



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Oportunidades en el uso de tecnología blockchain para el mercado de energía en Colombia

Alexánder Valencia Rendón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Área Curricular de Sistemas e Informática, Maestría en Ingeniería -
Sistemas Energéticos
Ciudad, Colombia
2021

Oportunidades en el uso de tecnología blockchain para el mercado de energía en Colombia

Alexánder Valencia Rendón

Trabajo Final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona, Ph.D.

Facultad de Minas, Área Curricular de Sistemas e Informática, Maestría en Ingeniería -

Sistemas Energéticos

Ciudad, Colombia

2021

Dedicatoria:

*A mis padres, familia, pareja, tutores y la
fuente universal*

Agradecimientos

A mi familia, padres, hermanos, a mi pareja (por la infinita paciencia). A los tutores de la vida, Carl Sagan, Jordan Peterson y a los amigos del alma.

Resumen

La Confianza, reputación y autoridad son atributos que caracterizan a las instituciones mediadoras en el intercambio de bienes y servicios entre empresas y personas. Las entidades centralizadas tales como la banca, instituciones financieras, oficinas de instrumentos públicos, cámaras de compensación, entre otros. Estas entidades aplican reglas y protocolos de intercambio reconocidos por los agentes con quienes interactúan, llevan registro de las transacciones, y en algunos casos, pueden servir como garantes para el cumplimiento de acuerdos entre diferentes partes. Particularmente en el sector energético, el desarrollo de tecnologías de generación de energía distribuida, apalancado por la competitividad de las fuentes de energía renovables, ha generado una fuerte presión para que los mercados energéticos altamente regulados y centralizados, permitan el intercambio efectivo entre prosumidores y empresas de servicios energéticos, incentivando la competencia, la transparencia y la flexibilidad. Sin embargo, el control, seguimiento y conciliación de estos intercambios presenta un reto para las instituciones tradicionales. Es en este sentido que la tecnología de registros distribuidos (Distributed Ledger Technology) ofrece soluciones para la validación, control de origen, registro e integridad para que tales transacciones se puedan llevar a cabo de forma rutinaria. Este Trabajo Final pretende revisar la literatura formal alrededor del blockchain como un caso particular de las tecnologías de registros distribuidos, sus retos y oportunidades para el desarrollo de esta tecnología aplicada al mercado de energía de Colombia.

Palabras clave Distributed ledger technology, blockchain, Mercados Energéticos, Regulación, Economía transactiva.

Blockchain technology opportunities for Colombian energy market.

Abstract:

Trust, reputation and authority are bound attributes to centralized institutions such as banks, public record offices, exchanges, among others. These institutions record, verify, and occasionally arbitrate all kind of transactions and accords among companies and people in general. In the energy sector, the upcoming new paradigm of a distributed grid has been fueled by evolving renewable energy, such revolution has pushed authorities to de-regulate energy markets by allowing prosumers and utilities to pursue a flexible, more transparent and more competitive energy ecosystem. However new challenges arise for regulators in order to control, keep track and settle the surging number of transactions among all these new agents. In this regard, Distributed Ledger Technologies offer new solutions for the record keeping, management and integrity security of these transactions. This work aims to review formal literature around blockchain as a particular case of distributed ledger technology, counting for challenges and opportunities for the development of blockchain at the Colombian energy market.

Keywords: Distributed Ledger Technology, blockchain, Energy Markets, Regulation, Transactive economy

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
Introducción	1
1. Capítulo: Antecedentes	5
1.1 Contexto regulatorio, financiero y de los mercados energéticos	11
1.1.1 Contexto regulatorio y financiero.....	11
1.1.2 Contexto de los mercados energéticos	16
1.1.3 Contexto colombiano.....	18
2. Capítulo: Marco Teórico	21
2.1 Enfoque en sector energético	21
2.2 Enfoque desde la cadena de valor.....	22
3. Capítulo Revisión de Literatura	24
3.1 Fuentes de consulta	26
3.1 Temas explorados y brechas temáticas	27
4. Capítulo Objetivos y Metodología	31
4.1 Objetivos.....	31
4.1.1 Objetivo general:	31
4.1.2 Objetivos específicos:	31
4.2 METODOLOGÍA.....	31
5. Requerimientos tecnológicos para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia.	33
5.1 Arquitectura y Atributos.....	34
5.2 El dilema de la Escalabilidad vs Velocidad	38
5.2.1 Sharding:.....	40
5.2.2 Random sampling y Zk Snarks,.....	40
5.2.3 Roll-up	41

6. Requerimientos regulatorios y legales para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia.....	42
6.1 Regulación en el sector financiero.....	42
6.1.1 Regulación en países del G20	44
6.1.2 Regulación en Colombia.....	45
6.2 Regulación en el sector de la energía	46
6.2.1 Regulación en países desarrollados	48
6.2.2 Regulación en Colombia.....	49
7. Requerimientos de ciber-seguridad para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.....	57
7.1 Blockchain como habilitador de la seguridad en el internet de la energía	57
7.2 Requerimientos de ciber seguridad en Colombia	60
8. Oportunidades para el uso de blockchain en el mercado de electricidad de Colombia.	63
8.1 Enfoque de análisis de cadena de valor y patrones derivados	64
8.1.1 Blockchain Para Integración de negocio, Interoperabilidad	65
8.1.2 Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado	65
8.1.3 Blockchain para Seguridad y Autenticación	66
8.1.4 Blockchain como Oferta Tecnológica, APIs.	66
8.1.5 Blockchain para Transferencia de Valor Monetario.....	67
8.2 Aplicaciones blockchain en el entorno colombiano.....	67
8.2.1 Resultados consulta base de datos empresariales	68
8.2.2 Cycle	72
8.2.3 Neu.....	72
8.2.4 EcoGox.....	73
8.2.5 EcoRegistry	73
9. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	75
9.1 Conclusiones Generales	75
9.2 Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos	76
9.2.1 Objetivo específico 1.....	76
9.2.2 Objetivo específico 2.....	77
9.2.3 Objetivo específico 3.....	78
9.2.4 Objetivo general.....	78
9.3 Trabajos Futuros	79
A. Anexo A: Patrones de modelos de negocios basados en Blockchain.....	81
B. Anexo B: Lista de Empresas Colombianas con aplicaciones blockchain, consultadas en CrunchBase y Colombia Fintech.....	83
C. Anexo C: Prioridades Regulatorias MTE, modernización del mercado energético Colombia.....	93
Referencias	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Modelo de transacción P2P, adaptado de (Nakamoto 2008).....	7
Figura 2 Cambio de paradigma en modelo de privacidad transaccional, adaptada de (Nakamoto, 2008)	8
Figura 3 Proceso transaccional entre dos partes usando blockchain, tomado de (PWC,2016)	10
Figura 4, Balance neto entrada-salida de una transacción. tomado de (Dhillon et al., 2017a)	11
Figura 5. Cantidad de startups por caso de uso en blockchain, tomado de (Solarplaza, 2018)	17
Figura 6 - Modelo ElectroChain de Codensa y grupo T&T 2018; tomado de (Grupo T&T,2018).....	19
Figura 7 Participación empresarial en ecosistema Fintech, tomado de (Fintech, 2020) ..	20
Figura 8 Evolución de modelo centralizado a economía transaccional - Adaptado de (Global, 2017)	23
Figura 9. Esquema de captura de valor, modelo tradicional en internet, versus modelo blockchain Ethereum, tomado de (Metcalf & Hooper, 2017).....	35
Figura 10. Gráfico relacional de atributos y tipo de arquitectura blockchain, elaboración propia.....	37
Figura 11 – Esquema del protocolo PoS de Ethereum 2, tomado de (Buterin et al., n.d.)	39
Figura 12 Obstáculos en la industria financiera, traducido de (Budman, 2021)	43
Figura 13 Internet de la Energía, adaptado de (Cao, 2019).....	47
Figura 14: Tareas Foco (iii) Misión Energética, tomado de (Suárez, 2018)	51
Figura 15. Diagrama de procesos de un consorcio blockchain entre prosumidores y comercializadores de energía, tomado de (Knirsch et al., 2019)	59
Figura 16 Participación Empresarial por patrón de modelo de negocio en Colombia, Elaboración Propia a partir de datos de referencia de Colombia Fintech.	69

Figura 17. Año de constitución empresas con aplicación blockchain, Elaboración Propia a partir de datos de referencia de Colombia Fintech.	69
Figura 18 Participación empresarial por sector económico, Elaboración Propia, partir de datos de referencia de Colombia Fintech.	70
Figura 19 Diversidad de Patrones de modelo de negocio por Sector Económico, Elaboración Propia, partir de datos de referencia de Colombia Fintech.....	71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Estado de la regulación sobre criptoactivos en varios países del mundo, Tomado de (Barrera-rego et al., n.d.).....	13
Tabla 2 Proporción de criptoactivos por subclase de activo en función del uso, adaptado de (Dowlat, 2018).....	14
Tabla 3 - Consultas en bases de datos y repositorios, fuente propia.....	24
Tabla 4 Artículos del tipo revisiones sistemáticas en tecnología blockchain y energía, elaboración propia	26
Tabla 5 - Brechas temáticas encontradas en la literatura, elaboración propia	29
Tabla 6 Atributos a nivel de Clase, registros distribuidos, por tipo de acceso, tomado de (H. T. M. Gamage, H. D. Weerasinghe & N. G. J. Dias, 2020);.....	35
Tabla 7 Atributos de protocolos blockchain de mayor difusión, tomado de (Boughaci & Boughaci, 2019).....	36
Tabla 8 Regulación financiera respecto a criptoactivos en países del G20, tomado de (Dowlat, 2018).....	44
Tabla 9 Oportunidades y retos en el Internet de la Energía, tomado de (Cao, 2019).	47
Tabla 10 Dimensiones prioritarias para la transición energética en Colombia, tomado de (Benavides et al., 2018).	49
Tabla 11 Prioridades de cambios Regulatorios para promover Internet de la Energía y aplicaciones Blockchain	51
Tabla 12 Aspectos de ciberseguridad operativos e informáticos en el sector energía	61
Tabla 13 Patrones de modelos de negocios basados en blockchain, tomado de (Weking et al., 2019).....	63
Tabla 14 Detalle de organizaciones que aplican blockchain en el sector energía, elaboración propia.	72
Tabla 15 Atributos de los patrones de modelo de negocio, tomado de (Weking et al., 2019)	81

Tabla 16 –Empresas Colombianas con aplicaciones Blockchain listadas en CrunchBase y Colombia Fintech, Elaboración Propia.....	84
Tabla 17 Prioridades regulatorias para la modernización del mercado energético y efecto sobre mercado descentralizado habilitado por Blockchain, modificado de (Ángela Cadena & Puyana, 2020).....	94

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

DLT:	Distributed Ledger Technology – Tecnología de registro distribuido. Sistema de informático que almacena las tablas o registros de transacciones en repositorios física y simbólicamente distribuidos, en donde la custodia y control no dependen de una única entidad que ejerce control.
DERs	Recursos Energéticos Distribuidos, conjunto de sistemas de generación, almacenamiento y consumo embebidos del lado de la Demanda en un sistema energético.
P2P:	Peer to Peer – Relación transaccional entre pares de una misma clase.
LA/FAT:	Lavado de activo y financiamiento de actividades del terrorismo. Políticas de control y supervisión de actividades financieras que buscan limitar y sancionar flujos monetarios hacia/desde actividades clasificadas como ilícitas por gobiernos nacionales.
ICO	Initial Coin offering –oferta inicial de moneda. Proceso de ofrecimiento de participación a financistas para la adquisición de tokens de aplicación al momento del desarrollo de un protocolo blockchain por medio de dinero fiduciario con el fin de fondar los recursos para el desarrollo del protocolo
COIN	Criptomoneda. – En el contexto de este trabajo, token criptográfico de aplicación que se utiliza como medio de intercambio de valor entre los agentes que participan de un protocolo blockchain específico.
TOKEN	Objeto digital que se genera para señalar la culminación el proceso de creación de un bloque transaccional en el algoritmo blockchain. Los tokens permiten la actualización del estado del sistema a todos los nodos participantes, almacenan atributos transaccionales y pueden ser utilizados para otorgar derechos de lectura, escritura y voto a los nodos que los acumulen. Cuando se utilizan como medio de intercambio de valor son equivalentes a cripto-monedas
PROSUMIDOR	Del anglicismo Prosumer, Agente del mercado energético con un papel dual de Consumidor y Generador de electricidad.
OTC	Over the counter, operaciones sobre el mostrador. En un mercado de bienes y servicios, corresponde a la categoría de contratos que se realizan de forma privada entre uno o varios agentes participantes. Las condiciones de precio, cantidad y condiciones de despacho de un bien o servicio son conocidas exclusivamente por los involucrados y no se informa su contenido a agentes de control externo.

Abreviatura	Término
CONSENSO	Dentro del proceso de validación de un protocolo blockchain, corresponde al conjunto de reglas de transición de estado que disparan una respuesta económica (dentro de las que están los derechos distribuidos para ejecutar la transición) que permiten una actualización segura del estado del sistema, que permite finalizar un bloque, concatenando las transacciones procesadas, estampando la fecha exacta del proceso y liberando tokens utilitarios al primer nodo que completó el algoritmo.
PoW	Proof of Work- Prueba de Trabajo mecanismo de consenso en donde el derecho para verificar y publicar una transacción depende del poder de cómputo de la máquina que ejecuta el algoritmo criptográfico, cuya solución matemática consume cada vez más recursos al aumentar las iteraciones
PoS	Proof of Stake - Prueba De Tenencia mecanismo de consenso en donde el derecho para verificar y publicar una transacción es otorgado a aquellos nodos que acumulan una cantidad mayor de Tokens con el tiempo
DAO	Decentralized Autonomous Organization – Organización Autónoma Descentralizada es una entidad programada para que actúe de forma autónoma, puede tomar acciones de forma autónoma en función de reglas de comportamiento embebidas en contratos inteligentes y reglas de consenso entre los nodos asociados
SDK	Software Developer Kit. – Paquete de programas del desarrollador. Conjunto de programas usadas para el desarrollo de aplicaciones de software para un dispositivo y/o sistema operativo específico. Pueden ubicarse en máquina local, remota, nube o una combinación.
Dapps	Decentralized Applications – Aplicaciones descentralizadas: Aplicaciones que corren en redes descentralizadas y corren su propio código backend (Contratos inteligentes). Usan Ethereum para almacenamiento y ejecutar los contratos inteligentes mediante la lógica de la aplicación (app)

Introducción

En el sector energético el desarrollo de tecnologías de generación de energía distribuida, apalancado por la competitividad de las fuentes de energía renovables, ha generado una fuerte presión para que los mercados energéticos altamente regulados y centralizados, permitan la introducción de reglas más flexibles para la integración de fuentes alternativas de energía y consecuentemente su comercialización y uso.

La llamada revolución de la energía comienza con la creación de algunos mercados en la década de los 90's (Newbery, 2017), llevando a la proliferación de derivados financieros basados en commodities energéticos, de los cuales la electricidad es uno de ellos, esto a su vez aceleró el ingreso de agentes dispuestos a aprovechar los nuevos nichos de mercado producto de la liberalización (Y. Zhang & Farnoosh, 2019).

La creación de nuevas reglas de mercado, el ingreso de agentes privados como: productores privados de energía (Independent power producers, IPP), prosumidores y el desarrollo de fuentes alternas para generar, almacenar y suplir electricidad, han requerido de la aplicación de tecnologías de la información para soportar la gestión de redes eléctricas, la integración de los mercados y validación de operaciones financieras entre los múltiples agentes del sistema (J. Zhang, 2021).

Esta integración de redes de información entre empresas (Business to Business, B2B), requiere de métodos y sistemas de estandarización para el intercambio de datos (formatos), que permita enlazar procesos de negocio mediante protocolos de comunicaciones de uso común. (Dumas et al., 2013).

Ahora bien, la complejidad de una red de comunicaciones, medida como el número de interacciones, crece de forma cuadrática en función de la cantidad de participantes (Madureira et al., 2013), como por ejemplo en el caso de los mercados energéticos, en el que interactúan agentes productores, consumidores, reguladores, administradores del sistema, agregadores, entre otros. Estos agentes intercambian a su vez bienes

(electricidad, gas, equipos), servicios (operación, validación, intermediación, etc.), documentos legales y reportes (contratos de compra y venta, futuros, reportes operativos, certificados de origen, bonos de emisiones, etc.).

Es por esto que las plataformas de gestión transaccional deben soportar funciones tales como: trading, gestión de riesgo, confirmación de transacciones, control de la entrega física del servicio, reportes del estado del sistema a los reguladores, reportes y órdenes para balanceo de la red, regulación de tensión y frecuencia, reportes al regulador, entre otros (Yao et al., 2018).

En particular, la liberación de los mercados eléctricos introdujo a una serie de ajustes al proceso transaccional y a las relaciones y métricas de operación del sistema, estos cambios pueden referirse a: i) cambios en los costos de transacción, ii) presión en los precios del producto transado, iii) personalización del volumen de electricidad despachado iv) conciliación de transacciones de compra/venta en tiempo casi real (Valentová et al., 2020).

Los cambios mencionados demandan de los sistemas de información capacidades crecientes para mover grandes cantidades de información entre agentes y administradores del sistema, por lo que los sistemas de información pueden no estar preparados para la tarea. La tecnología de validación y almacenamiento de información distribuido y descentralizado “Distributed Ledger Technologies” DLT podrían asistir en esta tarea. La tecnología blockchain es un caso especial de las DLT que puede soportar dos procesos fundamentales en la arquitectura transaccional requerida: i) Una estructura de datos descentralizada y distribuida a prueba de alteraciones que captura el estado actual de la transacción y ii) un mecanismo autónomo de validación y certificación de transacciones que permiten actualizar el estado del sistema a un nuevo estado de forma simultánea para todos los agentes participantes (Mendling et al., 2018).

Este Trabajo Final de Maestría inicia con el capítulo 1 de antecedentes recientes en el desarrollo y aplicación de la tecnología de registro distribuido, Distributed Ledger Technology, (DLT) de forma particular en los mercados energéticos. Delimita oportunidades de uso de esta tecnología en Colombia, mediante la citación de algunos reportes de mercado, artículos publicados o en proyecto de publicación en revistas indexadas, casos de negocio y artículos de prensa tanto en idioma inglés como español, que dan cuenta sobre el desarrollo de aplicaciones en mercados energéticos

internacionales y locales. Igualmente se describe el desarrollo de la tecnología DLT y su caso particular blockchain; aplicaciones específicas para los mercados energéticos; oportunidades, barreras tecnológicas y regulatorias en mercados de referencia.

En el capítulo 2 de marco teórico se mencionan las bases formales para el desarrollo de la tecnología DLT, principios en el campo de la informática, la criptografía y la implementación en diferentes casos de uso práctico; finalmente se mencionarán las tendencias tanto en investigación como en tecnología con miras a resolver las problemáticas descritas en los mercados energéticos, tales como: ¿cuáles son las arquitecturas más apropiadas para el desarrollo de proyectos blockchain en el mercado de energía en Colombia? y ¿cuáles son los retos percibidos desde el punto de vista de la tecnología, la regulación y la seguridad que deben encarar los desarrolladores de proyectos blockchain en el mercado de energía en Colombia?

En el capítulo 3, se citan las fuentes de consulta, mediante una revisión terciaria y cualitativa de la literatura, en la cual, se mencionan trabajos formales de otros autores que se tomarán como mapa inicial para la acotación de este problema en otros contextos culturales, tecnológicos y sociales. Se muestran resultados de la revisión de la literatura y se enuncian temas explorados y brechas temáticas encontradas.

En el capítulo 4 objetivos y metodología, se describen los métodos y herramientas aplicados por el autor para desarrollar el objeto de investigación. Estos servirán para la definición del objetivo principal y los específicos del trabajo.

En el capítulo 5 se ilustran los requerimientos tecnológicos para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia.

En el capítulo 6 se desarrollan requerimientos regulatorios y legales para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia.

En el capítulo 7 se profundiza en los requerimientos de ciber-seguridad para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.

En el capítulo 8 se describen las oportunidades para el uso de blockchain en el mercado de electricidad de Colombia.

Finalmente, en el capítulo 9 de conclusiones y trabajos futuros, se agrupan los hallazgos y se realizan breves discusiones respecto trabajos futuros para el desarrollo de aplicaciones basadas en blockchain, con un especial énfasis a la industria energética en Colombia.

1. Capítulo: Antecedentes

En respuesta a la pérdida de confianza institucional en los mercados financieros a raíz de la crisis hipotecaria del año 2008, Satoshi Nakamoto propuso un sistema electrónico de pagos que permitía la autenticación, validación y almacenamiento de las transacciones de forma descentralizada entre los participantes del sistema, eliminando la necesidad de una entidad centralizada que autentificara y gestionara los registros. El protocolo llamado Bitcoin utilizaba algoritmos criptográficos que preservaba a la vez el anonimato de los participantes a la vez que hacía computacionalmente muy costoso la alteración de los registros (Nakamoto, 2008).

Desde el punto de vista conceptual, Nakamoto identifica a los agentes como nodos dentro una red distribuida a los cuales se les delega la gestión, validación y definición de reglas del sistema, generando un paradigma de gestión descentralizado que se conoce como organización autónoma distribuida (DAO). Una DAO no requiere de un agente externo que jerarquice el proceso de toma de decisiones, es una entidad autónoma programada dentro del código del algoritmo, siendo este el atributo fundamental del sistema de Nakamoto que luego ha sido implementado por Buterin en 2013 a través de contratos inteligentes en Ethereum (Dhillon et al., 2017b)

El proceso descrito, inicia con la emisión de un paquete de transacciones por un nodo que desean enviar un pago a otro nodo, cada nodo se identifica con una dirección única y un repositorio o “billetera” dentro de aplicativo-cliente que ejecuta el código. El algoritmo encripta el contenido de la transacción en un Hash, por medio de una función que comprime datos en una línea de texto de longitud única, en este caso 256 bits, firmándola con una llave privada antes de ser enviada a los demás nodos por medio de Internet (Singhal et al., 2018b).

Al momento de subir la transacción a la red, el nodo emite unas llaves públicas junto con la hora y fecha de creación de la transacción, cada nodo recibe o “lee” nuevas transacciones de otros nodos que son agrupadas en “bloques” de tamaño predeterminado. Una vez se completa el tamaño, el nodo inicia un proceso de validación mediante el cálculo de un algoritmo criptográfico combinando todas las transacciones del bloque y obteniendo un único hash o identificador de esa transacción (Singhal et al., 2018b).

El nodo que primero finalice esta prueba de trabajo (Proof of Work, PoW) tiene el derecho de “escribir” o grabar en el bloque la cadena anterior de bloques aprobados, incluyendo su propia llave privada y fecha exacta de finalización, para luego emitir el nuevo bloque a todos los nodos y actualizar el estado de todo el sistema (Singhal et al., 2018a).

En este punto cada nodo almacena un registro completo de todas las transacciones pasadas confirmadas, por lo cual son públicas. Una vez se actualiza la cadena, el nodo receptor de la transacción, utiliza su llave privada y recibe el pago correspondiente, acá se reinicia el ciclo (Singhal et al., 2018a).

Por este servicio, el nodo es recompensado con un artefacto o token que representa el esfuerzo computacional del nodo, que a su vez puede ser intercambiable como moneda (coin) entre los nodos de la red. Este sistema de verificación transaccional conocido como Bitcoin, se basa en la estructura de datos llamada blockchain (cadena de bloques) el cual es un caso particular de las DLT. Cabe aclarar que para el sistema no es importante quién es el emisor o receptor, pueden ser personas, organizaciones o incluso máquinas. La Figura 1 muestra el paradigma transaccional del protocolo blockchain propuesto por Nakamoto (Singhal et al., 2018a).

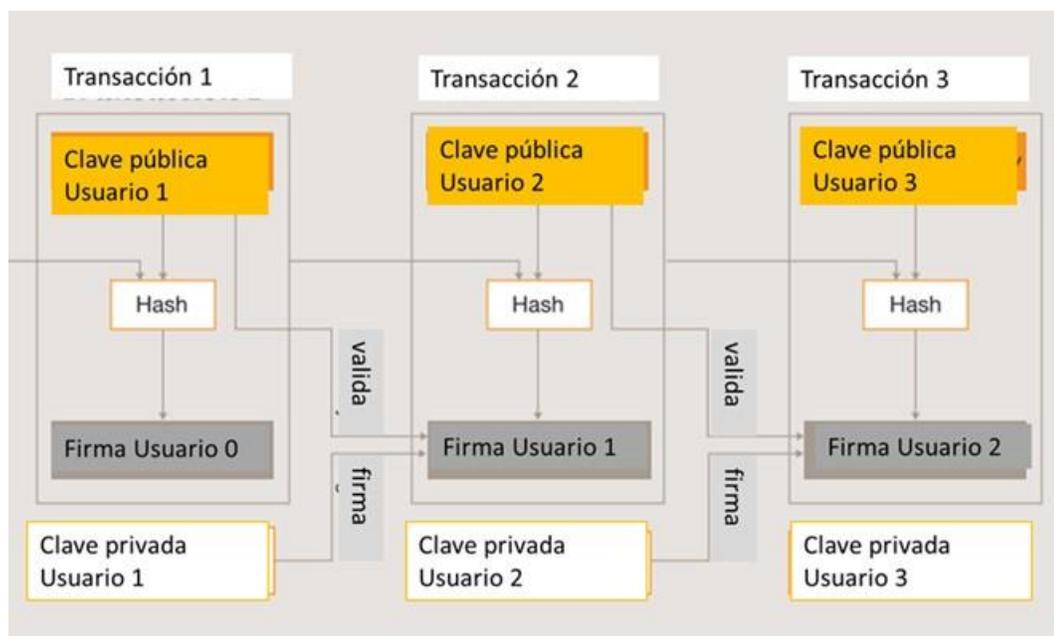


Figura 1 Modelo de transacción P2P, adaptado de (Nakamoto 2008)

De acuerdo con la Figura 1, la estructura del algoritmo encadena de forma permanente las transacciones realizadas a lo largo de un bloque de tal suerte que sea computacionalmente muy difícil alterar todas las transacciones ocurridas. Esta forma de ejecutar el proceso de validación de un sistema de confianza descentralizada resuelve en parte problemas de transparencia e integridad de la información en las transacciones, ya que el contenido es combinado con algoritmos de encriptación que están embebidos en la arquitectura del protocolo.

El cambio del paradigma transaccional propuesto por Nakamoto, es radical, pues desplaza la confiabilidad del sistema de una autoridad central validadora a un arquitectura descentralizada, en donde el incentivo para la cartelización y manipulación de una parte es elevadamente costoso y permite que todos los agentes que participen del ecosistema puedan decidir cambios y actualizaciones al protocolo de forma anónima para el resto de los nodos participantes (Dutsch & Steinecke, 2017). Este nuevo paradigma se ilustra en la Figura 2.



Figura 2 Cambio de paradigma en modelo de privacidad transaccional, adaptada de (Nakamoto, 2008)

A partir del artículo fundacional de Nakamoto, la evolución de las tecnologías blockchain ha pasado por cuatro etapas que pueden ser distinguidas claramente: La primera entre 2009 y 2013 da muestras de una comunidad de desarrolladores que producen protocolos del tipo blockchain basados en registros distribuidos apalancados por el algoritmo Bitcoin, en dónde sólo puede saberse origen, destino y cantidades de la transacción (Caradonna, 2020).

Luego entre 2013 y 2015 los desarrolladores introducen el concepto de digitalización de activos, en la cual se crean copias digitales con atributos de objetos del mundo real, este proceso también conocido como “tokenización” permite que las transacciones incluyan: origen, destino, cantidad y atributos (Caradonna, 2020).

La tercera etapa entre 2015 – 2017, evidencia sofisticación en el desarrollo de funciones avanzadas en los protocolos blockchain, como la posibilidad de generar rutinas complejas automáticas del tipo “si las condiciones X,Y o Z se cumplen, ejecute la orden 1,2,3”; estos programas automáticos se conocen como “Smart Contracts” y permiten incluir: origen, destino, atributos, algoritmos anidados condicionales; el hito en esta fase es el de la creación del protocolo Ethereum por el desarrollador Vitalik Buterin (Metcalfe, 2020).

La cuarta etapa a partir de 2017 muestra la evolución de ecosistemas y plataformas para usuario final basados en bifurcaciones (protocolos blockchain que parten de un protocolo

anterior) y modificaciones de los diferentes protocolos de blockchain. Para Abril de 2017 ya se estimaba una valorización del mercado de la tecnología Bitcoin de 19,2 Billones de dólares y de 4,4 Billones de dólares para Ethereum (Dutsch & Steinecke, 2017), para Agosto de 2021, Bloomberg estima una capitalización de 2 trillones de dólares, con Bitcoin y Ethereum como los líderes del mercado seguido de Cardano. (Osinger, 2021)

En este punto cabe aclarar que Cardano, es un protocolo lanzado en septiembre de 2017 por Blockchain Development Output Hong Kong (IOHK), Cardano es una plataforma blockchain descentralizada en contratos inteligentes de código abierto que funciona en un algoritmo PoS y proporciona una base para la criptomoneda ADA. Su primera versión fue lanzada en septiembre de 2017 (Mohanty, 2019).

