

# Estudio de caso y marco para la implementación de microrredes coordinadas con Blockchain

Bonillo P, Ramón y Pérez M, Daniel

Tutor: Oroño, Diego

**Resumen**— El sector energético no es ajeno a los cambios tecnológicos, prueba de ello es la irrupción de la tecnología *Blockchain* dentro del mercado eléctrico, que plantea tanto importantes desafíos como una gran cantidad de beneficios. Es evidente que este cambio tecnológico va a conllevar a un nuevo modelo de negocio donde los elementos del mercado eléctrico tendrán que adaptarse a los nuevos entornos digitales, cada vez más integrados al mundo real. También es necesario mencionar que el mercado centralizado de energía está cambiando su estructura a un modelo más descentralizado, tomando presencia en el sector la generación distribuida, cada vez más atractiva, en gran medida por la creciente evolución, disminución de precios y disponibilidad de las fuentes de energía renovables.

La transición energética hacia el uso de fuentes renovables, la digitalización y el desarrollo de la tecnología *Blockchain*, abren una gama de posibilidades dentro del mercado eléctrico, haciendo viable por ejemplo a escala local, la creación de estructuras transaccionales de energía entre pares “*Peer-to-Peer*” (P2P), que proporcionan un entorno descentralizado, seguro y más económico que el otorgado por los modelos actuales. *Blockchain* cuenta con proyectos pilotos totalmente operativos en el área, que la respaldan como una tecnología que demuestra ser competente en términos de transparencia, seguridad e inmutabilidad de los registros para coordinar transacciones energéticas P2P entre los miembros de una microrred, posicionando así a esta tecnología como una alternativa atractiva para gestionar mercados energéticos locales.

Este trabajo aborda brevemente los principios fundamentales de la tecnología *Blockchain*, sus usos actuales en los distintos sectores, con especial énfasis en el eléctrico. Así mismo presenta una revisión de los casos pilotos y proyectos en desarrollo más relevantes aplicados a microrredes, finalizando con una corta evaluación del potencial de la tecnología aplicada en microrredes en Uruguay.

**Palabras clave**—*Blockchain*, microrred, P2P, mercado eléctrico, contrato inteligente.

## I. INTRODUCCIÓN

La matriz energética mundial se ha diversificado en las últimas décadas guiada entre otros aspectos, por políticas energéticas cuyos objetivos se centran en la sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovables (descarbonización), mayor eficiencia en los procesos de conversión de energía y acceso a dichas fuentes para todas las personas. La matriz de generación eléctrica tiene un rol muy importante para lograr los objetivos antes mencionados, razón por la cual se han integrado a las redes eléctricas de potencia fuentes de generación distribuida de origen renovable como la solar fotovoltaica, eólica, biomasa, minihidráulica y geotérmica, ubicadas mucho más cerca de las cargas, además de equipos de almacenamiento. La

modernización de las redes modifica drásticamente el antiguo concepto, en el que las centrales de generación se encontraban alejadas de los centros de carga, requiriendo largas líneas de transmisión y subestaciones en alta tensión, para transportar la energía de manera unidireccional hasta las subestaciones de distribución y finalmente a los usuarios.



Figura 1. Modelo de red de potencia convencional [1].

Esta nueva arquitectura de la red permite a los usuarios tomar el rol de prosumidores (consumidor - productor) instalando sus propias fuentes de generación para el autoconsumo de energía eléctrica o almacenamiento a través de bancos de baterías, entregando el excedente a la red en los momentos que la misma lo requiera. Los pequeños consumidores pasan a ser agentes activos en los mercados energéticos, para lo cual la red de distribución debe incorporar tecnología que permita la digitalización, descentralización, automatización de los procesos, comunicación e intercambio de información entre los agentes participantes [2] [3].

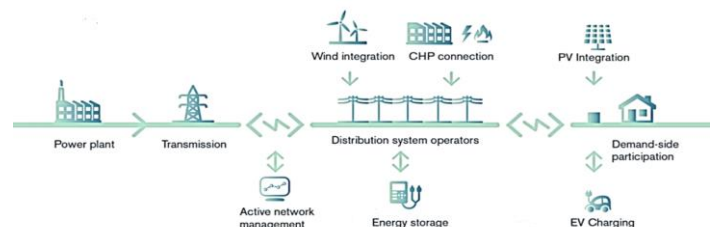


Figura 2. Red de potencia con flujos de potencia bidireccionales [1].

Las microrredes inteligentes son redes eléctricas locales que integran sistemas avanzados de medición, control y procesamiento de datos cuyas características hacen viable su operación de forma autónoma o conectada al sistema eléctrico de potencia central, permitiendo flujos de carga bidireccionales, optimizando dichos flujos de acuerdo a las necesidades energéticas tanto de la red local como principal, otorgando un papel activo a los prosumidores.

Estas microrredes se destacan por el dinamismo con el que ocurren las transferencias de energía entre los participantes, por ejemplo, en un determinado instante un usuario puede estar consumiendo energía de la red local, y en la siguiente hora puede entregar energía proveniente de su generador fotovoltaico, lo que representa un desafío para gestionar el mercado. Esta dinámica genera grandes volúmenes de

información que requieren sistemas capaces de procesar y almacenar de forma segura cada una de las transacciones. Las bases de datos distribuidas o *Distributed Ledger Technology* (DLT) como *Blockchain* han surgido como modelo para gestionar de forma óptima y descentralizada las numerosas transacciones energéticas que se generan en las microrredes. En [4] se define la *Blockchain* como “un libro mayor, implementado como una base de datos distribuida en una red, la cual puede ser pública o privada. En ella, se almacenan de forma permanente (inmutable) un historial de transacciones mediante la utilización de nodos, los cuales pueden contar con diferentes permisos sobre la red”. Este registro distribuido de transacciones es verificable mediante sistemas de criptografía asimétrica, que funcionan almacenando la información en forma de bloques conectados entre sí y en donde cada transacción es confirmada por el consenso de la mayoría de los miembros de la red. Además, una vez que un registro es creado y aceptado por la cadena de bloques, nunca puede ser alterado o borrado. Por lo tanto, es posible decir que *Blockchain* contiene un registro seguro y verificable de cada transacción realizada [5] [6] [7]. Se considera que la tecnología *Blockchain* nace en el año 2008 cuando *Satoshi Nakamoto*, pseudónimo detrás del cual se sospecha un grupo de desarrolladores se esconde, publica el white paper “*Bitcoin: un sistema de dinero electrónico Peer-to-Peer*”, sentando las bases para su posterior publicación en el año 2009 de la primera versión del software de fuente abierta *Bitcoin*. Si bien las primeras aplicaciones de *Blockchain* estaban orientadas al ámbito financiero, se trata de una tecnología disruptiva con potencial desarrollo en otras áreas como servicios notariales, gestión de datos de identidad, pólizas de seguro, industria, automoción y movilidad, servicios médicos, educación, gobierno y energía [8] [9] [10].

## II. TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN

### A. Funcionamiento

El término proviene etimológicamente de “*Block*” bloque y “*Chain*” cadena, es una cadena de bloques donde cada bloque se enlaza con el anterior a través de una función criptográfica, generando la cadena que da nombre a la definición. Cada bloque presente en la cadena está compuesto de información (mensaje-transacción), que contiene un *hash* de sus datos particulares y del *hash* anterior, en términos simples *Blockchain* es una base de datos replicada en una red P2P. En una red *Blockchain* cada vez que una transacción ocurre, la información es organizada dentro de bloques, quedando registrada una copia en cada computadora o nodo de la red, siendo necesario un mecanismo de consenso para verificar y acordar que la información de la transacción es correcta. Cada bloque posee un número de secuencia, estampa de tiempo y *hash* criptográfico único, que a su vez hace uso del *hash* criptográfico del bloque anterior. Una vez que la información es validada, la transacción es agregada al bloque, cuando este alcanza un determinado tamaño, se le agrega una estampa de tiempo y es unido al bloque anterior a través de una función criptográfica, creando de esta manera la cadena de bloques [7] [11] [12] [13] [14].

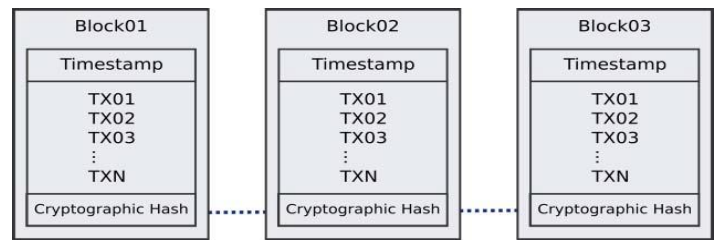


Figura 3. Estructura de bloques [13].

En [15] se explica que “*Blockchain* no es otra cosa que una base de datos que se halla distribuida entre diferentes participantes, protegidos criptográficamente y organizada en bloques de transacciones relacionados entre sí matemáticamente. Expresado de forma más breve, es una base de datos descentralizada que no puede ser alterada”. *Blockchain* es un sistema que permite crear consenso entre partes que comparten series de datos, es decir, permite a las partes comprobar el estado y evolución de lo compartido, garantizando por medio del consenso la veracidad y generando confianza entre partes (que inicialmente no confían entre sí por no conocerse) dentro de redes que son inseguras de forma nativa [16].

Un concepto más práctico es el presentado en [16] donde se explica que “se puede pensar en *Blockchain* como un entorno de desarrollo de aplicaciones descentralizadas sobre una base de datos de contabilidad segura y pública, que puede utilizar sus propios recursos para autofinanciar su funcionamiento y que a su vez permite la creación de empresas o agrupaciones de carácter totalmente digital con un sentido muy desarrollado de la democracia y de la participación de los usuarios que las componen”.

### B. Principios Fundamentales

Para entender cómo funciona la tecnología *Blockchain*, es necesario comprender los fundamentos y elemento básicos que la caracterizan, las cuales se describen a continuación:

**Nodo:** cualquier máquina electrónica dentro de la red que tenga la capacidad de cómputo y que además posea el software o protocolo para comunicarse con el resto de los dispositivos (ordenadores) [17].

**Red entre pares o P2P (Peer to Peer):** Es una red donde los nodos pueden conectarse directamente, en esquema descentralizado donde no existe un elemento orquestador y como lo dice su nombre se realiza entre pares. La ventaja más importante de las redes P2P es que son más sólidas frente a posibles eventualidades por su método de funcionamiento donde los nodos operan de manera independiente [16] [17].

**Registro distribuido:** Como se presenta en [17] “*Blockchain* nace como una propuesta de registro distribuido de información”. Las redes *Blockchain* son distribuidas “porque cada elemento que la constituye puede funcionar simultáneamente como emisor y receptor respecto a los demás nodos de la red”, es decir, que todos los nodos de la red están interconectados, siendo innecesario un servidor intermedio. Al contrario de una red centralizada, en una red *Blockchain* la información es almacenada (registrada) en la totalidad de los nodos que la conforman, cada nodo contiene una copia (registro seguro y verificable) de la cadena de

bloques, es decir, de cada transacción realizada. En este sistema descentralizado todos los nodos son iguales entre sí, tienen el mismo nivel jerárquico en cuanto a la toma de decisiones (*Blockchain* pública) [7] [15] [17] [18].



Figura 4. Modelo de red centralizada, red descentralizada y distribuida [17].

