los edificios como los ascensores, los portales, los descansillos o las escaleras, y se vertían los excedentes a la red al precio de la tarifa de compensación. Para sacar partido a las instalaciones solares, lo que se hizo en Hackney fue asignar virtualmente parte de las instalaciones a los diferentes residentes de la comunidad. De manera que se creó una pequeña comunidad de comercio energética donde intercambiar energía entre vecinos. Para ello fue necesario instalar los dispositivos de Verv en 40 de los hogares.

6.4.2. Contexto del proyecto

Este proyecto surge en un contexto global en el que la mayor parte de la energía que se consume proviene de un sistema energético sucio, ineficiente y caro, que está provocando problemas de salud y acelerando el cambio climático. Un sistema

centralizado y formado por empresas verticalmente integradas, que tiene mucho poder en la toma de decisiones como el precio de la electricidad que va a entrar en los hogares. Sin embargo, con la inmensa penetración de pequeños recursos de generación distribuida que se está experimentando, con las presiones regulatorias debido a los acuerdos climáticos y objetivos pactados por los gobiernos, y con los grandes avances tecnológicos, empresas como Verv confían en el cambio del sistema energético. Por ello, Verv se centra en algunos factores para acelerar el cambio que hacen creer a esta compañía que los mercados de energía peer-to-peer proveen una forma efectiva de democratizar el sistema energético.

El contexto local que ha llevado a Verv a ubicar el proyecto en la comunidad de viviendas sociales de Hackney es el siguiente:

- I. La situación socioeconómica en la que se encuentran los residentes de Banister House Estate. Muchos de los miembros de la comunidad cuentan con un nivel bajo de ingresos económicos y necesitan utilizar el prepago eléctrico para poder hacer frente a su consumo.
- II. En Reino Unido 2.5M de personas sufren pobreza energética.
- III. La comunidad ya contaba con varias instalaciones de paneles solares que habían sido financiadas mediante crowdfunding. En concreto, 14 de los 17 edificios tenían paneles solares en sus azoteas.
- IV. Apenas se estaba sacando partido a la generación procedente de los paneles solares instalados en las azoteas de los edificios de la comunidad.

6.4.3. Objetivos del proyecto

El principal objetivos del proyecto era crear una comunidad donde se pudiese intercambiar energía a un coste reducido, menor que el coste de la energía de la red, y dónde los participantes pudiesen beneficiarse de todas las funcionalidades de Verv Home Hub (VHH). Para ello el proyecto necesitaba cumplir con unos objetivos más específicos:

- I. Evaluar la viabilidad técnica de Verv Trading Platform (VTP)
- II. Evaluar la interoperabilidad de Verv Trading Platform (VTP), Verv Home Hub (VHH), los smart meters de los usuarios, la empresa distribuidora y la empresa comercializadora.
- III. Analizar la acogida de esta iniciativa en la comunidad, el nivel de participación y de satisfacción de los participantes.
- IV. Evaluar la reducción en las facturas eléctricas de los participantes.
- V. Utilizar los resultados del proyecto para crear más comunidades energéticas en Reino Unido e, incluso, proyectos nivel global.

6.4.4. Aspectos técnicos

Hardware:

- **Smart meter:** No se puede participar en el mercado con un medidor analógico tradicional, es necesario contar con un smart meter o un dispositivo VHH que más tarde se explicará en que consiste. Los smart meters toman medidas del consumo de energía de los hogares y de los valores de generación de los paneles solares.
- **Verv Home Hub (VHH):** Este dispositivo es opcional, ya que se puede participar en el mercado con los smart meters sin necesidad de instalar VHH en los hogares. Es un dispositivo que muestrea los valores de consumo de los residentes a gran velocidad. Se instala sobre el medidor de consumo eléctrico habitual o sobre el smart meter colocando una pinza amperimétrica, y se obtiene en tiempo real información sobre el consumo, el estado de los electrodomésticos (i.e. encendido o apagado) y sobre su eficiencia energética.