En particular, los mercados energéticos bilaterales (Over the Counter, OTC) pueden beneficiarse de los diferentes protocolos de blockchain disponibles para agilizar el proceso de validación de contratos de compra y venta de activos energéticos, el proceso de balance de cuenta y el de certificación de origen de un contrato específico (Solarplaza, 2018).

Los contratos bilaterales podrían ser transados mediante un proceso de conciliación sin que medien cámaras de compensación. Incluso, las aplicaciones potenciales a mercados eléctricos ya se evidenciaban desde 2013, cuando algunos autores proponían un mecanismo de control distribuido de micro-redes basado en Bitcoin, implementando políticas de privacidad e intercambio mediante “tokens de energía” entre usuarios y empresas de energía de forma anónima (Dimitriou & Karame, 2013).

Los usos potenciales de blockchain también puede integrarse en otras actividades de la cadena de valor dentro de la industria de la energía más allá de los procesos de validación transaccional; blockchain puede aplicarse a procesos de: medición de variables de estado, facturación y aplicación de garantías, certificación de propiedad y gestión de un activo energético, certificación de origen en la generación de energía renovable y certificación de bonos de emisiones de CO2 provenientes de fuentes renovables o procesos de eficiencia energética (Global, 2017). En la Figura 3, se muestra un esquema para el proceso de validación de un contrato OTC bajo blockchain.

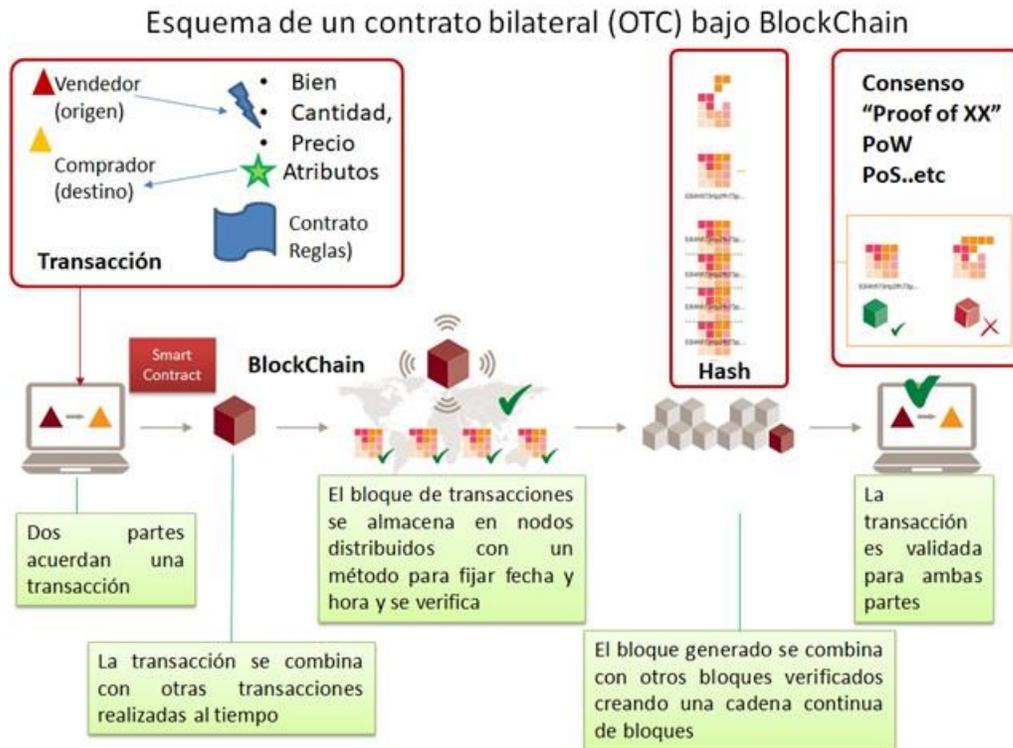


Figura 3 Proceso transaccional entre dos partes usando blockchain, tomado de (PWC,2016)

Nótese que después de que el bloque de transacciones se procesa se crea un balance transaccional también conocido como UTXO *"unspent transaction output"* para Bitcoin, Cardano; o Balance de cuenta en Ethereum. Este proceso se explica con un ejemplo sencillo. Supóngase que Bob, que tiene asignados 10 BTC, transfiere 1 BTC a Alice. La transacción indica 10 BTC de entrada, saliendo 1 BTC para Alice y 9 BTC reasignados a Bob, ambas transacciones han sido firmadas por Bob con su clave. En un bloque posterior, Alice puede transferir 0.5 BTC a un tercero en una transacción grabada en este nuevo bloque, la transacción es firmada por Bob y Alice repitiéndose el ciclo iterativamente. La Figura 4 muestra el flujo transaccional.

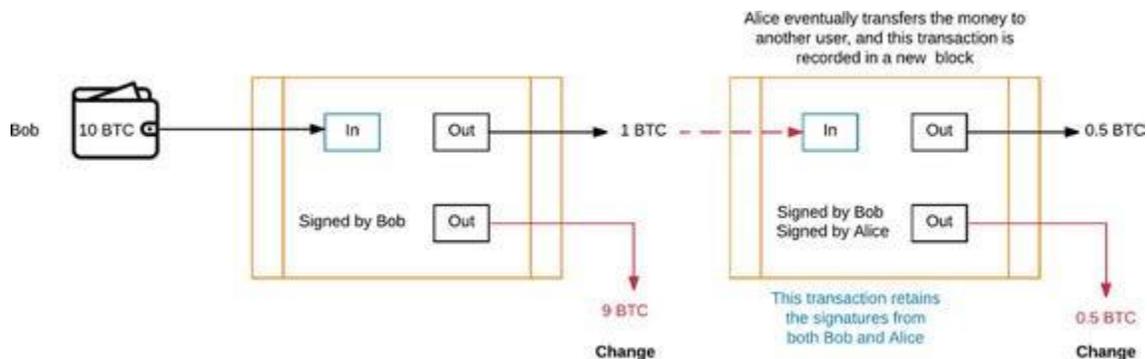


Figura 4, Balance neto entrada-salida de una transacción. tomado de (Dhillon et al., 2017a)

El propósito de este trabajo es indagar las oportunidades de la tecnología blockchain para el desarrollo de aplicaciones orientadas al mercado energético en Colombia, para esto, el siguiente aparte contextualizará al lector sobre el estado de la tecnología blockchain en relación a los aspectos regulatorios, financieros en mercados energéticos globales y locales.

1.1 Contexto regulatorio, financiero y de los mercados energéticos

1.1.1 Contexto regulatorio y financiero.

En 2018, Price-Waterhouse Cooper realizó una encuesta global a 600 expertos dentro del ecosistema blockchain sobre la utilidad de esta tecnología en diferentes industrias, la misma concluyó que el 46% de los encuestados ve a los servicios financieros como una de las industrias líderes en implementación, seguida de 12% para energía y servicios públicos y manufactura. La misma encuesta concluye que dentro de los obstáculos más relevantes para la adopción de blockchain en su industria se tiene: 27% relacionado con incertidumbre regulatoria, un 25% falta de confianza entre los usuarios y un 21% habilidad para aunar esfuerzos entre diferentes redes. Finalmente, en el aspecto de liderazgo tecnológico, la percepción apunta a Estados Unidos y China como los líderes actuales y proyectados hasta el 2023 (PWC, 2018).

En cuanto al contexto de gobernanza, existe un debate financiero a nivel global respecto de la adecuada clasificación de los activos digitalizados y transados a través de las plataformas DLT como blockchain. Las implicaciones económicas de transacciones de intercambio de valor equivalente a monedas en redes públicas, privadas o híbridas como medio de pago pueden conllevar riesgos de estabilidad financiera (Kshetri, 2021).

La denominación de criptoactivos por parte del Banco de pagos internacionales (BIS), incluye a las criptomonedas y tokens como activos de inversión y documentos asegurables, negando la paridad como moneda equivalente al dinero soberano. (Nelson, 2018), concluye que a pesar de la rápida adopción y atractivo de los criptoactivos como medio de pago e incluso como medio para almacenar valor, es prácticamente “inconcebible” que estos puedan reemplazar al dinero soberano en virtud de: la falta de confianza del público en general, las potenciales fallas en la seguridad para almacenar y gestionar los criptoactivos, la vulnerabilidad tecnológica y la falta de una entidad que represente un respaldo ante reclamaciones.

Particularmente en Colombia, el Banco de la república en sus cuadernos de trabajo elaboró un documento de línea base sobre criptoactivos que caracteriza la regulación internacional e impactos en políticas monetarias; y concluyendo que para el caso colombiano:

“...Actualmente, la regulación colombiana no hace mención explícita al carácter legal de los Criptoactivos ni a los negocios asociados. Sin embargo, varias autoridades se han manifestado con el objetivo de hacer aclaraciones oficiales que señalan los límites y restricciones de estos Criptoactivos y los negocios relacionados a la luz de la legislación vigente.” (Barrera-rego et al., n.d.)

El reporte del Banco de la República compila un análisis muy completo del estado de la regulación respecto a los criptoactivos en diferentes países el mundo. La Tabla 1 proporciona comparativamente el estado de la regulación en Colombia con relación a otros países de la región:

	Advertencias al consumidor	Reglas sobre LA/FT	Tratamiento tributario	Registro o licencias intermediación CA	Proyectos institucionales de DLT	Tratamiento Regulatorio
Estados Unidos	✓	✓	✓	✓	✓	Commodities ¹³² / digital representation of value ¹³³ / ICO - Securities ¹³⁴
Canadá	✓	✓	✓	✓	✓	Type of digital currency ¹³⁵ (no legal tender ¹³⁶) / ICO - Securities ¹³⁷
Colombia	✓					No hay tratamiento regulatorio específico aún. Criptoactivos
México	✓	✓	✓	✓	✓	Representación de valor ¹³⁸
Chile					✓	Subconjunto de tecnologías financieras ¹³⁹ / Método de pago ¹⁴⁰
Argentina		✓				No hay tratamiento regulatorio específico aún, se asemeja a un medio digital de intercambio ¹⁴¹
Brasil	✓		✓		✓	Activos ¹⁴²
Japón	✓	✓	✓	✓	✓	Proprietary value ¹⁴³ / store of value ¹⁴⁴ / Financial value ¹⁴⁵
Unión Europea	✓	✓	✓	✓ ¹⁴⁶	✓	Representación digital de valor ¹⁴⁷ / Medio de pago ¹⁴⁸
Alemania	✓		✓		✓	Units of account ¹⁴⁹ / Digital representation of value ¹⁵⁰ / Bitcoin as financial instruments ¹⁵¹
Suiza		✓	✓	✓		Payment tokens / Utility Tokens / Asset Tokens ¹⁵²
Francia	✓			✓	✓	Crypto assets ¹⁵³ / Non-listed securities ¹⁵⁴
España	✓	✓	✓		✓	Activos digitales ¹⁵⁵ / Medio de pago ¹⁵⁶
Reino Unido	✓		✓	✓	✓	Evolving asset ¹⁵⁷ / Asset class ¹⁵⁸
Singapur	✓	✓	✓	✓	✓	No hay tratamiento regulatorio específico aún

Nota: los campos en blanco indican que el país no tiene acciones regulatorias o que no hay información disponible.

Nota: Para facilitar la interpretación y entendimiento, se mantienen los términos en inglés de la clasificación de los CA en cada país.

Tabla 1 Estado de la regulación sobre criptoactivos en varios países del mundo, Tomado de (Arango-Arango & Bernal-Ramírez, 2018)

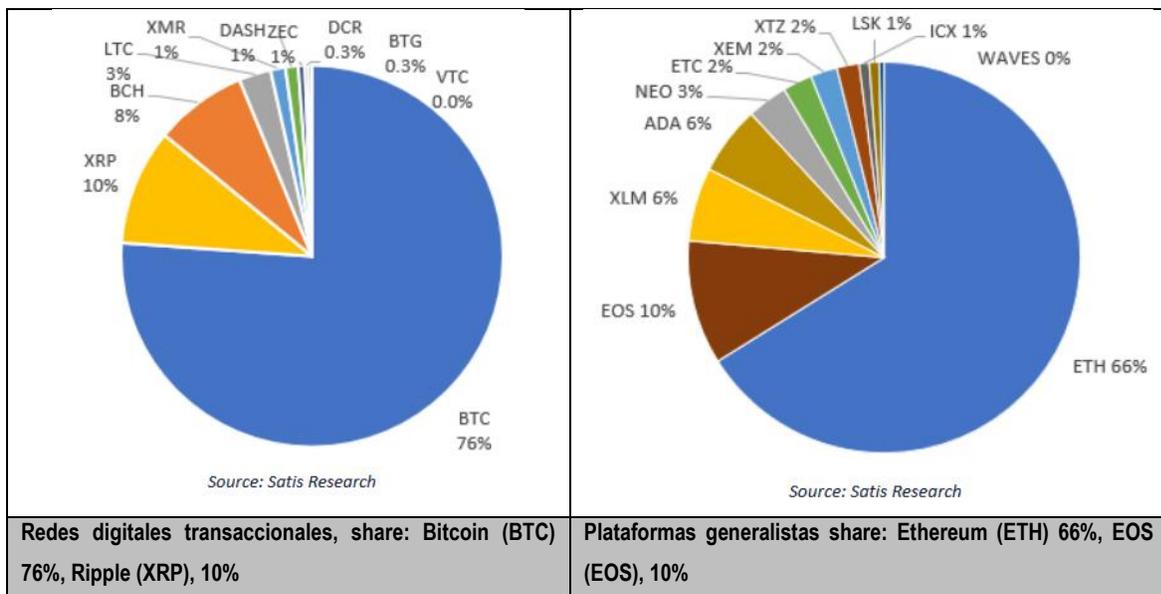
De los 15 países listados en la Tabla 1, sólo cuatro han abordado las cuatro dimensiones necesarias para una adecuada integración de los criptoactivos al sistema financiero. Es de notar la brecha de entendimiento y adopción de políticas para la tecnología blockchain en Colombia con respecto a países más avanzados en este sentido. Dentro de los países objeto del estudio (Arango-Arango & Bernal-Ramírez, 2018), el análisis del banco de la república encontró que los criptoactivos también se clasifican como: a) activos digitales, b) commodities, c) medios para acumulación de valor y d) “securities” o valores; es decir, se tratan como activos sujetos a reclamaciones entre partes al momento de incumplimiento

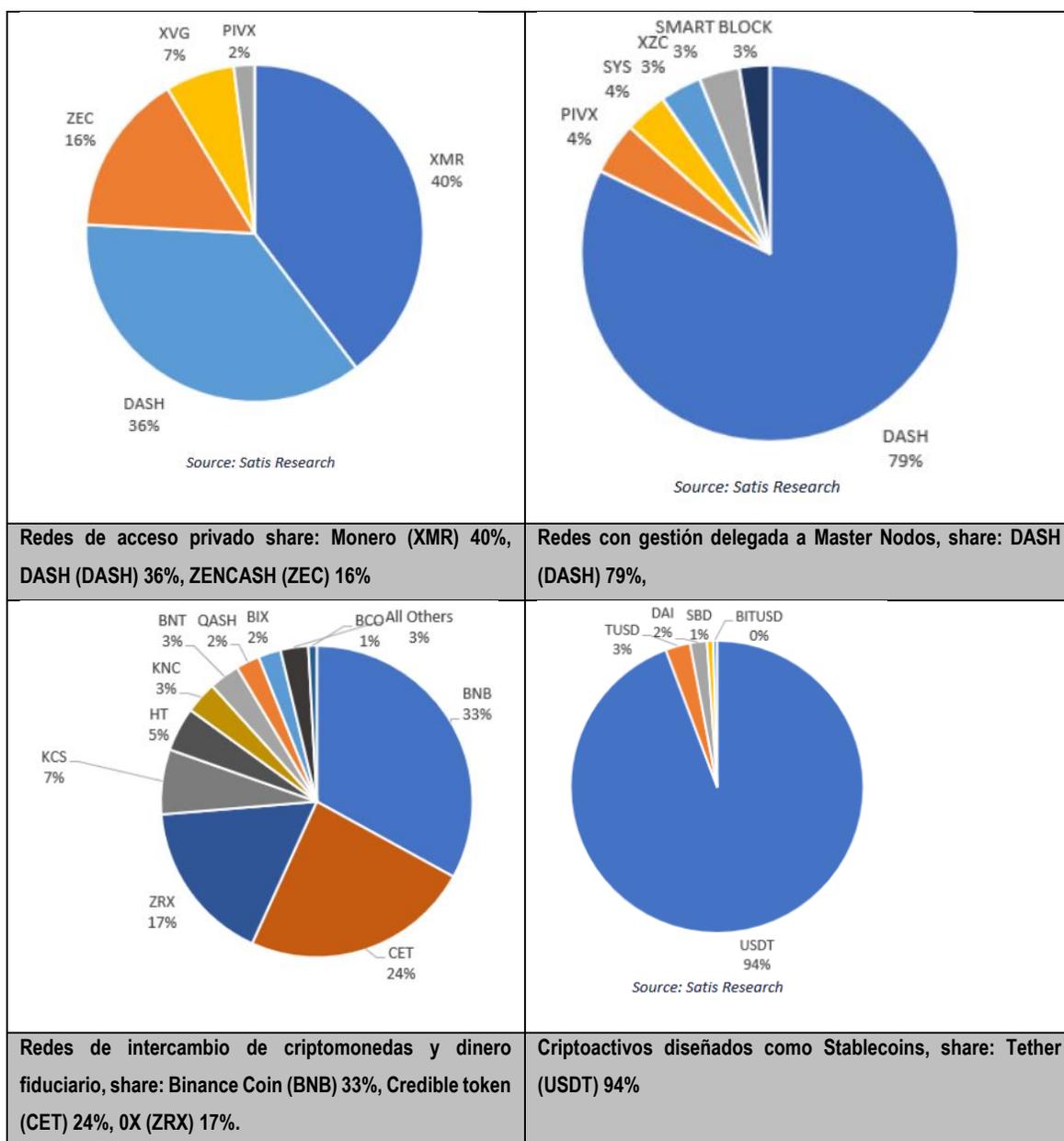
de un contrato. Esta clasificación podría expandir la implementación de productos y derivados financieros basados en criptoactivos.

Otra manera de clasificar la naturaleza de los criptoactivos considera los atributos del bien físico del cual han sido copiados o digitalizados (Gemelo Digital), y el uso o valor asociado dentro de la cadena de valor de los agentes que intervienen en las transacciones (Michael Hodapp, 2018)

Bajo esta aproximación, los criptoactivos se pueden agrupar en dos clases: 1) activos asociados transables como: propiedades inmuebles, metales preciosos, criptomoneda (Coins) y flujos monetarios para intercambiar dinero soberano a Criptomonedas; 2) activos asociados al uso: Redes digitales transaccionales, redes digitales de acceso privado, plataformas para el intercambio de Criptoactivos, Criptomonedas que conservan el valor en el tiempo o “Stablecoins” y redes de acceso permissionado que regula quién puede acceder al servicio (Dowlat, 2018). Para ilustrar la diversidad de activos de uso en blockchain, en la Tabla 2, se muestran las subclases de criptoactivos más relevantes:

Tabla 2 Proporción de criptoactivos por subclase de activo en función del uso, adaptado de (Dowlat, 2018)





La categoría de activos de uso muestra artefactos interesantes y esenciales dentro de la cadena de valor del ecosistema blockchain, cada una de ellos juega un papel funcional interesante, por ejemplo: Bitcoin y Ripple son protocolos que canalizan el 86% de las transacciones asociadas al intercambio de valor; Ethereum es la plataforma preferida para desarrollar aplicaciones de uso general mediante contratos inteligentes; Monero, Dash y Zencash son las plataformas de acceso privado más usadas para realizar pequeñas transacciones monetarias (Dowlat, 2018).

El protocolo DASH ha sido de los primeros en utilizar la administración delegada a Nodos Maestros utilizando el método de consenso de prueba de tenencia PoS, en un intento por mejorar la escalabilidad; Tether es el más valorado para respaldar activos tangibles como oro, dinero soberano y otros; finalmente, se tiene una diversidad de criptoactivos que buscan su lugar como protocolos que faciliten el intercambio de valor entre los otros criptoactivos, tal es el caso de Binance con token BNB y Credit Coin con CTC (Michal Hodapp, 2018).

Sin embargo, la naturaleza dinámica de la tecnología seguirá evidenciado la adopción de nuevos protocolos, la obsolescencia de otros y la evolución a aplicaciones más sofisticadas y adaptadas a casos de uso cada vez más personalizados, estos son apenas las primeras etapas de un mercado en proceso de maduración.

1.1.2 Contexto de los mercados energéticos

Para el caso específico de la aplicación a mercados energéticos varias iniciativas basadas en blockchain buscan resolver problemas propios de la industria, tales como: facilitar el acceso a los mercados de energía, proporcionar mayor diversidad y flexibilidad a los contratos de compra y venta, certificar el origen y atributo de una fuente energética en particular, asegurar la propiedad directa de un activo energético, propiciar el agenciamiento de activos y facilitar la democratización y autodeterminación en la propiedad de los datos (Hartnett et al., 2018).

Dentro de los criptoactivos más reconocidos y cuyo enfoque es el sector energético se pueden enumerar a: SolarCoin, Powerledger, EWChain e Hyperledger, los cuales operan dentro del concepto de redes privadas con su propio protocolo blockchain. En general, los casos de uso de blockchain en el sector energía se concentran alrededor de soluciones que buscan agilizar el proceso de compra-venta de energía entre dos partes o peer-to-peer (P2P) con un 74% de empresas desarrolladoras de plataformas privadas fundadas a partir de 2016 y que utilizan a Ethereum (50% la usan) como el protocolo más empleado para el desarrollo de software (Solarplaza, 2018).

En la Figura 5 se ilustra la proporción de iniciativas por tipo de uso en el sector energético.

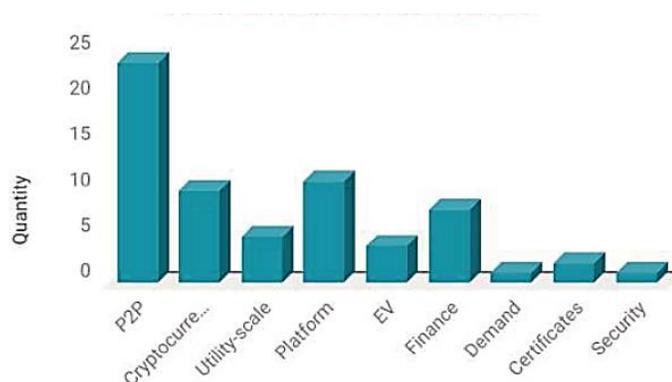


Figura 5. Cantidad de startups por caso de uso en blockchain, tomado de (Solarplaza, 2018)

Es de notar que se listan más de 20 aplicaciones para la comercialización de energía peer to peer p2p, más de 10 como plataformas de intercambio de servicios y de criptomonedas respaldadas en activos energéticos y menos de 5 enfocadas en temas de seguridad y de certificación, esta caracterización puede dar luces sobre dónde los temas relevantes para futuros desarrollos de la tecnología blockchain.

Un aspecto característico de un mercado en desarrollo es la rápida obsolescencia y abandono temprano de proyectos: Deloitte reporta sobre el estado de los proyectos blockchain publicados en el repositorio GitHub que, de 86.034 iniciativas registradas, sólo el 8% se mantiene de forma activa (mínimo 1 actualización/año) con una tasa de “mortalidad” promedio de 1,22 años. Aquellos que sobrepasan el año se encontró que el 15% son respaldados por organizaciones y 7% son de origen “personal”. Deloitte identificó tres riesgos que explican la baja tasa de supervivencia: 1) Los proyectos son más compendios de ideas con poco desarrollo de código fundamenta, por ende generan poca tracción; 2) es frecuente que sólo uno o pocos desarrolladores generen la mayor proporción de contenido, los proyectos que sobreviven tienen varios desarrolladores comprometidos que se soportan entre sí y 3) los proyectos exitosos, son modificaciones o expansiones de otros ya preexistentes, estas modificaciones sustanciales suelen llamarse bifurcaciones o forks, y tienden a sobrevivir ya que su protocolo tiende a tomarse como estándar (Insights & Deloitte, 2017).

1.1.3 Contexto colombiano

En Colombia se pueden apreciar algunas oportunidades para la aplicación de la tecnología blockchain como por ejemplo menciona un artículo de la República que identifica más de 100 proyectos originados en el país el artículo y menciona tres retos para su adopción en el país: 1) Interoperabilidad entre plataformas blockchain; 2) la escalabilidad y 3) la falta de regulaciones concretas sobre seguridad y privacidad (Venegas Loaiza, 2018).

Otro, por ejemplo, es el proyecto ViveLab Bogotá y el grupo de investigación aplicada e innovación en TIC (inticolombia). Vive Lab ha desarrollado una herramienta para certificar los títulos de propiedad para restituyentes de tierra dentro del programa de restitución de la Agencia Nacional de Tierras de Colombia (— Agencia de Noticias UN-, 2018).

En 2019, el operador del mercado eléctrico colombiano, lanzó Ecoregistry una plataforma para validación de bonos de emisión de carbono bajo los lineamientos de la ley 1931 de 2018 sobre cambio climático, el protocolo opera como red privada o consorcio que corre contratos inteligentes basados en Ethereum (Lozano et al., 2019).

Finalmente, en el sector eléctrico Codensa desarrolló junto con el grupo T&T de la Universidad Nacional el proyecto ElectroChain para el intercambio de electricidad P2P mediante contratos inteligentes basados en blockchain que entre otros integra mecanismos de remuneración de excedentes energéticos para auto generadores de acuerdo a la resolución Creg 030 de 2018 (Grupo TYT, 2018), una ilustración de su red blockchain se evidencia en la Figura 6.

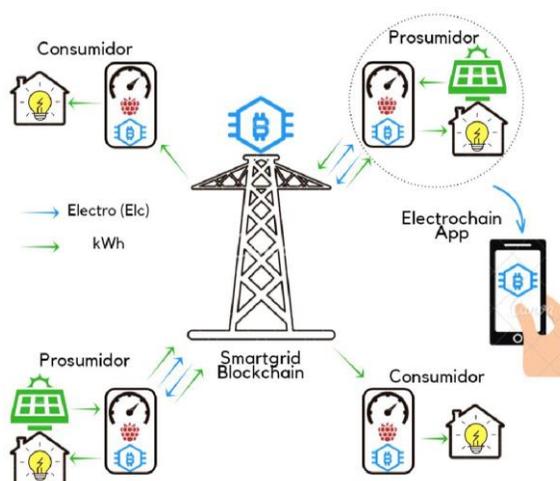


Figura 6 - Modelo ElectroChain de Codensa y grupo T&T 2018; tomado de (Grupo T&T,2018)

El proyecto ElectroChain busca realizar el proceso de conciliación de pagos y balance de contratos con los consumidores de mercado regulado como prosumidores de manera directa y en tiempo real.

La asociación de empresas financieras de base tecnológica Colombia Fintech reconoció en su reporte sectorial del año 2020 (Fintech, 2020) a la tecnología blockchain como parte del ecosistema, con una participación del 4.66% entre las 322 empresas mapeadas en el sector, en la Figura 7 se muestra la participación los roles.

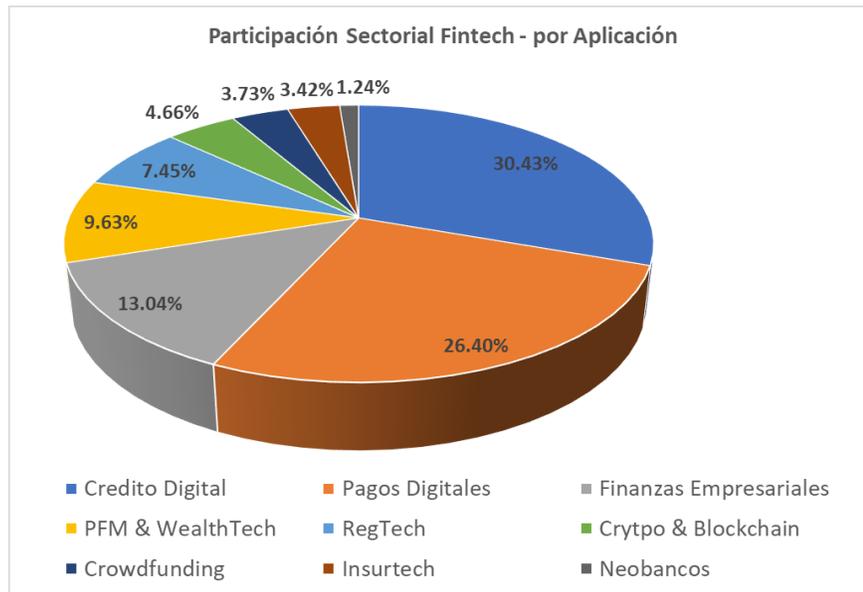


Figura 7 Participación empresarial en ecosistema Fintech, tomado de (Fintech, 2020)

Las 14 empresas mapeadas por Colombia Fintech (Fintech, 2020), reportaron portafolios de servicios en los siguientes tres campos de acción: i) Plataformas de intercambio de criptoactivos, activos virtuales como medio de pago (criptopagos) y valores o mercancías; ii) Ofertas iniciales de Criptomoneda (ICOs); iii) Blockchain As A Service para servicios financieros y vi) Servicios de desarrollo contratos Inteligentes para sector financiero.