**Criptografía asimétrica:** *Blockchain* permite verificar la veracidad de las transacciones mediante la denominada firma digital (clave de cifrado y clave de descifrado del algoritmo empleado [15]), esto es posible porque cuando un usuario realiza una transacción, ésta es automáticamente firmada con su clave privada y comprobable por medio de la clave pública del emisor (autenticación) que está disponibles para todos los miembros de la red. De modo que se puede conocer la cuenta de procedencia del mensaje y certificar que no han ocurrido alteraciones en el contenido. Es posible entender mejor el proceso si pensamos en un ejemplo donde un sujeto “A” desea enviar un mensaje o transacción a un sujeto “B”, entonces “A” firma con su clave privada y encripta el mensaje antes de enviarlo con la clave pública de “B” y solo “B” lo puede descifrar con su clave privada (clave privada de B), además al “A” firmar el mensaje con su clave privada, confirmando que en realidad el mensaje proviene de él y “B” puede confirmar que es así verificando el hecho con la firma pública de “A” [18] [19].

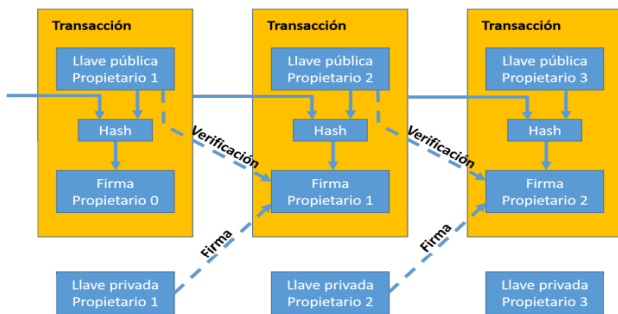


Figura 5. Diagrama *Blockchain* extraído de la publicación original de Satoshi Nakamoto y traducido por López Lérica y Mora Pérez en el libro “La economía de *Blockchain*” [16].

**Transacción:** Es una instancia de cambio de propiedad de tokens a través de una parte de la firma digital. Representa una operación básica por medio de la cual un nodo envía un mensaje a otro. Dependiendo de la aplicación *Blockchain* una transacción puede ser, por ejemplo, la transferencia de una determinada cantidad de un activo digital entre distintos usuarios, siendo un activo digital cualquier recurso real cuyo valor es llevado al plano digital (acciones de empresas, inmuebles, energía, otros) o su creación es de origen digital y tiene valor por sí mismo (criptomonedas) [16] [20] [21].

**Privacidad de red:** En términos de privacidad existen dos grandes tipos de *Blockchain*, la pública y la permissionada. En la primera no existe restricción de los derechos y en las funciones de los miembros de la red, es posible ingresar y abandonar la red, así como ejercer las funciones de escritura y lectura. En el caso de la permissionada los derechos de escritura y lectura son asignados solo a algunos participantes. En general en ambos casos sin la necesidad de un ente central que valide los procesos y datos contenidos en la red. Es posible encontrar otras clasificaciones de tipos de *Blockchain* tal como se aprecia en la Tabla 1 y Tabla 2, donde además de separar las permissionadas en privada y federada, se agrega la *Blockchain* as a Service (BaaS) que son *Blockchain* en la nube las cuales ofrecen servicios de almacenamiento de información con la ventaja de tener aumento en la seguridad y la no necesidad de inversión en hardware [15] [17] [18] [22] [23] [24] [25].

Tabla 1. Comparativa entre los tipos de *Blockchain* [17].

	Públicos Bitcoin, Ethereum, Litecoin	Privados Hyperledger, Corda, Quorum	Federados Hyperledger, Corda, Quorum	<i>Blockchain</i> as a Service IBM, Microsoft, Amazon
Cualquiera puede participar	✓	✗	✗	NA
Los participantes actúan, en general, como nodos	✓	✗	✗	NA
Transparencia	✓	≈	≈	NA
Hay un único administrador	✗	✓	✗	NA
Hay más de un administrador	✗	✗	✓	NA
No hay administradores	✓	✗	✗	NA
Ningún participante tiene más derechos que los demás	✓	✗	✗	NA
Se pueden implementar Smart Contracts	✓	✓	✓	NA
Existe recompensa por minado de bloques	≈	✗	✗	NA
Soluciona problema de falta de confianza	✓	✗	≈	NA
Seguridad basada en protocolos de consenso	✓	✗	≈	NA
Seguridad basada en funciones hash	✓	≈	≈	NA
Provee servicios en la nube	NA	NA	NA	✓

Tabla 2. Características técnicas de acuerdo al tipo de *Blockchain* [12].

	PUBLIC	PRIVATE
Access right	Open, anyone can write/read	Restricted "Know Your Customer" (KYC) policy
Validation	Permissionless, unknown validators (risk of "Sybil attack")	Permissioned, known validators (can ban who misbehave)
Speed	Slow clearing, fast settlement	Fast, high performances. Settlement might be slow depending on the process
Security	Immutable record	Reversible, can edit and change the history
Identity	Anonymous/pseudonymous	Known (KYC rules)
Asset	Native digital token used for mining reward	Customisable type of asset
Cost	Energy, OPEX	Development cost, CAPEX
Consensus	Proof of Work, possible Proof of Stake in the future	Proof of Stake, Delegated Proof of Stake, Proof of Elapsed Time, Byzantine Fault Tolerance algorithms

**Mecanismo de consenso:** En una red *Blockchain* los nodos no tienen por qué confiar entre sí, sin embargo, comparten entre ellos un registro de información confiable. Lo hacen por medio de un mecanismo de consenso o protocolo de consenso que es el método por el cual los nodos dentro de la red deben ponerse de acuerdo y de esta forma determinar la veracidad de la información. Está sustentado en un protocolo que verifica las transacciones realizadas, asegurando que no puedan ser modificadas ni revertidas. El consenso es el fundamento que permite que la totalidad de los participantes de la red confíen en la información contenida en el sistema, manteniendo la integridad de la gestión de los datos en todo momento. En otras palabras es una herramienta de seguridad que evalúa la fidelidad de la información, donde todas y cada una de las transacciones realizadas en el pasado y en presente son verificables en cualquier momento futuro y este consenso se realiza sin comprometer la privacidad de las partes involucradas, por este motivo se dice que el mecanismo de consenso y el anonimato son dos características importantes del *Blockchain* [7] [15] [17] [18].

Estos mecanismos dependen de si la red es pública o permitida. Para las públicas el mecanismo de consenso actualmente utilizado es el de la prueba de trabajo o *Proof of Work (PoW)*, pero existen alternativas como la prueba de inversión o de participación *Proof of stakes (PoS)*, Prueba de tiempo transcurrido *Proof of Elapsed Time (PoET)* y para las permitidas las pruebas de autor "*Proof of Authority (PoAu)*". Otros mecanismos utilizados son: *Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)*, *Delegated Proof of Stake (DPoS)*, *Federated Byzantine Agreement (FBA)*, *Proof of Activity (PoAc)*, *Proof of Burn (PoB)* y *Proof of Capacity (PoC)* [26].

**Smart Contracts:** Son elementos fundamentales de la tecnología *Blockchain*, siendo básicamente programas informáticos que tienen la capacidad de ejecutar automáticamente los términos de un contrato (cláusulas), "representan promesas unilaterales de proporcionar una tarea informática determinada" y lo hacen estableciendo y definiendo cómo y quién puede llevar a cabo qué transacciones. Por ejemplo, es posible realizar un pago automático cuando se cumple una condición preconfigurada por las partes en el *smart contract* [17] [18].

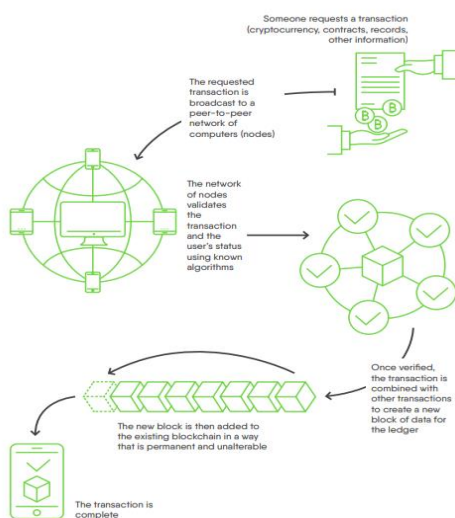


Figura 6. Proceso de transacción *Blockchain* [27].

**Función Hash:** Es una función computacionalmente eficiente que relaciona cadenas binarias de longitud arbitraria a cadenas binarias de longitud fija llamada *Hash*.

**Hash:** es una huella digital informática "producto de un proceso matemático que utiliza una cantidad de datos variables y produce una salida mucho más corta de longitud fija" es decir, un código alfanumérico que corresponden a un conjunto de datos concatenados o mensaje. Se utilizan para el cifrado de datos y son partes inevitables de la *Blockchain* [16] [17].

### C. Usos actuales

Las aplicaciones de *Blockchain* actualmente se clasifican en tres amplias categorías según su complejidad y generación tecnológica. La primera es la "*Blockchain 1.0*" que está orientada a la automatización de transacciones financieras sin intermediarios (descentralización de dinero) con aplicaciones descentralizadas (*dApp*) como "*Bitcoin*" que introduce transacciones de *tokens (bitcoins)*, en este grupo se encuentran gran parte de las criptomonedas. "*Blockchain 2.0*" que son aquellas aplicaciones que incluyen o soportan los *Smart Contracts*, que ejecutan procesos predefinidos de forma automática en una transacción y que están orientados a la descentralización de mercados, algunos ejemplos son *Ethereum* e *HyperLedger*, y "*Blockchain 3.0*" donde los contratos inteligentes se desarrollan más para dar lugar a Organizaciones Autónomas Descentralizadas "*Decentralised Autonomous Organisations (DAO)*" y *Decentralized Autonomous Societies (DAS)* que se rigen por códigos propios de programación que les otorgan un alto grado de autonomía, está pensado para adaptarse a los cambios tecnológicos que están ocurriendo con la implementación de la *Big Data* y la automatización de tareas predictivas principalmente en áreas como la inteligencia artificial, aprendizaje automático, internet de las cosas y análisis de macrodatos, siendo algunos ejemplos de estas aplicaciones *IOTA* y *Hashgraph* [12] [16] [28] [29] [30] [31] [32].

*Bitcoin* es el ejemplo más popular y controvertido ligado a la tecnología *Blockchain*. Tal como se mencionó anteriormente nace con la publicación de *Satoshi Nakamoto* como una opción P2P de dinero electrónico que permite que los pagos online se realicen directamente de un actor a otro sin pasar por un intermediario o institución financiera, pudiendo ser utilizadas como una alternativa a las monedas fiduciarias (dinero fiat o dinero convencional), afianzándose así como la primera criptomoneda o "moneda criptográfica", nombre que reciben todas las redes y medios de intercambio que utilizan criptografía para proteger sus transacciones. En definitiva, *Bitcoin* consiste en una *Blockchain* P2P con mecanismo de consenso *PoW* donde se realizan transacciones de monedas electrónicas. Un índice para medir la evolución de *Bitcoin* y su aceptación como medio para realizar transacciones financieras, es el aumento de su cotización, durante el año 2010 su valor era menor a 1 dólar, mientras que en mayo de 2021 su valor supera los 55000 dólares, demostrando además una alta volatilidad [7] [8] [12] [33].

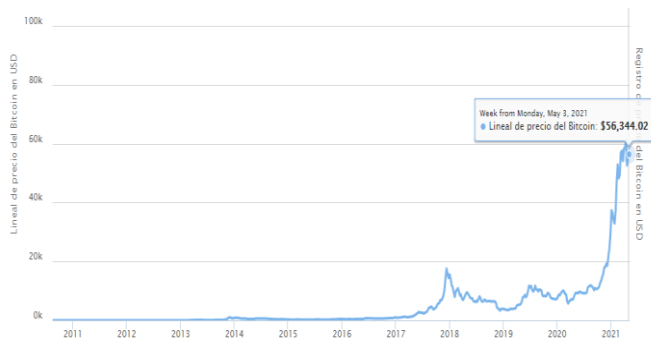


Figura 7. Historial de cotizaciones de *bitcoin* [33].