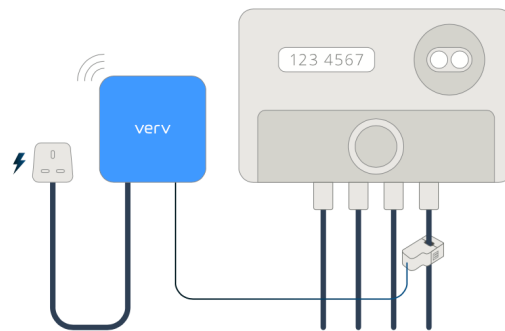


Figura 29: Verv Home Hub (VHH) [28]

Funcionan midiendo los valores de corriente y tensión a una velocidad de millones de veces por segundo y, posteriormente, aplican machine learning para separar los perfiles de los diferentes electrodomésticos. Con toda esta información, estos dispositivos son capaces de crear patrones de consumo en los hogares para crear predicciones sobre futuras demandas. Y, posteriormente, realizar ofertas de compra o venta en el mercado P2P.

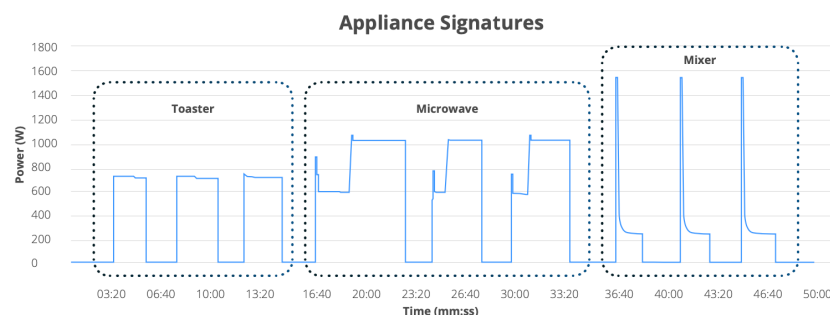


Figura 30: Perfil de consumo de diferentes electrodomésticos [28]

- **Paneles solares:** Este proyecto dispone únicamente de un tupo de DER para su abastecimiento eléctrico, que son los paneles solares PV ubicados en 14/17 edificios. Pero, en un futuro se está evaluando la idea de instalar baterías de almacenamiento de energía.

Software:

- **Verv Trading Platform (VTP):** La plataforma parte de los datos recibidos por los smart meters o por los VHH. A partir de estos datos VTP crea un historial de consumo de cada hogar, ejecuta el algoritmo de casación y el resto de los módulos necesarios para el comercio.
- **Matching Algorithm:** El algoritmo de casación, es lo que en otros proyectos se denomina aplicación de mercado. En este caso, este algoritmo utiliza inteligencia artificial y tiene en cuenta los siguientes inputs para decidir si se debe o no realizar una transacción: predicción de la demanda del hogar, predicción de la generación de los paneles solares, los parámetros establecidos por los usuarios y en futuros desarrollos también tendría en cuenta los datos de la batería. Con todos estos datos la plataforma VTP ejecuta el algoritmo de casación de la siguiente manera:

PASO A PASO DEL ALGORITMO DE CASACIÓN	
1	El sistema VTP de cada participante evalúa la generación y demanda de las 4 próximas horas.
2	El sistema VTP de cada participante prosumidor comunica la cantidad de energía que puede vender durante ese periodo de tiempo.
3	El sistema VTP de cada participante consumidor evalúa el precio de compra de energía de la red y ejecuta un oferta de compra con el precio que considere (i.e. precio inferior al de la red)
4	El sistema VTP de los participantes prosumidores que pueden ofrecer energía para ese periodo de tiempo ejecuta una oferta de venta según las preferencias del usuario.
5	Si en el momento no hay ninguna casación porque los precios de compra son inferiores a los precios de venta el proceso se repite.
6	De manera que, el sistema VTP de los prosumidores dispuestos a vender reducen el precio de sus ofertas de venta. Y, los mismo ocurre con los usuario que están dispuesto a comprar, solo que en este caso incrementan los precios de compra.
7	Este proceso continua hasta que las ofertas casan y se crea un smart contract entre las partes.
8	Se verifica que el comprador envía el dinero a la cartera de, y que del hogar del vendedor ha salido la cantidad vendida y que en el hogar del comprador ha entrado esa misma cantidad.
9	Se ejecuta el smart contract una vez se ha verificado la comprobación de envío de energía. Y se, realiza el pago entre las partes.

Tabla 18: Paso a paso del algoritmo de casación

En este ejemplo se ha considerado un periodo de 4 horas, pero con un algoritmo más refinado esta ventana de tiempo podría ser superior. Además, es un ejemplo simplificado porque en realidad un smart contract no puede utilizar dinero, solo tokens. Por eso, todas las transacciones requieren tokens VLUX que se compran al agregador local para no tener que comprar los VLUX a un vendedor público.