Según el contexto expuesto se observa una industria en proceso de maduración, con algunas tendencias de consolidación alrededor de protocolos blockchain que permitan la digitalización de actividades complejas por medio de contratos inteligentes, se presentaron los retos desde el punto de vista permanencia y desarrollo de proyectos por falta de respaldo y tracción empresarial, y se presentó una imagen del naciente mercado de aplicaciones blockchain en Colombia, apalancando en el sector financiero.

2. Capítulo: Marco Teórico

Desde que Nakamoto publicó su artículo en 2008 una variedad de protocolos, plataformas y aplicaciones han ingresado en el ecosistema blockchain, lo que en alguna medida puede generar confusión a los tomadores de decisión que buscan identificar las arquitecturas más adecuadas en función del tipo de problema que buscan resolver.

En particular, para el caso de aplicaciones orientadas a los mercados de energía, algunos autores identifican tres criterios a evaluar para una exitosa implementación: a) Adecuada selección de la plataforma blockchain a implementar mediante evaluación de las ventajas de un protocolo respecto a otros, 2) construcción del método de validación de las transacciones o también llamado consenso y 3) Evaluar las necesidades de recursos computacionales para escalar el proceso a más usuarios (Saraf & Sabadra, 2018).

Otros autores, consideran las funcionalidades adicionales como la inclusión de reglas programables, la capacidad para gestionar una red de participantes completamente distribuida y la capacidad para forzar consenso para capturar, almacenar las transacciones así como los datos anexos a las mismas (Risius & Spohrer, 2017), mientras que otros ponderan la capacidad para minimizar tiempo, costo, agilizar procesos empresariales y capacidad para integrarse en redes transaccionales preexistentes (Viriyasitavat et al., 2018).

2.1 Enfoque en sector energético

En el caso particular de la industria energética se han identificado aplicaciones relevantes de blockchain, como es el caso de: a) venta de excedentes de autogeneración entre prosumidores y la red eléctrica; b) venta de energía de Generadores Distribuidos (GD) y la red eléctrica, c) intercambio de energía en forma directa entre prosumidores (P2P) y d)

intercambio de energía entre GD y comercializadores regionales a través de un contrato de compra de energía (Yan et al., 2017)

Otros autores han evaluado a nivel académico la viabilidad de aplicaciones blockchain en mercados de energía desde los aspectos de privacidad, seguridad y descentralización y tecnología. Estos autores concluyen que una infraestructura relativamente pequeña de sistemas de cómputo es suficiente para operar un mercado energético regional, también encontraron dificultades para trazar el cambio en el estado de la red blockchain y potenciales fallas en la validación de las cláusulas del contrato a falta del activo a comercializar (Foti, Greasidis, & Vavalis, 2018).

Por el lado del uso de recursos se han detectado retos en: la gestión de los costos de almacenamiento y verificación dado el aumento de los participantes en la red (Cheng et al., 2017), la carencia de beneficios económicos directos a los participantes del proceso de descentralización, la ocurrencia de potenciales fallas catastróficas por la estructura asincrónica de la red y la vulnerabilidad del sistema ante pérdida de la llave de acceso privada (Yang et al., 2018).

2.2 Enfoque desde la cadena de valor

Nótese la variedad de enfoques para determinar criterios desde lo tecnológico, lo legal y lo financiero, sin embargo, los beneficios e impacto del paradigma blockchain de cara a la sociedad, pasa por los aspectos empresariales y de económicos. En este aspecto el enfoque de análisis del modelo de negocios para tecnología blockchain es una herramienta útil para integrar estos aspectos en un sistema completo e interrelacionado.

Algunos autores parten del enfoque de valor sistémico, en el cual se analiza el rol de un potencial emprendimiento basado en blockchain dentro de un ecosistema económico y social, en el que se identifican cuatro arquetipos o roles típicos: a) Rol de Integrador, en donde se transforman materia prima para crear valor; b) Rol de colaborador creando valor al trabajar con otros. c) rol de facilitador transaccional quien crea valor mediante herramientas o plataformas para otros y d) rol de puente en el que la firma crea valor al conectar firmas que no tenían relación previa (Xu et al., 2018).

En un contexto más específico dentro de la cadena de valor en mercados eléctricos, blockchain puede simplificar el proceso de balance y operación del administrador de la red cuando diferentes recursos eléctricos distribuidos se van integrando a la red. La Figura 8 muestra el flujo de energía e información en un mercado eléctrico con control centralizado, en la cual los roles de los agentes están determinados por su posición en la cadena de valor y básicamente el flujo de energía entre generadores y consumidores es de una sola vía:

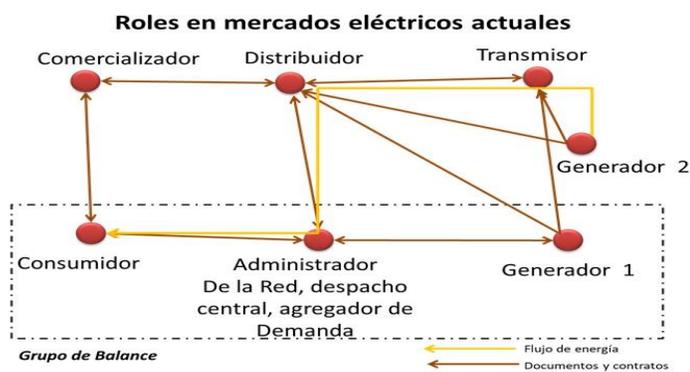


Figura 8 Evolución de modelo centralizado a economía transaccional - Adaptado de (Global, 2017)

Bajo este paradigma, la integración de recursos energéticos distribuidos DERs, como plantas generación solar, sistemas de almacenamiento eléctrico, vehículos eléctricos, microrredes, cooperativas energéticas, prosumidores y agentes emergentes; es más compleja, ya que el control y balance operativo y transaccional de esta nueva dinámica introduce una cantidad creciente de interacciones que deben ser reguladas por algún mecanismo adaptativo que garantice un funcionamiento confiable y ordenado del sistema eléctrico.

3. Capítulo Revisión de Literatura

El corpus de conocimiento alrededor de la tecnología blockchain es diverso, dinámico y a veces confuso por la variedad de campos de aplicación y potenciales usos en la solución de problemas de disciplinas muy variadas. Es de notar la creciente cantidad de trabajos publicados a nivel científico en los últimos tres años como lo demuestran los resultados obtenidos por el autor de las bases de datos de revistas, conferencias, libros y repositorios indexados, las búsquedas se resumen en la Tabla 3

Tabla 3 - Consultas en bases de datos y repositorios, fuente propia

NRO	RECURSO	FECHA	PALABRAS CLAVE USADAS	RESULTADOS
1	SPRINGER LINK	20/6/2021	Convergence and Blockchain	1388
2	SPRINGER LINK	26/6/2021	Energy and Blockchain (FILTER Chapters, Conference papers, - preview only papers)	368
3	SCIENCE DIRECT	31/08/2018	Clean energy community, Energy transition pathway, Distributed energy, Decentralized energy	187
4	SPRINGER LINK	26/6/2021	Technology and Blockchain (FILTER Chapters, Conference papers, - preview only papers)	186
5	IEE explorer	10/6/2018	blockchain AND Energy	50
6	SCIENCE DIRECT	31/08/2018	ENERGY + PROSUMER MODEL BLOCKCHAIN	45
7	EBSCO	10/6/2018	Booleano/Frase: blockchain AND energy Limitadores Remove: Texto completo en Vínculo, Tipos de fuentes Remove: Publicaciones académicas	21
8	IEE explorer	10/6/2018	blockchain AND energy filtro: Journal & magazines	14
9	SCOPUS	15/07/2019	BITCOIN + BUSINESS MODEL	14
10	SCIENCE DIRECT	31/08/2018	Blockchain, Carbon trading, Carbon emission, Energy economics	6
11	SCOPUS	15/07/2019	BLOCKCHAIN+ COLOMBIA	5
12	IEE explorer	30/08/2018	Renewable energy sources, Smart grids, Bitcoin	2
13	SCIENCE DIRECT	31/08/2018	blockchain technology, Chemical industry. Electricity market, Machine-to-machine communications	1
14	SCIENCE DIRECT	31/08/2018	Microgrid energy market, Market design, blockchain, Case study, Peer-to-peer trading, Renewable energy	1

15	RESEARCH GATE	15/10/2018	BLOCKCHAIN, COLOMBIA	1
16	BANREPUBLICA	15/10/2018	CRIPTOACTIVO	1

Con respecto a los trabajos literarios de autores afiliados a universidades colombianas o cuyo alcance incluyen aplicaciones en el territorio colombiano con el criterio “blockchain AND Colombia” arrojaron una cantidad reducida de trabajos publicados, en contraste con el resto de elemento de búsquedas relacionadas con “Energy”, “transactive”, “business model”, entre otros, arrojando un total de 14 artículos, de los cuales uno de ellos corresponde al potencial de aplicaciones a la cadena de abastecimiento en el sector de alimentos (Gervasi et al., 2013).

Es de notar que se encontraron artículos de prensa sobre iniciativas de proyectos blockchain y algunos análisis sectoriales del entorno colombiano que caen dentro de la literatura gris y son válidos para ofrecer un contexto en el momento y lugares específicos del país. La selección de documentos se basó en la relevancia respecto a los asuntos técnicos, de mercado, regulatorios y respecto al desarrollo de proyectos basados en tecnología blockchain aplicados al entorno de la industria de la energía.

El proceso de revisión de literatura se ejecutó en tres fases: Planeación, en la que se identificó la necesidad de la revisión, se realizan preguntas y se desarrolló el protocolo; la ejecución en donde se identificó y seleccionó el material, evaluando la calidad previa a la extracción y síntesis de los datos; para finalmente reportar hallazgos e integrarlos en el cuerpo de trabajo.

En particular en este trabajo se desarrolló una revisión terciaria, descriptiva y cualitativa de la literatura alrededor de las aplicaciones de la tecnología blockchain en mercados financieros y eléctricos (Velásquez, 2015a). En este sentido, la revisión de literatura cobra relevancia en un campo de conocimiento dinámico y en expansión, con el fin de mapear los nuevos desarrollos, identificar revisiones sistemáticas de la literatura que ayuden a señalar vacíos en la investigación y, que pueden informar de futuros campos y trabajos de exploración. (Velásquez, 2015b).

3.1 Fuentes de consulta

En esta etapa se buscaron trabajos relacionados con los casos de estudio e implementación de tecnología blockchain orientados al sector de energía en Colombia y se contrastaron hallazgos con implementaciones realizadas en los mercados globales más desarrollados al respecto.

Dada la naturaleza reciente de estos tópicos en el país, se incluyeron fuentes de literatura gris que fueran relevantes para dar contexto a acontecimientos recientes a través de reportes, ponencias en simposios, artículos de prensa y entrevistas.

Los textos se buscaron en inglés, con un rango de búsqueda entre 2009 y 2021, principalmente en los repositorios de: Scopus, IEE Explore, ScienceDirect y Springer Link. En particular se encontraron 6 artículos relacionados con revisiones sistemáticas de la literatura en diversos campos, los que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Artículos del tipo revisiones sistemáticas en tecnología blockchain y energía, elaboración propia

Referencia	Título	Autores	Publicación	Palabras Clave	Año	Páginas
(Yli-Huumo et al., 2016)	Where Is Current Research on Blockchain Technology? —A Systematic Review	Yli-Huumo, Jesse Ko, Deokyoon Choi, Sujin Park, Sooyong Smolander, Kari	PLOS ONE Vol 11	Systematic Review; Blockchain technology	2016	1 to 27
(Konstantinidis et al., 2018)	Blockchain for business applications: A systematic literature review	Konstantinidis, Ioannis Siaminos, Georgios Timplalexis, Christos Zervas, Panagiotis Peristeras, Vassilios Decker, Stefan	Lecture Notes in Business Information Processing Vol 320	Applications; Blockchain; Business; Literature review	2018	384-399
(Corbet et al., 2018), e	Cryptocurrencies as a financial asset: A systematic analysis	Corbet, Shaen Lucey, Brian Urquhart, Andrew Yarovaya, Larisa	International Review of Financial Analysis	Cryptocurrencies; Cybercriminality; Pricing bubbles; Regulation; Systematic literature review	2018	1 to 18
(Macrinici et al., 2018)	Smart contract applications within blockchain technology: A	Macrinici, Daniel Cartofeanu, Cristian Gao, Shang	Telematics and Informatics	Smart contracts Blockchain, Cryptocurrency, Ethereum, Bitcoin,	2018	2337-2354

	systematic mapping study			Systematic mapping		
(Andoni et al., 2019)	Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities	Andoni, Merlinda Robu, Valentin Flynn, David Abram, Simone Geach, Dale Jenkins, David McCallum, Peter Peacock, Andrew	Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol 100	Blockchain; Distributed ledger; Energy decentralization; Peer-to-peer energy trading; Prosumer; Renewable energy	2019	143-174
(Liang & Ji, 2021),	Privacy challenges of IoT-based blockchain: a systematic review	Liang, Wenbing Ji, Nan	Cluster Computing	Blockchain; Computer networks; Distributed systems; Internet of things; Privacy; Systematic literature review	2021	1 to 19

3.1 Temas explorados y brechas temáticas

(Yli-Huomo et al., 2016), realizaron un mapeo sistemático en el que indagaron sobre aplicaciones desarrolladas que usan blockchain, brechas temáticas actuales y tendencias futuras, los autores usaron para esta revisión el protocolo PRISMA (Moher et al., 2015), resultando en 41 artículos de interés. Los temas relevantes de investigación se enfocaban en: seguridad y privacidad, uso de recursos, velocidad, maleabilidad de los datos y autenticación, mientras que los temas que tenían poco desarrollo se relacionaban con latencia, monetización, soporte de los desarrolladores, hard-forks (versionado), tamaño de los bloques y anchos de banda, asimetrías en la minería de blockchain y ciber-ataques. Dichos autores instan a investigaciones futuras relacionadas con: la escalabilidad y evaluación de la efectividad de las soluciones de blockchain desarrolladas

(Corbet et al., 2018), ejecutaron una revisión empírica de la literatura de 97 artículos sobre cripto activos publicados desde 2009 en relación con la banca y servicios financieros. Encontraron que los tópicos en desarrollo se centraban en: burbujas inherentes, alineación regulatoria, ciber-criminalidad, estructura de los criptoactivos, diversificación de beneficios, eficiencia del mercado, dinámicas de precios. Dentro de las brechas temáticas encontraron: número de criptomoneda a estudiar, aspectos legales, económicos y regulatorios que afectan los criptoactivos, problemas de información asimétrica, beneficios

alternativos potenciales y usos para blockchain, beneficios de los criptoactivos por separado, evaluar criptoactivos basado en el uso más allá del desempeño financiero, impacto ambiental de los criptoactivos beneficios como un activo dentro de un portafolio diversificado, estudios permanentes sobre criptoactivos dada la naturaleza dinámica del tema. En los temas de trabajo futuro los autores identificaron futuros campos de estudio desde el punto de vista regulatorio, tales como: potencial para el surgimiento de burbujas financieras alrededor de los criptoactivos, alineamiento con regulaciones y gobernanza, ciber-criminalidad, estructura subyacente de las criptomonedas, dinámica del precio, beneficios de la diversificación y regulación

(Macrinici et al., 2018), utilizan el método del mapeo sistemático de 64 artículos agrupados por publicaciones, canales, métodos y aproximaciones; los autores concluyeron que el 73% de los artículos analizados se publicaron entre 2016 y el primer cuarto de 2018, los tópicos más relevantes han sido: propuestas de soluciones e investigación evaluativa; siendo la mayoría artículos de estudios experimentales cuyas mayores discusiones giran en torno a: métodos, herramientas, modelos y sus implicaciones en la problemática de complejidad, escalabilidad, seguridad y privacidad y la interacción humana con la tecnología blockchain.

(Konstantinidis et al., 2018), analizaron 44 artículos relevantes indagando sobre aplicaciones y servicios de tecnología blockchain, identificando como las áreas de desarrollo más frecuente a: criptomonedas, gobierno electrónico, salud, cadena de suministro, energía y banca. A la par, encontraron que: la seguridad, la privacidad, la latencia y el costo computacional son los principales desafíos técnicos en este campo.

(Andoni et al., 2019)., revisaron de manera sistemática 140 blockchain publicados en proyectos de investigación y start-ups, mapearon del potencial y la relevancia de la tecnología para aplicaciones relacionadas con el sector energía y las clasificaron según el campo de actividad. Encontraron que los campos de mayor potencial en el sector energía se relacionaban con: 1) medición / facturación y seguridad; 2) criptomonedas, tokens e inversión; 3) comercio de energía descentralizado; 4) certificados verdes y comercio de carbono; 5) gestión de la red; 6) IoT, dispositivos inteligentes, automatización y gestión de activos; 7) movilidad eléctrica; 8) e iniciativas y consorcios de propósito general. Como retos y futuros campos de investigación, mencionaron: i) aspectos subyacentes a la

tecnología como escalabilidad, velocidad y seguridad; ii) desafíos en el desarrollo de aplicaciones blockchain como los costos y relevancia, iii) barreras significativas en la adopción de la tecnología desde el ámbito regulatorio y legal; iv) normas de protección de datos del consumidor

(Liang & Ji, 2021), desarrollaron una revisión enfocada en retos de privacidad en el desarrollo de aplicaciones blockchain basadas internet de las cosas (IoT), indagaron sobre: los retos desde privacidad en IoT y cómo el IoT se beneficia del uso de blockchain. Los investigadores encontraron 20 artículos relevantes aplicando la técnica PRISMA (Moher et al., 2015), Identificaron los siguientes beneficios de la aplicación de blockchain en IoT: reducción de costos, eliminar puntos de falla, transparencia, privacidad desde el diseño, descentralización, automatización, anonimato y descentralización. Además de retos asociados con: Solidez de algoritmos de consenso, escalabilidad, virtualización y almacenamiento del blockchain. Finalmente recomendaron como áreas de futura investigación a: i) monitoreo automatizado de la integridad de los datos en tiempo real, y ii) desarrollo en conjuntos de datos cifrados descentralizado para mantener la privacidad.

La Tabla 5 agrupa los temas en desarrollo, los retos y futuros trabajos propuestos de los artículos analizados.

Tabla 5 - Brechas temáticas encontradas en la literatura, elaboración propia

Temas/Artículos	Temas en desarrollo	Retos y futuros trabajos	
Yli-Huumo, et al;2016	Seguridad y privacidad, uso de recursos, velocidad, maleabilidad de los datos y autenticación	Latencia, monetización, soporte de los desarrolladores, hard-forks (versionado), tamaño de los bloques y anchos de banda, asimetrías en la minería de blockchain, latencia y ciber-ataques.	La escalabilidad y evaluación de la efectividad de las soluciones de blockchain desarrolladas
Corbet, et al;2018	Burbujas inherentes, alineación regulatoria, ciber-criminalidad., estructura de los criptoactivos, diversificación de beneficios, eficiencia del mercado, dinámicas de precios	Evaluar criptoactivos basado en el uso más allá del desempeño financiero, impacto ambiental de los criptoactivos, beneficios como un activo dentro de un portafolio diversificado, estudios permanentes sobre criptoactivos dada la naturaleza dinámica del tema en el cual los autores identifican futuros campos de estudio desde el punto de vista regulatorio	Potencial para el surgimiento de burbujas financieras alrededor de los criptoactivos, alineamiento con regulaciones y gobernanza, ciber-criminalidad, estructura subyacente de las criptomonedas, dinámica del precio,

			beneficios de la diversificación y regulación
Macrinici, et al;2018	Propuestas de soluciones e investigación evaluativa; siendo la mayoría artículos de estudios experimentales cuyas mayores discusiones giran en torno a: métodos, herramientas y modelos	Implicaciones en la problemática de complejidad, escalabilidad, seguridad y privacidad y la interacción humana con la tecnología blockchain	
Konstantinidis, et al;2018	Criptomonedas, gobierno electrónico, salud, cadena de suministro, energía y banca	La seguridad, la privacidad, la latencia y el costo computacional	
Andoni, et al;2019	1) medición / facturación y seguridad; 2) criptomonedas, tokens e inversión; 3) comercio de energía descentralizado; 4) certificados verdes y comercio de carbono; 5) gestión de la red; 6) IoT, dispositivos inteligentes, automatización y gestión de activos; 7) movilidad eléctrica; 8) e iniciativas y consorcios de propósito general	i) aspectos subyacentes a la tecnología como escalabilidad, velocidad y seguridad; ii) desafíos en el desarrollo de aplicaciones blockchain como los costos y relevancia, iii) barreras significativas en la adopción de la tecnología desde el ámbito regulatorio y legal; iv) normas de protección de datos del consumidor	
Liang, W; et al;2021	Reducción de costos, eliminar puntos de falla, transparencia, privacidad desde el diseño, descentralización, automatización, anonimato y descentralización	Escalabilidad, virtualización y almacenamiento para almacenar el blockchain.	i) monitoreo automatizado de la integridad de los datos en tiempo real, y ii) desarrollo en conjuntos de datos cifrados descentralizado para mantener la privacidad

Para acometer este Trabajo Final se tomaron como punto de partida las brechas temáticas mencionadas en la revisión de literatura, las cuales fueron contrastadas mediante juicio experto y benchmarking con otros trabajos similares. En el siguiente Capítulo se presenta el objetivo principal de este trabajo el cual está enfocado a identificar las oportunidades para la implementación de la tecnología blockchain en el mercado de electricidad de Colombia.

4. Capítulo Objetivos y Metodología

En este capítulo, se presentan los objetivos y métodos utilizados para la elaboración del presente trabajo. Se plantea el objetivo general, seguido de los específicos y al final, métodos y aparatos empleados en la ejecución del trabajo final de grado.

4.1 Objetivos

4.1.1 Objetivo general:

Evaluar la viabilidad de la implementación de tecnología blockchain para el mercado de electricidad en Colombia.

4.1.2 Objetivos específicos:

Objetivo específico 1:

Identificar requerimientos tecnológicos para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.

Objetivo específico 2:

Identificar requerimientos regulatorios y legales para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.

Objetivo específico 3:

Identificar requerimientos de ciber-seguridad para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.

4.2 METODOLOGÍA

El desarrollo de los capítulos temáticos busca lograr los objetivos específicos de forma individual. Se realizó una revisión terciaria de la literatura para detectar brechas temáticas y trabajos futuros identificados por varios autores relevantes. Partiendo de esta base, se

plantearon objetivos específicos que buscan ampliar el espacio de conocimiento alrededor de las cuestiones planteadas por cada uno. Se realizó un capítulo sobre los requerimientos tecnológicos y operativos, en donde se han descrito las problemáticas más relevantes para el desarrollo de aplicaciones basadas en blockchain, mencionando algunas soluciones propuestas por la comunidad de desarrolladores con relación al sector energía. Luego, se ilustran los requerimientos regulatorios, mencionando los retos desde el punto de vista del regulador del sector energía en Colombia para modernizar el sector y en consecuencia habilitar la integración de soluciones blockchain. Son mostrados los cambios regulatorios aplicados por varios gobiernos y los necesarios para el desarrollo de la tecnología en el ámbito del mercado eléctrico en Colombia. Posteriormente son tratados los requerimientos desde la Ciber-seguridad y la privacidad de datos del usuario, partiendo desde un contexto global hacia un contexto local y, enfocado en el ámbito del mercado eléctrico.

Se analizaron las oportunidades para el desarrollo de aplicaciones basadas en blockchain en la industria energética. Se tomó como referencia el trabajo de algunos autores para identificar patrones de modelos de negocios para aplicaciones basadas en blockchain desde la óptica de la cadena de valor. Esta clasificación luego fue aplicada a casos empresariales colombianos, para contrastar el estado de este tejido empresarial en el ámbito del mercado eléctrico situación en Colombia. Finalmente, en el Capítulo de conclusiones, se presentaron los resultados generales del trabajo, las conclusiones por cada objetivo específico, limitaciones y trabajos futuros.

5. Requerimientos tecnológicos para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia.

El desarrollo de los protocolos blockchain ha estimulado la creación de aplicaciones especializados por sectores e industrias, en particular en el sector energético, la aplicación de los contratos inteligentes ha permitido la descentralización de actividades comerciales y operativas, como, por ejemplo: compra/venta de electricidad entre usuarios pares (p2p trading) en microrredes no interconectadas, la trazabilidad de los certificados de emisiones generados por una planta renovable en particular, gestión documental de activos, desarrollo del servicio de movilidad eléctrica como servicio, entre otros (Pichler et al., 2019).

Tales desarrollos han requerido la solución a retos tecnológicos más allá del protocolo blockchain aplicado como el almacenamiento y distribución de la información, latencia, interoperabilidad entre protocolos, y sistemas de control y adopción. Por ejemplo, para el caso transaccional en redes p2p, la solución debe contemplar la implementación de protocolos de verificación del consumo de electricidad por medio de medidores inteligentes compatibles con el protocolo blockchain y funcionalidades de comunicación rápida de forma segura.

Thakur y Breslin (Thakur & Breslin, 2018) proponen una arquitectura basada en protocolo blockchain de formación de coaliciones distribuidas, en donde las transacciones validan estados de oferta y demanda de electricidad por medio de contratos inteligentes entre los nodos de la microrred. El algoritmo puede ser ejecutado de forma asíncrona y distribuida,

permitiendo una validación rápida con las propiedades de seguridad y privacidad de blockchain.

La convergencia de otras tecnologías ha posibilitado el uso de blockchain en problemas específicos del sector de la energía, es el caso de aplicación de equipos IOT “internet of things” para la comercialización entre redes inteligentes “Smart grids” por medio de medidores de energía inteligentes y sistemas de control automáticos, los cuales han sido susceptibles a ciber-ataques en sus tres capas funcionales: Disponibilidad, Integralidad y Confidencialidad (R.Vignesh, 2017).

Al respecto, algunos autores han propuesto la combinación de un protocolo blockchain de dos capas; la primera define, carga y encadena los contratos inteligentes en Ethereum y una segunda a nivel de usuarios (nodos, empresas, traders, etc.) que utiliza un algoritmo de consenso Prueba de Tenencia “Proof of Stake” (PoS) para validar las transacciones y que vincula el interés de los agentes en “desocupar” un almacenamiento de energía dentro de la red inteligente y que representa a un token multiplicado por el número de días que la energía está almacenada. Este protocolo permitiría habilitar la confiabilidad, la eficiencia, la flexibilidad y la seguridad en el comercio de redes inteligentes (Zheng et al., 2018).

5.1 Arquitectura y Atributos

Por otro lado, otros autores afirman que la selección de la arquitectura para el desarrollo de aplicaciones tecnológicas basadas en blockchain debe considerar el paradigma transaccional desde el diseño de la misma, es decir, qué tan abierto o cerrado es el acceso a la base de datos distribuida en la cual se correrán los algoritmos, cuáles son los protocolos asociados y fundamentalmente cómo se captura valor en las diferentes capas funcionales de la arquitectura (Melo et al., 2021).

El blockchain permite una mayor captura de valor en los niveles fundacionales del protocolo y un tanto menos en las aplicaciones construidas como segunda capa o interfase (muchas de estas propietarias), a diferencia de internet en la que las aplicaciones de más alto nivel son las que capturan la mayor cantidad de valor; ejemplo: Servicios de Correo electrónico (Yahoo-mail, Gmail etc.) los cuáles son construidos sobre el protocolo IMAP y SMTP. (H. T. M. Gamage, H. D. Weerasinghe & N. G. J. Dias, 2020).

La captura de valor a nivel del protocolo blockchain sucede porque la capa de datos compartidos en blockchain habilitó un ecosistema en el que cualquiera puede ingresar y crear aplicaciones competitivas sin restricciones en el acceso a los datos. En segundo lugar, los incentivos económicos proporcionados como tokens criptográficos (utilitarios o de aplicación) en blockchain son el otro factor clave que incentiva el desarrollo y la adopción de protocolos. De esta manera blockchain proporciona un incentivo económico para emitir tokens criptográficos digitalmente sobre una cadena de bloques existente o en una cadena de bloques completamente separada (Metcalf & Hooper, 2017). La Figura 9, ilustra la cantidad de servicios embebidos en el protocolo blockchain Ethereum, que permiten una captura de valor mayor a los desarrolladores y usuarios en comparación con internet.