*Ethereum* es el segundo proyecto más grande de *Blockchain* después de *Bitcoin* y consiste en una *Virtual Machine* (máquina Virtual) con plataforma *cloud 2.0* que posee un lenguaje de programación integrado permitiendo a los usuarios crear sus propias aplicaciones en un ambiente *Blockchain*, concretamente es una plataforma global de código abierto para aplicaciones descentralizadas. En *Ethereum* existe una sola computadora canónica denominada máquina virtual *Ethereum* o *Ethereum Virtual Machine* “*EVM*” avalada por todos los participantes de la red *Ethereum* ya que cada nodo posee una copia del estado de esta computadora y su mecanismo de consenso al igual que en *Bitcoin* es el *PoW*. Internamente *Ethereum* utiliza una criptomoneda llamada *ETH* para realizar las transacciones que ocurren dentro de ella o para usar las aplicaciones existentes. Según *Eurelectric* hay más de 1000 proyectos que utilizan actualmente *Ethereum* [12] [34].

*HyperLedger Project* es un proyecto de código abierto desarrollado por *The Linux Foundation* en 2015, en él se desarrollan *Blockchain* privadas para ser utilizadas entre empresas con el objetivo de crear redes de negocios, pretendiendo establecer estándares para soluciones *Blockchain* en la industria. Dentro de *HyperLedger* se encuentran dos grandes bloques de proyectos: los entornos de trabajo “*Frameworks*” y las “*Tools*” (herramientas). Dentro del primer grupo está *HyperLedger Fabric* que es el entorno que permite crear la arquitectura *Blockchain* y personalizarla según las necesidades, *HyperLedger Indy* que permite gestionar la identidad descentralizada, es un entorno donde puedes descentralizar tu información personal y decidir con quién deseas compartirla, *HyperLedger Iroha* pensada para usuarios finales, se diseñó para una gestión simple y fácil de los activos digitales, está orientada a la creación rápida de *Blockchain* para ser operadas desde dispositivos móviles utilizando mecanismo de consenso *PBFT*, *HyperLedger Sawtooth* con mecanismo de consenso *PoET* enfocada al soporte de operaciones paralelas, construir, implementar y ejecutar libros contables distribuidos e *HyperLedger Burrow* que proporciona a los desarrolladores un motor de contratos inteligentes fuertemente determinista para operar en procesos industriales complejos, está optimizado para compartir procesos entre organizaciones y opera como una biblioteca de contratos inteligentes. En el segundo grupo se encuentran las herramientas *HyperLedger Caliper*, *HyperLedger Cello*, *HyperLedger Composer*, *HyperLedger Explorer* e *HyperLedger Quilt* que aportan una serie de funcionalidades que pueden ser consultadas con más profundidad en [35] [36]. *R3 CEV* es un proyecto desarrollado por el consorcio *R3* que busca desarrollar con tecnología *Blockchain* soluciones que

brinden confianza en el sector financiero, mejorando los procesos tradicionales de la banca. *R3* se encuentra digitalizando procesos y sistemas en los que las empresas puedan confiar y donde puedan realizar sus transacciones entre sí, además de permitir el desarrollo de aplicaciones para el análisis y procesamiento de datos confidenciales de múltiples partes sin comprometer la confidencialidad de ninguna de las partes. Actualmente cuenta con la participación de 350 instituciones dentro de las cuales se agrupan 40 de los principales bancos del mundo [16] [37]. La tecnología *Blockchain* se encuentra en fase de búsqueda y desarrollo en una amplia gama de áreas, no siendo exclusivas las financieras. “Más allá de programar el dinero, la *Blockchain* nos permite programar la confianza, propiedad, identidad, activos y contratos, mediante pagos, transacciones, procesos, autenticación, reconciliación e información en tiempo real, y todo con plena transparencia y auditabilidad” [15].

#### D. Proyección

*Blockchain* está evolucionando rápidamente y está tomando un lugar en áreas como la salud, gestionando la información del sistema sanitario, almacenando expedientes médicos de forma completa descentralizada e inmutable en redes donde el usuario decide quien dentro de los proveedores de salud puede tener acceso a su información, administrando así la confidencialidad y la responsabilidad de sus datos; otra rama de aplicación es el denominado internet de las cosas, con el objetivo de lograr conectar miles de millones de dispositivos y que con el modelo centralizado no es posible soportar. También tiene aplicabilidad en la gestión de bienes digitales, auditoría o transacciones financieras, en la educación, banca, seguros, bienes raíces, comercio internacional y los estados. En la Figura 8, se muestra la distribución de proyectos *Blockchain* en distintas áreas de aplicación [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47].

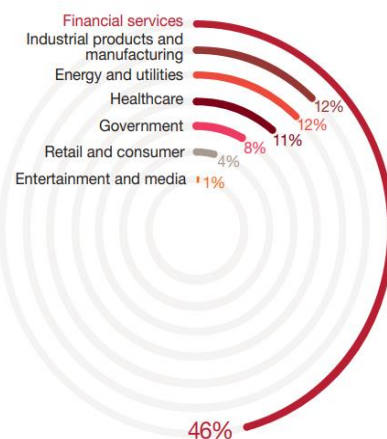


Figura 8. Sectores en los cuales se han desarrollado aplicaciones *Blockchain* [48].

### III. TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN EN EL SECTOR ELÉCTRICO

*Blockchain* es una tecnología con un gran potencial como vimos anteriormente en sectores donde no existe un intercambio físico, como el financiero, seguros y bancario.

En gran medida se debe a la capacidad que tiene el *Blockchain* de registrar fehacientemente las transacciones sin que exista la necesidad de verificar el intercambio físico. No obstante, es posible suponer que después del sector financiero la energía será el otro sector donde ocurrirán cambios y se desarrollarán aplicaciones masivas con *Blockchain*, debido a que el sector eléctrico a pesar de ser un caso donde ocurre intercambio físico presenta características que permiten afirmar que es susceptible a la implementación de este cambio tecnológico, que en cierta medida viene ocurriendo y justamente estamos presenciando un momento histórico donde el mercado eléctrico se encuentra en una fase de revolución con el surgimiento de proyectos *Blockchain* que buscan mejorar las operaciones del sector. Actualmente se contabilizan más de 120 organizaciones que están llevando a cabo más de 40 proyectos pilotos que buscan aplicación en áreas como el mercado minorista y mayorista de energía, el mercado entre pares, gestión y carga de vehículos eléctricos, seguridad, equilibrio y flexibilidad de red y mercados orientados a mejorar atributos ambientales, implementando energías renovables y reduciendo la huella de carbono, dicho brevemente, los proyectos pilotos basados en la tecnología *Blockchain* se encuentra en todas las áreas de la cadena de valor de la energía. Para el año 2018 el monto de inversión en *Blockchain* por las compañías energéticas alcanzó los 466 millones de dólares [11] [49] [50] [51].

Las iniciativas de aplicaciones empleando *Blockchain* orientadas al sector eléctrico se pueden dividir en seis categorías como se aprecia en la Figura 9. De acuerdo a [52] en el año 2018, alrededor del 60% de los proyectos estaban orientados al comercio de energía en mercados eléctricos ya sea a través de transacciones P2P (36%), donde los usuarios pueden comercializar energía eléctrica producida localmente de forma descentralizada y directa entre los participantes de la microrred, sin la intervención de un agente externo o transacciones de energía en mercados de mayoristas (24%), donde esta tecnología puede controlar los flujos de potencia en la red para optimizar ciertos procesos, como la carga de baterías en momentos que hay excesos de generación renovable, proveer servicios auxiliares a la red como control de tensión, pudiendo los precios de la energía variar de acuerdo a la ubicación de los usuarios (mercado granular) y de las señales del mercado [51] [52].

El financiamiento de proyectos de energía de origen renovable es otra de las aplicaciones que ha tomado impulso (12%), proveyendo plataformas que conectan proyectos en desarrollo, inversores y consumidores. Un ejemplo es la plataforma *WePower* (Estonia), en la cual se permite la compra, venta y comercio de energía de manera anticipada a través de *tokens* equivalentes a 1 kWh que el proyecto generará en el futuro, garantizando parte de los fondos requeridos para desarrollar el proyecto [53] [54].

Los atributos de sostenibilidad (11%) permiten mantener una trazabilidad segura y descentralizada del origen de cada unidad de energía generada, por ejemplo, si la misma proviene de fuentes renovables, el tipo de fuente y las emisiones de CO<sub>2</sub> requeridas para su producción. La plataforma *TEO* creada por *ENGIE*, es un ejemplo de este tipo de aplicaciones. La plataforma registra la energía consumida y generada en tiempo real, con esta información calcula los volúmenes de energía intercambiada entre los activos de generación renovable y los consumidores, además

del impacto en términos de CO<sub>2</sub> evitado, por último, todos los datos son registrados en certificados a prueba de manipulación en la *Blockchain*, siendo los mismos consultables y trazables [55].

La introducción de vehículos eléctricos al mercado con precios cada vez más accesibles, ha creado un campo de aplicación para la tecnología *Blockchain*, siendo el 11% de los proyectos basados en esta tecnología durante 2018. Este tipo de aplicaciones utilizan *Blockchain* en redes y estaciones de carga para gestionar tanto la carga como la descarga de las baterías de forma automática y descentralizada, de acuerdo a las condiciones de la red, con el fin de optimizar el uso de los recursos energéticos disponibles en la red de potencia [56].

El sector eléctrico por su característica evolutiva provee un campo para desarrollar otras aplicaciones utilizando *Blockchain*, por ejemplo, mantener un registro seguro, confiable y trazable de los activos instalados en las redes de potencia desde la adquisición hasta su desincorporación del sistema, usando la información del régimen de operación para planificar mantenimientos preventivos.

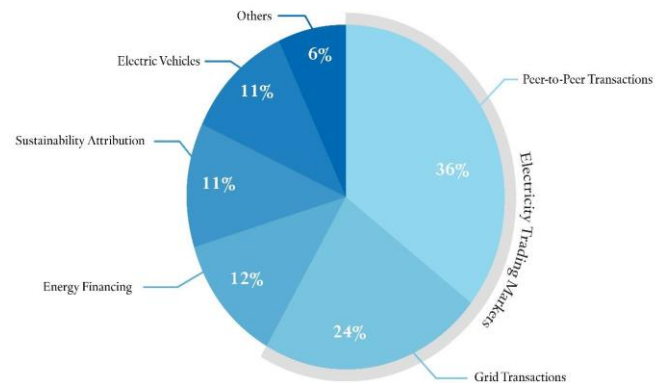


Figura 9. Aplicaciones *Blockchain* por categoría en el sector eléctrico [52].

Dentro de otras soluciones de tecnología *Blockchain* en el sector energético está la gestión de datos relacionados con la producción y uso de la energía. Un ejemplo es el caso del proyecto *ElectriCChain* que tiene el objetivo de conectar la totalidad de sistemas de producción de energía solar instalados en el mundo para poder recabar los datos en tiempo real, las 24 horas del día, los 7 días de la semana en una red *Blockchain*. Dentro de los objetivos está el otorgar a los investigadores datos útiles que pudieran ser analizados para interpretar mejor los sistemas de generación solar, definir informes estándares de irradiancia y generación de energía en el mundo y estudiar los equipos de generación (paneles, inversores, etc) [57].

En la Tabla 3, se muestran algunos ejemplos de proyectos desarrollados hasta la fecha en cada una de las áreas relacionadas al sector eléctrico.

Tabla 3. Principales aplicaciones y proyectos *Blockchain* en el sector eléctrico [12].