- **Verv Trading Platform App (VTP):** Mediante la aplicación los usuarios pueden establecer sus preferencias. Las preferencias pueden ser los precios máximos/mínimos que están dispuestos a pagar/cobrar por la energía. También, en futuros desarrollos en los que el sistema cuente con baterías, el usuario podría establecer un nivel mínimo de carga de la batería por debajo del cual siempre quisiera comprar energía. El objetivo de establecer estas preferencias es que, haciendo uso de ellas, el sistema trabaje automáticamente sin intervenciones adicionales de los usuarios.

Arquitectura blockchain:

La arquitectura de la plataforma VTP es la siguiente:

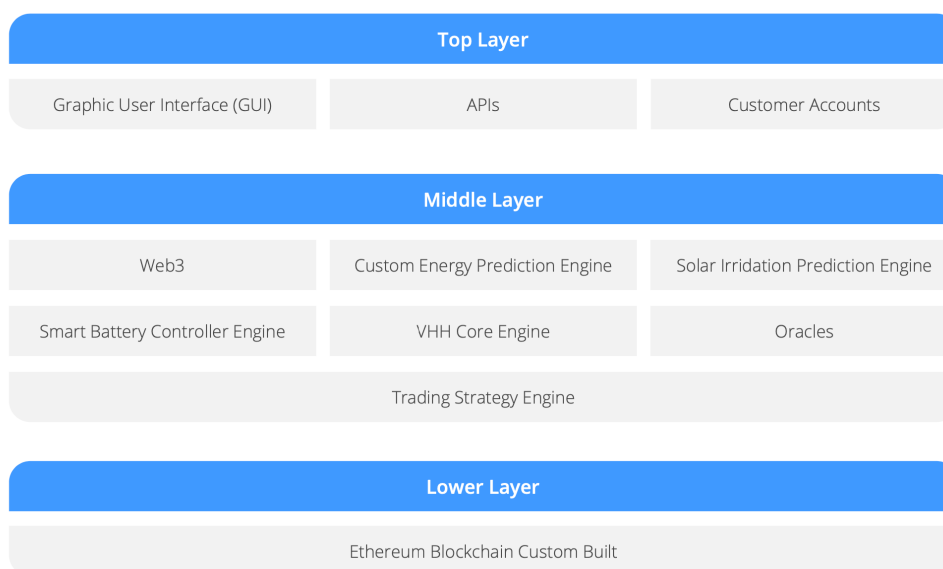


Figura 31: Arquitectura Verv Trading Platform (VTP) [27]

Sobre la arquitectura blockchain del proyecto no existe mucha información publicada. Se sabe que sus principales características son las siguientes: la plataforma utiliza blockchain pública, la red que utiliza es Ethereum, los tokens son VLUX y la validación de los bloques es realizada por el agregador local.

6.4.5. Tabla Resumen del Proyecto

Nombre del Proyecto	Verv's Hackney Project
Marco temporal	Noviembre 2017
Localización	Hackney Banister House Estate, London, Reino Unido
Socios y participantes	• Verv • Repowering London • UCL's Energy Institute LoLo CDT in Energy Demand • Powervault
Presupuesto	-
Contexto global del Proyecto	La situación del sistema energético está cambiando con la masiva integración de recursos de generación renovable distribuida, con las nuevas políticas derivadas de la situación climática y con los avances que la tecnología está experimentando.
Contexto local del Proyecto	• La situación socioeconómica en la que se encuentran los residentes de Banister House Estate. • En Reino Unido 2.5M de personas sufren pobreza energética. • La comunidad ya contaba con varios paneles solares en 14 de los 17 edificios que habían sido financiados mediante crowdfunding. • No se estaba sacando partido a la energía producida por los paneles solares instalados en las azoteas de los edificios de la comunidad.
Objetivos	El propósito del proyecto fue crear una comunidad de energía P2P en la que se asegurase el suministro eléctrico reduciendo el coste de la electricidad. • Evaluar la viabilidad técnica de VTP • Evaluar la interoperabilidad de VTP, VHH, los smart meters, la empresa distribuidora y la empresa comercializadora. • Analizar la acogida de esta iniciativa en la comunidad, el nivel de participación y de satisfacción de los participantes. • Evaluar la reducción en las facturas eléctricas de los participantes. • Utilizar los resultados del proyecto para crear más comunidades energéticas en Reino Unido e, incluso, proyectos nivel global.
Aspectos técnicos	Machine learning: para identificar el estado y las condiciones de los electrodomésticos, los patrones de consumo de los hogares y predecir fallos en los electrodomésticos antes de que ocurran. Inteligencia Artificial: para evaluar si es conveniente realizar una oferta de compra o venta en el mercado P2P. Hardware: Verv Home Hub (VHH), paneles solares y smart meters. Software: Algoritmo de casación, aplicación de usuario, etc. Arquitectura blockchain: • Ethereum • Proof of Authority • Token VLUX (ERC20) • Smart Contracts escritos en Solidity • En principio los nodos validadores son los agregadores locales