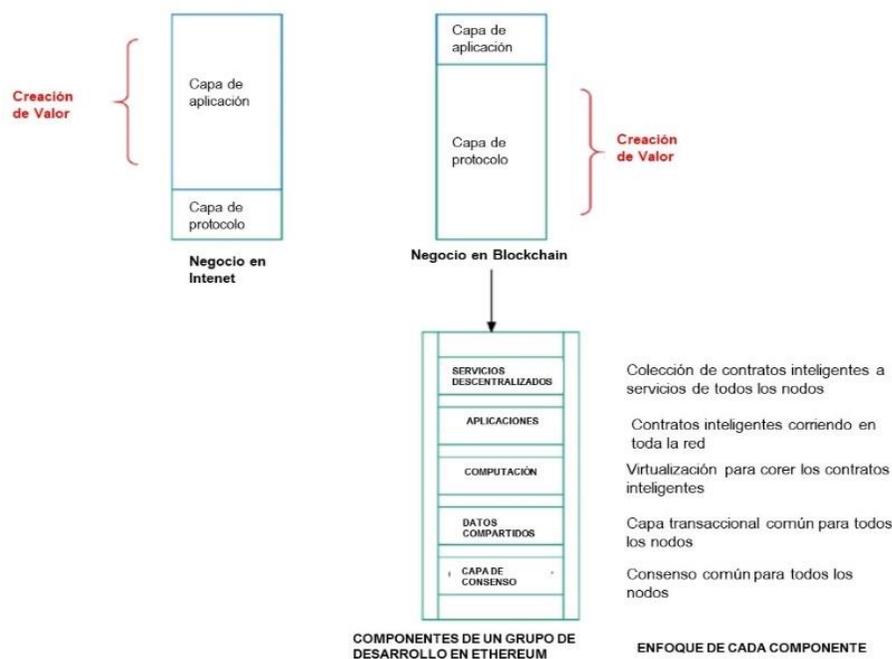


Figura 9. Esquema de captura de valor, modelo tradicional en internet, versus modelo blockchain Ethereum, tomado de (Metcalf & Hooper, 2017).

En el mismo sentido, La Tabla 6 muestra una clasificación por atributos principales en función del grado de acceso a los usuarios de diferentes tecnologías de registro distribuido (DLT), en las que se incluye Blockchain y bases de datos distribuidas.

Tabla 6. Atributos a nivel de Clase, registros distribuidos, por tipo de acceso, tomado de (H. T. M. Gamage, H. D. Weerasinghe & N. G. J. Dias, 2020);

Atributos/Clase	Blockchain sin permisos de acceso	Blockchain con permiso de acceso abiertos	Blockchain con permiso de acceso cerrados	Base de datos distribuida y de acceso restringido
Acceso público de lectura	Disponible	Disponible	No disponible	No disponible
Acceso público de escritura	Disponible	No Disponible	No disponible	No disponible
Inmutable	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Veloz	Bajo	Medio	Alto	Alto
Escalable	Bajo	Medio	Alto	Alto
Descentralizada	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Distribuida	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Auditable	Alto	Alta	Bajo	Bajo
Ejemplo	Plataformas abiertas,” sin permiso”: Bitcoin, Ethereum, LiteCoin, Monero, Lbry	Consorcios, “acceso permissionado”: Powerledger, Hyperledger, Libra	Plataforma Privada “acceso permissionado: IBM Blockchain	Bases de datos clásicas, NO es Blockchain

Otra forma de clasificación puede realizarse denotando los atributos funcionales de los protocolos asociados a cada clase, la Tabla 7 muestra una comparación de atributos entre tres de los protocolos blockchain de mayor difusión de acuerdo a (Boughaci & Boughaci, 2019), los atributos listados pueden ser de ayuda a desarrolladores al momento de seleccionar el protocolo más adecuado al ámbito del problema de interés.

Tabla 7 Atributos de protocolos blockchain de mayor difusión, tomado de (Boughaci & Boughaci, 2019)

Atributo/Protocolo	Bitcoin	Hyperledger	Ethereum
Aplicación	Cripto-moneda	Plataforma de uso general	Plataforma de uso general
Propiedad	Pública	Código abierto – Linux Foundation	Código abierto – Ethereum Foundation
Intensidad energética	Alta	Baja	Baja
Contratos inteligentes	Nativo	Dockers (aplicativo)	Máquina Virtual Ethereum
Lenguaje de programación	Golang, C++	Golang, Java	Solidity, Serpent, LLL
Modelo de Datos	Basado en transacciones	Valor clave	Basada en cuentas

Token de intercambio (moneda)	Bitcoin "BTC"	No posee	Ether "ETH"
Algoritmo de consenso	Prueba de trabajo (PoW)	Tolerancia a la falla Bizantina practica (PBFT)	Ethereum 1.0: Prueba de trabajo (PoW), Ethereum 2.0 Prueba de Tenencia (PoS) propuesto por V. Buterin

De acuerdo con esta separación los protocolos blockchain de acceso abierto (públicas o consorcios) conservan los atributos esenciales de la tecnología, como inmutabilidad, la validación descentralizada de las transacciones y la auditabilidad. Por otro lado, las plataformas de acceso privado y restringido, conservan la propiedad clásica de las bases de datos privadas. Sin embargo, ese mismo grado de acceso introduce dos problemas crecientes con el ingreso de usuarios: Escalabilidad y Velocidad. Escalabilidad entendida como la asignación de recursos de cómputo y almacenamiento requerido por cada nodo para ejecutar el protocolo y velocidad entendida como el tiempo que tarda una transacción en ser validada por los participantes del protocolo. La Figura 10 relaciona los atributos de los sistemas blockchain comparados con bases de datos convencionales en función del acceso y grado de control:

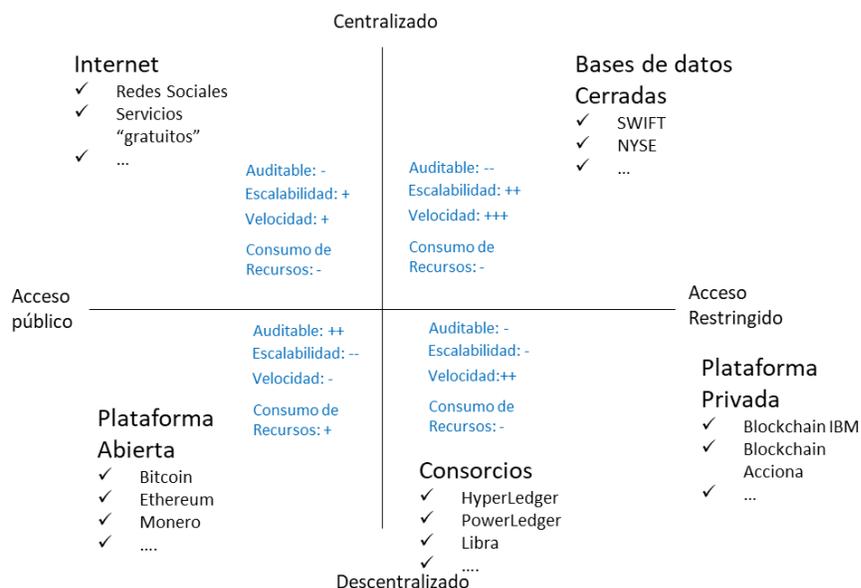


Figura 10. Gráfico relacional de atributos y tipo de arquitectura blockchain, elaboración propia

Nótese que hay una relación conceptual inversa entre la auditabilidad, la escalabilidad y consumo de recursos entre el paradigma de acceso público y descentralizado (propio de Bitcoin y Ethereum) versus el paradigma tradicional de bases de datos centralizadas y de acceso restringido (propio de bases de datos propietarias). El gradiente que relaciona estos dos paradigmas conceptualmente se identifica con “la Confianza”, es decir, cuánto menos se confíe en la gestión de una entidad centralizada y cerrada que custodie unas bases de datos, más incentivo existiría para el surgimiento de paradigmas alternos, resilientes a la concentración y dominio de alguno de los participantes del sistema. En la medida en que más y más agentes actúen en el paradigma descentralizado, la velocidad transaccional la escalabilidad, rendimiento, tiempo de verificación de transacciones y consumo de energía, seguirán siendo sus principales obstáculos a superar (Xu et al., 2018).

5.2 El dilema de la Escalabilidad vs Velocidad

En cuanto al problema de escalabilidad, algunos autores proponen estrategias de optimización del almacenamiento para mantener una cantidad mínima de datos que permitan validar las transacciones mediante programas asíncronos que corren en cada nodo. Esto también implica el desafío de determinar un conjunto de reglas para archivar y eliminar los datos. Además, de reglas para cómo se deben distribuir los datos entre los diferentes nodos, garantizando la mejor eficiencia. Por lo tanto, el equilibrio de carga en términos de cuántos y qué nodos deben usarse para validar cada transacción entre los nodos participantes es otra pregunta importante a responder.(Yang et al., 2018).

Uno de los equipos de desarrollo de Ethereum, liderado por Vitalik Buterin, ha propuesto la migración del algoritmo de consenso inicial de Prueba de Trabajo PoW a un protocolo Ethereum 2.0 basado en la Prueba de tenencia PoS con el objetivo de aumentar la escalabilidad y las velocidades de transacción sin afectar las aplicaciones ya desarrolladas en la segunda capa del protocolo, en la cual los contratos inteligentes “Smart Contracts” han encontrado aplicación. En términos generales, la propuesta consiste en modificar la primera capa del protocolo para que procese más transacciones, a pesar de que existe un límite en la capacidad de nodos dentro de la blockchain (Tao et al., 2020).

Para lo anterior es necesario que los bloques sean fáciles de leer (validar, que esté correcto, completo, etc.) y de escribir (llegar al consenso). Si es costoso leer el bloque se

podría tener la delegación de la lectura a unos pocos nodos que podrían tener el incentivo para modificar las reglas sin permiso de los demás nodos. Si es costoso escribir, varios agentes se moverían a protocolos de segunda capa para “partir” el problema en soluciones menos costosas pero que tienden a ser centralizadas, revocando el principio distribuido de blockchain, (Buterin et al., n.d.), La Figura 11 muestra el funcionamiento del protocolo al momento de llegar al consenso:

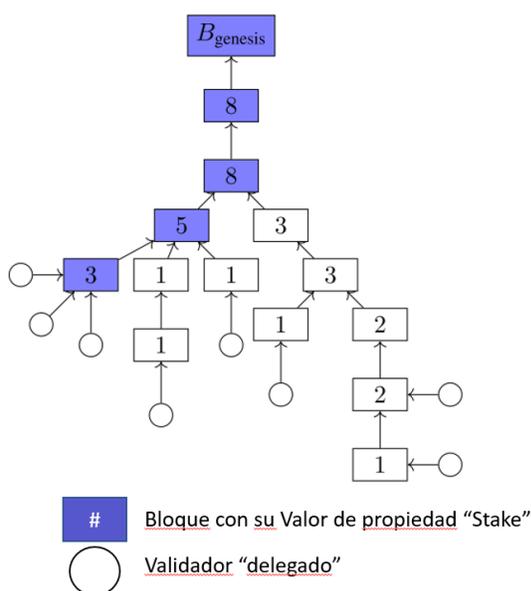


Figura 11 – Esquema del protocolo PoS de Ethereum 2, tomado de (Buterin et al., n.d.)

Cada bloque lleva un peso asociado a la tenencia (PoS) de tokens acumulados de la iteración anterior que le dio origen. El algoritmo designa, por medio de algún mecanismo aleatorio “Random Sampling” una cantidad de nodos delegados “validadores” que procesarán los bloques subsiguientes de forma asíncrona, otorgando un valor testigo o índice de 1 unidad, de tal manera que aquel bloque con mayor cantidad de testigos es delegado como el bloque líder de la siguiente iteración y tendrá el derecho a finalizar el bloque y escribir las transacciones. Este algoritmo tiene tres elementos de delegación importantes: Sharding (Buterin, 2021c), Random Sampling y Roll Up (Buterin, 2021b). A continuación, se explican estos tres elementos:

5.2.1 Sharding:

Regla que permite que cada nodo procese y almacene una pequeña porción de los datos de las transacciones entrantes en paralelo, logrando posteriormente un acuerdo global a través de un mecanismo de consenso adicional. La fragmentación de las ejecuciones de transacciones, así como la fragmentación del estado replicado, aumenta el rendimiento computacional del algoritmo; pasando de 50 segundos de tiempo de ejecución por transacción a 0.5 segundos cuando la técnica se aplica a uno de los contratos inteligentes típicos más usados como es el "Fungible Token¹" (Pirlea et al., 2021).

5.2.2 Random sampling y Zk Snarks,

El muestreo aleatorio o Random Sampling, consiste en una regla que permite seleccionar aleatoriamente una lista de nodos validadores al que se le asigna verificar un bloque (o realizar alguna otra tarea) llamado comité. Cuando un comité verifica un bloque, publica una firma que da fe de que lo hizo. Todos los demás nodos, en lugar de verificar bloques completos, ahora solo verifican sus firmas, lo que equivale a una cantidad de trabajo menor. En lugar de que cada bloque se transmita a través de la misma red P2P, cada bloque se transmite en una subred diferente, y los nodos solo necesitan unirse a las subredes correspondientes a los bloques de los que son responsables (Buterin, 2021c).

Sin embargo, esta estrategia puede presentar debilidad ante ciberataques, ya que depende de redes peer-to-peer fragmentadas, las cuales se componen de pocos nodos. Se puede mejorar la seguridad de esta regla aplicando algoritmos de criptografía como las pruebas sucintas de conocimiento cero de propósito general, generalmente llamadas zk-SNARK. Una prueba "sucinta" es aquella en la que tanto el tamaño de la prueba como el tiempo necesario para verificarla crecen mucho más lentamente que el cálculo que se va a verificar, por ejemplo, se puede idear una prueba que calcule del n-ésimo término de un polinomio, permitiendo ejecutar millones de pasos en un cálculo, sin hacer el trabajo para verificar cada paso individual directamente (Buterin, 2021a).

¹ Contrato que produce tokens indistinguibles de los demás por ende intercambiables con otros bienes o activos individuales del mismo tipo"(Mitra, 2020).

5.2.3 Roll-up

Regla que permite la asignación de nodos agregadores que centralizan un grupo de transacciones, el agregador puede ser designado de forma aleatoria y cambiar en cada iteración. El agregador comprime las transacciones para procesar sólo la información relevante que sirva para actualizar el estado de todo el sistema a todos los nodos del blockchain: Estado, balance de la cuenta y uso de memoria interna del Smart contract. Esta técnica reduce el uso de memoria por un factor de 10x. Finalmente, se añade una rutina de validación para informar a los demás nodos que los agregadores han llegado a consenso. Mediante la aplicación de esta técnica, en conjunto con Sharding y Random Sampling, se espera aumentar la escalabilidad de Ethereum a Ethereum 2.0 en un factor promedio de 100x para diferentes tipos de transacciones (Buterin, 2021b).

Los requerimientos tecnológicos para el desarrollo de aplicaciones blockchain son de diversa índole, no solamente asociados al problema intrínseco que busca resolver, sino a aspectos técnicos relacionados con el almacenamiento, procesamiento y velocidad transaccional durante su uso. En este capítulo se discutió el uso de arquitecturas de varias capas operativas que permiten aprovechar los atributos de flexibilidad, confiabilidad y seguridad de blockchain de forma modular; mediante la selección y parametrización de atributos adaptados para cada problema en particular. La arquitectura en capas también permite la captura de valor a niveles más operativos, otorgando más incentivos a los desarrolladores que implementan protocolos blockchain. Se exploró la relación inversa entre los grados de centralismo y apertura versus la escalabilidad y velocidad transaccional en diferentes protocolos blockchain; en particular, los desarrolladores de Ethereum plantean tres soluciones funcionales que permitirían aumentar eficiencias en consumo de recursos y velocidad con el crecimiento en transacciones y usuarios; sin sacrificar seguridad y privacidad.

A la par con los requerimientos tecnológicos, el desarrollo de aplicaciones blockchain debe contemplar los aspectos regulatorios y de cumplimiento que rigen el sector al cual están orientados, especialmente si estos son fuertemente regulados tales como los sectores financieros y energía. El siguiente capítulo trata sobre los requerimientos legales y regulatorios para el desarrollo de aplicaciones blockchain en el sector energía.

6.Requerimientos regulatorios y legales para el desarrollo de blockchain en el mercado de electricidad en Colombia

6.1 Regulación en el sector financiero

Instituciones gubernamentales e industrias han desplegado programas para evaluar las fortalezas y rutas necesarias para la incorporación de la tecnología blockchain en las actividades diarias. Esto se ha producido con mayor velocidad de integración en unas industrias más que otras, el sector de los servicios financieros y bancarios ha tomado el liderazgo global tanto en aspectos operativos como regulatorios. Actividades como captación, pagos, préstamos, inversiones y trading, seguimiento a transacciones, derivados financieros y moneda digital serían algunas de las beneficiadas en la industria, (Pawczuk et al., 2020).

Desde el punto de vista de oportunidades y fortalezas para el sector, algunos autores indican que se orientan a la excelencia operativa: i) mayor disciplina operativa en la cadena de valor, ii) mejoras en las capacidades y canales bancarios, iii) innovación disruptiva en operaciones tradicionales, iv) habilitar ahorros significativos en costos; al relacionamiento con clientes: i) cercanía con los usuarios, ii) activar nuevos modelos de negocio, iii) disrupción del modelo comercial de la banca, iv) desarrollo de tecnologías propias o adquisición de start up Fintech; y finalmente al impacto en el liderazgo de producto: i) desarrollo de nuevos productos, ii) rediseño de productos y servicios existentes(Rajnak & Puschmann, 2020).

Para identificar los en esta industria se realizó la encuesta global de Deloitte para 2021, la cual fue aplicada a 1280 ejecutivos senior en 10 países entre marzo y abril. La encuesta encontró que 63% de los líderes bancarios considera que la regulación de la seguridad de datos es el asunto regulatorio con más prioridad y el 71% de ellos opinó que la ciberseguridad es el principal obstáculo a resolver (Budman, 2021). Otros obstáculos relevantes pueden verse en la Figura 12.

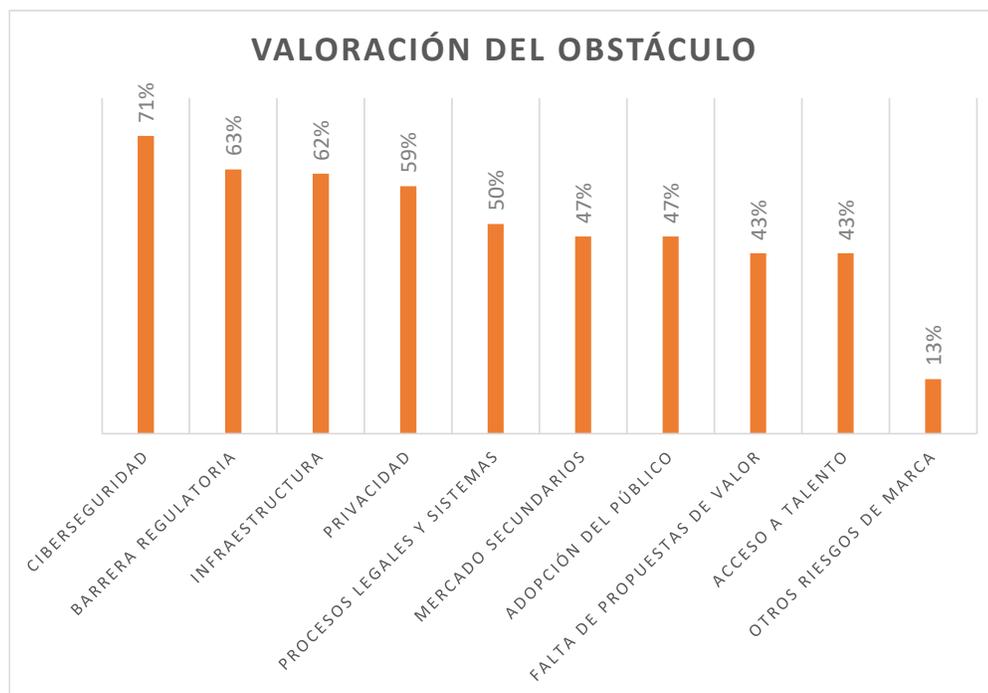


Figura 12 Obstáculos en la industria financiera, traducido de (Budman, 2021)

Otro aspecto considerado por (Boreiko et al., 2019) corresponde a la conceptualización relativa a los tokens ligados a un protocolo blockchain en particular. Es de recordar que los tokens son unidades informáticas que representan cambios en el estado del algoritmo y dan cuenta del trabajo de validación realizado por los nodos, estos son conocidos como tokens utilitarios. Cuando los tokens además otorgan derechos de lectura, escritura, almacenamiento o de votación (como es el caso del consenso “Proof of stake”) a quien los posee, se les conoce como tokens de aplicación.

Son estos últimos que otorgan un derecho de uso del protocolo, los que han sido empleados como mecanismo de captación de recursos por parte de desarrolladores en las primeras etapas de diseño y consolidación de un protocolo blockchain. Estos tokens de aplicación se ofrecen a financistas en procesos de subasta pública conocidos como Ofrecimiento de Moneda Inicial, en inglés “initial coin offerings” (ICOs). Nótese que bajo esta concepción los tokens de aplicación se equiparan con moneda y adquieren la característica de activos. En este sentido, los tokens operan como criptomonedas y pueden ser utilizadas como método de pago y potestad para ejercer derechos y accesos dentro del protocolo donde opera, y es en este sentido que adquieren las propiedades del

dinero monetario y desde el punto de vista legal, atributos asociados a valores “securities” como criptoactivos o inversiones. (Boreiko et al., 2019)

6.1.1 Regulación en países del G20

Los reguladores del sistema financiero identifican riesgos de cara a los usuarios interesados en el aspecto mercantil y bursátil de blockchain, siendo los más relevantes: los operacionales y de seguridad, riesgos de solvencia, riesgo tributario, riesgo de mercado y de contraparte. El dilema del regulador es dual, ya que debe permitir el desarrollo de aplicaciones que mejoren el desempeño general del sistema financiero y creen valor para sus agentes, pero a su vez garantizando condiciones de estabilidad, certeza y responsabilidad cuando la tecnología opera en condiciones descentralizadas, anónimas y sin intermediarios.(Priem, 2020).

Una respuesta a este dilema consiste en la creación de espacios regulatorios que permitan ejecutar “experimentos o pilotos” controlados, en el que se prueba el funcionamiento de aplicaciones, programas o actividades disruptivas a un número limitado de agentes por un periodo de tiempo suficiente y limitado, con el fin de observar las implicaciones de esta innovación antes de aprobar la regulación y escalar su implementación al sistema financiero general. Este mecanismo de innovación supervisada se conoce como areneras regulatorias o “Sandboxes” y han sido promovidas por la Comisión de la Unión Europea (Dowlat, 2018). La Tabla 8 muestra el mapa regulatorio financiero general en algunos países del G20, incluida la Unión Europea.

Tabla 8 Regulación financiera respecto a criptoactivos en países del G20, tomado de (Dowlat, 2018)

Pais	Jurisprudencia	Regulación para ICO	Regulación tributaria	Observaciones
Unión Europea	EU Fintech Action Plan	Blockchain Bundesverband Token Regulation Paper	En estudio	Utiliza SandBoxes en conjunto con organizaciones financieras basadas en tecnología Fintech
Inglaterra	FCA discussion paper, Nov 2017	Osbourne Clarke - ICOs - the legal implications - September 2017	Aplica	Se aplica impuestos a las ganancias al enajenar tokens

Estados Unidos	IRS notice 2014/21, FinCen 2013 Guidance on virtual currencies	Securities Law Framework for Blockchain Tokens	Aplica	La SEC aún no define si los criptoactivos se rigen como inversiones, valores o ambos
Alemania	Carta de recomendaciones de la BAFIN	BaFin guidance on ICOs	Aplica	Los tokens se consideran inversión y las ganancias de su enajenación se equiparan a los dividendos accionarios, por ende, sujetos a impuestos.

Los reguladores del sistema financiero en los países del G20 no han unificado los criterios para el tratamiento de criptoactivos y tokens dentro de un marco normativo común, este escenario podría retrasar el avance de iniciativas blockchain, ya que de cara al público general, los lineamientos de lo que se puede o no se puede hacer cambia de país a país y no tienen una jurisprudencia clara, aunque podría decirse que en términos regulatorios, el sistema financiero es el más avanzado a pesar de estar en etapas tempranas de desarrollo.

6.1.2 Regulación en Colombia

En Colombia y gran parte de Latinoamérica, la normatividad asociada a la integración de blockchain y paradigmas transaccionales descentralizados, también presenta un desarrollo regulatorio temprano. En 2018 el Banco de la República definió la hoja de ruta para la integración de criptoactivos al mercado de valores, lo que luego en 2019 se presentó como proyecto de ley 268 de 2019 que buscaba regular la prestación del servicio de intercambio de criptoactivos. Esta iniciativa obliga a las casas de cambio “Exchange” a mantener programas de protección de datos al usuario, gestión de riesgos, prevención de actividades ilícitas y ser sujetos de supervisión de MinTic (Ordoñez et al., 2019). Para Junio de 2021, el proyecto de ley se encuentra radicado para discusiones y aún no ha pasado a ser sancionado al congreso (Contreras, 2021).

Sin embargo, el ministerio de hacienda, alineado con las tendencias regulatorias, promulgó el decreto 1234 del 14 de septiembre de 2020, que habilitó a La Superintendencia Financiera de Colombia para la creación de un marco regulatorio experimental llamada LaArenera (Sandbox) que permite la ejecución de pilotos en actividades que aún no se encuentran completamente reguladas por parte de agentes de la industria. En particular, LaArenera ha implementado dos pilotos para evaluar: 1) la implementación de blockchain

para optimizar las transacciones de bonos financieros en el mercado secundario de valores, que permitirá la creación, monitoreo, registro, liquidación y validación de estos instrumentos a partir de contratos inteligentes, el piloto está liderado por el Banco de la República, el BID y Davivienda. (Superfinanciera, 2021) y 2) de la misma forma probar en el espacio controlado de laArenera, el manejo de operaciones de cash-in (depósito de recursos) y cash-out (retiro de recursos) bajo un conjunto de condiciones y requerimientos definidos para realizar la prueba piloto con plataformas de intercambio de criptoactivos (Exchange) debidamente constituidas en Colombia (Sociedades, 2020).

Ambas iniciativas muestran la importancia de los ambientes controlados para permitir la experimentación con tecnologías disruptivas que de otro lado sería muy difícil y hasta prohibido dentro de industrias fuertemente reguladas como la Financiera y la Energética.

6.2 Regulación en el sector de la energía

Como contraste, la industria energética viene en un proceso de liberación de mercados desde mediados de los 80's, cambiando el paradigma de un modelo centralizado en la generación y distribución a otro centrado en modelos de negocio desde la demanda y la generación descentralizada, habilitando el surgimiento de nuevos agentes y roles, por ejemplo, el de prosumidor.

Las reformas regulatorias del mercado mayorista y minorista han creado un ecosistema de relaciones conocido como el internet de la energía, en el cual las estructuras transaccionales y de flujo de información son más abiertas, la energía se genera de forma descentralizada y las conexiones par a par (p2p) se fortalecen (G. Liu et al., 2019). El paradigma relacional en el internet de la energía puede ser representada en la Figura 13, en la cual aparecen nuevos agentes, algunos agentes existentes se modifican y actualizan su comportamiento, y surgen nuevas relaciones entre ellos:

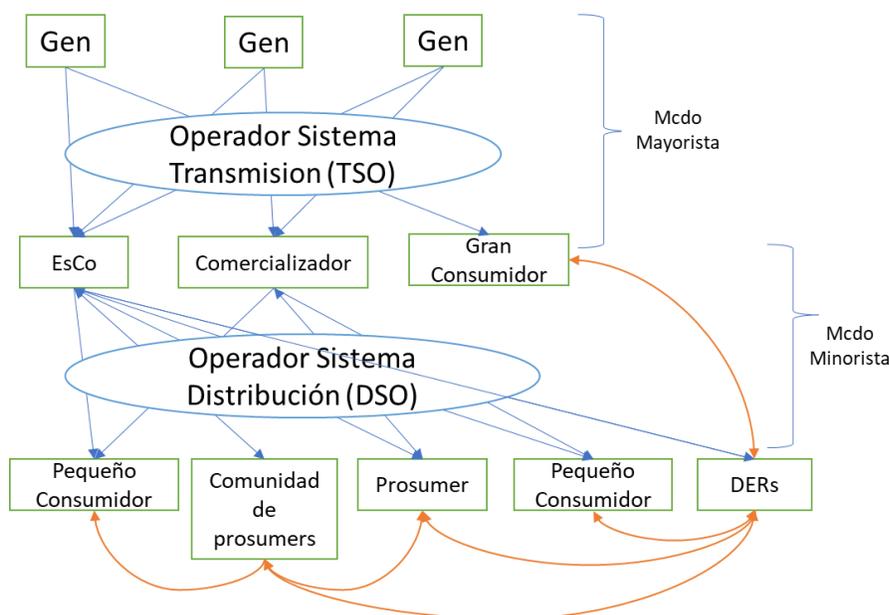


Figura 13 Internet de la Energía, adaptado de (Cao, 2019)

Nótese que las relaciones bidireccionales entre algunos agentes también se dan de forma paralela, es decir, en el mercado minorista pequeños consumidores y prosumidores pueden relacionarse de forma directa intercambiando energía e información, esto último en el concepto de energía transactiva.