	OPPORTUNITY/ POTENTIAL BENEFIT	PROJECT EXAMPLES
Wholesale energy trading 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduce transaction costs in wholesale energy trading</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enerchain (Ponton)</li> <li>- Interbit (BTL)</li> </ul> 
Retail electricity markets 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduce variable costs of retail payment processing and accounting</li> <li>- Greater transparency into billing</li> <li>- Fluid energy contract entry/exit</li> <li>- Greater customer choice of energy supply</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Drift</li> <li>- Grid+</li> </ul> 
Peer-to-peer marketplaces 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relieve stress on transmission networks</li> <li>- Improve DER economics</li> <li>- Greater customer choice of energy supply</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brooklyn Microgrid Project (LO3 Energy)</li> <li>- Joullette (Alliander and Spectral)</li> <li>- Verbund and Salzburg AG</li> </ul> 
Flexibility services 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Improve TSO ability to balance supply and demand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TenneT</li> <li>- Electron</li> </ul> 
Electric vehicle charging and coordination 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Improve DSO ability to coordinate electric vehicle load and discharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Share&amp;Charge (MotionWerk)</li> <li>- eMotorWerks</li> </ul> 
Network management and security 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Improve DSO and TSO network management and security</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keyless Signature Infrastructure (Guardtime)</li> </ul> 
Environmental attribute markets 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Improve efficiency and transparency of environmental attribute markets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SolarCoin</li> <li>- Ideo CoLab</li> </ul> 

#### IV. TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN APLICADA A MICRORREDES

Según la definición de IRENA una microrred o minired es una infraestructura energética integrada que combina cargas y recursos energéticos distribuidos en una sola entidad controlable que puede ser operada de forma separada de la red, con la que puede tener o no conexión [58] [59].

El uso de tecnología *Blockchain* en microrredes resulta atractiva y necesaria porque permite la comercialización de energía renovable producida localmente por los miembros de la microrred, dando lugar a transacciones de compra y venta de energía, por ejemplo, un miembro pudiera vender la energía generada por paneles fotovoltaicos instalados en techos de edificaciones. Estas transacciones podrían ser ejecutadas usando *Smart Contracts* sin la necesidad de participación de un intermediario y utilizando la unidad de energía como un *token* de *Blockchain*. Al igual que ocurre en el mercado mayorista, *Blockchain* podría aportar y mejorar a los mercados minoristas eliminando los intermediarios del proceso de compra venta e incorporando el uso de criptomonedas como pago por el suministro energético, haciendo más transparente el proceso de suministro de energía. En otras palabras, *Blockchain* mejora la economía de las energías renovables a pequeña escala [12] [19].

#### A. Transacciones de energía en microrredes empleando *Blockchain*

Como se explicó anteriormente el sector energético está en un proceso evolutivo constante y actualmente pasa por una etapa de transformación que apunta a la descentralización. Para ello es probable que ocurra una mutación del sistema actual, reubicando e incorporando activos de generación. En un futuro cercano será posible contar con una gran cantidad de generadores y centros de almacenamiento de energía situados en las proximidades de los consumidores. inclusive este nuevo modelo contempla la posibilidad de que los consumidores puedan generar parte o la totalidad de toda su energía (autoconsumidores) cubriendo su demanda y teniendo la posibilidad de vender los excedentes, dando lugar esta redistribución a poder gestionar el sistema eléctrico localmente (en cada una de las microrredes que lo conforman), logrando así una mayor eficiencia en los recursos y solucionando incidencias que con el modelo tradicional no son evitables.

Este nuevo modelo de gestión de redes implica un cambio de la infraestructura de distribución porque se pasará de un sistema donde la energía fluye de manera unidireccional a otro donde la energía fluye entre los distintos actores de la red, debido a que los generadores estarán ubicados en cualquier punto inyectando energía, siendo direccionada en el sentido que se necesite.

En el año 2013 se publicó el primer artículo académico en el cual se menciona la “energía transactiva”, aplicando tanto técnicas de mercado como conmutaciones sobre microrredes autosostenibles, con capacidad de realizar operaciones transactivas autónomas, marcando una tendencia en la investigación académica dirigida a diseñar soluciones basadas en esta visión [60].

La tecnología que ofrecía la primera generación de *Blockchain* era limitada para desarrollar soluciones aplicadas al sector energético. Sin embargo, en el año 2015 se introduce al mercado la plataforma *Ethereum*, incorporando de manera exitosa el concepto de “*smart contracts*”. Este avance proveía las herramientas necesarias para facilitar el comercio de energía con la visión de energía transactiva en microrredes eléctricas [14].

Es en este nuevo modelo energético que se abre un espacio de aplicación al *Blockchain*, permitiendo la interacción entre prosumidores a través de *smart contracts* que regulan y gestionan tanto la demanda como los activos de generación y distribución. *Blockchain* podría entonces desarrollar mercados P2P entre productores y consumidores a escala local, implicando un alivio en las redes de transmisión, distribución y una disminución de costos, a la vez que proporciona a las partes una mayor transparencia en las transacciones y en el suministro de energía [12].

#### B. Pilotos o casos de éxito

**Brooklyn Microgrid**, en Brooklyn, Nueva York, se desarrolló un proyecto piloto de comercio de energía liderado por la empresa *Transactive Grid* en colaboración con *LO3 Energy*, *Consensus*, *Centrica* y *Siemens*. Este modelo fue disruptivo en el mercado eléctrico ya que representó la primera plataforma de transacciones energéticas P2P con tecnología *Blockchain*. Como se muestra en la Figura 10, se trata de una microrred conformada por dos estructuras una red virtual y otra física que opera sobre las redes de distribución de *Bay*

*Ridge, Borough Hall y Park Slope*. En esta red virtual los usuarios prosumidores pueden vender los excedentes de la energía que producen a los otros miembros presentes en la red, por medio de un sistema de gestión de energía que emplea tecnología *Blockchain*, a través de *Smart Contract* basados en *Ethereum* y con mecanismo de consenso *PBFT* (*Practical Byzantine Fault Tolerance*), utilizando protocolo *Tendermint*. El proyecto inició con una comunidad de 5 prosumidores y 5 consumidores, sin embargo, se tiene estimado escalar a 300 participantes, entre pequeños negocios y otras edificaciones residenciales. La información de los excedentes de energía proveniente de medidores inteligentes es transformada en *tokens* de energía *BOLT*, los cuales son utilizados para realizar las transacciones energéticas. Como resultado, el proyecto logró reducir un 6 % las pérdidas de transmisión y distribución, además de vender los excedentes a la red principal [26] [59] [60] [61].

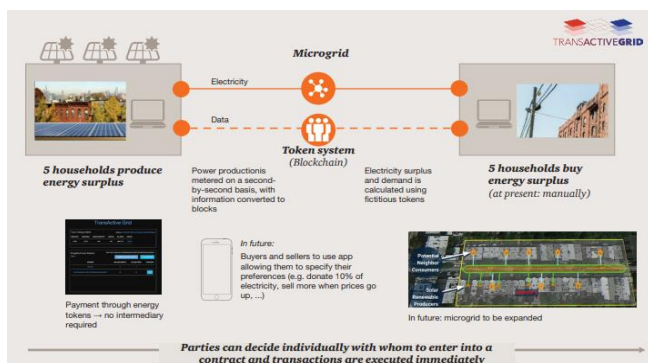


Figura 10. Proyecto de Microred de Brooklyn [62].

**Proyecto LAMP “The Landau Microgrid Project”**, es el proyecto de microred de *Landau* en el sur de Alemania, fue diseñado por *LO3 Energy*, *Energie Suedwest AG*, y el Instituto de Tecnología de *Karlsruhe (KIT)*, para implementarse en una red local con un aproximado de 20 usuarios residenciales, combinando energía solar fotovoltaica y cogeneración *CHP*. A través de una aplicación móvil, tanto prosumidores como consumidores pueden establecer el precio máximo al cual están dispuestos pagar la energía, así como el precio mínimo de venta de la producción de energía proveniente de su generador fotovoltaico. Los participantes pueden generar órdenes (ofertar o solicitar) de energía cada 15 minutos. Las órdenes son procesadas y aparejadas por un mecanismo de mercado central a un precio dependiente de la franja, cumpliendo con la regulación alemana. El proyecto se encuentra en etapa de investigación, hay aspectos que están parcialmente o no están totalmente definidos y que son necesarios para su desarrollo como modelo de negocio. Respecto a la organización, no existe una propuesta de valor a largo plazo para los participantes principales, especialmente el operador del mercado. En cuanto a la información, resta estandarizar el modelo de datos para las transacciones en *Blockchain* (no implementada aún) y las lecturas de los medidores inteligentes. En el ámbito tecnológico, sólo falta incluir dispositivos con capacidades de cómputo y almacenamiento para el sistema de gestión de comercio de energía (*EMTS*). Se prevé la implementación de una plataforma *Blockchain* basada en *Ethereum* o *Hyperledger*, utilizando protocolos de consenso *PoA* o *PoS* para disminuir los requerimientos computacionales de energía derivados del

*PoW*. El proyecto espera continuar con simulaciones e implementaciones en el mundo real para definir los protocolos que mejor se adaptan a *LAMP* [63] [64].

**Powerpeers**, es una plataforma desarrollada por la empresa *Vattenfall* que busca hacer que el mercado energético holandés sea más personal, justo y sostenible. Consiste en un mercado digital interactivo donde convergen la oferta y la demanda de la energía autogenerada, coexistiendo dos tipos de contratos a elección de los participantes, uno a precio fijo y otro a precio variable que ofrece una mayor flexibilidad. Dentro de *Powerpeers* los usuarios pueden suministrar la energía que han generado en exceso a otros participantes o en el caso de demandar energía pueden elegir de quien desean obtener. Además del intercambio energético autogenerado dentro de la comunidad también existe la posibilidad de optar por el suministro de energía proveniente de empresas con generadores eólicos, solar o hidroeléctrico que están dentro del mercado holandés, dando lugar a una red más descentralizada. Así mismo, la plataforma permite verificar en línea la cantidad de energía intercambiada por cada fuente, cada kilovatio hora comercializado se encuentra identificado y es trazable, es decir que la energía es rastreada, dando a los participantes el conocimiento de su consumo energético, pudiendo ver de dónde viene exactamente su energía. *Powerpeers* se encuentra desarrollado sobre *Hyperledger Fabric* donde el intercambio de datos está basado en *Blockchain Gateway* que es una aplicación de gestión de datos [65] [66] [67] [68].

**Grid singularity**, es el nombre del proyecto desarrollado por la empresa del mismo nombre con sede en Berlín (Alemania). Está basado en el motor de intercambio de energía *d3a.io* que es un software de código abierto que simula y opera intercambios de energía personalizados en una red descentralizada y abierta, creando de esta forma mercados locales interconectados dentro de un modelo comercial de energía verde. *Grid singularity* es más que una plataforma de intercambio de energía porque ofrece un modelo novedoso de red transactiva, con una amplia gama de prestaciones dentro de las que se incluye el análisis y evaluación comparativa de los datos energéticos, y la gestión de redes inteligentes, todas bajo un entorno *Blockchain 2.0*. Dentro de la propuesta de evaluación de datos energéticos que hace *Grid singularity* se encuentra por ejemplo la capacidad y disponibilidad de generación, así como el precio y origen de la energía [69].

**Power Ledger Perth**, es un proyecto desarrollado en Australia bajo tecnología *Blockchain* híbrida (doble capa pública y privada) para el comercio de energía *P2P* (con el software *FuseBox P2P*) en un modelo de sistema eléctrico distribuido, permite la interoperabilidad entre diversos mecanismos de gestión y fijación de precios en el mercado de energía eléctrica mediante *tokens* previamente comprados, en este caso dos, *POWR* que trabaja en una primera capa y permite la entrada al sistema (una especie de licencia del software) y *Sparkz* que representa el valor de la energía intercambiada. La idea es que las compañías eléctricas vendan los *Sparkz* a los clientes para comercializar energía tanto con los prosumidores como con las propias compañías eléctricas que se encuentran dentro de la plataforma [70].