Tabla 19: Resumen Caso de Estudio 4 (Verv's Hackney Project)

6.4.6. Resultados y Conclusiones

Tecnologías y aspectos técnicos:

- I.** Este proyecto, no sólo está enfocado en el comercio de energía P2P, sino también en la eficiencia energética. Gracias a VHV los usuarios pueden conocer el estado de sus electrodomésticos, es decir, si están funcionando o están apagados. Pueden conocer su eficiencia energética, lo que han consumido mientras estaban en funcionamiento, si próximamente van a fallar y necesitan mantenimiento preventivo. Esto demuestra que, el futuro de estos mercados va mucho más allá del simple intercambio de energía entre vecinos.
- II.** Cada vez, gracias a la inteligencia artificial y a machine learning, va a ser más sencillo obtener las predicciones de consumo de los usuarios y predicciones de generación de los DERs. De manera que, las ofertas de los participantes en las comunidades P2P van a ser más precisas.

Modelo de negocio, regulación y divulgación del proyecto:

- I.** El sector energético, es un sector altamente regulado, y el éxito de los mercados de energía P2P requiere una cooperación entre los reguladores y los gobiernos de los diferentes países. Aunque, de momento parece que los reguladores están apoyando estos mercados, si en un futuro la regulación no cambia, el mecanismo de la VTP deberá ser modificado.
- II.** El modelo de negocio actual del comercio peer-to-peer requiere el uso de las redes de transporte y distribución, que son propiedad de los operadores de la red y del sistema. Por eso, en caso de que los operadores prohíban el uso de la infraestructura para el comercio P2P o impongan unas tasas prohibitivas, supone un riesgo para la viabilidad económica como la escalabilidad de estas iniciativas.
- III.** En cuanto a la regulación de las tasas de las redes de transporte y distribución, Verv espera que en un futuro que el precio refleje el uso real de la red. De manera que, si la energía es adquirida localmente, dentro de un mismo edificio, durante un periodo valle de consumo, los cargos deben reflejar el poco estrés que ese intercambio está produciendo en la red.

6.4.7. Análisis DAFO

	INTERNO		EXTERNO	
	NEGATIVO		POSITIVO	
	DEBILIDADES		AMENAZAS	
	• La principal motivación de los participantes es económica. Por lo tanto, en el momento en el que los usuarios no obtienen beneficios optan por renunciar al proyecto. • Falta de investigación referente al comportamiento de los usuarios.		• La regulación en torno a las redes de transporte y distribución todavía tiene supone un obstáculo. Además, varía mucho entre países. • Modelo de negocio poco desarrollado.	
	FORTALEZAS		OPORTUNIDADES	
	• El sistema cuenta con un agregador local para que no sean los participantes los que tengan que adquirir los tokens. • Gracias al agregador local los participantes ahorran en costes de transacción. • El proceso es sencillo y muy automático. Los usuarios únicamente tienen que establecer sus preferencias a través de la app. • La interacción de los usuarios con la VTP es la mínima posible. • Utiliza machine learning e inteligencia artificial para crear previsiones de consumo muy precisas y para evaluar las oportunidades de compra/venta. • Los usuarios ahorran en la factura eléctrica. • Se reduce el tiempo de recuperación de la inversión en paneles solares de los prosumidores. • Incentivan la generación local de energía. • Promueve la creación de comunidades cohesionadas y resilientes. • La tecnología blockchain permite que las transacciones sean inmediatas, y por tanto ingresos también. De manera que se reduce el tiempo entre el consumo y la facturación.		• Intercambio de energía con otras comunidades energéticas, no únicamente con la comunidad a la que se pertenece, siguiendo un orden jerárquico (i.e. mismo bloque, misma comercializadora eléctrica, misma red de distribución, etc.) • Incorporación de baterías en algunos hogares para almacenar energía. • Incorporación de otros DERs. • Aumento de la consciencia y sensibilidad sobre el consumo eléctrico en la sociedad. • Implantación del proyecto en otras zonas de Reino Unido y en otros países.	