Algunos autores como (Cao, 2019) han identificado el potencial de blockchain aplicado al mercado energético Chino, específicamente para mediar las interrelaciones en los agentes en el Internet de la Energía y resolver retos tecnológicos y regulatorios, tal y como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Oportunidades y retos en el Internet de la Energía, tomado de (Cao, 2019).

	Generación	Transmisión y Distribución	Gestión de cargas y Demanda
Problemática	Integración operativa de Generadores Distribuidos	Aleatoriedad y desbalances en el control de las redes	Señal de precio bidireccional que remunere a los agentes,
Oportunidades	Automatizar y optimizar la generación Mercado de servicios auxiliares descentralizado	Gestión descentralizada de las redes	Integrar señales de consumo inteligente Plantas Virtuales Mercado de Certificados de Energía Renovables

Retos Técnicos	Interoperabilidad de los controladores maestros de las plantas	Bajo nivel de inteligencia en todas las redes	Medición unificada de flujos de energía, medidores AMI
Retos Regulatorios	Eliminar barreras monopolísticas, brindar espacios de experimentación regulatoria, supervisar el mercado	Política para la gestión y protección de grandes cantidades de información y controlar posición dominante de algunos agentes	Protección a la privacidad de los datos

Es importante notar que los retos tecnológicos se concentran alrededor de la integración de arquitecturas de control, comunicación y redes, mientras que los regulatorios gravitan en el campo de la gestión y la privacidad de la información y, en un nivel macro, políticas normativas y regulatorias al monopolio industrial, obstáculos a la competencia e interacción con los mercados financieros.

Ambos conceptos de Energía Transactiva y el Internet de la Energía, requieren una serie de reformas y cambios liderados por la política pública a cargo del regulador del mercado energético que permita: a) Implementar procesos altamente coordinados de optimización, b) mantener control y confiabilidad a la par de integración de generadores distribuidos y DERs, c) proveer participación sin discriminación de agentes, d) crear interfaces auditables y transparentes y e) mantener altos estándares de desempeño del sistema.

6.2.1 Regulación en países desarrollados

Algunos países han marcado mapas regulatorios de largo plazo como es el caso de Estados Unidos, con una visión de reforma completa de los mercados para el año 2050, la cual contiene cuatro fases: Desarrollo de estándares y pilotos demostrativos de energía transactiva (2011-2015), despliegue regional de proyectos de energía transactiva en zonas con flexibilidad y apoyo regulatorio (2015-2020), despliegue general en la mayoría de mercados energéticos y sus interfaces entre mercados regionales (2016 -2030) y transformación completa del mercado (2020 -2050), (Chen et al., 2019).

China a través de su Administración Nacional Energía emitió la primera normativa que reconoce la posibilidad de transacciones bidireccionales de energía entre consumidores en 2013, y para 2017, aprobó la creación de cuatro estructuras transaccionales en su

mercado de energía: Autogeneración con exportación de excedentes a la red, generación distribuida 100% a la red, transacciones par a par (p2p) y comisión por venta de electricidad producida regionalmente (Yan et al., 2017).

6.2.2 Regulación en Colombia

En el ámbito local en Colombia, los primeros pasos para la transición a una arquitectura descentralizada de los mercados eléctricos empiezan a darse en 2018, con la publicación de un documento de trabajo por Fedesarrollo que luego se convirtió en guía para la constitución de la misión de la transformación energética (MTE), la cual fue promulgada por parte del Ministerio de Minas en 2019, el documento de Fedesarrollo identificó tres dimensiones medulares con problemas estructurales que requieren modernización: Operatividad y confiabilidad del sistema, estructura de mercado y cambios tecnológicos emergentes (Benavides et al., 2018). Los ejes temáticos, oportunidades y propuestas se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensiones prioritarias para la transición energética en Colombia, tomado de (Benavides et al., 2018).

Dimensiones>	Operatividad del sistema	Estructura del mercado	Cambios tecnológicos
Problemática	Confiabilidad y vulnerabilidad del sistema ante cambio climático Reforma 1994	Competencia reducida Riesgo Sistémico en la Generación	Falta Integración de nuevas fuentes de generación FNCER y sus modelos transaccionales
Oportunidades	Gas Natural como soporte de la confiabilidad	Democratización y descentralización	Fomentar Fuentes no Convencionales y habilitar y los Recursos Energéticos Distribuidos DERs
Propuestas Técnicas	Planeación integrada de recursos Re-gasificadora del Pacífico	Mercado de Servicios Auxiliares	Aportes de las FNCER al portafolio de Generación
Propuestas Regulatorias	Coordinación del ISO, DSO y demás agentes	Mercado de Contratos Regulación favorable a nuevos actores	Subastas para FNCER Pilotos de adopción modelos transactivos/descentralizados

Nótese, que algunas dimensiones temáticas para el mercado colombiano coinciden con aquellos encontrados en los mercados arriba mencionados, en especial la integración de tecnologías de Generación, el acceso al mercado mayorista y minorista de nuevos agentes y la coordinación en el control operativo y transaccional son reiterados.

Sin embargo, dadas las vulnerabilidades de la estructura de generación en Colombia, se propone un cambio en el combustible para la generación de Carbón a Gas Natural, y así garantizar la confiabilidad del sistema ante el cambio climático.

Posteriormente el Ministerio de Minas y Energía (MME) desarrolló en 2019 la primera fase de la Misión de Transformación Energética (MTE), contando con la participación de 19 expertos nacionales e internacionales, los cuales adelantaron estudios para identificar ajustes al marco regulatorio y avanzar en la modernización del mercado y de la red eléctrica, los ejes temáticos se centraron en:

- (i) Competencia, participación y estructura del mercado eléctrico.
- (ii) El rol del gas en la transformación energética.
- (iii) Descentralización, digitalización y gestión eficiente de la demanda.
- (iv) Cierre de brechas, mejora de la calidad y diseño y formulación eficiente de subsidios.
- (v) Revisión del marco institucional y regulatorio.

Sin desligar la interrelación de los ejes temáticos, cabe anotar, que el foco (iii) exploró la descentralización, digitalización y gestión eficiente de la demanda, que suponen una economía altamente electrificada y con niveles superiores de consumo de energía eléctrica, foco que propone la implementación de seis actividades dentro del mapa regulatorio futuro, los cuáles se muestran en la Figura 14.

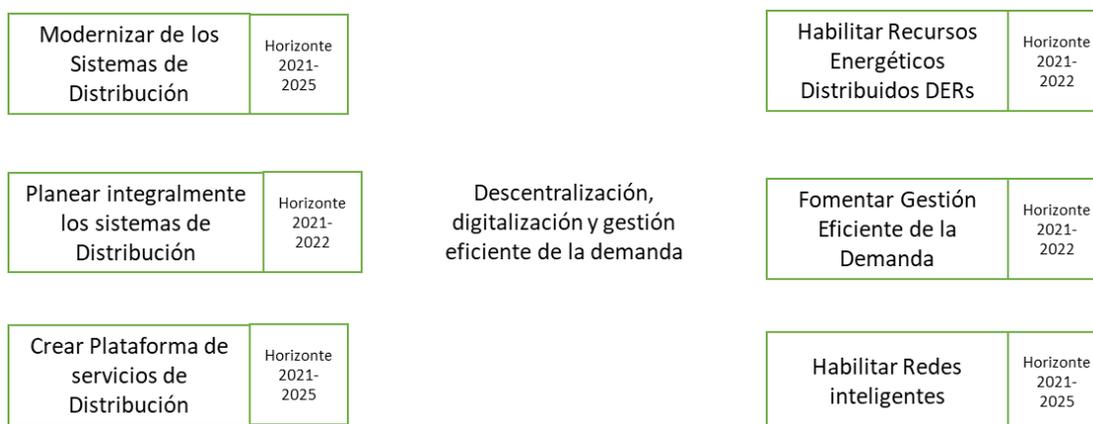


Figura 14: Tareas Foco (iii) Misión Energética, tomado de (Suárez, 2018)

Las actividades propuestas conceptualizan una red eléctrica de distribución en el largo plazo, con un esquema de control híbrido descentralizado, en el que se tendría un centro de control regional o local en cada subestación de Alta Tensión/Media Tensión del sistema del operador. Los elementos esenciales para abrir la red a nuevos agentes, tecnologías y esquemas transaccionales propuestos serían: Diseño de tarifas reguladas para usuarios finales, despliegue de infraestructura de medición inteligente (AMI), gestión eficiente de la demanda, planificación y remuneración de los sistemas de distribución, aumento de la visibilidad y transparencia de los sistemas de distribución, creación de plataformas distribuidas para compra de servicios de red, Incorporación de recursos distribuidos (DER) y el nuevo papel del distribuidor (Cadena, 2020).

Los cambios regulatorios se deben centrar en la modificación de los decretos relacionados con la reglamentación del Sector Administrativo de Minas y Energía para incorporar una política pública que permita la innovación de productos, modelos de negocio y servicios en el sector. La Tabla 11 detalla las acciones regulatorias necesarias para la transición del mercado energético colombiano a uno descentralizado y digitalizado. La explicación detallada de cada elemento por parte del estudio del MTE, se pueden consultar en el Anexo C: Prioridades Regulatorias MTE, modernización del mercado energético Colombia.

Tabla 11 Prioridades de cambios Regulatorios para promover Internet de la Energía y aplicaciones Blockchain

Prioridad del Regulador	Recomendación de la MTE	Ajustes normativos identificados como necesarios	Efectos sobre Internet de la Energía y blockchain
-------------------------	-------------------------	--	---

Aumento visibilidad y transparencia sistemas de distribución	Operadores del sistema de distribución (despliegue de AMI y administración de información)	Expedir regulación que reglamenta	En el largo plazo, la centralización de la gestión de medición y compilación de la información de los agentes del mercado podría elevar la vulnerabilidad del sistema ante ciberataques, salidas por contingencias del servicio y eventos no previstos
Desintegración vertical de actividades de energía eléctrica	Nuevo comercializador/nuevos agentes pueden ejercer sin restricciones: C, agregación, GD, GSE y CUR.	Complementar la Resolución CREG 128 de 1996: participación en las actividades de generación, distribución y comercialización de electricidad.	Las nuevas actividades desagregadas presentan oportunidades para la prestación de servicios descentralizados y regionales que mediante blockchain, permitirán la coordinación entre los agentes sin incrementar los costos transaccionales si este modelo se gestionara de forma centralizada
Gestión eficiente de la demanda de energía eléctrica	Participación de la Demanda en el mercado spot	Modificar la Resolución CREG 011 de 2015 Programa de respuesta de la demanda para el mercado diario Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - Reglamento de Operación Mercado Mayorista Modificar Resolución CREG 029 de 2016 Esquema de tarifas diferenciales costos del servicio a usuarios regulados en el SIN.	Permite que los prosumidores participen en el mercado abierto de energía a través de DERs de su propiedad
Mercado de corto plazo de energía eléctrica. Precios nodales	Sofisticación de ofertas	Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - aspectos comerciales del mercado mayorista (MME) de energía en el SIN. Modificación a la Resolución CREG 051 de 2009 - Esquema de ofertas de precios, el Despacho Ideal y las reglas para determinar el precio de la Bolsa en el Mercado Energía Mayorista. Expedición de una regulación que ajuste la remuneración a XM S.A. ESP de los servicios regulados del CND, ASIC y LAC para el año de implementación de la medida	Mercado transaccional de energía eléctrica en tiempo real. Permite conocer señales de precio y cantidad ajustándose a variaciones de oferta y demanda en tiempo real
Mercado de mediano plazo y comercialización de energía eléctrica. Negociación directa de los usuarios no regulados con los generadores	Multi-comercializador	Modificar la Resolución CREG 122 de 2003 Por la cual se regulan aspectos comerciales del mercado mayorista de energía eléctrica en el SIN Modificar la Resolución CREG 156 de 2011 Por la cual se establece el Reglamento de Comercialización del servicio público de energía eléctrica, como parte del Reglamento de Operación	Permite la libre contratación de comercializadores en una misma frontera, permitiendo al prosumidor contratar esquemas de abastecimiento en cantidades y precios optimizando su Demanda
Mercado de mediano plazo y comercialización de energía eléctrica. Negociación directa de los usuarios no	Bajar umbral de Usuario NO Regulado (UNR)	Modificar la Resolución CREG 131 de 1998 Se dictan disposiciones adicionales sobre el mercado competitivo de energía eléctrica.	Permite la contratación por parte del prosumer de tarifas en donde la G y la C provienen de la competencia de mercado

regulados con los generadores			
Modernización de la red de distribución para incorporar recursos energéticos	“Plataformas comerciales entre consumidores”	Modificar la Resolución CREG 030 de 2018 y 24 de 2015	Permite transacciones directas entre Comercializadores, Consumidores (prosumers) habilitando las transacciones Peer to Peer
	Reglas para priorización de servicios de SAEB de múltiples usos	CREG deberá expedir una regulación que establezca las reglas para los demás servicios que puedan prestar los servicios de almacenamiento	Permitiría definir las condiciones de despacho de los SAEB dadas las prioridades definidas por el regulador, generando flujos económicos a diferentes servicios prestados por el prosumidor
	Plataformas distribuidas: subasta de productos de red de largo plazo	Expedir Resolución que complemente la figura del Cargo por concepto del plan de reducción de pérdidas no técnicas CPROG, la actualización de planes de inversión y/o las unidades constructivas especiales en la Resolución CREG 015 de 2018, mediante areneras	La formación de un mercado de energía descentralizado permite que nuevos agentes participen en condiciones de competencia con servicios de valor para la red operada por los DSO
Redes y conexiones de energía eléctrica. Planificación de la distribución	Valorar aporte de DERs como base para el desarrollo de políticas, planificación de recursos y la participación del cliente	Dos alternativas: a) Modificación de la Resolución CREG 025 de 1995. Código de Redes, b) Expedición de una resolución por el Minenergía estableciendo criterios para el planeamiento de la transmisión y distribución, según el artículo 18 de la Ley 143 de 1994 y el artículo 5 del Decreto 381 de 2012	Permite la remuneración de los DERS, habilitando flujos de ingresos provenientes de la Energía localizada (generación/almacenamiento) y servicios auxiliares para confiabilidad
	Respuesta a la demanda y DERS	Modificar Resolución CREG 029 de 2016 esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía. Modificar la Resolución CREG 011 de 2015 Por la cual se regula el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica. Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - Reglamento de Operación Mercado Mayorista	Permite gestión inteligente de la demanda en tiempo real y su remuneración acorde a fluctuaciones operativas y del precio
Reformas a XM S.A. E.S.P. como operador del sistema	Medidas Regulatorias	Expedición de una resolución de la CREG reglamentando la actividad de monitoreo, creada por el artículo 2 de la Res. Creg 091 de 2007	Oportunidad para desarrollar servicios de medición inteligente distribuida garantizando privacidad, transparencia y economía de escala

Suficiencia de suministro de energía eléctrica. Reforma del Cargo por Confiabilidad con evaluación de impacto de migrar al esquema contractual	Contratos estandarizados ajustados a demanda horaria vía subastas periódicas, con amplio horizonte de planeación y duración (mayor 5 años)	No se requiere ajuste normativo dada la flexibilidad de la Resolución CREG 114 de 2018 para que los Mecanismos de Comercialización ofrezcan este producto.	Permite la programación de contratos inteligentes estandarizados bajo la normativa actual y personalizar los horizontes de entrega y realización de estas
	Alternativa a la obligatoriedad: Liberación del precio spot	Modificación de la Resolución CREG 119 de 1998. Por la cual se modifican y complementan algunas de las disposiciones contenidas en la Resolución CREG-217 de 1997, que establece el Estatuto de Racionamiento, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.	Permitiría el arbitraje económico de los prosumers para decidir si vender/comprar electricidad en función de la fluctuación horaria del precio Spot, mejorando la rentabilidad de sus activos energéticos distribuidos
UPME como Oficial de Información del Sector de energía eléctrica y gas natural	Interoperabilidad	Emitir regulación CREG y establecer qué puede ser reglamentado por el CNO Modificar la Resolución CREG 038 de 2014 Por la cual se modifica el Código de Medida contenido en el Anexo General del Código de Redes.	El protocolo blockchain de segunda generación, permite parametrizar capas interoperables entre los contratos inteligentes y las arquitecturas de gestión
	Acceso a datos	Emitir regulación CREG y establecer qué puede ser reglamentado por el CNO Modificar la Resolución CREG 038 de 2014 Por la cual se modifica el Código de Medida contenido en el Anexo General del Código de Redes.	El protocolo blockchain de segunda generación, permite parametrizar validación transaccional de los agentes garantizando anonimato y protección de identidad. Las cuales pueden ser liberadas por decisión del agente a través de funcionalidades o instrucciones embebidas en los contratos. El usuario/nodo tiene libertad para elegir que información sería revelada
	Confidencialidad de los datos	Modificar Resolución CREG 030 de 2018 Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional	los contratos inteligentes permiten la parametrización de funcionalidades o instrucciones embebidas que permitan elegir qué información sería revelada a quienes y en qué condiciones
	Gestor de información del resto del sector o gestor general	No requiere ajuste regulatorio	Oportunidad para desarrollar servicios de medición inteligente distribuida garantizando privacidad, transparencia y economía de escala
Uso de areneras para permitir la innovación de productos, modelos de negocio y servicios	Pilotos para factibilidad técnica y económica	Implementación de proyectos piloto se puede a través de areneras Modificar Resolución CREG 030 de 2018 Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional	Las Areneras o SandBox permiten la prueba en tiempo real de arquitecturas transaccionales disruptivas como Blockchain aplicado a mercados p2p

Prosumer / Comunidades de usuarios	Modificar la Resolución CREG 108 de 1997 Criterios generales sobre protección de los derechos de los usuarios de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible por red física, Modificar la Resolución CREG 156 de 2011 Reglamento de Comercialización del servicio público de energía eléctrica. Modificar la Resolución CREG 157 de 2011 Normas sobre el registro de fronteras comerciales y contratos de energía de largo plazo, y se adoptan otras disposiciones	Aceptar la existencia de prosumidores y comunidades/cooperativas de usuarios como agentes del mercado permitirá transacciones legalmente aceptadas entre estos y los demás agentes del mercado eléctrico
Microrredes	Complementar la Resolución CREG 015 de 2018 Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional	La coordinación y reporte de usuarios en las microrredes puede operarse a través de protocolos blockchain de arquitectura privada o híbrida, garantizando el anonimato y transparencia de la información suministrada entre los diferentes agentes
Microrredes y unbundling	Expedir regulación reglamentando las reglas de desintegración vertical y la relación promotor de la microrred y el distribuidor	Permitirá la prestación de servicios de valor agregado del prosumidor hacia el Distribuidor persiguiendo objetivos de calidad y confiabilidad
Uso de Areneras o laboratorios de innovación	Alternativa 1: Minenergía emite señal de política pública indicando qué debe cumplir arenera, iniciativa de oficio o privada y su interrelación con la regulación Alternativa 2: Expedir regulación de la CREG identificando la oportunidad de arenera, poner reglas de escenario controlado, revisar la evolución y conflicto de interés.	Cuando la arenera requiera de una "exención regulatoria", Se requiere de la iniciativa CREG para su adopción. Cuando la arenera sea para evaluar si se regula o no una actividad, la iniciativa puede venir por el Minenergía con apoyo de la UPME

Nótese que son 22 actividades de modificación regulatoria en los 5 focos de trabajo que se relacionan directamente con elementos funcionales del Internet de la Energía, posibilitando la digitalización de un sistema energético descentralizado, lo que en últimas abrirá oportunidades para el desarrollo de modelos de negocios y aplicaciones blockchain.

Es de importancia remarcar la adopción del mecanismo de areneras regulatorias en el mercado energético por parte del regulador, de forma similar a lo sucedido con el mercado financiero. El mecanismo otorgaría 24 meses a los agentes sujetos a la arenera para llevar a cabo el experimento, el cual se otorgaría por el regulador siempre que: 1. La propuesta

no está en el mercado o es lo suficientemente diferente de procesos actuales, 2. El proceso traerá beneficios a los consumidores 3) La empresa debe presentar un análisis y plan de mitigación de riesgos durante el período de la prueba y 4) demostrar que una imposición regulatoria impide la innovación.

En este capítulo se exploró el estado de la regulación en el sector financiero y energía, respecto al uso y aplicación de protocolos blockchain y criptoactivos, en varios países del mundo y en Colombia. Se contrastaron los beneficios en términos de valor y los obstáculos más relevantes para la implementación de soluciones blockchain en ambas industrias; encontrando que las barreras regulatorias y la ciberseguridad son los más frecuentes. En términos regulatorios el sector financiero ha buscado la protección del usuario de cara a la inversión en criptoactivos y legislación en tópicos taxativos a los rendimientos derivados de su comercialización, pero sin criterios unificados internacionalmente. En el sector de la energía los reguladores se ha enfocado en liberar y relajar restricciones de mercado, posibilitando el desarrollo de soluciones blockchain en la cadena de valor del sector tales como: la integración de la generación distribuida, la comercialización de energía entre prosumidores y otros agentes, y la gestión dinámica de los DERs en la llamada internet de la energía.

Finalmente, se mostró el avance de la misión de transformación energética de Colombia, que ha propuesto cambios regulatorios que habilitarían el desarrollo de aplicaciones blockchain para el sector, en particular, la adopción del mecanismo de areneras regulatorias que permitiría experimentar innovaciones en el sector de forma controlada, supervisada y escalonada, de la misma forma que el sector financiero las ha implementado exitosamente. En referente a los aspectos de ciberseguridad, el siguiente capítulo explora los requerimientos para aplicaciones blockchain y su rol en el sector energía.

7.Requerimientos de ciberseguridad para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia.

Junto con el transporte, el suministro de agua y las telecomunicaciones, la provisión de energía eléctrica se considera un servicio de infraestructura crítica. Su interrupción puede causar daños económicos importantes e incluso pérdidas humanas. Todas las infraestructuras críticas tienen vulnerabilidades inherentes. En particular con el advenimiento del internet de la energía, la integración de los DERs y la liberación de los mercados, ha sido necesario el despliegue de tecnologías de medición avanzada inteligentes AMI y dispositivos IoT que se conecten a través de internet de forma permanente, aumentando el riesgo de intromisiones no autorizadas y adicionando vulnerabilidades a la red eléctrica vía ataques a la seguridad electrónica (Burger et al., 2018).

Los reguladores han definido estándares para la seguridad de los dispositivos de medición que incluyan protocolos la autenticación de identidad, encriptación de los canales de comunicación y la seguridad en el almacenamiento de datos, bajo lineamientos de legales de protección de datos. Las capacidades criptográficas, descentralizadas y autónomas de la tecnología blockchain pueden ayudar a solucionar esta problemática emergente en el sector de la energía (Pichler et al., 2019).

7.1 Blockchain como habilitador de la seguridad en el internet de la energía

En el contexto del internet de la energía surgió un nuevo paradigma del consumidor y productor de energía distribuido, el prosumidor. Esto sucede cuando usuarios convencionales instalan sistemas de generación distribuida como la solar fotovoltaica, para suplir sus consumos y exportar los excedentes de generación a la red o a otros usuarios.

En este contexto las transacciones comerciales se dan directamente entre usuarios (peer to peer) y comercializadores del servicio de energía. Knirsch y otros (Knirsch et al., 2019), demuestran como un protocolo blockchain de acceso restringido (consorcio) y basado en una red privada, puede aplicarse al caso de plantas solares comunitarias, en las que un grupo de usuarios-inversionistas comparten los beneficios y excedentes energéticos, en un entorno de pocos usuarios que no confían entre ellos y en los cuales existe el incentivo de sobre ofertar los excedentes energéticos con fines de lucro.

La plataforma blockchain propuesta se clasifica como un consorcio compuesto por los prosumidores y operadores de redes, siendo estos últimos los que asignan permisos a nuevos clientes. Estos permisos permiten a los clientes interactuar, leer y escribir en el blockchain. Se tiene un proceso de revocación que garantiza que los usuarios inactivos ya no participen en la plataforma. Esta propuesta resuelve los limitantes de escalabilidad y seguridad al permitir que sólo los participantes deleguen a los comercializadores de energía el acceso de nuevos participantes, pero sin perder las propiedades de encriptación y registro descentralizado que sigue permaneciendo en poder de los nodos (Knirsch et al., 2019). La Figura 15 muestra el esquema de operación de este tipo de protocolo blockchain tipo consorcio con acceso privado.

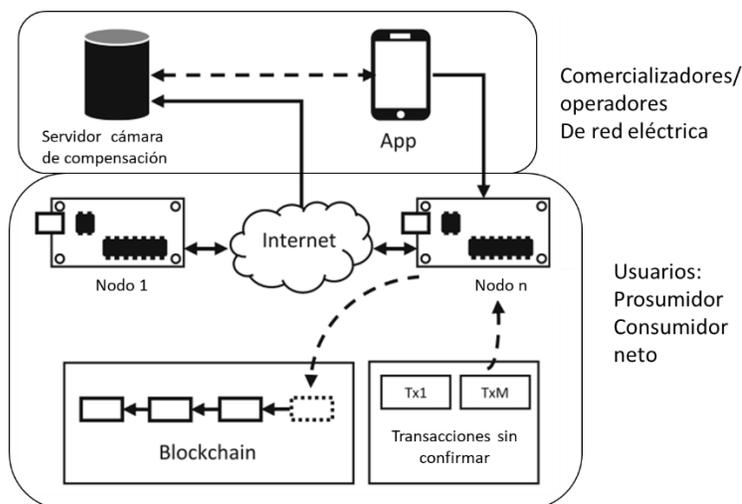


Figura 15. Diagrama de procesos de un consorcio blockchain entre prosumidores y comercializadores de energía, tomado de (Knirsch et al., 2019)

Nótese que en el paradigma del protocolo blockchain tipo consorcio, la validación se realiza a través de dispositivos de medición avanzada de energía (AMI) que tienen suficiente capacidad de cómputo para correr parte del algoritmo criptográfico (cifrado y firma pública) en la que incluyen el estado de generación y balance de importaciones/exportaciones de energía. Los comercializadores cruzan los balances de los nodos participantes actualizando el estado de todo el sistema.

Proyectos blockchain con este enfoque han sido propuesto por otros autores: Un consorcio blockchain para el comercio de electricidad entre comunidades de prosumidores, comercializadores apalancado en el protocolo Hyperledger fue auspiciado por el gobierno irlandés (Verma et al., 2018); un protocolo blockchain de acceso abierto que utiliza un procesador criptográfico embebido en los paneles solares a través de un dispositivo IoT y que se comunica vía Internet a los nodos que corren el resto del protocolo blockchain (Mallett, 2018); un piloto de 75 prosumidores en Suiza para comercio en un mercado p2p basado en la disponibilidad de recurso local y subastas en tiempo real entre oferentes y compradores fue habilitado mediante un blockchain de acceso abierto basado en Tendermint (Wörner et al., 2019)

7.2 Requerimientos de ciber seguridad en Colombia

En Colombia, la normativa aplicable al ámbito de la ciberseguridad en el sector energía es relativamente reciente, la circular CREG 072 de 2019 y el documento CREG 065 de 2019, definieron la consulta pública para la estrategia integral de ciberseguridad del sector eléctrico, la cual identificó tres tendencias que aumentan la vulnerabilidad del sector ante ataques cibernéticos: a. La digitalización de la economía y del sector eléctrico, b. La transformación del sector eléctrico y c. La electrificación de la economía (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2019).

Los modos de falla potenciales asociados a la ciberseguridad son estructurales y derivados de: i) La creciente integración de tecnologías de información, IT, con tecnologías de operación, OT, ii) La incorporación de redes inteligentes en la operación del sector eléctrico, iii) La falta de conciencia sobre los problemas asociados con incidentes de seguridad digital por parte de los agentes y usuarios. iv) La protección exclusiva de ciber-activos críticos, iv) La falta de una estrategia integral de seguridad digital vi) Los bajos recursos destinados al aseguramiento de los sistemas de operación y de información. vii) La incorporación de nuevas tecnologías a la red sin considerar aspectos de seguridad digital (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2019).