La arquitectura de los modelos de sistema eléctrico en el proyecto *Power Ledger* se pueden apreciar en la Figura 11. El lado izquierdo corresponde al modelo propuesto en transacciones dentro del mercado minorista donde los prosumidores y consumidores pueden comprar y vender energía entre sí al igual que lo hacen con las compañías eléctricas. En esta arquitectura la compañía eléctrica local o *Application Host* obtiene su “licencia” utilizando *POWR* y por medio de esta canjea *Sparkz* por dinero en efectivo con los participantes. La otra opción propuesta corresponde a un modelo con una intermediación casi nula donde consumidores y prosumidores que previamente obtuvieron su licencia con el uso de *POWR* pueden realizar transacciones P2P intercambiando *Sparkz* por energía [70].

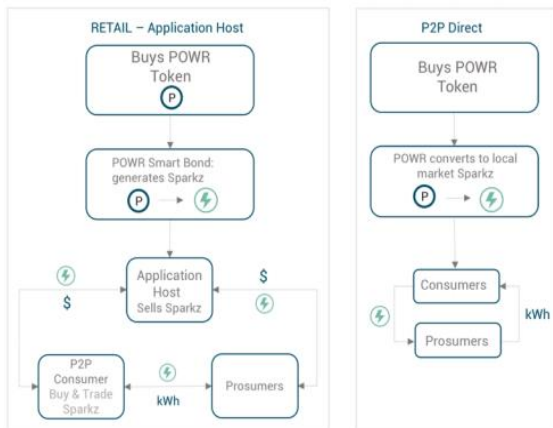


Figura 11. Arquitectura de los modelos de sistema eléctrico en el proyecto *Power Ledger* para el mercado minorista y P2P [70].

*Jouliette at De Ceuvel* (Holanda), es un proyecto desarrollado en 2017 por *Spectral Energy* con colaboración de *Alliander*. Se trata de una plataforma P2P de intercambio de energía basada en una *Blockchain* privada con un modelo de mecanismo de consenso “*round robin*” que realiza transacciones muy rápidas y con un alto rendimiento. El *Token* que utiliza esta plataforma se llama “*Jouliette*” sobre el entorno de *MultiChain* (un entorno de código abierto que permite el desarrollo de *Blockchain* públicas y privadas) y es utilizado para el intercambio de energía P2P. El proyecto está ubicado en una comunidad de Amsterdam llamada *Ceuvel* reconocida por su desarrollo urbano sostenible. *Jouliette at De Ceuvel* cuenta con una red que abarca 16 edificios de oficinas, un invernadero, un pequeño hotel, un restaurante y numerosos paneles fotovoltaicos instalados. La plataforma muestra los flujos de energía de la comunidad en tiempo real y utiliza un algoritmo de inteligencia artificial para predecir el consumo y la producción de energía eléctrica y tiene como principales objetivos lograr un suministro de energía 100% renovable y otorgar a la comunidad herramientas con las cuales poder administrar fácilmente su propia microeconomía. Actualmente el proyecto ha transitado dos fases y sigue explorando nuevas aplicaciones como utilizar *Jouliette* para facilitar un sistema de banca local, comprar en el café de la comunidad e integrar otros servicios intracomunitarios como el uso compartido de automóviles [71] [72] [73] [74] [75] [76].



Figura 12. Vista superior proyecto *Ceuvel* [72].

### C. Análisis comparativo de distintos proyectos

En la Tabla 4, se muestra un resumen comparativo contemplando aspectos técnicos referentes al tipo de plataforma *Blockchain* empleada en distintos proyectos aplicados a transacciones energéticas en el sector eléctrico. Entre los proyectos analizados, *Ethereum* es la plataforma más empleada, además en [26] se afirma que aproximadamente el 50% del total de los desarrollos *Blockchain* en el sector de energía eléctrica están utilizando la plataforma *Ethereum*, gracias al desarrollo de los *smart contracts* y su adecuación a las características de las transacciones en mercados de energía locales. Además, se han probado distintos tipos de permisos (público o privado) y mecanismos de consenso (*PoW*, *PoA* y *PoS*) durante dichas pruebas piloto. En la Figura 14 y Figura 14, se observa cómo se distribuyen 140 iniciativas (listadas en el anexo A de [26]) de *Blockchain* aplicadas al sector de energía eléctrica según la plataforma que utilizan y los mecanismos de consenso empleados, donde se aprecia que el 55% del total de proyectos relevados utiliza *PoW*, seguido por *PBFT*.

Tabla 4. Comparación técnica entre distintos proyectos *Blockchain* [77].

Projects	Technical Parameters				
	Blockchain	Blockchain type	Consensus mechanism	Open source	Hardware development
PWR Company	Ethereum	/	PoW	/	X
TransActiveGrid	Ethereum	/	PoW	/	/
TheSunExchange	Ethereum	/	PoW	/	/
PowerLedger	EcoChain	Public Private	PoW PoS	X	X
BrooklynMicrogrid	Ethereum	/	PoW	/	/
Share&Charge	Ethereum	Public	PoS	X	X
NRGcoin	various	Public Private	various	X	X
GrünStromJeton	Ethereum	Public Private	PoA	X	X
SolarCoin	Litecoin	Public	PoW	/	/
Bankymoon	Bitcoin	Public	PoW	/	X
GridSingularity	Ethereum EWF	Public	PoW PoA	X	-
Electron	Ethereum	/	PoW	X	/

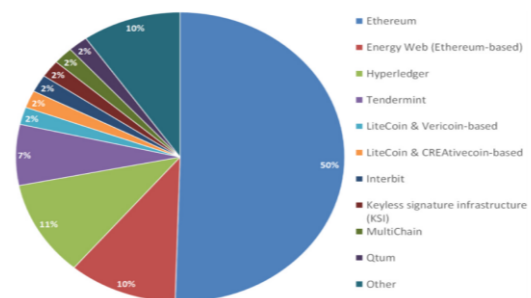


Figura 13. Plataformas *Blockchain* utilizadas en el sector eléctrico [26].

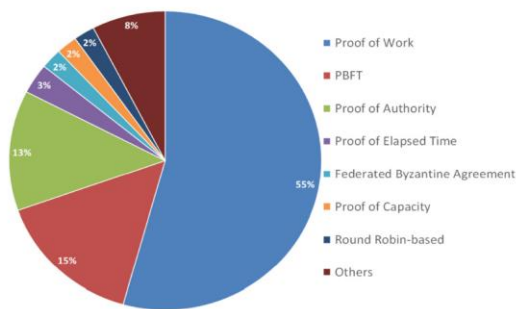


Figura 14. Mecanismos de consenso *Blockchain* utilizados en el sector eléctrico [26].

#### D. Proyectos en Desarrollo

**El proyecto NEW 4.0**, tiene como objetivo crear un marco para suministrar energía eléctrica cien por ciento de origen renovable al norte de Alemania (*Hamburg* y *Schleswig-Holstein*) para el año 2035. Para lograr esto se está desarrollando y probando una red de energía inteligente a gran escala, que integra generación, almacenamiento, transporte, consumo y todos los elementos conectados a la red. Esta plataforma provee un mercado inteligente que permite un comercio completamente automático entre los participantes, empleando tecnología *Blockchain*. Además, se están probando nuevos modelos de mercado y desarrollando un marco regulatorio que se adapte a las nuevas características del mercado y la red [78].

**Share and Charge**, las empresas *Slock.iT* e *Innogy Motionwerk* de Alemania, desarrollaron la primera plataforma *Blockchain* basada en *Ethereum* aplicada a la gestión de carga de vehículos eléctricos, llamada *Share and Charge*. Se trata de un sistema seguro, descentralizado y libre de intermediarios que emplea la funcionalidad de los contratos inteligentes, integrando la tecnología *IoT* de las estaciones de carga con transacciones energéticas P2P. La aplicación muestra las estaciones de carga más cercanas al usuario, una vez realizada la carga se procesa el pago de forma simple, directa y automática a través de la *Blockchain* [79].

**Groningen Municipality**, es un ambicioso emprendimiento *Blockchain* desarrollado por *Spectral Energy* que bajo la visión “*Energie delen met je buren*” (compartiendo energía con tus vecinos) tiene como objetivo desarrollar al máximo el potencial de la tecnología *Blockchain* en la sexta ciudad más importante de Holanda, convirtiéndola así en ejemplo de sostenibilidad para el resto de ciudades de Holanda. *Spectral Energy* tiene la meta fijada para el año 2025 y por eso trabaja actualmente en implementar una solución técnica con hardware y software que satisfaga los retos sociales, económicos y normativos que implica este proyecto. Está pensado para implementarse en por lo menos dos fases, la primera que involucra el intercambio energético entre prosumidores del barrio de *Reitdiep* y una segunda que buscará ampliar el alcance hasta el barrio de *Selwerd*, además le ofrecerá a los participantes la posibilidad de visualizar las transacciones energéticas realizadas en el mercado local. La intención de *Spectral Energy* es escalar la solución poco a poco, conectando desde los mercados locales hasta los

mercados mayoristas, alcanzando un mercado energético totalmente integrado y descentralizado [72] [80].

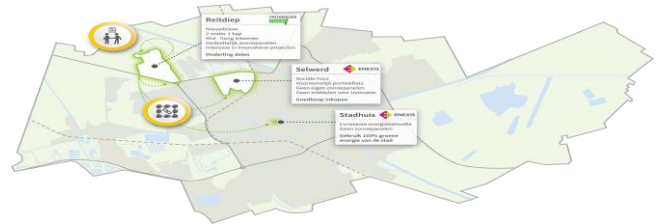


Figura 15. Municipalidad de Groningen [72].

#### V. ASPECTOS DE CIBERSEGURIDAD

Las microrredes están compuestas por capas físicas compuestas por equipos e instalaciones conectadas a la red eléctrica y capas informáticas conformadas por redes donde se reciben, procesan y almacenan los datos. Esta arquitectura hace que existan distintos puntos de acceso en las diferentes capas, que puedan poner en riesgo la seguridad y privacidad de la información de las transacciones e integrantes de la red. En [81] y [82] se identifican aspectos claves a considerar en el ámbito de la ciberseguridad aplicadas microrredes, tales como:

**Disponibilidad:** garantizar el acceso a la información y funcionalidades cuando son requeridas. Es necesario desarrollar redes con tolerancia a fallas y resistencia a ataques de disponibilidad, que puedan afectar el despacho de energía de las fuentes locales por denegar acceso a entidades autorizadas.

**Integridad:** prevenir que una entidad no autorizada pueda tener acceso a la información para modificarla o eliminarla. En microrredes la pérdida de integridad en la información podría afectar la gestión de la potencia suministrada, por ejemplo, modificando las lecturas provenientes de los medidores inteligentes.

**Confidencialidad:** proteger la seguridad y privacidad de la información previniendo que usuarios no autorizados accedan a dicha información. Las microrredes comparten información de los usuarios participantes, con distintos niveles de privacidad y sensibilidad, la cual debe estar protegida y accesible sólo por aquellos con los permisos establecidos.

**Autenticación:** validar la identidad de las partes que están en comunicación. Se debe garantizar que las partes involucradas en una transacción, sean las reales a través de mecanismos de identificación adecuados.

**No repudio:** proveer evidencia de que una entidad realizó una acción y no pueda ser negada o alterada. Las transacciones energéticas tienen valor económico, por lo cual, las acciones realizadas por los participantes deben contar con un registro que no permita negar dichas acciones.