Tabla 20: Análisis DAFO Caso de Estudio 4 (Verv's Hackney Project)

7. Conclusiones y Trabajos futuros

La implantación de mercados de energía peer-to-peer presenta un gran potencial, tanto desde el punto de vista de especialistas, obtenido a través de la literatura, como desde el punto de vista práctico, obtenido al realizar el estudio de casos. A continuación, se explican las principales conclusiones obtenidas tras analizar los cuatro casos desarrollados en el proyecto.

7.1. Conclusiones sobre el comportamiento y la motivación de los usuarios

A pesar de que en las encuestas previas a la realización de cada uno de los proyectos la mayoría de los participantes afirmaban que su motivación no era económica, sino puramente medioambiental y social. Los resultados de los proyectos mostraron lo contrario. La sociedad solo está dispuesta a entrar en estas comunidades si se beneficia de un ahorro, o si por lo menos no incurren en mayores gastos.

Además, los datos recopilados sobre la interacción de los usuarios con la plataforma muestran que a medida que pasa el tiempo, los participantes pierden motivación y dejan de emplear su tiempo en tareas asociadas con el comercio P2P (i.e. actualizar sus preferencias, evaluar datos sobre su consumo o su generación, etc.). Por eso, es importante que las soluciones P2P sean lo más automáticas posible. De manera que los usuarios apenas tengan que interactuar con la plataforma.

Otro dato objetivo es que, al participar en los proyectos, la mayoría de los usuarios modificaron sus patrones de consumo para adaptarse a la generación de la comunidad. Tanto por motivos financieros, porque se incentivaba económicamente el consumo en horas de mucha generación, como por responsabilidad social, porque antes de participar en los proyectos no eran conscientes las dificultades de la red. De esto se puede sacar como conclusión general, que los mercados de energía P2P sensibilizan y educan a los participantes sobre como su consumo afecta al sistema. Creando consumidores con un papel activo en la red. Y, además, estos mercados pueden contribuir potencialmente a solucionar los problemas asociados a los flujos inversos de energía, y puedan prevenir las sobrecargas de la red y estabilizar los niveles de tensión.

7.2. Conclusiones acerca del papel de las redes de transporte y distribución

Uno de los problemas asociados al comercio peer-to-peer son los precios de las tasas por uso de la infraestructura eléctrica. Las comunidades que intercambian energía localmente entre vecinos, habitualmente, apenas utilizan las redes de transporte y distribución. Sin embargo, excepcionalmente, durante el invierno cuando apenas hay sol, casi toda la energía consumida en estas comunidades proviene de la red. Por lo que es necesario determinar unas tasas apropiadas en base a las características del intercambio de energía.

Lo que proponen los desarrolladores de las plataformas de comercio P2P es que las tasas de transporte y distribución reflejen el uso real de la red. De manera que, si la

energía es adquirida localmente, de un mismo edificio, durante un periodo valle, los cargos reflejen el poco estrés que este intercambio está produciendo en la red. Y lo mismo si ocurre lo contrario, es decir, si la energía es adquirida de la red, durante un periodo de pico de consumo, los cargos deben reflejar el gran estrés provocado por este intercambio en la red.

A la hora de determinar los precios, debe existir un alineamiento en los objetivos de los operadores de la red y de las empresas desarrolladoras que debe basarse en fomentar la generación local de energía y el consumo de electricidad durante las horas de menor demanda para reducir la carga en la red. Por eso, es importante que las empresas distribuidoras y los operadores del sistema de los diferentes países formen parte de la conversación en estos proyectos. Al fin y al cabo, son ellos los propietarios del activo que transporta la electricidad entre los vecinos.

7.3. Conclusiones acerca de los riesgos asociados con la incierta regulación

Es posible que, con el aumento de las aplicaciones basadas en tecnología blockchain, se apliquen regulaciones existentes, o aparezcan nuevas regulaciones, contrarias a la configuración actual del sistema de smart contracts. Y, como consecuencia, sea necesario hacer alguna modificación o incluso eliminar del mercado muchas de las plataformas actuales de comercio P2P.