A la par, el Consejo Nacional de Operación CNO, en su acuerdo 1347 de 16/9/2020, definió los lineamientos de ciberseguridad para todos los agentes del sistema eléctrico colombiano, en el cual exigió la creación de: políticas o lineamiento de ciberseguridad, actualización de inventarios de ciber-activos, la actualización de análisis de riesgos y vulnerabilidades, la actualización del nivel de gestión de ciberseguridad y la creación de un plan de entrenamiento en un plazo no mayor a 24 meses (Guía de Ciberseguridad, 2019).

Desde el punto de vista de la cadena de valor del sector, Deloitte identificó aspectos operativos e informáticos claves de ciberseguridad en el sector energía, puntualizando los aspectos de integridad, confidencialidad y seguridad como los objetivos primordiales de la implementación de una política de ciberseguridad, (Deloitte; Fortinet, 2020), la Tabla 12 muestra la totalidad de los aspectos mencionados.

Tabla 12 Aspectos de ciberseguridad operativos e informáticos en el sector energía, tomado de (Deloitte; Fortinet, 2020)

	Ambientes Operacionales	Ambientes informáticos
Información	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecución de cambios o detección de dispositivos físicos, procesos y eventos 	<ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento, manipulación, obtención y transmisión
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad física (clientes y trabajadores) 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad
	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Integridad
	<ul style="list-style-type: none"> • Integridad 	<ul style="list-style-type: none"> • Confidencialidad
	<ul style="list-style-type: none"> • Confidencialidad 	
Impacto por ciberataque	<ul style="list-style-type: none"> • Daño ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de Información
	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de vida 	<ul style="list-style-type: none"> • Disrupción de Operaciones
	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de ingresos por minuto/hora 	<ul style="list-style-type: none"> • Daño reputacional
	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo a seguridad nacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de información sensible
	<ul style="list-style-type: none"> • Disrupción a cadena de suministro 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Daño reputacional 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Penalidades regulatorias 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de información 	
Parchado	<ul style="list-style-type: none"> • Complejo de ejecutar 	<ul style="list-style-type: none"> • Programadas oportunamente
	<ul style="list-style-type: none"> • Realizado por fabricantes (remotamente) 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizada por equipo de IT/Ciclo
Ciclo de vida	<ul style="list-style-type: none"> • vida-20-30 años, cada vez menor debido a convergencia 	<ul style="list-style-type: none"> • IT-3-5 años con IT
Procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado, desactualizados 	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente escalable

Es importante anotar que Deloitte propone un esquema de cinco niveles para la implementación de una estrategia empresarial robusta de ciberseguridad para los agentes del sector eléctrico: Nivel 0 de procesos, Nivel 2 de control supervisado, Nivel 3 de autenticación operativa, Nivel 4 de planificación comercial y Nivel 5 de arquitectura de ERP, en la cual no consideró aún la aplicación de aplicaciones criptográficas basadas en blockchain para asegurar la privacidad y validación en dispositivos IoT ni en módulos transaccionales en el nivel comercial o empresaria (Deloitte; Fortinet, 2020).

En este capítulo se trató un aspecto específico de la ciberseguridad asociada al desarrollo de protocolos blockchain para el sector energía y es el relacionado con la interoperabilidad y seguridad transaccional en el uso de dispositivos IoT y AMI, los cuales son esenciales para la modernización del mercado energético y para la evolución del internet de la energía. Se mostró que los atributos blockchain de: privacidad, encriptamiento de datos y almacenamiento y procesamiento de transacciones de forma descentralizada, asisten en el aseguramiento de estos dispositivos ante ciberataques. Para el sector energía en Colombia, se contrastaron las iniciativas regulatorias para la protección de activos del sector energía ante ciberataques, versus los riesgos sistémicos derivados de la mayor interconectividad entre agentes del mercado y la infraestructura energética. Por último, se detallaron algunos requerimientos de ciberseguridad recomendados por expertos en el tema, para la definición de arquitectura e implementación de soluciones blockchain para el sector energía.

En los últimos tres capítulos, se ha mostrado la multiplicidad de dimensiones de valor en las cuales se abren oportunidades para el desarrollo de aplicaciones asociadas a la tecnología blockchain en el sector energía. Estas oportunidades pueden ser analizadas y clasificadas en arquetipos y modelos de negocios que invitan al lector de este trabajo, a explorar futuras líneas de trabajo investigativo, incluso con un enfoque empresarial; para el desarrollo de blockchain en el sector energía. El siguiente capítulo trata específicamente este tema.

8. Oportunidades para el uso de blockchain en el mercado de electricidad de Colombia.

En este capítulo se describen pautas para la caracterización y clasificación de Modelos de Negocios apalancados en el uso y aplicación de la tecnología blockchain desde el enfoque de análisis de la cadena de valor en Colombia, mediante el muestreo y clasificación de patrones o arquetipos empresariales desarrollado en el trabajo de (Weking et al., 2019), trabajo que, en criterio del autor, aporta herramientas útiles para entender los ámbitos de uso que la tecnología tiene en diferentes sectores y mercados, incluido el eléctrico.

Las dos preguntas formuladas por Weking van en el siguiente sentido: (i) ¿Cómo pueden ser clasificados los modelos de negocio blockchain en una taxonomía? Y (ii) ¿Cuáles son los patrones de modelos de negocio para la tecnología blockchain? Para esto, se hizo una revisión sistemática de literatura, encontrando 46 artículos relevantes, luego se indagaron 99 casos de negocios reales que explícitamente utilizan blockchain como tecnología medular para su operación. Finalmente se aplicó un procedimiento de combinación y de clusterización del cual resultaron cinco (5) categorías estadísticamente diferentes, caracterizadas por 22 dimensiones predictoras de modelos de negocio exitosos. En este aparte, se tomaron los resultados para analizar casos encontrados en la industria energética internacional y particulares al entorno colombiano, utilizando repositorios de información empresarial reconocidos. La Tabla 13 muestra los patrones de modelo de negocio basados en aplicaciones blockchain propuestos por Weking (Weking et al., 2019).

Tabla 13. Patrones de modelos de negocios basados en blockchain, tomado de (Weking et al., 2019)

Patrón de Modelo de Negocio basados en Blockchain	Definición	Incentivo	Servicio Provisto
Blockchain Para Integración de negocio, Interoperabilidad	Proveer una base de datos compartida y estándar para mejorar interoperabilidad entre usuarios	Optimizar Costos	Interoperabilidad
Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado	Proveer un mercado sin intermediarios involucrados	Mejoras a la intermediación	Diseño de Mercado

Blockchain para Seguridad, Autenticación	Reforzar aspectos de seguridad mediante el uso de aspectos de la tecnología blockchain (criptografía)	Mejorar la Seguridad	Autenticación
Blockchain como Oferta Tecnológica, APIs.	Proveer interfaces de aplicación (API) basadas en blockchain	Conectividad entre aplicaciones	API para Layer 2
Blockchain para Transferencia de Valor Monetario	Habilitar la transferencia directa de valor entre usuarios (peers)	Trazabilidad y Verificación	Transferencias de valor

Los modelos de negocio fueron analizados bajo el enfoque de análisis de Cadena de Valor, que se compone de: a) Propuesta de valor como el portafolio de productos y servicios vigentes que una organización ofrece, b) Entrega de valor que se relaciona con la identificación del cliente objetivo; c) Creación de valor que describe los procesos, actividades, recursos y capacidades organizacionales puestos en funcionamiento dentro de la organización y d) Captura de valor que describe el mecanismo de monetización por medio de la relación entre la estructura de costos y la de ingresos. Se invita al lector a examinar el Anexo A: Patrones de modelos de negocios basados en Blockchain ,para profundizar en los resultados detallados de la clasificación taxonómica y los patrones resultantes de la investigación. En las siguientes secciones se explican los atributos de cada patrón en forma resumida.

8.1 Enfoque de análisis de cadena de valor y patrones derivados

La resultados del análisis de cadena de valor habilitadas por blockchain por otros autores, también han encontrado aplicaciones relevantes en diseño de contratos, eficiencia de estructuras de gobierno, desarrollo de competencias externas y diseño de comunicaciones y transacciones (Treiblmaier, 2018). También se ha encontrado que blockchain redefine las cadenas de valor en múltiples industrias, cuando se eliminan procesos administrativos que dependen del almacenamiento de documentos tradicionales en papel, como los procesos de Registro, Verificación y Ejecución (Nikolakis et al., 2018). Xin et al, analizaron el impacto de blockchain en el mecanismo de creación de valor y el intercambio de intereses entre empresas e innovadores, encontrando que blockchain beneficia los modelos de innovación disruptivos tempranos, alocando recursos más rápidamente ante pequeñas victorias tempranas comparado con otros modelos de innovación tradicionales

(Xing et al., 2021). Es por esto, que el enfoque de cadena de valor, es una herramienta útil para identificar oportunidades generadas por blockchain en diferentes industrias (Gurtu & Johny, 2019).

8.1.1 Blockchain Para Integración de negocio, Interoperabilidad

Son modelos de negocios que integran blockchain en procesos de una cadena de valor preexistente. Comúnmente se utilizan dispositivos IoT que corren porciones del protocolo blockchain o interactúan con él, que, a su vez, permite interacción y compatibilidad entre procesos o entre firmas. La interoperabilidad permite transacciones transparentes y ejecución de contratos inteligentes entre los dispositivos IoT. Los proveedores de estos servicios ofrecen la solución de comunicación que almacena información en el blockchain, que se integra a los diferentes ERP corporativos de los clientes y que personaliza los algoritmos de consenso y tokens utilitarios de acuerdo con las necesidades del modelo de negocio. Usualmente las firmas que ofrecen este servicio monetizan su valor por medio de cobros por afiliaciones periódicas en vez de usar cripto moneda. Uno de los principales focos de atención de este patrón corresponde a la mitigación de riesgos en ciberseguridad derivado de accesos no autorizados a los dispositivos IoT (Weking et al., 2019).

8.1.2 Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado

En esta categoría se agrupan firmas que ofrecen la operación de un mercado multilateral o una plataforma de comercio. Los proveedores de la plataforma integran productos y servicios de otras firmas a usuarios y clientes finales, suelen utilizar el protocolo Ethereum y los mecanismos de consenso existentes porque su negocio no requiere modificaciones específicas de blockchain. Algunos proveedores permiten a los usuarios ofrecer o vender nuevos activos utilizando blockchain y permiten que sus clientes se conviertan en complementadores. Como ejemplos de esta categoría tenemos a: plataformas de juegos, plataformas de distribución de música, arte y bienes con certificado de origen, es decir bienes físicos, virtuales o servicios propios de cada cliente y usuario (Weking et al., 2019).

8.1.3 Blockchain para Seguridad y Autenticación

Las plataformas con énfasis en seguridad profundizan los aspectos de protección de identidad y criptografía de los protocolos blockchain para garantizar la propiedad sobre un activo, principalmente propiedad intelectual o información.

Sus clientes son empresariales y en ocasiones integran tecnologías de hardware, servicios en la nube y otros para empaquetar en su oferta de valor. Sin embargo, permiten que las empresas utilicen sus soluciones para diversas áreas de aplicación. La posición de la cadena de valor es habilitadora de blockchain.

La mayoría de estos proveedores utilizan un protocolo blockchain modificado existente, como Bitcoin, y desarrollan aplicativos de acceso privado en una segunda capa con mecanismos de consenso propio. La monetización ocurre mediante cobros por afiliación y emisión de tokens de aplicación. Algunas de las aplicaciones se encuentran en la digitalización de activos tangibles: Propiedad de bienes raíces, metales preciosos, almacenamiento de información sensible, servicios Web descentralizados (Weking et al., 2019).

8.1.4 Blockchain como Oferta Tecnológica, APIs.

El cuarto patrón ofrece API de blockchain a los desarrolladores. Los proveedores ofrecen una infraestructura blockchain para activos en general. Generalmente atienden clientes empresariales, pero con usuarios comunes, distribuyen su API como código abierto y no intermedian las cadenas de valor existentes.

Los proveedores desarrollan su solución blockchain modificando el mecanismo de consenso subyacente ajustándolas a necesidades comerciales específicas. Este modelo de negocio actúa como habilitador de blockchain en algún proceso de la cadena de valor de sus clientes porque ofrecen varias implementaciones independientes del área de aplicación.

Un punto importante es que no cobran a sus clientes, pero se benefician de la distribución y acumulación de sus tokens esperando una valoración futura por el aumento en la demanda de esos tokens. En esta categoría se agrupan los proyectos de Blockchain de

primera y segunda capa, que fondean y promocionan su protocolo en gran medida mediante ofertas iniciales de moneda (ICO) (Weking et al., 2019).

8.1.5 Blockchain para Transferencia de Valor Monetario

El último patrón cubre empresas relacionadas con las criptomonedas. Actualmente, muchas empresas aprovechan las ventajas de las criptomonedas implementando sus plataformas de transferencia de valor. Sus clientes y usuarios son personas naturales y jurídicas.

Los proveedores se centran en el dinero como activo subyacente; ofrecen sus servicios basados en aplicaciones móviles sin personalización, ya que apuntan a transacciones convenientes y económicas. Su posición en la cadena de valor es ser usuario de blockchain.

Los proveedores utilizan protocolos blockchain existentes y sus mecanismos de consenso subyacente. Los proveedores generan ingresos cobrando tarifas por cada transacción y se benefician de sus propios tokens al permitir la transferencia exclusiva de sus tokens. Algunas de estas aplicaciones se enfocan en productos financieros y micro pagos (Weking et al., 2019).

8.2 Aplicaciones blockchain en el entorno colombiano

Partiendo del marco de referencia anterior, es pertinente indagar ¿cuáles son las aplicaciones del protocolo blockchain en el ecosistema empresarial colombiano?, ¿qué patrones de modelo de negocio son los más frecuentes en el entorno empresarial? Y, ¿cómo se encuentra el ecosistema para el sector energía? Para esto se tomaron dos fuentes de información relevantes, una la base de datos CrunchBase², que alberga información de más de 600.000 compañías, especialmente de base tecnológica, la cual es empleada para análisis sectoriales en el ámbito empresarial (Felgueiras et al., 2020),

² CrunchBase: <https://www.crunchbase.com/>

adicionalmente se consultó la base de datos de Colombia FinTech³. La cual es la asociación de empresas Fintech de Colombia.

En este punto cabe anotar que los resultados de esta búsqueda no representan el universo empresarial colombiano con respecto a la tecnología blockchain, tampoco es posible asegurar si la muestra es representativa, ya que el registro en las mencionadas bases de datos es voluntario, por lo que pueden existir una multitud de proyectos blockchain por fuera de estos repositorios y por ende fuera del alcance de este análisis.

Los criterios de búsqueda corresponden a: i) que su sede principal se encuentre en Colombia, ii) que la descripción de su propuesta de valor tenga al menos un producto relacionado con aplicaciones blockchain y iii) aquellas fundadas desde el año 2000 hasta el 10/09/2021.

En total se encontraron 25 empresas listadas sumando resultados de ambas bases de datos, de las cuales 23 aún permanecen activas al momento de la elaboración de este reporte. Se invita al lector a revisar el **Anexo A: Patrones de modelos de negocios basados en Blockchain** que muestra los resultados completos de las 25 empresas.

8.2.1 Resultados consulta base de datos empresariales

Con respecto a la pregunta **¿cuáles son las aplicaciones del protocolo blockchain en el ecosistema empresarial colombiano?**, la Figura 16 muestra los resultados de la consulta sobre patrones empresariales presentes.

³ Colombia FinTech: <https://www.colombiafintech.co/inicio>

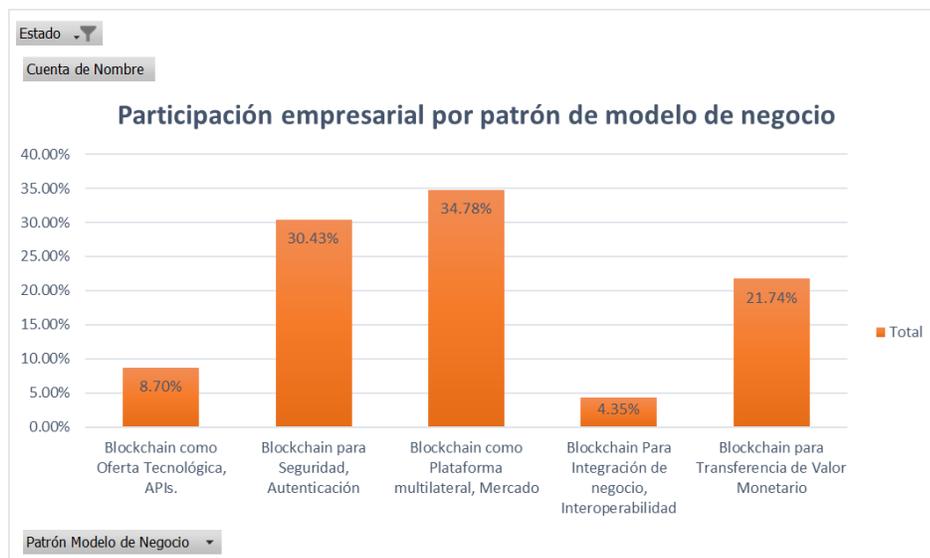


Figura 16 Participación Empresarial por patrón de modelo de negocio en Colombia, Elaboración Propia a partir de datos de referencia de Colombia Fintech.

Los patrones “blockchain como plataforma multilateral” y “blockchain para seguridad y autenticación” representan el 34,8% y el 30,4% respectivamente de la muestra, seguido de las aplicaciones “blockchain para transferencia de valor” con un 21,7%, conformando un Pareto del 86,7%. La Figura 17 muestra el acumulado de empresas constituidas por año, que puede tomarse como un indicativo de madurez del sector.



Figura 17. Año de constitución empresas con aplicación blockchain, Elaboración Propia a partir de datos de referencia de Colombia Fintech.

Nótese que el año 2018 ha sido el más prolíficos en creación de nuevas empresas, seguido de una caída año a año hasta solamente una en 2020, especulativamente se podría

plantear una relación con la caída global del mercado de criptomonedas entre 2017 y 2018 (J. Liu & Serletis, 2019).

Respecto a la pregunta, **¿qué patrones de modelo de negocio son los más frecuentes en el entorno empresarial?**, la Figura 18 muestra la participación empresarial de proyectos blockchain por cada sector económico para el cual el modelo de negocio orienta su portafolio de valor. En esta muestra, el 34,78% atiende el mercado de servicios financieros, el 21,74% atiende el mercado de servicios legales y el 17,39% el mercado de servicios al sector energía, totalizando un Pareto del 73,91%



Figura 18 Participación empresarial por sector económico, Elaboración Propia, partir de datos de referencia de Colombia Fintech.

Cabe mencionar, que no debería una sorpresa la mayor participación de empresas en el sector financiero ya que este ha sido el que más apoyo y cambios regulatorios ha implementado para la adopción de blockchain en Colombia. Respecto a los servicios legales, estos en su mayoría corresponden a validación y certificación de documentos electrónicos y firmas digitales. La Figura 19, muestra en detalle diversidad de patrones de modelo de negocio al interior de cada industria

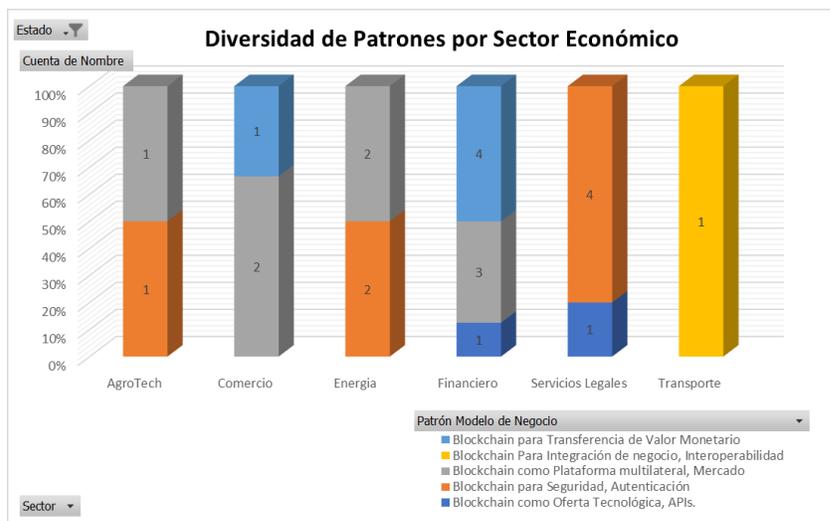


Figura 19 Diversidad de Patrones de modelo de negocio por Sector Económico, Elaboración Propia, partir de datos de referencia de Colombia Fintech.

Es interesante ver que dentro del sector financiero se encontraron 3 patrones de modelo de negocio, siendo el de “blockchain para transferencia de valor” el más frecuente con 4 aplicaciones de 7. En el sector de servicios legales dominan los “blockchain para seguridad y autenticación” con 4 empresas de 5 y en el sector energía se encontraron por igual “blockchain como plataforma multilateral” y “blockchain para seguridad y autenticación” con dos empresas cada una para un total de 4 en el sector.

Finalmente, a la pregunta de **¿cómo se encuentra el ecosistema para el sector energía?**, se presenta en la Tabla 14 una caracterización más detallada de las 4 empresas consultadas que prestan sus servicios al sector energía:

Tabla 14 Detalle de organizaciones que aplican blockchain en el sector energía, elaboración propia, partir de datos de referencia de Colombia Fintech.

Nombre	Sector	Sede	Descripción	Capital	Fondos levantados	Website	Año de incorporación	Patrón Modelo de Negocio
Cycle	Energía	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Cycle is a platform that turns renewable energy systems profitable for the householders in off-grid communities.	Premio	USD 150,000	www.cyclesystem.org	2018	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
ECOGOX	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	A través de EcoGox se tiene la elección de consumir energía renovable de la fuente y los atributos de tu preferencia.	Propio	n/a	https://www.ecogox.com/functioning	2019	Blockchain para Seguridad, Autenticación
NEU	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	NEU is reinventing the process of producing and consuming energy. As a next generation AI-driven electricity retailer our goal is to digitalize and democratize clean energy to lower our customer's energy bills	Semilla	USD 3,500,000	www.neu.com.co	2019	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
ECOREGISTRY	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	Registry platform for the carbon market based on blockchain technology Technology 4.0 at the service of sustainability	Propio	n/a	https://www.ecoregistry.io/about	2019	Blockchain para Seguridad, Autenticación

Nótese que de las cuatro organizaciones dos conservan el patrón de Plataforma Multilateral, en este caso Cycle y NeU, mientras que “blockchain para seguridad y autenticación” corresponde a Ecogox y EcoRegistry. Consultando los sitios web de cada una, de estas empresas, se encontró lo siguiente:

8.2.2 Cycle

Apalanca su oferta de valor al integrar dispositivos de medición avanzada inteligente (AMI) e IoT y protocolo blockchain para crear una plataforma de acceso a un mercado P2P para que prosumidores y consumidores transen energía a precios más competitivos. Su modelo de monetización se basa en la venta de los dispositivos de medición AMI (Cycle, 2021) cobros por transacción y venta de información procesada a agentes del sector energía, (Crunchbase, 2021a).

8.2.3 Neu

Neu Energy es un agente comercializador del mercado de energía mayorista en Colombia que atiende tanto el segmento de usuarios regulados como no regulados (Neu Energy, 2021) apalancando su oferta de valor en medición avanzada AMI, App móvil para gestión del usuario, plataforma blockchain para la comercialización de energía entre prosumidores

y usuarios e inteligencia artificial para optimizar y habilitar servicios a sus clientes. Entre sus servicios tiene la creación de plantas solares virtuales, certificación de consumo de origen de energías renovables y gestión de eficiencia energética, entre otros. (Crunchbase, 2021b)

8.2.4 EcoGox

Promete a clientes empresariales la posibilidad de contratar su abastecimiento de electricidad de fuentes preferidas, certificando la tecnología que la genera y la procedencia de una planta en particular Actualmente lista 18 proyectos de generación entre solar e hidro de Colombia y Centroamérica. Ecogox, permite que generadores registren y certifiquen sus proyectos, Ecogox emite los certificados de atributos de energía renovables cobrando una tarifa de intermediación por emisión de certificados. Es importante notar que este proyecto es auspiciado por XM gestor de mercado de energía en Colombia y un socio tecnológico llamado Latin Checkout, (EcoGox, 2021)

8.2.5 EcoRegistry

Ecoregistry es la primera entidad certificadora de Bonos de Emisión de Carbón basada en blockchain para compensar los cobros por emisiones de Co2 de acuerdo con el decreto 923 de 2017 y la resolución 1447 de 2018 en Colombia. La plataforma permite que los inversionistas registren sus proyectos bajo diversos esquemas de certificación para la mitigación de cambio climático (ESIC002 para forestales, CVCC V2.1 para generación con fuentes renovables). Para septiembre de 2021 listaba 72 proyectos diversos de los cuales pueden comprarse sus bonos de emisión, para lo cual EcoRegistry se conecta con la plataforma Climatetrade. Ecoregistry monetiza su ingreso mediante cobros por el registro del proyecto, por la certificación del proyecto y por la emisión de los bonos. Es importante notar que también es un proyecto auspiciado por XM gestor de mercado de energía en Colombia, (EcoRegistry, 2021)

En este capítulo, se exploraron las oportunidades para el desarrollo de proyectos y aplicaciones de la tecnología blockchain en el sector de la energía desde la óptica del análisis de cadena de valor en entornos empresariales. Se analizaron cinco patrones de modelo de negocio basados en blockchain que pueden ser aplicados a diversos procesos

de la cadena de valor del sector: procesos para integración del negocio, para el diseño y operación de mercados multilaterales, para seguridad y autenticación, para el desarrollo de aplicaciones tecnológicas o plataformas y para la transferencia de valor. Se utilizó este modelo para contrastar el estado del ecosistema empresarial alrededor de proyectos blockchain en Colombia con un especial foco en el sector energía.

Se encontraron 23 proyectos empresariales activos, en su mayoría atendiendo el sector financiero, seguido del de servicios legales y contando cinco en el sector energía. Se encontró que los proyectos empresariales orientados a procesos para el diseño y operación de mercados multilaterales, y para seguridad y autenticación son los más frecuentes. Se notó que algunas de las cinco empresas con proyectos blockchain en el sector energía en Colombia han recibido capitalizaciones significativas en rondas de inversión de capital semilla en los últimos 4 años, lo que denota un aspecto positivo para el fomento de proyectos innovadores en el sector energético y que están alineados con los propósitos de modernización del mercado de energía en Colombia.

A partir de los resultados de lo expuesto en los anteriores capítulos, se presentan conclusiones generales y específicas a los temas desarrollados y se esbozan lineamientos para futuros trabajos de interés en el siguiente capítulo de conclusiones.

9. Conclusiones y Trabajos Futuros

9.1 Conclusiones Generales

Durante la elaboración de este trabajo se revisaron los aspectos esenciales para entender el funcionamiento de la tecnología blockchain, tales como su diferencia con paradigmas existentes, operatividad, protocolos de mayor uso, casos de aplicación en diferentes industrias, especialmente el sector energético, brechas temáticas, necesidades de trabajo futuro, retos y oportunidades para su implementación.

Con respecto a la diferencia con paradigmas existentes se concluyó que blockchain ofrece la posibilidad de construir una infraestructura transaccional digital para intercambiar valor, información, bienes y servicios entre múltiples agentes, independiente de su identidad, poder y tamaño, preservando el anonimato y la información compartida en los protocolos.

Se mostró que es posible un nuevo paradigma de captura de valor en el que los desarrolladores de la tecnología pueden embeber múltiples servicios en un código subyacente robusto, autónomo y confiable, habilitando la posibilidad de crear servicios de más alto nivel, más livianos y diversos para un grupo creciente de aplicaciones adaptada a las necesidades de los usuarios.

El paradigma de las organizaciones autónomas descentralizadas DAO permite la participación democrática de los agentes de un sistema blockchain y les otorga el derecho y la responsabilidad de definir las reglas de juego, consenso y modificaciones del protocolo, creando una estructura de poder descentralizado sin parangón en la historia social humana.

En este Trabajo Final se mostraron casos de negocio exitosos en el sector energético global y especialmente en el entorno colombiano, pero a su vez, se mostraron las oportunidades poco exploradas en nichos de servicios que aparentemente no han sido explotados por emprendedores tecnológicos en Colombia.

Se presentaron retos y posibles caminos en los tópicos tecnológicos, regulatorios y de ciberseguridad que invitan al lector a profundizar y encontrar oportunidades de emprendimiento y desarrollo de aplicaciones en el entorno local.

Finalmente se presentaron algunos temas que ameritan una revisión futura más detallada relevantes al tema principal de interés. El autor de este Trabajo Final reconoce las limitaciones de la revisión de la literatura ejecutada, dado el dinamismo en la producción literaria de académicos, instituciones y demás interesados en los tópicos alrededor de un espacio de conocimiento en proceso de maduración como lo es blockchain.

9.2 Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos

9.2.1 Objetivo específico 1

"Identificar requerimientos tecnológicos para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia ".