La tecnología *Blockchain* aplicada a microrredes, permite mantener integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información gracias a su principio de inmutabilidad de los datos, lograda a partir de la verificación, validación y almacenamiento distribuido en dispositivos múltiples, en

lugar de una base de datos centralizada, lo cual previene que la microrred tenga un punto de falla único. Además, el envío de información está basado en firmas criptográficas que disminuyen la posibilidad de manipular las transacciones energéticas y el sistema de despacho de energía. Aunque esta tecnología no garantiza en su totalidad la ocurrencia de ataques cibernéticos, ofrece barreras en el sistema para mejorar la seguridad a través de la autenticación, encriptación y capacidad para verificar la integridad de los datos. En la Tabla 5, se indica el nivel de seguridad para distintos tipos de *Blockchain*. En el caso de *Blockchain* públicas con mecanismo de consenso *PoW* o *PoS*, la tolerancia a ataques es del 51%, esto quiere decir que una vez que la información es agregada a la cadena, esta no puede ser manipulada al menos de que el atacante logre modificarla en el 51% de los equipos de todo el sistema donde se almacena una copia de los registros, por otro lado, las *Blockchain* privadas o consorcio tienen una tolerancia menor a los ataques cibernéticos llegando a alcanzar el 33% [83] [84].

Tabla 5. Niveles de seguridad y acceso en distintas *Blockchain* [83].

	Public	Consortium	Private
Participants	Anonymus	Trusted	Trusted
Consensus mechanism	Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), etc.	Multi-party voting	Strictly pre-approved nodes
Security performance	51% attack tolerance, nearly impossible to tamper, no finality	33.33% attack tolerance, could be tampered, enabled finality	
Computational complexity	High		Low
Access	Open access	Permissioned	Strictly permissioned
Anonymity	Yes	No	No

## VI. DESAFÍOS A SUPERAR POR LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN APLICADA A MICRORREDES

*Blockchain* como toda tecnología innovadora, por su inmadurez presenta algunas limitaciones, riesgos y desafíos que se resumen a continuación:

**Estandarización:** Las microrredes están compuestas por dispositivos que intercambian información de forma constante como medidores inteligentes, dispositivos *IoT*, sensores, baterías, vehículos eléctricos, entre otros, los cuales requieren de protocolos que permitan su interoperabilidad. La tecnología *Blockchain* ha desarrollado distintos mecanismos, protocolos y soluciones tecnológicas para integrar los distintos equipos que forman parte de la red, sin embargo, no existen estándares ampliamente aceptados que faciliten esta tarea. En este sentido, se requiere elaborar estándares a nivel de comunicaciones, seguridad y privacidad de la información, interoperabilidad y políticas de penalización y recompensa [81].

**Escalabilidad:** el sector energético requiere un elevado número de transacciones por segundo, considerando operaciones a gran escala, por ejemplo, compra-venta de energía eléctrica considerando la totalidad de un sistema interconectado. Esto genera una sobrecarga de procesamiento y retraso en los nodos involucrados en el proceso de consenso y validación (problema de latencia). Por otro lado, el almacenamiento de información es otro de los factores a considerar en la escalabilidad, pues los nodos deben sostener una copia del libro mayor de transacciones, por lo que aumentan los requerimientos de almacenamiento de dichos

nodos. Teniendo definido un mecanismo de consenso, si se desea realizar una mayor cantidad de transacciones, estas ocasionarán necesariamente un aumento en la potencia de procesamiento y uso de la memoria, y si además el historial de transacciones crece será necesario aumentar el almacenamiento disponible [11] [85] [86].

**Costos de implementación y rendimiento:** Los procesos de verificación o mecanismos de consenso conllevan a la adquisición de *hardware* y *software* de alto costo, los cuales consumen grandes cantidades de energía para realizar sus tareas. De acuerdo al índice de consumo de energía de *Bitcoin* calculado por la Universidad de *Cambridge*, el consumo anual de energía es de 142.61 TWh a la fecha de la presentación de este trabajo, lo que es equivalente al consumo anual de electricidad de Suecia. En cuanto a *Ethereum*, su consumo anual de energía es de 26 TWh, equivalente al consumo eléctrico de Ecuador. Para disminuir los costos de procesamiento, los mecanismos de consenso *PoS* o *PoA*, podrían tener un mejor desempeño a futuro, sin embargo, a nivel de comunicaciones *Blockchain* tiene que competir con tecnologías más maduras y económicas como la telemetría. Al igual que los costos, las velocidades de procesamiento están limitadas por los procesos llevados a cabo en los mecanismos de consenso implementados. Las plataformas *Blockchain* privadas y permissionadas tienen un rendimiento mayor que las públicas, sin embargo, no ofrecen una descentralización total ya que están desplegadas bajo el control centralizado de un sistema. Para mejorar el rendimiento, de acuerdo caso de uso, se podrían realizar algunos procesos de cálculo fuera de la cadena de bloques e integrar los sistemas a través de interfaces [26] [62] [81] [87] [88].

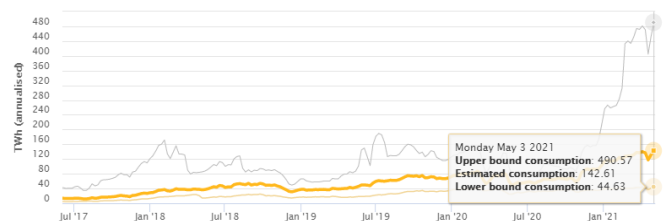


Figura 16. Consumo anual estimado de energía de *Bitcoin* [87].

**Percepción pública:** Los cambios tecnológicos usualmente traen consigo resistencia para ser adoptados por los usuarios. *Blockchain* es una tecnología disruptiva con cierto grado de complejidad, en la cual se elimina la necesidad de contar con intermediarios para realizar transacciones automáticas, directas y seguras entre los participantes. Este es un concepto nuevo que rompe con los esquemas tradicionales en los cuales los usuarios depositan la confianza en una entidad central, la cual se encarga de garantizar el correcto funcionamiento de las operaciones. En este nuevo escenario, los usuarios depositan la confianza en contratos inteligentes que se auto ejecutan en función de las señales del mercado y las condiciones de la red. A medida que la *Blockchain* sea incorporada en distintas áreas de aplicación y se concreten nuevos casos de éxito, esta tecnología podrá ser adoptada más fácilmente por los usuarios.

**Seguridad:** *Blockchain* enfrenta riesgos como funcionamientos no esperados ocasionados por errores de diseño en los sistemas, debido a falta de experiencia en el desarrollo de aplicaciones a gran escala o ataques externos maliciosos, que podrían causar una mala reputación frente a los usuarios. A nivel de usuario la pérdida de la clave privada significa pérdida de los activos digitales, es un riesgo considerable y que representa un desafío complejo mitigar. La seguridad informática es un aspecto del cual nunca se tiene certeza en su totalidad, pues ningún sistema está exento de errores o ataques, a medida que la tecnología avanza y los desarrolladores ganan experiencia en el ámbito de las transacciones energéticas, se podrá disminuir la brecha sobre las dudas que presenta actualmente [26].

**Marco regulatorio y legal:** En algunos países como Alemania, Holanda y Estados Unidos, se han otorgados permisos limitados para habilitar el comercio de energía P2P, sin embargo, este es un modelo de negocio que no se encuentra ampliamente respaldado por el marco legal actual asociado a los mercados eléctricos de energía, así como tampoco la adopción de libros mayores distribuidos para el registro de las transacciones. La adopción de un marco regulatorio y legal debe ser tratado cuidadosamente, pues además de garantizar un adecuado suministro de energía a los usuarios considerando el balance entre generación y demanda, también afecta el modelo de negocio de las empresas que operan y administran las redes eléctricas. Los roles, relacionamientos y responsabilidades de los participantes deben ser claramente identificados, así como las penalizaciones o bonificaciones derivadas de los pliegos regulatorios. Por otro lado, los precios de la energía en este tipo de mercado son determinados por las leyes de oferta y demanda, lo cual puede significar una alta volatilidad de los precios, requiriendo mecanismos que garanticen la protección de los usuarios más vulnerables. En [89] se indican aspectos de *Blockchain* que los reguladores deben conocer para entender y usar la tecnología, para potenciar las actividades regulatorias. Por último, los *smart contracts* se ejecutan de forma automática, lo cual genera desafíos legales para garantizar que el código refleje de manera precisa la voluntad y responsabilidades contractuales de las partes, teniendo cierta inflexibilidad en caso presentar errores de ejecución o no cumplimiento de las obligaciones derivadas del contrato [14] [90].

## VII. POTENCIAL DE BLOCKCHAIN EN MICRORREDES DE URUGUAY

En Uruguay a partir del año 2010 como parte de las políticas energéticas nacionales (2005-2030), para promover el uso de fuentes de generación renovables no convencionales y mitigar el impacto ambiental derivado de los gases efecto invernadero, entra en vigencia el decreto 173/010, el cual habilitaba a los suscriptores conectados a la red de distribución de baja tensión a instalar fuentes de generación de origen renovable eólica, solar, biomasa o mini hidráulica. Este decreto permitía intercambiar energía en forma bidireccional con la red de distribución, siendo la misma comprada en su totalidad por la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE) por un periodo de 10 años [91] [92].

Como consecuencia del decreto 173/10, se introdujeron a la red de distribución instalaciones de microgeneración cuya prioridad era la venta de energía en lugar del autoconsumo, por lo cual, a través de la resolución del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) del 12 de mayo de 2017, se define que la inyección anual de energía del suscriptor a la red del Distribuidor, debe ser menor o igual al consumo anual de energía eléctrica tomada de dicha red. Es decir, se permite la conexión de microgeneradores a la red de distribución con prioridad de autoconsumo, siendo la potencia de la instalación de microgeneración menor o igual que la potencia contratada por el suscriptor con tope de 150 kW, y cuyo balance energético anual bajo ningún concepto puede ser mayor a cero, acarreando penalizaciones en caso de incumplimiento [46].

En el año 2020, entra en vigencia el decreto 27/020, el cual habilita a los suscriptores conectados a la red de distribución de baja tensión, a generar energía eléctrica a partir de una instalación de baterías conectada en paralelo, y que no inyecte energía a la red del distribuidor [93].

Por otra parte, como plan de digitalización de las redes eléctricas, se han incorporado paulatinamente medidores inteligentes a nivel del cliente, los cuales permiten registrar un histórico de consumo cada 15 minutos, con la información de los parámetros del servicio eléctrico entregado. Entre otras aplicaciones, esta información va a proveer datos sobre el estado de las redes de distribución casi en tiempo real, con una granularidad y exactitud importante para tomar decisiones tanto operativas como de gestión de las redes [94]. El uso de vehículos eléctricos tanto de uso público como privado ha ido creciendo a medida que se agregan incentivos económicos para su adquisición, como reducción de impuestos, certificados de eficiencia energética, exoneración de aranceles de importación, tarifas eléctricas especiales y subsidios. En paralelo, el proyecto *Movilidad Eléctrica* tiene como objetivo expandir la red de carga en Uruguay con la incorporación de más de 60 puntos de carga, distribuidos de forma estratégica en todo el territorio nacional para garantizar la movilidad entre las distintas ciudades empleando vehículos eléctricos [95] [96].

La integración de microgeneración a nivel de suscriptores de baja tensión, medición inteligente, baterías conectadas en paralelo a la red y estaciones de carga para vehículos eléctricos, ofrecen un marco ideal para la proyección de pruebas piloto empleando *Blockchain* en microrredes para realizar transacciones energéticas de forma automática y descentralizada entre los participantes de la red local, bajo el esquema propuesto en la Figura 17, pudiendo a su vez la microrred consumir o entregar energía a la red principal para ofrecer servicios auxiliares.

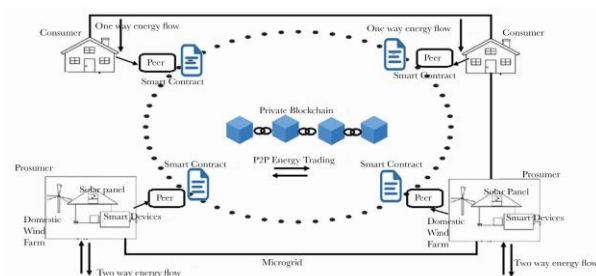


Figura 17. Esquema propuesto de transacciones empleando *Blockchain* en una microrred [97].