Es difícil predecir como va a evolucionar la legislación con respecto a este tipo de iniciativas. Por ejemplo, se podría determinar que los tokens, empleados por las plataformas, fueran un producto financiero regulado para el que se necesitara una licencia, o podría prohibirse su transferencia. Lo que afectaría negativamente al valor de los tokens utilizados por las plataformas.

Lo mismo ocurriría con la regulación de las tasas de transporte y distribución, mencionadas previamente. El modelo de negocio peer-to-peer actual confía en la utilización de la infraestructura de red existente. En caso de que la ley no permita que los intercambios de energía ocurran en la red o si se cobran unas tasas muy altas, podría verse comprometida la viabilidad económica y la escalabilidad del modelo de comercio de energía P2P.

Además, la regulación varía mucho entre países por lo que las plataformas deben contar con modificaciones según el país y el modelo de negocio de las compañías desarrolladoras también debe adaptarse.

7.4. Conclusiones acerca de los beneficios obtenidos por la implantación de mercados P2P y del uso de la tecnología blockchain

Los proyectos han mostrado el gran papel de estos mercados en la integración de los recursos de generación distribuida en la red. Los usuarios que participan en mercados P2P, según las encuestas, están motivados en adquirir paneles solares y otros DERs porque al vender su energía a la comunidad se benefician de periodos

de recuperación de la inversión inferiores que los que obtendrían si utilizaran los DERs únicamente para el autoconsumo.

Estas plataformas, son una solución para llevar electricidad a todas aquellas zonas que se encuentran alejadas de la red eléctrica donde podrían crearse microrredes similares a la Microrred de Brooklyn. O, incluso, en zonas urbanas propensas a sufrir catástrofes naturales o climatológicas que necesitan contar con redes resilientes.

La integración de blockchain en este tipo de proyectos tiene muchas ventajas. Entre ellas, la eliminación de intermediarios que supone reducciones en los costes y en los tiempos de gestión de las transacciones. Otra ventaja es la descentralización del control. Esta característica de blockchain está alineada con la forma que está adquiriendo el sistema energético.

Además, el consumo energético que siempre se ha asociado a esta tecnología no es un problema. Es verdad que algunos mecanismos de consenso, como el PoW, requieren una gran carga computacional y un gran consumo de energía. Pero, actualmente no hace falta comprometer la seguridad del sistema para reducir el consumo energético, ya que seguridad y consumo no están reñidos. Existen muchos mecanismos de consenso, como PoS o PoA, que lo corroboran.

Pero, blockchain también tiene inconvenientes entre los que se encuentra el marco regulatorio o la necesidad de utilizar tokens para poder ejecutar los smart contracts. De manera que, si se quiere automatizar el proceso, para facilitar la compra de energía a los participantes, es necesario contar con la figura del agregador local mencionado en el proyecto desarrollado por Verv. Otro inconveniente, es la dificultad que supone entender esta tecnología para los participantes. Por eso, el objetivo es que ellos no tengan que hacerse cargo de la plataforma, y simplemente la utilicen como mucha gente que utiliza internet sin saber cómo funciona.

Por lo tanto, con respecto a blockchain concluiría que, simplemente, es una herramienta para materializar los mercados de energía P2P, que tiene sus ventajas, pero que no es indispensable para la operación de estos proyectos, y que puede ser sustituida por otras alternativas.

7.5. Trabajos Futuros

Tras haber finalizado este estudio se proponen como líneas de futuras:

- Análisis económico y análisis de costes de un sistema descentralizado que utiliza tecnología blockchain.
- Estudio de otros proyectos de comercio P2P que utilicen tecnologías diferentes a blockchain para llevar a cabo las transacciones.
- Estudio de la posible escalabilidad de las soluciones blockchain de comercio P2P.
- Desarrollo de una plataforma blockchain para llevar a cabo transacciones energéticas.