En el capítulo 5, se desarrolló un análisis de los aspectos tecnológicos más relevantes para el desarrollo de aplicaciones blockchain con especial énfasis en el mercado eléctrico colombiano.

Se concluyó que aquellos protocolos blockchain que permiten la ejecución de contratos inteligentes posibilitan la descentralización de actividades comerciales en el sector, actividades como: la compra/venta de electricidad entre usuarios pares (p2p trading), la trazabilidad de los certificados de emisiones por fuentes renovables, la gestión documental de activos y el desarrollo del servicio de movilidad eléctrica como servicio, entre otros.

Se demostró que son atributos esenciales de tales protocolos la disponibilidad, la integridad y la confidencialidad transaccional, a costos tan competitivos como el paradigma centralizado tradicional.

Se concluyó que la escalabilidad y la velocidad en las transacciones son los retos tecnológicos más relevantes para el desarrollo exitoso de aplicaciones blockchain y se presentaron algunas soluciones propuestas por desarrolladores como la validación transaccional sectorizada (Sharding), la cual es asignada aleatoriamente a ciertos nodos (Random Sampling) y la agrupación delegada (roll-up) que podrían mejorar el rendimiento y velocidad hasta en un factor de 100.

9.2.2 Objetivo específico 2

" Identificar requerimientos regulatorios y legales para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia ".

En el capítulo de antecedentes se evidenció que los sectores financiero y energético han sido los que más han impulsado el desarrollo de aplicaciones blockchain a problemas típicos en sus respectivas industrias.

En el capítulo 6 se demostró que una modernización del marco regulatorio en el sector financiero ha jalonado la adopción de prácticas comunes en países del G20. En Colombia, los reguladores del sector financiero han jalonado el desarrollo de aplicaciones blockchain mediante la adopción de “areneras regulatorias”, permitiendo la experimentación segura como una etapa previa a la actualización y adopción de cambios regulatorios.

Se mostró que regulador del sector energético incluyó esta misma herramienta en su misión de modernización del mercado energético y explícitamente ha promulgado 22 modificaciones a la ley que permitirían el desarrollo de nuevos ámbitos de aplicación, servicios nuevos al ecosistema energético como son: La automatización de la operación del sistema, la creación de servicios auxiliares descentralizados, la integración de señales del lado de la demanda, la creación de plantas renovables virtuales, la integración de un mercado de bonos de emisión y reglas de juego que permitan el desarrollo de aplicaciones tecnológicas del blockchain.

9.2.3 Objetivo específico 3

"Identificar requerimientos de ciber-seguridad para el desarrollo blockchain en mercado de electricidad en Colombia".

En el capítulo de antecedentes y en el capítulo 7, se exploraron los aspectos de ciberseguridad relevantes para la implementación de soluciones blockchain en el sector energía.

Si bien este tópico ha sido identificado y abordado en la literatura formal por académicos y reguladores, Colombia, apenas promulgó los primeros requerimientos para los agentes del sector energético a partir de 2019.

Se identificaron brechas en aspectos de análisis de riesgo, identificación de ciber-activos, y de arquitecturas comunes a los actores del sector. Los reguladores del sector energético en Colombia aún no identificaron el potencial de blockchain para asistir en el diseño de estrategias de ciberseguridad en el sector. Es por esto que el campo de aplicaciones de la tecnología blockchain en el país se puede considerar como una brecha temática que requiere futuras exploraciones y análisis.

9.2.4 Objetivo general

" Evaluar la viabilidad de la implementación de tecnología blockchain para el mercado de electricidad en Colombia "

En el Capítulo 8, se exploró y se tomó como referencia el trabajo de algunos autores para caracterizar patrones de modelos de negocio para el desarrollo de aplicaciones blockchain desde un enfoque de análisis de cadena de valor. Se describieron 5 categorías de patrones en las cuales se identificaron 22 atributos predictores de éxito en modelos de negocios.

Se encontró que, en el conjunto del ecosistema empresarial colombiano, el 4.36% de los emprendimientos tecnológicos pertenecen al sector de aplicaciones blockchain, en su gran mayoría orientados al sector financiero y de una muestra de 23 empresas localizadas en Colombia cuya propuesta de valor presentaba al menos un producto o servicio apalancado

en la tecnología blockchain y se extrajeron 4 cuyo portafolio tenía relación con el sector energía que representaron un 17.39% de la muestra. Se concluyó que los modelos de negocio orientados a la autenticación y certificación de un producto energético representaron el 50% de las empresas y el otro 50% a modelos de negocios para la comercialización de electricidad con atributos verdes.

También se concluyó que existen oportunidades para el desarrollo de las aplicaciones blockchain orientadas a la interoperabilidad, la transferencia de valor y como oferta tecnológica en el sector energía, ya que tanto en análisis sectorial como en la muestra empresarial no se encontraron empresas dedicadas a estos nichos de mercado.

9.3 Trabajos Futuros

Este Trabajo Final se encontraron algunos campos futuros de investigación:

Con relación a aspectos tecnológicos persiste la necesidad de profundizar en escalabilidad, uso de recursos y velocidad que permitan la masificación del uso de plataformas blockchain en el sector energía. Igualmente se identificó la pertinencia de desarrollar estudios de vigilancia tecnológica puedan trazar el rápido desarrollo del corpus de conocimiento alrededor de blockchain.

En los aspectos regulatorios se identificó la pertinencia de profundizar en el impacto de las areneras regulatorias para incentivar el desarrollo de proyectos blockchain en el sector de la energía, así como la interacción entre la tecnología y la modernización del mercado eléctrico colombiano.

En los aspectos de ciberseguridad se identificaron campos de estudios relacionados con la integración de protocolos blockchain en el desarrollo de sistemas de medición avanzada y dispositivos IoT que mejoren los niveles de seguridad en actividades operativas en las redes de transmisión y distribución, y a su vez beneficien a las arquitecturas descentralizadas y anónimas para la gestión comercial y empresarial de los agentes del sector.

Finalmente, en cuanto a las oportunidades se encontraron espacios para profundizar en aplicaciones blockchain orientadas a la interoperabilidad, la transferencia de valor y como oferta tecnológica en el sector energía.

A. Anexo A: Patrones de modelos de negocios basados en Blockchain

En la Tabla 15 se presentan los 22 atributos de las 5 categorías de modelos de negocios blockchain bajo el enfoque de análisis de cadena de valor, según el trabajo de (Weking et al., 2019).

Tabla 15 Atributos de los patrones de modelo de negocio, tomado de (Weking et al., 2019)

Proposición de Valor	Clasificación de Valor	Provisión del Servicio	Para Integración de negocio	Como Plataforma multilateral	Para Seguridad	Como Oferta tecnológica	Transferencia de valor monetario
			Interoperabilidad	Mercado	Autenticación	API para Blockchain	Transferencia de Valor
		Incentivo	Trazabilidad de datos y verificación	Mejorar la intermediación	Mejora de la seguridad	Oferta de Blockchain	Optimización de Costos
	Cliente Objetivo	Cliente	Persona Jurídica	Persona Natural	Persona Jurídica	Persona Jurídica	Persona Natural y Jurídica
		Usuario	Persona Jurídica	Persona Natural	Persona Natural	Persona Natural y Jurídica	Persona Natural y Jurídica
		Forma de mediación	Grupo interno y Entre grupos	Grupo interno y Entre grupos	Entre Grupos	Sin Mediación	Al interior del grupo
		Diversificación de usuario	Sin Diversificación	centrado en el usuario	centrado en el usuario	Sin Diversificación	Sin Diversificación
Activo Subyacente		Activo Físico	Activo Virtual	Activo específico al usuario	Sin activo específico	Dinero fiduciario	

Creación y entrega de Valor	Provisión del Servicio	Para Integración de negocio	Como Plataforma multilateral	Para Seguridad	Como Oferta tecnológica	Para transferencia de valor monetario
	Socio Clave	Independiente	Socio Industrial	Socio Tecnológico	Independiente	Independiente
	Canal Clave	Sitio WEB, Integración con el ERP	Sitio Web	Tecnología provista sin un canal definido	Proveer tecnología sin canal	Aplicación Móvil
	Personalización	Integración de desarrollador interno	Ninguna	Ninguna	Integración de desarrollador interno o externo	Ninguna

Afiliación del DAO		Sin alineación con el DAO	Sin alineación con el DAO	Sin alineación con el DAO	Activador del DAO	Sin alineación con el DAO
Clasificación del Blockchain	Posición en la cadena de valor	Mediador en el Blockchain	Usuario del Blockchain	Activador del uso de blockchain	Activador del uso de blockchain	Usuario del blockchain
	Origen del Blockchain	Combinación de Blockchains	Blockchain de uso externo	Blockchain existentes modificados	Blockchain Propio	Blockchain Propio
	Tipo de Blockchain	Consortio	Privado	Privado	Público	Privado
	Blockchain Subyacente	Múltiples	Ethereum	Bitcoin	Otros	Otros
	Mecanismo de Consenso	Modificado	Existente	Auto-Creado	Auto-Creado	Auto-Creado
Tecnología Adicional		Internet de las cosas (IoT)	Ninguna	Servicios en la Nube	Apps Descentralizadas (Dapps)	Ninguna

Provisión del Servicio		Para Integración de negocio	Como Plataforma multilateral	Para Seguridad	Como Oferta tecnológica	Para transferencia de valor monetario
Flujo de ingresos	Cargo al usuario	Tarifa por afiliación	Costo por Transacción	Costo por Transacción	Sin cargos	Costo por Transacción
	Acepta monedas	Ninguna asociada a Blockchain	Sólo tokens propios	Sólo tokens propios	Otras Criptomonedas adicionales	Sólo tokens propios
	Sistema de Tokens	Sin Token	Sistema de tokens duales (aplicación y de intercambio)	Listado de tokens propio	Sin Token	Listado de tokens propio
Estructura de costos	Provisión de Costos	Provisto para el SDK	Provisto para la plataforma	Provisión para SDK	provisión para SDK	Provisto para la plataforma
	Origen de la red	Uso externo del Blockchain	Uso externo del Blockchain	Red propia de Minería	Red propia de Minería	Red propia de Minería

B. Anexo B: Lista de Empresas Colombianas con aplicaciones blockchain, consultadas en CrunchBase y Colombia Fintech

En la siguiente tabla se presenta el resultado de la consulta de organizaciones activas listadas en la plataforma CrunchBase: <https://www.crunchbase.com/> y Colombia Fintech <https://www.colombiafintech.co> que listan empresas cuya sede principal se encuentra en Colombia y cuya propuesta de valor presenta al menos un producto relacionado con aplicaciones blockchain, se incluye las fundadas desde el año 2000 hasta el 12/12/2021, se encontraron 25 empresas listadas.

Criterio:

Crunchbase: Blockchain AND Colombia AND inception Date 1/1/2000 – 12/12/2021
<https://www.crunchbase.com/discover/organization.companies/f6f289fee374df3d8eef5f0b08fa9698>

Colombia Fintech: Blockchain

<https://www.colombiafintech.co/fintechs?searchString=blockchain>

Tabla 16 –Empresas Colombianas con aplicaciones Blockchain listadas en CrunchBase y Colombia Fintech, Elaboración Propia

Nombre	Sector	Sede	Descripción	Base de Datos	Capital	Fondos levantados	Website	Año de incorporación	Estado	Patrón Modelo de Negocio
Minka	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Minka is a financial services cloud that enables fintechs to build solutions in days instead of years.	27,027	Semilla	USD 3,500,000	www.minka.io	2015	Activa	Blockchain como Oferta Tecnológica, APIs.
Xertify	Servicios Legales	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Xertify is a certified network where people and institutions people can exchange trusty digital credentials using blockchain technology.	65,935	Pre-Semilla	USD 180,000	xertify.co	2017	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación
arkDia	Servicios Legales	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	We offer companies to have the full record and control of all the lifecycle of a contract or document with our platform base on blockchain.	79,785	Pre-Semilla	USD 67,700	arkdia.co	2018	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación

Cycle	Energia	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Cycle is a platform that turns renewable energy systems profitable for the householders in off-grid communities.		Premio	USD 150,000	www.cyclesystem.org	2018	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
MOONBLOCK	Financiero	Medellín, Antioquia, Colombia	MOONBLOCK develops all the professional tools you need to trade in the CRYPTO market, in one single platform.	95,506	PreSeed	USD 150,000	moonblock.ai	2018	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
INplaza	Comercio	Medellín, Antioquia, Colombia	INplaza is a blockchain technology company that focuses on international trade.	116,214	Semilla	USD 288,000	inplaza.co	2016	Inactiva	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
Protraffic	Transporte	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Protraffic is the second largest company in the Colombian road safety industry.	133,494	Semilla	USD 450,000	www.protrafico.com/index.htm	2012	Activa	Blockchain Para Integración de negocio, Interoperabilidad
NetM	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	NetM provides the protocol of blockchain-based decentralized network, and the NTM cryptocurrency for corporate cross-border payments	209,519	Propio	n/a	www.netmred.com	2015	Activa	Blockchain para Transferencia de Valor Monetario

Callisto Network	Servicios Legales	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Callisto's goal is to r&d a reference implementation of sustain, self-governed, self-funded blockchain ecosystem & development environment. A smart-contract ecosystem with a real emphasis on security. Build, stake and trade on a never compromised blockchain.	239,477	Propio	n/a	https://callisto.network/	2018	Activa	Blockchain como Oferta Tecnológica, APIs.
ACREDITTA	Servicios Legales	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Latin America leading platform to issue digital credentials based on blockchain-secured format that's easily shareable and verifiable	258,262	Propio	n/a	www.acreditta.com/	2018	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación
Digital Fair Business	AgroTech	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Sustainable Traceability and story record mobile app.	261,007	Semilla	n/a	getfair.org	2018	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación
Banlinea	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	The largest consumer blockchain database network for financial product	267,024	Propio	n/a	banlinea.com/	2011	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado

			distribution in LATAM.							
Ccoins	Comercio	Medellín, Antioquia, Colombia	Ccoins is a platform for buying, selling, and trading of a wide range of cryptocurrencies that is quick, easy, safe, and convenient.	334,253	Propio	n/a	ccoins.io	2017	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
Psyche Coin	Comercio	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Digital currency requires a solution that's easy like PayPal, fast like blockchain, and trustworthy like traditional systems. Psyche is the first cryptocurrency, which is free and easy to use for the people to connect and do their daily business/remittance without technical knowledge.	574,100	Propio	n/a	psyche.cash	2020	Activa	Blockchain para Transferencia de Valor Monetario

Cannvest	AgroTech	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Cannvest is a crowdfunding platform that connects individuals with small cannabis producers to fund their infrastructure needs. Our crop traceability and investment platform is built on a permissioned blockchain, which provides secure and transparent information to farmers, technical advisors, investors and regulatory bodies	688,613	Propio	n/a	cannvest.co	2019	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
Geoestate	Bienes Raíces	Medellín, Antioquia, Colombia	GeoEstate is the first smart Real Estate Investment Trust powered by Data science. Through a deep data science process, we find the highest profit and lower risk properties in the globe defining when to invest and	896,400	Propio	n/a	geoestate.co/	2018	Inactiva	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado

			liquidate the asset.							
Boletos Qubit (Qubit Smart Tickets)	Comercio	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Ticket system that eliminates unauthorized reselling at major events and creates better fan experiences, Qubit Labs, Qubit, Tix Qubit, Blockchain Qubit	932,849	Propio	n/a	www.boletosqubit.co	2018	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
Beriblock	Servicios Legales	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	We create a representation of a document/contract in Blockchain, to keep track of its ownership and authenticate if it has suffered changes, giving certainty to the owner and eventual buyer, the version they have is authentic, unique and traceable.	ColombiaFintech	Semilla	n/a	https://beriblock.com/	2018	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación

ONE2CREDIT	Financiero	Barranquilla, Atlántico, Colombia	Somos una plataforma transaccional de servicios financieros (créditos online bajo monto y corto plazo), soportada por tecnología blockchain, con protocolo propietario de escalabilidad transaccional. Disponemos de billetera electrónica y Marketplace.	ColombiaFintech	Propio	n/a	www.one2credit.com	2016	Activa	Blockchain para Transferencia de Valor Monetario
KOIBANX	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Infraestructura tecnológica para digital banking. Conectándose con nuestras APIs, bancos e instituciones financieras crean canales digitales de pagos, inversión y trading con la seguridad y la costo-eficiencia que provee la tecnología Blockchain	ColombiaFintech	n/a	n/a	https://www.koibanx.com/	2015	Activa	Blockchain para Transferencia de Valor Monetario
2TRANSFAIR	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Core transaccional Blockchain empresarial	99,865	Pre-Semilla	USD 40,000	www.2transfair.com	2017	Activa	Blockchain para Transferencia

			para gestión y administración de pagos digitales no financieros.							a de Valor Monetario
BUDA	Financiero	Bogotá, Distrito Especial, Colombia	Somos es una empresa que desarrolla servicios tecnológicos con base en tecnología Blockchain de Bitcoin. Operamos un Exchange en Chile, Colombia y Perú. Igualmente, desarrollamos servicios de infraestructura Bitcoin a través de nuestra API.	153,119	Propio	n/a	www.buda.com	2015	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
ECOGOX	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	A través de EcoGox tienes la elección de consumir energía renovable de la fuente y los atributos de tu preferencia. Demostremos juntos cómo aportar al desarrollo sostenible de tu organización y el planeta	ColombiaFintech	Propio	n/a	https://www.ecogox.com/functioning	2019	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación

NEU	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	NEU is reinventing the process of producing and consuming energy. As a next generation AI-driven electricity retailer our goal is to digitalize and democratize clean energy to lower our customer's energy bills	16,902	Semilla	USD 3,500,000	www.neu.com.co	2019	Activa	Blockchain como Plataforma multilateral, Mercado
ECOREGISTRY	Energía	Medellín, Antioquia, Colombia	Registry platform for the carbon market based on blockchain technology 4.0 at the service of sustainability	ColombiaFintech	Propio	n/a	https://www.ecoregistry.io/about	2019	Activa	Blockchain para Seguridad, Autenticación

C. Anexo C: Prioridades Regulatorias MTE, modernización del mercado energético Colombia.

Prioridades regulatorias para la modernización del mercado energético y efecto sobre mercado descentralizado habilitado por Blockchain, modificado de (Ángela Cadena & Puyana, 2020)

Tabla 17 Prioridades regulatorias para la modernización del mercado energético y efecto sobre mercado descentralizado habilitado por Blockchain, modificado de (Cadena, 2020)

Prioridad del Regulador	Recomendación de la MTE	Descripción de la recomendación	Ajustes normativos identificados como necesarios	Efectos sobre mercados eléctricos descentralizados (habilitado por Blockchain)	FOCO
Aumento de visibilidad y transparencia y sistemas de distribución	Operadores del sistema de distribución (despliegue de AMI y administración de información)	Crear la figura del Operador del Sistema de Distribución (OSD), responsable de dar acceso a las redes de distribución a los comercializadores, prosumers, agregadores: permitiendo acceso desde la red de transmisión hasta el usuario final, en condiciones reguladas de seguridad y calidad de servicio.	Expedir regulación que reglamenta	En el largo plazo, la centralización de la gestión de medición y compilación de la información de los agentes del mercado podría elevar la vulnerabilidad del sistema ante ciberataques, salidas por contingencias del servicio y eventos no previstos	5
Desintegración vertical de actividades de energía eléctrica	Nuevo comercializador/nuevos agentes pueden ejercer sin restricciones: C, agregación, GD, GSE y CUR.	inductores de valor: § Liberalización minorista (competencia); y § Nuevas actividades. Se propone la figura del agregador comercializador/nuevos agentes que puede realizar todas las actividades competitivas sin restricciones: § Comercialización (C); § Agregación (ARED); § Generación distribuida (GD); § Gestión de servicios energéticos (GSE); y § CUR.	Complementar la Resolución CREG 128 de 1996 Por la cual se dictan reglas sobre la participación en las actividades de generación, distribución y comercialización de electricidad y se fijan límites a la participación accionaria entre empresas con actividades complementarias.	Las nuevas actividades desagregadas presentan oportunidades para la prestación de servicios descentralizados y regionales que mediante blockchain, permitirán la coordinación entre los agentes sin incrementar los costos transaccionales si este modelo se gestionara de forma centralizada	5
Gestión eficiente de la demanda de energía eléctrica	Participación de la Demanda en el mercado spot	Se permite la participación explícita de la demanda en la bolsa de energía: en situaciones de escasez, y que determine marginalmente cual es el precio de la energía.	Modificar la Resolución CREG 011 de 2015 Por la cual se regula el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - Reglamento de Operación Mercado Mayorista Modificar Resolución CREG 029 de 2016 Esquema de tarifas diferenciales para	Permite que los prosumidores participen en el mercado abierto de energía a través de DERs de su propiedad	3

			establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN.		
Mercado de corto plazo de energía eléctrica. Precios nodales	Sofisticación de ofertas	un mercado en tiempo real con ofertas en tres partes (CAP, GenMin y curva de oferta). permite reflejar las características de los recursos para la eficiencia operativa, (parámetros operativos, combinatorias para recursos de múltiples etapas, características únicas de las tecnologías más nuevas)	Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - aspectos comerciales del mercado mayorista (MME) de energía en el SIN. Modificación a la Resolución CREG 051 de 2009 - Esquema de ofertas de precios, el Despacho Ideal y las reglas para determinar el precio de la Bolsa en el Mercado Energía Mayorista. Expedición de una regulación que ajuste la remuneración a XM S.A. ESP de los servicios regulados del CND, ASIC y LAC para el año de implementación de la medida	Mercado transaccional de energía eléctrica en tiempo real. Permite conocer señales de precio y cantidad ajustándose a variaciones de oferta y demanda en tiempo real	1
Mercado de mediano plazo y comercialización de energía eléctrica. Negociación directa de los usuarios no regulados con los generadores	Multi-comercializador	Habilitar, a partir de 2021, que las UNR puedan tener más de un proveedor para cada frontera comercial, lo que permite contratar con tantos comercializadores como quieran y definir la prioridad de envío de cada proveedor.	Modificar la Resolución CREG 122 de 2003 Por la cual se regulan aspectos comerciales del mercado mayorista de energía eléctrica en el SIN Modificar la Resolución CREG 156 de 2011 Por la cual se establece el Reglamento de Comercialización del servicio público de energía eléctrica, como parte del Reglamento de Operación	Permite la libre contratación de comercializadores en una misma frontera, permitiendo al prosumidor contratar esquemas de abastecimiento en cantidades y precios optimizando su Demanda	1
Mercado de mediano plazo y comercialización de energía eléctrica. Negociación directa de los usuarios no regulados con los generadores	Bajar umbral de Usuario NO Regulado (UNR)	Reducir el umbral para UNR de 100 kW a 50 kW a partir de 2022 y eliminar el umbral para 2026.	Modificar la Resolución CREG 131 de 1998 Se dictan disposiciones adicionales sobre el mercado competitivo de energía eléctrica.	Permite la contratación por parte del prosumer de tarifas en donde la G y la C provienen de la competencia de mercado	1

<i>Prioridad del Regulador</i>	<i>Recomendación de la MTE</i>	<i>Descripción de la recomendación</i>	<i>Ajustes normativos identificados como necesarios</i>	<i>Efectos sobre mercados eléctricos descentralizados (habilitado por Blockchain)</i>	<i>FOCO</i>
Modernización de la red de distribución para incorporar recursos energéticos	“Plataformas comerciales entre consumidores”	Regular, antes de 2022, las plataformas comerciales entre consumidores.	Modificar la Resolución CREG 030 de 2018 y 24 de 2015	Permite transacciones directas entre Comercializadores, Consumidores (prosumers) habilitando las transacciones Peer to Peer	1
	Reglas para priorización de servicios de SAEB de múltiples usos	Nuevas reglas para priorizar los servicios proporcionados por el almacenamiento de uso múltiple como activos de transmisión; priorizando servicios prestados como un activo de transmisión sobre los servicios de mercado, y priorizando servicios de mercado que aportan confiabilidad sobre aquellos que no lo son.	CREG deberá expedir una regulación que establezca las reglas para los demás servicios que puedan prestar los servicios de almacenamiento	Permitiría definir las condiciones de despacho de los SAEB dadas las prioridades definidas por el regulador, generando flujos económicos a diferentes servicios prestados por el prosumidor	1
	Plataformas distribuidas: subasta de productos de red de largo plazo	Un contrato a largo plazo (cuyos detalles se discuten más abajo) podría garantizar por un lado la recuperación de todos los costos de red para el distribuidor y por otro lado proporcionar un marco estable a los proveedores potenciales de servicios de red(...) En estas subastas, convocadas y coordinadas por el distribuidor, deberían poder participar en principio todos los recursos con capacidad de jugar un papel activo en la planificación de la distribución de largo plazo (generación distribuida, almacenamiento conectado a la red de distribución, gestión de la demanda, etc.). Estas subastas tendrían que promover la adquisición competitiva de productos, y estos productos no deberían de estar orientados a priori a favorecer a ninguna	Expedir Resolución que complemente la figura del CPROG, la actualización de planes de inversión y/o las unidades constructivas especiales en la Resolución CREG 015 de 2018, mediante areneras	la formación de un mercado de energía descentralizado, permite que nuevos agentes participen en condiciones de competencia con servicios de valor para la red operada por los DSO	3

		tecnología en particular. Todas las tecnologías capaces de proveer el servicio requerido por el distribuidor deberían poder ofertar en igualdad de condiciones.			
Redes y conexiones de energía eléctrica. Planificación de la distribución	Valorar aporte de DERs como base para el desarrollo de políticas, planificación de recursos y la participación del cliente	La valoración de los recursos energéticos distribuidos utilizando la energía localizada y los beneficios de confiabilidad, así como las contribuciones de resiliencia, deben desarrollarse como base para el desarrollo de políticas, la planificación de recursos y la participación del cliente.	Dos alternativas: a) Modificación de la Resolución CREG 025 de 1995. Código de Redes, b) Expedición de una resolución por el Minenergía estableciendo criterios para el planeamiento de la transmisión y distribución, según el artículo 18 de la Ley 143 de 1994 y el artículo 5 del Decreto 381 de 2012	Permite la remuneración de los DERs, habilitando flujos de ingresos provenientes de la Energía localizada (generación/almacenamiento) y servicios auxiliares para confiabilidad	1
	Respuesta a la demanda y DERs	Un mercado diario con liquidaciones financieras vinculantes facilitará la participación de la respuesta de la demanda para permitir la participación de reducciones de carga en tiempo real, así como el almacenamiento de energía, que puede desarrollar un horario óptimo para la carga y descarga en función de precios del día anterior, menos volátiles antes de ofrecer potencialmente en el mercado en tiempo real	Modificar Resolución CREG 029 de 2016 esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía. Modificar la Resolución CREG 011 de 2015 Por la cual se regula el programa de respuesta de la demanda para el mercado diario en condición crítica. Modificación a la Resolución CREG 024 de 1995 - Reglamento de Operación Mercado Mayorista	Permite gestión inteligente de la demanda en tiempo real y su remuneración acorde a fluctuaciones operativas y del precio	1

Reformas a XM S.A. E.S.P. como operador del sistema	Medidas Regulatorias	Hoy, XM centraliza la información del SIN. Vía regulatoria tal como se creó la figura de XM se puede adicionar la labor de gestión de información del resto del sector. O definir un gestor general que consolide la información de XM con el resto.	Expedición de una resolución de la CREG reglamentando la actividad de monitoreo, creada por el artículo 2 de la Res. Creg 091 de 2007	Oportunidad para desarrollar servicios de medición inteligente distribuida garantizando privacidad, transparencia y economía de escala	4
Suficiencia de suministro de energía eléctrica. Reforma del Cargo por Confiabilidad con evaluación de impacto de migrar al esquema contractual	Contratos estandarizados ajustados a demanda horaria vía subastas periódicas, con amplio horizonte de planeación y duración (mayor 5 años)	Esta energía se compraría a través de contratos a plazo estandarizados de precio fijo y cantidad fija, ajustados a la demanda horaria de energía transados mediante subastas. Los contratos estandarizados pueden pactarse para diferentes horizontes de entrega: varios años (5 a 15 años), un año, trimestralmente o mensualmente. La subasta de los contratos debe realizarse con suficiente anticipación para que las nuevas fuentes de suministro puedan competir para proporcionar energía. Al menos tres años entre el cierre de la subasta y la entrega de energía.	No se requiere ajuste normativo dada la flexibilidad de la Resolución CREG 114 de 2018 para que los Mecanismos de Comercialización ofrezcan este producto.	Permite la programación de contratos inteligentes estandarizados bajo la normativa actual y personalizar los horizontes de entrega y realización de las mismas	1
	Alternativa a la obligatoriedad: Liberación del precio spot	cómo se señaló en Wolak (2019c), esta externalidad de confiabilidad ya no existe si la CREG está dispuesta a dejar el mercado de energía a corto plazo sin límites y también si está dispuesta a comprometerse a permitir que los precios de energía a corto plazo aumenten al nivel necesario para lograr la demanda horaria igual a la alimentación por hora durante todas las posibles condiciones del sistema.	Modificación de la Resolución CREG 119 de 1998. Por la cual se modifican y complementan algunas de las disposiciones contenidas en la Resolución CREG-217 de 1997, que establece el Estatuto de Racionamiento, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.	Permitiría el arbitraje económico de los prosumers para decidir si vender/comprar electricidad en función de la fluctuación horaria del precio Spot, mejorando la rentabilidad de sus activos energéticos distribuidos	1