La principal barrera a solucionar para llevar a cabo este tipo de proyectos es el marco legal y regulatorio. Actualmente, las transacciones comerciales entre oferta y demanda de energía eléctrica, se realizan en el mercado mayorista a través del Despacho Nacional de Cargas (DNC) y la Administración del Mercado Eléctrico (ADME), siendo agentes del mismo los generadores, transmisores, distribuidores y grandes consumidores. Bajo este esquema (Figura 18), el comercio de energía mediante transacciones P2P entre consumidores regulados, los cuales tomarían el rol de prosumidores, no estaría avalado en la estructura del mercado de energía eléctrica de Uruguay [98].

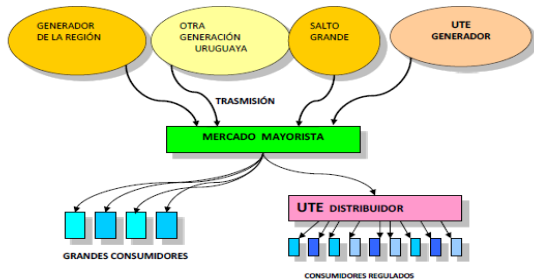


Figura 18. Organización del Mercado Eléctrico en Uruguay [99].

Considerando todo lo expuesto anteriormente, para garantizar en un mayor grado de medida la ejecución y éxito de proyectos empleando tecnología *Blockchain* en Uruguay, este trabajo propone considerar los siguientes aspectos:

- Adecuar el marco legal y regulatorio para permitir el comercio de energía entre los participantes de la microrred.
- Establecer objetivos claros y cuantificables en función de los recursos locales.
- Emplear una plataforma *Blockchain* basada en *smart contracts*, por ejemplo, *Ethereum*.
- Analizar la posibilidad de utilizar mecanismo de consenso *PoA* o *PoS* en lugar de *PoW* debido a los requerimientos energéticos derivados.
- Garantizar la calidad del servicio eléctrico entregado, considerando la normativa nacional.
- Analizar la posibilidad de ofrecer servicios auxiliares a la red principal del distribuidor.
- Acordar con el distribuidor el uso de las redes existentes (capa física).
- Instalar los equipos de medición y control requeridos en la microrred.
- Definir claramente responsables de la operación y mantenimiento de equipos.
- Dividir el proyecto en varias etapas, definiendo el número de participantes durante cada etapa del proyecto.
- Establecer etapas de prueba evaluando rendimiento, resultados esperados, entornos de visualización, entre otras.

- Acordar por medio del ente regulador (URSEA) la propuesta de reglas de transacción hecha por la comunidad energética participante.
- Correr flujos de carga bidireccionales entre la red principal y la microrred previo a la implementación.
- Calcular el número de transacciones por segundo requerido para un determinado número de participantes.
- Analizar posibles vulnerabilidades del sistema.
- Determinar el grado de descentralización (cantidad de validadores del mecanismo de consenso).

Como punto de partida se sugiere realizar un piloto de microrred coordinada por una plataforma *Blockchain* con un máximo de 20 casas entre consumidores y prosumidores (en base a los proyectos relevados), en el marco de un proyecto promovido por la Dirección Nacional de Energía (DNE). Se podría considerar un barrio privado o una zona rural sin acceso a la red de distribución de UTE, promoviendo el uso de los recursos locales para ofrecer cierta autonomía energética.

## VIII. CONCLUSIONES

*Blockchain* debe ser usada por sus capacidades, es una tecnología que puede ser muy útil en casos en donde miembros de una red no tengan plena confianza entre sí o su grado de confianza sea o necesite ser mínimo, también en casos en los cuales los participantes deseen reducir la dependencia de un proveedor intermediario, ya que por su naturaleza las *Blockchain* permiten interacciones más directas entre los participantes.

Las transacciones directas, seguras, verificables y transparentes conllevan a una disminución de problemas como el fraude, asociados a los procesos donde existen intermediarios. Las *Blockchain* permiten crear un entorno de confianza, atractivo por los beneficios que presenta como su auditabilidad pública la cual es distinta a la tradicional, donde la confianza depende de las garantías que ofrece un tercero, como un tribunal, y que puede estar sujeto de vicios, desvíos o ambigüedad de criterios.

*Blockchain* en el sector eléctrico produce una renovación radical, es una innovación tecnológica que entra a un mercado donde sus beneficios se perciben como soluciones para muchos de los desafíos que hoy transita este importante sector industrial. Los sistemas de potencia actualmente tienen como visión la generación distribuida y con ello la descentralización de gran parte de sus procesos, creando necesidades como el aumento de la conectividad digital de forma confiable y segura, la gestión de una importante cantidad de datos, la medición inteligente y el funcionamiento óptimo de las redes. *Blockchain* se posiciona como una solución a todos los tópicos mencionados y promete crear una infraestructura que garantice lograr los objetivos planteados.

En materia de microrredes, los proyectos pilotos han demostrado que existen hogares y empresas cada vez más interesadas en participar activamente en el mercado energético. *Blockchain* puede aprovechar sus potencialidades para permitir interacciones a pequeña escala en el sector de

manera económica, eficiente, segura y automática. En consecuencia, podría convertirse en herramienta base de los nuevos mercados digitales, donde incentive a los consumidores al autoabastecimiento empleando recursos energéticos renovables locales, a la vez que se benefician directamente de sus transacciones y contribuyen en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero.

Debido a la inmadurez de la tecnología *Blockchain*, existe competencia a nivel mundial en el desarrollo de aplicaciones para gestionar mercados eléctricos locales, por lo cual los resultados de las pruebas pilotos en cuanto a cantidades de energía intercambiada, porcentaje de disminución de pérdidas en líneas de transmisión y distribución y beneficios económicos obtenidos por los participantes, no se comparten de manera libre dificultando el análisis integral de dichos proyectos.

En Uruguay se han introducido políticas energéticas que han impulsado el uso de fuentes de energía renovable, modificando la arquitectura de sus redes eléctricas, ubicando generación distribuida a nivel de los consumidores en la red de distribución. La penetración de plantas fotovoltaicas, vehículos eléctricos, estaciones de carga, baterías y medidores inteligentes apuntan a la digitalización del sistema para optimizar los procesos del sector. Las condiciones tecnológicas de la red indican que se podrían realizar pruebas piloto de coordinación de microrredes empleando tecnología *Blockchain*, adecuando el marco legal y regulatorio actual para permitir transacciones energéticas entre los participantes. De esta manera se ofrece una solución innovadora e integradora, con el fin de proveer energía producida localmente, a los miembros de una localidad específica ya sea que esté conectada a la red o no.

Como trabajo futuro se deja planteada la posibilidad de seleccionar una comunidad en la cual se pueda llevar a cabo un proyecto de mercado energético local, empleando *Blockchain* para coordinar transacciones energéticas entre un determinado número de participantes, realizando simulaciones de flujos de carga para analizar su impacto sobre la red eléctrica, cálculos de cantidad de transacciones por unidad de tiempo requeridas, cuantificación de beneficios de aliviar carga en las redes de distribución del operador del sistema, análisis de infraestructura requerida y una evaluación técnico económica acertada para determinar su factibilidad.

#### REFERENCIAS

- [1] E.DSO, "Why smart grids?," [Online]. Available: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/home/why-smart-grids/>. [Accessed Abril 2021].
- [2] PwC, "Un futuro de prosumidores," *eye to eye*, no. 17, pp. 25-31, 2018.
- [3] J. Fernández Gómez y J. Menéndez Sánchez, Las redes inteligentes y el papel del distribuidor de energía eléctrica, Orkestra Instituto Vasco de Competitividad, 2019.
- [4] M. Pereira, M. Toscano and P. Villar, Plataformas blockchain y escenarios de uso, Montevideo: Universidad de la República, 2019.
- [5] European Commission, "Blockchain now and tomorrow: assessing multidimensional impacts of distributed ledger technologies," Publications Office of the European Union, 2019.
- [6] D. Efanov and P. Roschin, "The All-Pervasiveness of the Blockchain Technology," *Procedia Computer Science*, vol. 123, pp. 116-121, 2018.
- [7] M. Crosby, Nachiappan, P. Pradan, V. Sanjeev and V. Kalyanaraman, "BlockChain Technology: Beyond Bitcoin," *Applied Innovation Review (AIR)*, no. 2, Junio 2016.
- [8] S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System," 2008.
- [9] P. Champagne, El Libro de Satoshi, 2018.
- [10] K. Shiho and G. Chandra Deka, Advanced Applications of Blockchain Technology, vol. Studies in Big Data 60, Springer, 2020.
- [11] G. Hileman and M. Rauchs, "Global Blockchain Benchmarking Study," Cambridge Centre of Alternative Finance, 2017.
- [12] M. N. Luke, S. J. Lee, P. Zdenek and A. Dimitrova, "Blockchain in Electricity: a Critical Review of Progress to Date," *Eurelectric*, 2018.
- [13] A. Castellanos, D. Coll-Mayor and J. A. Notholt, "Cryptocurrency as guarantees of origin: Simulating a green certificate market with the Ethereum Blockchain," 2017.
- [14] M. Shafie-khah, Blockchain-based Smart Grids, Elsevier, 2020.
- [15] A. Preukschat, "Blockchain: la revolución industrial de Internet," *Revista de Derecho*, no. 19, pp. 197-201, 2019.
- [16] J. López Lérida and J. J. Mora Pérez, "La economía de Blockchain los modelos de negocio de la nueva web," 2016.
- [17] M. Allende López and V. Colina Unda, "Blockchain: Cómo desarrollar confianza en entornos complejos para generar valor de impacto social," *BID*, 2018.
- [18] D. G. Guzmán, Potencial de la Tecnología Blockchain en el Mercado Eléctrico, Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2018.
- [19] T. Gayvoronskaya and C. Meinel, Blockchain Hype or Innovation, Springer, 2021.
- [20] N. Z. Aitzhan and D. Svetinovic, "Security and Privacy in Decentralized Energy Trading Through Multi-Signatures, Blockchain and Anonymous Messaging Streams," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 15, no. 5, pp. 840-852, 2018.
- [21] BBVA, "Los activos digitales del futuro: tokenizados, programables y más seguros," Diciembre 2020. [Online]. Available: <https://www.bbva.com/es/los-activos-digitales-del-futuro-tokenizados-programables-y-mas-seguros/>. [Accessed Mayo 2021].
- [22] C. Helliari, L. Crawford, L. Rocca, C. Teodori and M. Veneziani, "Permissionless and permissioned