8. Bibliografía

- [1] UNEF (Unión Española Fotovoltaica), «Energía Solar Fotovoltaica: Oportunidad Para La Sostenibilidad,» 2021.
- [2] «Quartierstrom: Switzerland's first local electricity market,» [En línea]. Available: <https://quartier-strom.ch/index.php/en/homepage/>.
- [3] Naciones Unidas, «Acuerdo de París,» París, 2015.
- [4] P. Linares, P. Rodilla, T. Gómez, M. Rivier, P. Frías, J. P. Chaves, Á. Sánchez, T. Gerres, R. Cossent, L. Olmos, A. Ramos, L. Rouco y F. Martín, «El Sector Eléctrico Español del Futuro: Retos y Políticas,» Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), 2018.
- [5] «Enel X,» [En línea]. Available: <https://corporate.enelx.com/es/our-commitment/electrification>.
- [6] I. Alonso y M. Suárez-Varela, «Un Análisis del Impacto Económico Global del Reciente Encarecimiento de las Materias Primas Energéticas,» Banco de España, Madrid, 2021.
- [7] M. Pacce, I. Sánchez y M. Suárez-Varela, «El Papel del Coste de los Derechos de Emisión de CO2 y del Encarecimiento del Gas en la Evolución Reciente de los Precios Minoristas de la Electricidad en España,» Banco de España, Madrid, 2021.
- [8] IRENA, «Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables,» Abu Dhabi, 2019.
- [9] Endesa, «Endesa,» 4 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/renovables/digitalizacion-aerogeneradores-parques-eolicos>.
- [10] J. P. Chaves, R. Cossent, T. Gómez, G. López, J. Matanza, C. Mateo, N. Rodriguez y M. A. Sánchez, «La digitalización de las redes eléctricas de distribución en España,» IIT y Fundación Naturgy , 2021.
- [11] «Comunidad Local de Energía,» Sapiens, 2020. [En línea]. Available: <https://sapiensenergia.es/tag/comunidad-local-de-energia/>.
- [12] Gobierno de España, «Nota resumen explicativa del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021- 2030,» Madrid, 2020.
- [13] T. Gómez, J. P. Chaves, F. Martin y T. Gerres, «Señales de precio a la inversión en un mercado eléctrico con elevada penetración de renovables,» Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Madrid, 2018.
- [14] Foro de la Industria Nuclear Española, «El relevante papel de la energía nuclear contra el cambio climático,» Madrid, 2019 .
- [15] «La paradoja energética alemana: renunció a las plantas nucleares por la ecología, y ahora vuelve al carbón para cortar la dependencia de Rusia,» La Nación, 20 junio 2022.
- [16] «Aprende Blockchain,» [En línea]. Available: <https://aprendeblockchain.wordpress.com/fundamentos-tecnicos-de-blockchain/la-cadena-de-bloques/>.
- [17] IBM Limited Edition, Blockchain for Dummies, 2017.

- [18] The World Energy Insights Brief, «World Energy Insights Brief: Is Blockchain in Energy Driving an Evolution or a Revolution?», Londres, 2018.
- [19] V. Hosseinneshad, B. Hayes, B. O'Regan y S. Pierluigi, «Practical Insights to Design a Blockchain-Based Energy Trading Platform», IEEE POWER & ENERGY SOCIETY SECTION, 2021.
- [20] World Intellectual Property Organization (WIPO), «Global Innovation Index 2021», Ginebra, 2021.
- [21] «Brooklyn Microgrid», [En línea]. Available: <https://www.brooklyn.energy>.
- [22] E. Mengelkamp, «Designing microgrid energy markets A case study: The Brooklyn Microgrid», Alemania, 2017.
- [23] «Ecogeneration», 4 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.ecogeneration.com.au/new-york-peer-to-peer-trial-lands-in-small-town-south-australia/>.
- [24] J. Green, P. P. Newman y N. Forse, «RENeW Nexus: Enabling resilient, low cost & localised electricity markets through blockchain P2P & VPP trading», Australia, 2020.
- [25] L. Ableitner, B. Bättig, N. Beglinger, A. Brenzikofer, G. Carle, C. Dürr, A. Meeuw, S. Proll, C. Rosatzin, S. Schopfer, V. Tiefenbeck, F. Wortmann y A. Wörner, «Quartierstrom: Community Energy Network with Prosumer Focus», Swiss Federal Office of Energy SFOE, Berna, 2020.
- [26] L. Ableitner, A. Meeuw, S. Schopfer, V. Tiefenbeck, F. Wortmann y A. Wörner, «Quartierstrom - Implementation of a real world prosumer centric local energy market in Walenstadt, Switzerland», 2019.
- [27] L. Stoker, «Verv claims UK first with launch of blockchain-powered P2P energy trading pilot», Current, 22 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.current-news.co.uk/news/verv-claims-uk-first-with-launch-of-blockchain-powered-p2p-energy-trading-p>.
- [28] Verv, «Verv VLUX Whitepaper: The Evolution of Energy», Londres, 2018.
- [29] Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE), «Detalle del Funcionamiento del Mercado Intradiario».
- [30] Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE), «Funcionamiento del Mercado Diario».
- [31] Exergy, «Business Whitepaper», 2018.
- [32] Bit2Me Academy, «Bit2Me Academy», [En línea]. Available: <https://academy.bit2me.com/transacciones-bitcoin/>.
- [33] A. Delgado Martín, B. Crisóstomo Merino y M. L. Cruz Aparicio, «Transformación Digital de la Industria Eléctrica», 2018.
- [34] C. A. Vivas, «Estudio de la Tecnología Blockchain y su Potencial Aplicación para el Desarrollo de las Energías Eléctricas Renovables de Carácter Intermitente», Madrid, 2019.
- [35] D. G. Guzmán, «Potencial de la Tecnología Blockchain en el Mercado Eléctrico», Madrid, 2018.
- [36] E. G. Limia, «Blockchain Technology Application to Energy Communities», Madrid, 2018.