Prioridad del Regulador	Recomendación de la MTE	Descripción de la recomendación	Ajustes normativos identificados como necesarios	Efectos sobre mercados eléctricos descentralizados (habilitado por Blockchain)	FOCO
UPME como Oficial de Información del Sector de energía eléctrica y gas natural	Interoperabilidad	Debería existir un listado de definiciones único para todos los agentes, de manera que el conocimiento fuera común, al igual que la arquitectura del sistema y el estándar de interoperabilidad, para poder aprovechar las economías de escala en la adquisición de los equipos.	Emitir regulación CREG y establecer qué puede ser reglamentado por el CNO Modificar la Resolución CREG 038 de 2014 Por la cual se modifica el Código de Medida contenido en el Anexo General del Código de Redes.	El protocolo blockchain de segunda generación, permite parametrizar capas interoperables entre los contratos inteligentes y las arquitecturas de gestión	2
	Acceso a datos	En lo referente al acceso a los datos de los clientes sería recomendable la creación de un contrato único para gestionar las autorizaciones correspondientes (para evitar confundir al usuario con múltiples autorizaciones). Sería recomendable también permitir que el cliente participe de los beneficios que se puedan derivar del uso de su información por parte de terceros, cuando esta información produzca un valor económico. Finalmente, en cuanto a interoperabilidad, ciberseguridad y el uso y protección de datos, se solicita a la CREG establecer condiciones y requisitos para el acceso a la información por parte de otros agentes siempre y cuando se respeten las consideraciones establecidas en las normas de protección de datos que aplican en el país (último párrafo tomado de Romero-Grass et al).	Emitir regulación CREG y establecer qué puede ser reglamentado por el CNO Modificar la Resolución CREG 038 de 2014 Por la cual se modifica el Código de Medida contenido en el Anexo General del Código de Redes.	El protocolo blockchain de segunda generación, permite parametrizar validación transaccional de los agentes garantizando anonimato y protección de identidad. Las cuales pueden ser liberadas por decisión del agente a través de funcionalidades o instrucciones embebidas en los contratos. El usuario/nodo tiene libertad para elegir qué información sería revelada	2

	Confidencialidad de los datos	Por lo tanto, es conveniente la CREG establezca criterios para determinar qué tipo de datos deben ser tratados de forma confidencial y cuál debe ser el formato y canal a través del cual se deben poner a disposición de los agentes del sistema, así como definir cuál debe ser la naturaleza de un agente autorizado para tener acceso a estos datos. Estos criterios deben intentar equilibrar los costos y beneficios potenciales (cuantificables o no) de adquirir y publicar dicha información con las potenciales limitaciones legales.	Modificar Resolución CREG 030 de 2018 Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional	los contratos inteligentes permiten la parametrización de funcionalidades o instrucciones embebidas que permitan elegir qué información sería revelada a quienes y bajo qué condiciones	3
	Gestor de información del resto del sector o gestor general	En cuanto a la gestión de información del sector, como medida administrativa y de rápida implementación se recomienda la integración de toda la información del sector en la plataforma del SIMEC.	No requiere ajuste regulatorio	Oportunidad para desarrollar servicios de medición inteligente distribuida garantizando privacidad, transparencia y economía de escala	4
Uso de areneras (SandBox) para permitir la innovación de productos, modelos de negocio y servicios	Pilotos para factibilidad técnica y económica	Ese debería ser el movimiento más inmediato para aumentar la visibilidad y transparencia de los sistemas de distribución. El plan de implementación de estos mapas debe comenzar con un proyecto piloto que demuestre la factibilidad tecnológica y económica de la práctica.	Implementación de proyectos piloto se puede a través de areneras Modificar Resolución CREG 030 de 2018 Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional	Las Areneras o SandBox permiten la prueba en tiempo real de arquitecturas transaccionales disruptivas como Blockchain aplicado a mercados p2p	3

<p>Prosumer / Comunidades de usuarios</p>	<p>El prosumer es un agente productor-consumidor (producer-consumer) que inyecta y retira energía en la red de distribución. Puede agrupar a usuarios en sitios diferentes y pueden ser cooperativas o personas naturales con requisitos mínimos. No debe ser una ESP y puede integrar otros combustibles como el gas natural.</p>	<p>Modificar la Resolución CREG 108 de 1997 Criterios generales sobre protección de los derechos de los usuarios de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible por red física, Modificar la Resolución CREG 156 de 2011 Reglamento de Comercialización del servicio público de energía eléctrica. Modificar la Resolución CREG 157 de 2011 Normas sobre el registro de fronteras comerciales y contratos de energía de largo plazo, y se adoptan otras disposiciones</p>	<p>Aceptar la existencia de prosumidores y comunidades/cooperativas de usuarios como agentes del mercado permitirá transacciones legalmente aceptadas entre estos y los demás agentes del mercado eléctrico</p>	<p>5</p>
<p>Microrredes</p>	<p>El principal desafío de su participación en el mercado es la coordinación entre la red y el resto del sistema.</p>	<p>Complementar la Resolución CREG 015 de 2018 Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional</p>	<p>La coordinación y reporte de usuarios en las micro-redes puede operarse a través de protocolos blockchain de arquitectura privada o híbrida, garantizando el anonimato y transparencia de la información suministrada entre los diferentes agentes</p>	<p>5</p>
<p>Microrredes y unbundling</p>	<p>las reglas de unbundling propuestas (es decir se permita integración si hay una única conexión a la red). Resuelve La dificultad de coordinación entre una microrred y el OSD o de acceso de terceros se presenta cuando la microrred comparte elementos propios del OSD</p>	<p>Expedir regulación reglamentando las reglas de desintegración vertical y la relación promotor de la microrred y el distribuidor</p>	<p>Permitirá la prestación de servicios de valor agregado del prosumidor hacia el Distribuidor persiguiendo objetivos de calidad y confiabilidad</p>	<p>5</p>

<p>Uso de Areneras o laboratorios de innovación</p>	<p>El SandBox de Ofgem permite probar productos, modelos de negocio y servicios. El test es temporal, de pequeño tamaño y orientado a un grupo de clientes, bajo la premisa de que un test permanente o de amplio alcance implicaría que el esquema de regulación es inadecuado. Los criterios aplicados por los reguladores para calificar un proyecto como susceptible de tratamiento de laboratorio son:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La propuesta debe ser "genuinamente" innovadora. Esto implica que el proceso no está en el mercado o es lo suficientemente diferente de procesos actuales. 2. El proceso traerá beneficios a los consumidores que, de cualquier manera, estarán protegidos durante el período de duración del laboratorio. La empresa debe presentar un análisis de riesgos y un esquema de su mitigación durante el período de la prueba. 3. Demostrar que una imposición regulatoria impide la innovación. Esto permite saber cuál es la regla que debe ser temporalmente removida en el experimento. 4. El proyecto puede ser testeado. La empresa presenta un plan detallado con objetivos y con indicadores de desempeño y éxito que permitan evaluar la innovación. Estos deben ser cumplidos a los 24 meses de haberse otorgado la exención regulatoria. 	<p>Alternativa 1: Minenergía emite señal de política pública indicando qué debe cumplir arenera, iniciativa de oficio o privada y su interrelación con la regulación</p> <p>Alternativa 2: Expedir regulación de la CREG identificando la oportunidad de arenera, poner reglas de escenario controlado, revisar la evolución y conflicto de interés.</p>	<p>Cuando la arenera requiera de una "excepción regulatoria", Se requiere de la iniciativa CREG para su adopción. Cuando la arenera sea para evaluar si se regula o no una actividad, la iniciativa puede venir por el Minenergía con apoyo de la UPME</p>	<p>5</p>
---	---	--	--	----------

Referencias

La bibliografía empleada como material de soporte y referencia se presenta a continuación:

- Agencia de Noticias UN-. (2018, July 31). *Blockchain* blindo registro de restitución de tierras - UNIMEDIOS: Universidad Nacional de Colombia. *Unimedios | Agencia de Noticias UN*, 3. <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/blockchain-blindo-registro-de-restitucion-de-tierras.html>
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100(February 2018), 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Arango-Arango, C. A., & Bernal-Ramírez, J. F. (2018). *Documentos Técnicos o de Trabajo BANCO DE LA REPÚBLICA-COLOMBIA*. <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/presentacion-ghernandez-17-08-2017.pdf>
- Barrera-rego, C. A. A. M. M., Boada-ortiz, J. F. B. A., Arango-arango, C. A., & Bernal-ramírez, J. F. (n.d.). *Criptoactivos*.
- Benavides, J., Cadena, Á., González, J. J., Hidalgo, C., & Piñeros, A. (2018). *Mercado Eléctrico En Colombia: Transición Hacia Una Arquitectura Descentralizada*. 160.
- Boreiko, D., Ferrarini, G., & Giudici, P. (2019). Blockchain Startups and Prospectus Regulation. *European Business Organization Law Review*, 20(4), 665–694. <https://doi.org/10.1007/s40804-019-00168-6>
- Boughaci, D., & Boughaci, O. (2019). A Comparative Study of Three Blockchain Emerging Technologies: Bitcoin, Ethereum and Hyperledger. *Communications in Computer and Information Science*, 1097 CCIS, 3–7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36365-9_1
- Budman, M.;e. al. (2021). *Deloitte's 2021 Global Blockchain Survey*. https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/articles/US144337_Blockchain-survey/DI_Blockchain-survey.pdf
- Burger, C., Trbovich, A., Weinmann, J., & Richard, P. (2018). Vulnerabilities in smart meter

- infrastructure – can blockchain provide a solution? *Background Paper*, 1–30. www.esmt.org
- Buterin, V. (2021a). *An approximate introduction to how zk-SNARKs are possible*. Vitalik .Ca. <https://vitalik.ca/general/2021/01/26/snarks.html>
- Buterin, V. (2021b). *An Incomplete Guide to Rollups*. Vitalik.Ca. <https://vitalik.ca/general/2021/01/05/rollup.html>
- Buterin, V. (2021c). *Why sharding is great: demystifying the technical properties*. Vitalik .Ca. <https://vitalik.ca/general/2021/04/07/sharding.html>
- Buterin, V., Hernandez, D., Kamphofner, T., Pham, K., Qiao, Z., Ryan, D., Sin, J., Wang, Y., & Zhang, Y. X. (n.d.). *Combining GHOST and Casper*.
- Cadena, A. et al. (2020). *INFORMES SEGUNDA FASE MISIÓN DE TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA HOJA DE RUTA PARA LA ENERGÍA DEL FUTURO*.
- Cao, Y. (2019). Energy Internet blockchain technology. In *The Energy Internet*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102207-8.00003-5>
- Caradonna, T. (2020). Blockchain and society. *Informatik Spektrum 2020* 43:1, 43(1), 40–52. <https://doi.org/10.1007/S00287-020-01246-7>
- Chen, T., Pourbabak, H., & Su, W. (2019). Electricity market reform. In *The Energy Internet*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102207-8.00005-9>
- Cheng, S., Zeng, B., & Huang, Y. Z. (2017). Research on application model of blockchain technology in distributed electricity market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/93/1/012065>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2019). *CIRCULAR No. 072* (Issue 072). [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/b3f5512e987fd6c4052584720057e239/\\$FILE/Circular072-2019.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/b3f5512e987fd6c4052584720057e239/$FILE/Circular072-2019.pdf)
- Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG]. (2019). *Documento de consulta estrategia integral de seguridad digital en el sector eléctrico*. [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/b3f5512e987fd6c4052584720057e239/\\$FILE/Circular072-2019 Anexo1.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/52188526a7290f8505256eee0072eba7/b3f5512e987fd6c4052584720057e239/$FILE/Circular072-2019 Anexo1.pdf)
- Guía de Ciberseguridad, 30 (2019). <https://cnostatic.s3.amazonaws.com/cno-public/archivosAdjuntos/anexoacuerdo1241.pdf>
- Contreras, N. (2021). *La regulación de criptomonedas en Colombia | Negocios en*

- Colombia Abusaid Gómez y Asociados. Abusaid Gomez y Asociados. <https://abusaidgomez.com/la-regulacion-de-criptomonedas-en-colombia/>
- Corbet, S., Lucey, B., Urquhart, A., & Yarovaya, L. (2018). Cryptocurrencies as a financial asset: A systematic analysis. *International Review of Financial Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2018.09.003>
- Crunchbase. (2021a). *Cycle - Crunchbase Company Profile & Funding*. CrunchBase. <https://www.crunchbase.com/organization/cycle-7f3f>
- Crunchbase. (2021b). *NEU Energy - Crunchbase Company Profile & Funding*. Crunch. <https://www.crunchbase.com/organization/neu-energy>
- Cycle. (2021). *Productos – Cycle Shop*. Productos. <https://shop.cyclesystem.org/tienda/>
- Deloitte; Fortinet. (2020). *CIBERSEGURIDAD EN EL SECTOR ELÉCTRICO Amenazas para sistemas TI y OT*.
- Dhillon, V., Metcalf, D., & Hooper, M. (2017a). Foundations of Blockchain. In *Blockchain Enabled Applications* (pp. 15–24). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3081-7_3
- Dhillon, V., Metcalf, D., & Hooper, M. (2017b). The DAO Hacked. *Blockchain Enabled Applications*, 67–78. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3081-7_6
- Dimitriou, T., & Karame, G. (2013). Privacy-friendly tasking and trading of energy in smart grids. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing - SAC '13*. <https://doi.org/10.1145/2480362.2480488>
- Dowlat, S. (2018). *CRYPTO ASSET MARKET COVERAGE INITIATION: MARKET COMPOSITION*. https://research.bloomberg.com/pub/res/d2gg3p_HTg39HRCuzQjlyy8NVZQ
- Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2013). Advanced Process Modeling. In *Fundamentals of Business Process Management* (pp. 97–153). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33143-5_4
- Dutsch, G., & Steinecke, N. (2017). *Use Cases for Blockchain Technology in Energy & Commodity Trading*.
- EcoGox. (2021). *EcoGox*. Ecogox Website. <https://www.ecogox.com/>
- EcoRegistry. (2021). *EcoRegistry*. Ecoregistry Website. <https://www.ecoregistry.io/>
- Felgueiras, M., Batista, F., & Carvalho, J. P. (2020). Creating Classification Models from Textual Descriptions of Companies Using Crunchbase. *Communications in Computer*

- and Information Science*, 1237 CCIS, 695–707. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50146-4_51
- Fintech, C. (2020). *INFORME SECTORIAL* (Vol. 03). https://global-uploads.webflow.com/58c5b8748712539d1de79645/6055254862c7360c694da3d4_InformeSectorialFintank2020-ColombiaFintech.pdf
- Gervasi, O., Murgante, B., Misra, S., Stankova, E., Torre, C. M., Maria, A., Taniar, D., Apduhan, B. O., & Hutchison, D. (2013). *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013* (Vol. 7974). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39649-6>
- Global, P. (2017). *Blockchain-an Opportunity for Energy Producers and Consumers?* www.pwc.com/utilities
- Grupo TYT. (2018). *Universidad Nacional de Colombia : Proyecto Electrochain Codensa*. Grupo TYT Medellín. <http://grupotytm.edellin.unal.edu.co/noticias/73-proyecto-electrochain-codensa>
- Gurtu, A., & Johny, J. (2019). Potential of blockchain technology in supply chain management: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(9), 881–900. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-11-2018-0371>
- Hartnett, S., Henly, C., Hesse, E., Hildebrandt, T., Jentzch, C., Krämer, K., Macdonald, G., Morris, J., Touati, H., & Trbovich, A. (2018). *The Energy Web Chain*. <http://www.energyweb.org/papers/the-energy-web-chain>
- Hodapp, Michael. (2018). *CRYPTO ASSET MARKET COVERAGE INITIATION: TRADING & CUSTODY SEPTEMBER 18, 2018*. <https://research.bloomberg.com/pub/res/d3h2iTIKWla4FTLKGJsUn3mis5g>
- Hodapp, Michal. (2018). *CRYPTOASSET MARKET COVERAGE INITIATION: VALUATION AUGUST 30, 2018*. https://research.bloomberg.com/pub/res/d37g1Q1hEhBkiRCu_ruMdmSbc0A
- Insights, D., & Deloitte, G. De. (2017). *Evolución de la tecnología de la cadena de bloques* ♦.
- Knirsch, F., Unterweger, A., & Engel, D. (2019). Implementing a blockchain from scratch: why, how, and what we learned. *Eurasip Journal on Information Security*, 2019(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13635-019-0085-3>

- Konstantinidis, I., Siaminos, G., Timplalexis, C., Zervas, P., Peristeras, V., & Decker, S. (2018). Blockchain for business applications: A systematic literature review. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 320, 384–399. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93931-5_28
- Kshetri, N. (2021). The Economics of Central Bank Digital Currency. *COMPUTING'S ECONOMICS*, 0018-9162/, 6. <https://doi.org/10.1109/MC.2021.3070091>
- Liang, W., & Ji, N. (2021). Privacy challenges of IoT-based blockchain: a systematic review. *Cluster Computing*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03260-0>
- Liu, G., Qu, L., Zeng, R., & Gao, F. (2019). Energy Internet in China. *The Energy Internet*, 265–282. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102207-8.00012-6>
- Liu, J., & Serletis, A. (2019). Volatility in the Cryptocurrency Market. *Open Economies Review* 2019 30:4, 30(4), 779–811. <https://doi.org/10.1007/S11079-019-09547-5>
- Lozano, R., Vargas, B., & Desarrollo, N. De. (2019). *EcoRegistry , el nuevo actor que dinamizará el mercado de carbono de Colombia*. 7–8.
- Macrinici, D., Cartofeanu, C., & Gao, S. (2018). Smart contract applications within blockchain technology: A systematic mapping study. *Telematics and Informatics*. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.10.004>
- Madureira, A., Den Hartog, F., Bouwman, H., & Baken, N. (2013). *Empirical validation of Metcalfe's law: How Internet usage patterns have changed over time*. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2013.07.002>
- Mallett, C. T. (2018). *Harvesting Sunshine with Smart Solar Panels and Cryptocurrencies*. 257–269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69844-1_24
- Melo, C., Dantas, J., Pereira, P., & Maciel, P. (2021). Distributed application provisioning over Ethereum-based private and permissioned blockchain: availability modeling, capacity, and costs planning. *Journal of Supercomputing*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03617-z>
- Mending, J., Weber, I., Van Der Aalst, W., Brocke, J. Vom, Cabanillas, C., Daniel, F., Debois, S., Di Ciccio, C., Dumas, M., Dustdar, S., Gal, A., García-Bañuelos, L., Governatori, G., Hull, R., La Rosa, M., Leopold, H., Leymann, F., Recker, J., Reichert, M., ... Zhu, L. (2018). Blockchains for business process management - Challenges and opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems*, 9(1). <https://doi.org/10.1145/3183367>

-
- Metcalfe, D., & Hooper, M. (2017). *Blockchain Enabled Applications Understand the Blockchain Ecosystem and How to Make it Work for You-Vikram Dhillon*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3081-7>
- Metcalfe, W. (2020). Ethereum, Smart Contracts, DApps. *Economics, Law, and Institutions in Asia Pacific*, 77–93. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3376-1_5
- Mitra, R. (2020). *Fungible vs Non-Fungible Tokens - What is The Difference? - Blockgeeks*. BlockGeeks. <https://blockgeeks.com/guides/fungible-vs-non-fungible-tokens-what-is-the-difference/>
- Mohanty, D. (2019). Barter to Blockchain. *R3 Corda for Architects and Developers*, 1–47. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4529-3_1
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., & Stewart, L. A. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews* 2015 4:1, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Consulted, 1–9. doi:10.1007/s10838-008-9062-0stem. In *Journal for General Philosophy of Science* (Vol. 39, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s10838-008-9062-0>
- Nelson, B. (2018). Financial stability and monetary policy issues associated with digital currencies. *Journal of Economics and Business*. <https://doi.org/10.1016/j.jeconbus.2018.06.002>
- Neu Energy. (2021). *NEU - Energy & Technologies*. Nuestras Tarifas. <https://www.neu.com.co/rates>
- Newbery, D. (2017). Tales of two islands – Lessons for EU energy policy from electricity market reforms in Britain and Ireland. *Energy Policy*, 105, 597–607. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2016.10.015>
- Nikolakis, W., John, L., & Krishnan, H. (2018). *How Blockchain Can Shape Sustainable Global Value Chains: An Evidence, Verifiability, and Enforceability (EVE) Framework*. <https://doi.org/10.3390/su10113926>
- Ordoñez, L. A. T., Niviayo, E. J. R., & Molano, J. I. R. (2019). Approach to Blockchain and Smart Contract in Latin America: Application in Colombia. *Communications in*

- Computer and Information Science*, 1052, 500–510. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31019-6_42
- Osinger, J. (2021). *Crypto Market Retakes \$2 Trillion Market Cap Amid Bitcoin Gains - Bloomberg*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-15/crypto-market-retakes-2-trillion-market-cap-amid-bitcoin-gains>
- Pawczuk, L., Holdowsky, J., Massey, R., & Hansen, B. (2020). Deloitte's 2020 Global Blockchain survey. In *Deloitte Insights*. https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6608_2020-global-blockchain-survey/DI_CIR_2020_global_blockchain_survey.pdf
- Pichler, M., Meisel, M., Goranovic, A., Leonhartsberger, K., Lettner, G., Chasparis, G., Vallant, H., Marksteiner, S., & Bieser, H. (2019). Decentralized energy networks based on blockchain: background, overview and concept discussion. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 339, 244–257. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04849-5_22
- Pîrlea, G., Kumar, A., & Sergey, I. (2021). Practical Smart Contract Sharding with Ownership and Commutativity Analysis. *PLDI '21, June 20-25*, 15. <https://doi.org/10.1145/3453483.3454112>
- Priem, R. (2020). Distributed ledger technology for securities clearing and settlement: benefits, risks, and regulatory implications. In *Financial Innovation* (Vol. 6, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s40854-019-0169-6>
- PWC. (2018). Blockchain is here. What's your next move? In *Strategy & Insights*. <https://doi.org/HK-20180905-2-C3>
- R.Vignesh, A. S. (2017). Security on Internet of Things (IoT) Systems. *The Journal of Information Science and Technology Association*, 67(11), 577–581. https://doi.org/10.18919/jkg.67.11_577
- Rajnak, V., & Puschmann, T. (2020). The impact of blockchain on business models in banking. *Information Systems and E-Business Management*. <https://doi.org/10.1007/s10257-020-00468-2>
- Risius, M., & Spohrer, K. (2017). A Blockchain Research Framework: What We (don't) Know, Where We Go from Here, and How We Will Get There. *Business and Information Systems Engineering*, 59(6), 385–409. <https://doi.org/10.1007/s12599->

017-0506-0

- Saraf, C., & Sabadra, S. (2018). Blockchain platforms: A compendium. *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376323>
- Singhal, B., Dhameja, G., & Panda, P. S. (2018a). How Bitcoin Works. *Beginning Blockchain*, 149–217. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3444-0_3
- Singhal, B., Dhameja, G., & Panda, P. S. (2018b). How Blockchain Works. *Beginning Blockchain*, 31–148. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3444-0_2
- Sociedades, S. De. (2020). *realizar pruebas temporales en la Arenera de la SFC de operaciones de cash-in y cash-out en productos financieros de depósito a nombre de plataformas de criptoactivos*. <https://www.superfinanciera.gov.co/inicio/innovasfc/laarenera/proyecto-piloto-para-realizar-pruebas-en-laarenera-de-operaciones-de-cash-in-y-cash-out-en-productos-financieros-de-deposito-a-nombre-de-plataformas-de-criptoactivos-10107301>
- Solarplaza. (2018). *Comprehensive Guide to Companies involved in Blockchain and Energy*.
- Suárez, M. F. (2018). *Energética Transformación*. Ministerio de Minas y Energía de Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24090708/Mision+transformacion.pdf>
- Superfinanciera. (2021). *SandBox_Blockchain_Colombia_Superfinanciera.pdf*. <https://www.superfinanciera.gov.co/jsp/10108501>
- Tao, Y., Li, B., Jiang, J., Chu Ng, H., Wang, C., Li, B., & Kong, H. (2020). *On Sharding Open Blockchains with Smart Contracts; On Sharding Open Blockchains with Smart Contracts*. <https://doi.org/10.1109/ICDE48307.2020.00121>
- Thakur, S., & Breslin, J. G. (2018). Peer to Peer Energy Trade Among Microgrids Using Blockchain Based Distributed Coalition Formation Method. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 3(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40866-018-0044-y>
- Treiblmaier, H. (2018). The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action. *Supply Chain Management*, 23(6), 15.

- <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2018-0029>
- Valentová, M., Horák, M., & Dvořáček, L. (2020). Why transaction costs do not decrease over time? A case study of energy efficiency programmes in Czechia. *Energy Policy*, 147, 111871. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111871>
- Velásquez, J. D. (2015a). Una guía corta para escribir revisiones sistemáticas de literatura parte 1. *DYNA (Colombia)*, 82(190), 9–12. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.49511>
- Velásquez, J. D. (2015b). Una guía corta para escribir revisiones sistemáticas de literatura parte 3. *DYNA (Colombia)*, 82(190), 9–12. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.49511>
- Venegas Loaiza, A. (2018, June 12). Colombia es el segundo país con mayor operación de Blockchain en Latinoamérica. *La Republica*, 3. <https://www.larepublica.co/finanzas/colombia-es-el-segundo-pais-con-mayor-operacion-de-blockchain-en-latinoamerica-2736690>
- Verma, P., O'Regan, B., Hayes, B., Thakur, S., & Breslin, J. G. (2018). EnerPort: Irish Blockchain project for peer- to-peer energy trading. *Energy Informatics 2018 1:1*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S42162-018-0057-8>
- Viriyasitavat, W., Da Xu, L., Bi, Z., & Sapsomboon, A. (2018). Blockchain-based business process management (BPM) framework for service composition in industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1422-y>
- Weking, J., Mandalenakis, M., Hein, A., Hermes, S., Böhm, M., & Krcmar, H. (2019). The impact of blockchain technology on business models – a taxonomy and archetypal patterns. *Electronic Markets 2019 30:2*, 30(2), 285–305. <https://doi.org/10.1007/S12525-019-00386-3>
- Wörner, A., Meeuw, A., Ableitner, L., Wortmann, F., Schopfer, S., & Tiefenbeck, V. (2019). Trading solar energy within the neighborhood: field implementation of a blockchain-based electricity market. *Energy Informatics 2019 2:1*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S42162-019-0092-0>
- Xing, G., Duan, Z., Yan, W., & Baykal-Gürsoy, M. (2021). Evaluation of “innovation chain + supply chain” fusion driven by blockchain technology under typical scenario. *International Journal of Production Economics*, 242, 108284. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2021.108284>

-
- Xu, Y., Ahokangas, P., Yrjölä, S., & Koivumäki, T. (2018). The blockchain marketplace as the fifth type of electricity market. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, 245*, 278–288. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94965-9_28
- Yan, H., Huang, B.-B., & Hong, B.-W. (2017). *Distributed Energy Transaction Pattern and Block Chain Based Architecture Design*.
- Yang, W., Garg, S., Raza, A., Herbert, D., & Kang, B. (2018). Blockchain: Trends and future. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11016 LNAI, 201–210. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97289-3_15
- Yao, C., Zhang, Z., Yu, J., Feng, W., Zhou, C., & Han, Y. (2018). Research on operation and management multi-node model of mega city energy Internet. *Global Energy Interconnection*, 1(2), 130–136. <https://doi.org/10.14171/J.2096-5117.GEI.2018.02.004>
- Yli-Huomo, J., Ko, D., Choi, S., Park, S., & Smolander, K. (2016). Where Is Current Research on Blockchain Technology?—A Systematic Review. *PLOS ONE*, 11(10), 1–27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163477>
- Zhang, J. (2021). *Sustainable Energy Technologies and Assessments 44 (2021) 101051 Distributed network security framework of energy internet based on internet of things*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101051>
- Zhang, Y., & Farnoosh, A. (2019). Analyzing the dynamic impact of electricity futures on revenue and risk of renewable energy in China. *Energy Policy*, 132, 678–690. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.06.011>
- Zheng, D., Deng, K., Zhang, Y., Zhao, J., Zheng, X., & Ma, X. (2018). Smart grid power trading based on consortium blockchain in Internet of Things. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11336 LNCS, 453–459. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05057-3_34