- blockchain diffusion," *International Journal of Information Management*, vol. 54, 2020.
- [23] A. Carvalho, "A permissioned blockchain-based implementation of LMSR prediction markets," *Decision Support Systems*, vol. 130, 2020.
- [24] R. Zhang, R. Xue and L. Liu, "Security and Privacy on Blockchain," *ACM Comput. Surv.*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [25] T. Hon Yuen, "PACChain: Private, authenticated & auditable consortium blockchain and its implementation," *Future Generation Computer Systems*, vol. 112, pp. 913-929, 2020.
- [26] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum and A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143-174, 2019.
- [27] A. J. Menezes, P. C. Van Oorschot and S. A. Vanstone, *Handbook of Applied Cryptography*, 1996.
- [28] M. Swan, *Blockchain Blueprint for a New Economy*, O'Reilly Media, Inc, 2015.
- [29] T. Sofia, K. Votis, D. Tzovaras, I. Stamelos and K. Cooper, "Blockchain 3.0 Smart Contracts in E-Government 3.0 Applications," 2019.
- [30] IOTA, "IOTA," [Online]. Available: <https://www.iota.org/>. [Accessed Mayo 2021].
- [31] W. F. Silvano and M. Roderval, "Iota Tangle: A cryptocurrency to communicate Internet-of-Things data," *Future Generation Computer Systems*, vol. 112, pp. 307-319, 2020.
- [32] Hedera, "Hedera Hashgraph," [Online]. Available: <https://hedera.com/>. [Accessed Mayo 2021].
- [33] Buy Bitcoin Worldwide, "Gráfico de historial del precio de Bitcoin," [Online]. Available: <https://www.buybitcoinworldwide.com>. [Accessed Mayo 2021].
- [34] Ethereum, "Ethereum," [Online]. Available: <https://ethereum.org/en/>. [Accessed Abril 2021].
- [35] Hyperledger, "Hyperledger," [Online]. Available: <https://es.hyperledger.org/>. [Accessed Mayo 2021].
- [36] Hyperledger, "An Introduction to Hyperledger," 2018.
- [37] R3, "R3," [Online]. Available: <https://www.r3.com/>. [Accessed Mayo 2021].
- [38] A. Ekblaw, A. Azaria, J. D. Halamka and A. Lippman, "A Case Study for Blockchain in Healthcare: "MedRec" prototype for electronic health records and medical research data," 2016.
- [39] S. Angraal, H. M. Krumholz and S. Wade L, "Blockchain Technology: Applications in Health Care," 2017.
- [40] K. Christidis and M. Devetsikiotis, "Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 4, 2016.
- [41] K. Ikeda and M.-N. Hamid, "Chapter Four - Applications of Blockchain in the Financial Sector and a Peer-to-Peer Global Barter Web," *Advances in Computers*, vol. 111, pp. 99-120, 2018.
- [42] A. Grech and A. F. Camilleri, "Blockchain in Education," Joint Research Centre, 2017.
- [43] G. Peters and E. Panayi, "Understanding Modern Banking Ledgers Through Blockchain Technologies: Future of Transaction Processing and Smart Contracts on the Internet of Money," 2015.
- [44] V. Gatteschi, F. Lamberti, C. Demartini, C. Pranteda and V. Santamaría, "Blockchain and Smart Contracts for Insurance: Is the Technology Mature Enough?," *Future Internet*, vol. 10, no. 2, 2018.
- [45] I. Karamitsos, M. Papadaki and N. B. Al Barghuthi, "Design of the Blockchain Smart Contract: A Use Case for Real Estate," *Journal of Information Security*, vol. 9, no. 3.
- [46] BID, "Blockchain y Comercio Internacional Nuevas Tecnologías Para Una Mayor y Mejor Inserción Internacional de América Latina," *INTEGRACIÓN & COMERCIO*, no. 46, 2020.
- [47] S. Ølnes, J. Ubach and M. Janssen, "Blockchain in government: Benefits and implications of distributed ledger technology for information sharing," *Government Information Quarterly*, vol. 34, no. 3, pp. 355-364, 2017.
- [48] PwC, "PwC's Global Blockchain Survey. Blockchain is here. What's your next move?," PwC, 2018.
- [49] German-Mexican Energy Partnership, "Blockchain Meets Energy. Digital Solutions for a Decentralized and Decarbonized Sector," German-Mexican Energy Partnership and Florence School of Regulation, 2019.
- [50] M. Colleen, "Blockchain for Energy 2018: Companies & Applications for Distributed Ledger Technologies on the Grid," Greentech Media Inc., 2018.
- [51] IRENA, "Blockchain Innovation Landscape Brief," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [52] D. Livingston, V. Sivaram, M. Freeman and M. Fiege, "Applying Blockchain Technology to Electric Power Systems," 2018.
- [53] WePower, "WePower," [Online]. Available: <https://wepower.com/>. [Accessed Mayo 2021].
- [54] H. Vella, "GE Transform," 2019. [Online]. Available: <https://www.ge.com/power/transform>. [Accessed Abril 2021].
- [55] TEO, "The Energy Origin," [Online]. Available: <https://theenergyorigin.com/>. [Accessed Abril 2021].
- [56] N. Lasla, M. Al-Ammari, M. Abdallah and M. Younis, "Blockchain Based Trading Platform for Electric Vehicle Charging in Smart Cities," *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 1, pp. 80-92, 2020.
- [57] Chain of Things, "Case Study 2: Chain of Solar".
- [58] IRENA, "Innovation Outlook Renewable Mini-Grids," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2016.

- [59] R. Á. Hermana and J. Menéndez Sánchez, *Casos de Microrredes*, vol. 73/2020, Orkestra Instituto Vasco de Competitividad, 2020.
- [60] A. Wörner, . A. Meeuw, . L. Ableitner, F. Wortmann, S. Schopfer and V. Tiefenbeck, "Trading solar energy within the neighborhood: field implementation of a blockchain-based electricity market," *Energy Informatics*, vol. 2, no. 11, 2019.
- [61] IRENA, "Renewable Mini-Grids Innovation Landscape Brief," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [62] PwC global power & utilities, "Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers?," PwC, 2017.
- [63] E. Mengelkamp, J. Gärtner and C. Weinhardt, "Decentralizing Energy Systems Through Local Energy Markets: The LAMP-Project," 2018.
- [64] B. Kirpes, E. Mengelkamp, G. Schaal and C. Weinhardt, "Design of a microgrid local energy market on a blockchain-based information system," *IT- INFORMATION TECHNOLOGY*, vol. 61, 2019.
- [65] Powerpeers, "Powerpeers," [Online]. Available: <https://www.powerpeers.nl/>. [Accessed Abril 2021].
- [66] Vattenfall, "Vattenfall launches energy sharing marketplace powerpeers," [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2016/vattenfall-launches-energy-sharing-marketplace-powerpeers>. [Accessed Mayo 2021].
- [67] G. Vogt, "P2P electricity market platforms," 2018. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/p2p-electricity-market-platforms-georg-vogt/>. [Accessed Abril 2021].
- [68] Unchain.io, "How we helped Vattenfall realize a more decentralized energy grid," [Online]. Available: <https://unchain.io/clientcase/how-we-helped-vattenfall-realize-a-more-decentralized-energy-grid/>. [Accessed Mayo 2021].
- [69] Grid Singularity, "Grid Singularity," [Online]. Available: <https://gridsingularity.com/about/>. [Accessed Mayo 2021].
- [70] Power Ledger, "Power Ledger White Paper," 2019.
- [71] Jouliette, "Jouliette at De Ceuvel," [Online]. Available: <https://www.jouliette.net/>. [Accessed Mayo 2021].
- [72] Spectral, "Spectral Energy," [Online]. Available: <https://spectral.energy/>. [Accessed Mayo 2021].
- [73] Alliander, "Alliander," [Online]. Available: <https://www.alliander.com/nl/>. [Accessed Mayo 2021].
- [74] M. Ahmed-Rengers and K. Kostianen, "Don't Mine, Wait in Line: Fair and Efficient Blockchain Consensus with Robust Round Robin," 2020.
- [75] G. Greenspan, "MultiChain Private Blockchain — White Paper," 2015.
- [76] Smart Energy Portal, "Spectral – Project “Jouliette”," [Online]. Available: <https://www.smartenergyportal.ch/spectral-project-jouliette/>. [Accessed Mayo 2021].
- [77] M. M. Andrija Goranovic, S. W. Lampros Fotiadis and T. S. Albert Treytl, "Blockchain Applications In Microgrids an Overview of Current Projects and Concepts," 2017.
- [78] NEW 4.0, "The Future Of Energy Begins In The North. Specialised information on topics, projects. NEW 4.0 – Norddeutsche EnergieWende 4.0," Erneuerbare Energien Hamburg Clusteragentur GmbH, 2018.
- [79] A. Majer, "SLOCK.IT: Enabling IoT and the Universal Sharing Network," Blockchain Research Institute, 2017.
- [80] OECD, "The Circular Economy in Groningen, the Netherlands," OECD Publishing, Paris, 2020.
- [81] M. B. Mollah, J. Zhao, D. Niyato, K.-Y. Lam, X. Zhang, A. Ghia, L. Hai Koh and L. Yang, "Blockchain for Future Smart Grid: A Comprehensive Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 18-43, 2021.
- [82] S. Shapsough, F. Qatan, R. Aburukba, F. Aloul and A. R. Al Ali, "Smart grid cyber security: Challenges and solutions," *2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, pp. 170-175, 2015.
- [83] P. Zhuang, T. Zamir and H. Liang, "Blockchain for Cybersecurity in Smart Grid: A Comprehensive Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 3-19, 2021.
- [84] M. Mylrea and S. N. Gupta Gouriseti, "Blockchain for smart grid resilience: Exchanging distributed energy at speed, scale and security," *2017 Resilience Week (RWS)*, pp. 18-23, 2017.
- [85] T. Alladi, V. Chamola, J. Rodrigues and S. Kozlov, "Blockchain in Smart Grids: A Review on Different Use Cases," *Sensors*, 2019.
- [86] B. Hertz-Shargel and D. Livingston, "Assessing Blockchain's Future in Transactive Energy," Atlantic Council Global Energy Center, 2019.
- [87] University of Cambridge Judge Business School, "Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index," [Online]. Available: <https://cbeci.org/>. [Accessed Mayo 2021].
- [88] TQ Tezos, "Proof of Work vs. Proof of Stake: the Ecological Footprint," [Online]. Available: <https://medium.com/tqtezos/proof-of-work-vs-proof-of-stake-the-ecological-footprint-c58029faee44>. [Accessed Abril 2021].
- [89] M. A. Jamison and P. Tariq, "Five things regulators should know about blockchain (and three myths to forget)," *The Electricity Journal*, vol. 31, no. 9, pp. 20-23, 2018.
- [90] J. A. Padilla, "Blockchain y contratos inteligentes: aproximación a sus problemáticas y retos jurídicos," *Derecho Privado*, no. 39, pp. 175-201, 2020.



- [91] MIEM, "Política Energética 2005-2030," Montevideo, 2005.
- [92] IMPO, "Decreto N° 173/010 AUTORIZACION A SUSCRITORES CONECTADOS A LA RED DE DISTRIBUCION DE BAJA TENSION A INSTALAR GENERACIONES DE FUENTES RENOVABLES," 2010.
- [93] IMPO, *Decreto N° 27/020 Autorización a los suscritores conectados a la red de distribución de baja tensión a generar energía eléctrica a partir de la instalación de baterías que se determina*, Montevideo, 2020.
- [94] UTE, "Medición Inteligente," [Online]. Available: <https://www.ute.com.uy/medicion-inteligente>. [Accessed Mayo 2021].
- [95] MIEM, "Movilidad Eléctrica," [Online]. Available: <https://www.miem.gub.uy/energia/movilidad-electrica>. [Accessed Mayo 2021].
- [96] UTE, "UTE Movilidad Eléctrica," [Online]. Available: <https://movilidad.ute.com.uy/carga.html?tab=red-de-carga>. [Accessed Mayo 2021].
- [97] M. K. Thukral, "Emergence of blockchain-technology application in peer-to-peer electrical-energy trading: a review," *Clean Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 104-123, 2021.
- [98] URSEA, "Generación y Comercialización Mayorista," [Online]. Available: <https://www.gub.uy/unidad-reguladora-servicios-energia-agua/politicas-y-gestion/generacion-comercializacion-mayorista>. [Accessed Mayo 2021].
- [99] INCO, "Mercado Eléctrico en Uruguay. Seminario: "Riesgos y oportunidades para el mercado eléctrico como fruto de los cambios en la matriz energética"," 2018.
- [100] W. Cox and T. Considine, "Structured Energy: Microgrids and Autonomous Transactive Operation," 2013.