- [37] E. d. L. Mérida, «Análisis del Impacto de Digitalización en el Sector de la Distribución de Energía Eléctrica en España,» Madrid, 2020.
- [38] Universität St. Gallen, «Empowering Local Electricity Markets,» Suiza, 2017.

2. ANEXOS

Anexo 1: Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El 25 de septiembre de 2015, 193 países alcanzaron un acuerdo internacional con 17 objetivos y 169 metas. Estos Objetivos de Desarrollo Sostenible se encuentran agrupados en la Agenda 2030, y tienen como finalidad erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todas las personas.



Producido en colaboración con TROLLBÄCK + COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1212.529.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dpcampaigns@un.org

Figura 32: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Con la firma del tratado, los gobierno de los diferentes países comenzaron a trazar planes para cumplir con todos los objetivos antes del 2030. Ante esto, los diferentes sectores han tenido que tomar medidas para adaptarse a los nuevos escenarios y a las nuevas políticas. El sector energético se ha unido al resto de industrias en este cambio.

El sector energético se enfrenta a un desafío de gran envergadura por la complejidad del sistema. El sistema eléctrico está constituido por cuatro grandes actividades y cualquier pequeño cambio en alguna de ellas puede suponer graves consecuencias para el resto de la red. Además, las emisiones de este sector representan dos tercios de las emisiones globales. Esto significa que casi el 70% de los gases contaminantes y de los gases de efecto invernadero mundiales son producidos por la industria energética. Si a esto se le suma que la energía es un bien de primera necesidad y que debe estar garantizado para todas las personas, se entiende el importante papel que tiene el sector en este cambio.

Ante esta situación, numerosas empresas privadas, entidades públicas, e institutos y centros de investigación se han puesto manos a la obra desarrollando estrategias

y proyectos encaminados a la transformación del sector. Son diferentes los rumbos que han tomado estas investigaciones debido al incierto futuro del sector, pero todas ellas guían hacia un sistema descarbonizado, descentralizado, electrificado y digitalizado.

Los mercados de energía P2P estudiados en este proyecto ayudan a materializar los compromisos y objetivos establecidos por las organizaciones mundiales. Este proyecto se encuentra alineado con los ODS de la siguiente manera:

Retos	Papel de los Mercados de Energía P2P basados en tecnología Blockchain
7,13	Integran los recursos de generación distribuida en el sistema de manera que: • Aumentan la cuota de generación renovable • Reducen las pérdidas en el transporte, mejorando la eficiencia energética • Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de otros gases contaminantes
1, 7, 9, 10, 11	Tienen el potencial de crear comunidades energéticas de autoabastecimiento en zonas alejadas de la red eléctrica, a las que no se les puede asegurar el suministro eléctrico, y en zonas con una situación climatológica complicada o propensas a sufrir desastres naturales, que provocan problemas de operación.
11, 12	Los consumidores pasan a tomar un papel más activo en el sistema: • Los consumidores toman consciencia de su consumo, • Algunos hogares cambian sus patrones de consumo según la generación de su comunidad. Por ejemplo, reduciendo su consumo durante los picos de demanda en los que la comunidad no puede autoabastecerse.
10, 12	La utilización de la tecnología blockchain posibilita la transparencia y la trazabilidad de las transacciones energéticas
9	En la actualidad los proyectos basados en comercio P2P se encuentran en fase piloto y son puramente proyectos de investigación que buscan desarrollar, entre otras cosas, la tecnología necesaria para desarrollar una solución ante el desafío económico y medioambiental que se está viviendo.

Tabla 21: Alineación del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

