

Tipo de documento: Tesis de maestría

Maestría en Finanzas

Criptomonedas y sostenibilidad ¿una relación irreconciliable?

Autoría: Scervino, Franco

Año académico: 2023

¿Cómo citar este trabajo?

Scervino, F. (2023) "Criptomonedas y sostenibilidad ¿una relación irreconciliable?". [*Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella*].

Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella

<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/12065>

El presente documento se encuentra alojado en el Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella bajo una licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 2.5 Argentina (CC BY-NC-SA 2.5 AR)

Dirección: <https://repositorio.utdt.edu>



UNIVERSIDAD
TORCUATO DI TELLA

Trabajo Final de Graduación

Maestría en Finanzas UTDT

Año Académico 2023

Alumno: Franco Scervino

Tutor: Matías Bardini

Criptomonedas y sostenibilidad ¿una relación irreconciliable?

ÍNDICE

Abstract.....	3
Introducción.....	4
Desarrollo.....	6
Capítulo I: Energía. Sostenibilidad y renovables.....	6
Sostenibilidad.....	6
Neutralidad de Carbono y Carbono Negativo.....	13
Energías renovables.....	13
Bioenergía.....	14
Energía Eólica.....	14
Energía Geotérmica.....	15
Energía Hidroeléctrica.....	16
Energía Oceánica.....	17
Energía Solar.....	17
Análisis de Costos de las Energías Renovables.....	18
Capítulo II: Finanzas Descentralizadas y Criptomonedas.....	29
Emisión de Criptomonedas.....	32
Bitcoin y el Minado de Criptomonedas: Proof of Work.....	32
Ethereum y el Staking: Proof of Stake.....	35
Capítulo III: Bitcoin y Sostenibilidad: Perspectivas, Desafíos y Soluciones.....	37
Análisis del Consumo Energético de la Red de Minado de Bitcoin.....	38
Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index.....	38
Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index.....	40
Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index.....	43
Bitcoin Mining Council.....	45
Proyectos y Soluciones para la Sostenibilidad de la Minería de Bitcoin.....	46
Crypto Climate Accord.....	47
Bitcoin Clean Energy Initiative.....	48
Certificados de Energía Renovable.....	49
Aprovechamiento de Excedente Energético.....	51
Desafíos y Perspectivas.....	52
Consumo Energético.....	52
Regulación.....	53
Pérdida de Rentabilidad.....	54
Volatilidad.....	54
Conclusiones.....	55
Bibliografía.....	57

ABSTRACT

En el presente trabajo se analiza la relación entre sostenibilidad y criptomonedas, y los posibles beneficios de dicha vinculación, partiendo de la siguiente hipótesis: desde un punto de vista económico-financiero, resulta conveniente para Bitcoin volverse una industria sostenible.

En primer lugar, se realiza la caracterización de la noción de industria sostenible junto con la identificación de las energías renovables y tecnologías asociadas, incorporando estadísticas y estudios especializados en energías renovables, sus costos y proyecciones.

Posteriormente, se explican las Finanzas Descentralizadas en oposición a las Finanzas Centralizadas (o “tradicionales”) focalizando en las criptomonedas, su funcionamiento y mecanismos de validación.

Más avanzado el estudio, se detalla la composición de la red de minado de Bitcoin. Además, se comentan los proyectos e iniciativas de la comunidad Bitcoin con relación a las energías renovables y la sostenibilidad.

Ulteriormente, se consideran los desafíos y perspectivas que posee Bitcoin por delante y las potenciales soluciones que brindaría su constitución como una industria sostenible.

Finalmente, se efectúan reflexiones finales en torno a la comprobación de la hipótesis en virtud de los beneficios económico-financieros que supone para Bitcoin de volverse una industria sostenible.

Palabras clave: Industria Sostenible – Energías Renovables – Criptomonedas - Bitcoin - Minado

INTRODUCCIÓN

De un tiempo a esta parte, los mercados y la economía en su conjunto se han visto sujetos a niveles de volatilidad raramente vistos. Vale mencionar, a grandes rasgos, factores como crisis financieras, pandemias y guerras, como ejemplos de desencadenantes. En un contexto de incertidumbre y crisis, no resulta extraño encontrar la génesis de los grandes cambios (fácilmente pueden encontrarse menciones al respecto esbozadas por grandes autores). Es en este marco donde aparece la temática sobre la cual versa el presente trabajo: las criptomonedas.

En línea con ello, podemos encontrar como punto de partida la crisis financiera acaecida entre el 2007 y 2008 en Estados Unidos como consecuencia de las hipotecas *subprime*. Puntualmente, a finales del 2008, Satoshi Nakamoto (se desconoce si se trata de un individuo o un conjunto de individuos actuando bajo un seudónimo) ideó lo que fue la primera criptomoneda: el Bitcoin. De este modo, no resulta casual que en su documento constitutivo (este tipo de documento es conocido como *White paper*), se refiera a la intermediación de las instituciones financieras en su rol de “terceros de confianza” como una de las desventajas del sistema financiero imperante. De esta manera, lo que se busca es un sistema que permita las transacciones entre dos individuos sin que medie un tercero.

En efecto, dentro de las nociones básicas del protocolo *Bitcoin* (así como en gran parte de las criptomonedas existentes) radica la inexistencia de un tercero erigido como garante. En otras palabras, se opone diametralmente a las finanzas tradicionales centralizadas dejando, en particular, vacío el rol de un ente financiero de contralor (como pudiese ser un Banco Central). Aquí es donde puede aparecer uno de los grandes interrogantes de la temática: ¿Quién regula estas monedas? Asimismo, derivada de esta, puede incluirse otra cuestión: ¿Cómo se crean? Si bien ambas cuestiones serán discutidas más adelante, puede adelantarse que existen dos mecanismos principales de generación de criptomonedas: *Proof of Work* y *Proof of Stake*. Hoy en día utilizados por *Bitcoin* y *Ethereum* (segunda criptomoneda con mayor capitalización de mercado, detrás de *Bitcoin*), respectivamente.

Como es de imaginarse, la generación de criptomonedas (activos digitales) contempla el uso de energía como fuente de abastecimiento y, en este sentido, dicho fenómeno no se encuentra exento de críticas. El objetivo del presente trabajo es estudiar este supuesto y, en consecuencia, adentrarse en las posibilidades que tiene *Bitcoin* de convertirse en una industria sostenible con el ambiente. Asimismo, se estudiará su capacidad de volverse no solo carbono neutral, sino también carbono negativo. Al respecto, partiremos de la siguiente hipótesis: desde un punto de vista económico-financiero, resulta conveniente para *Bitcoin* volverse una industria sostenible.

Para llevar a cabo dicha tarea, se referirán y describirán las energías renovables en contraposición con las energías no renovables (fósiles), caracterizando, a su vez, el concepto de industria sostenible. De esta manera, se intentará demostrar la conveniencia económico-financiera de cambiar la fuente de la energía (partiendo de combustibles fósiles hacia energías renovables) con la utilización de estudios orientados a la comparación de costos y eficiencia energética. Posteriormente, se analizarán las características de las denominadas Finanzas Descentralizadas, los métodos de generación de criptomonedas y su funcionamiento, mencionando la situación de la red *Ethereum* y su cambio de método de consenso (*Proof of Work* a *Proof of Stake*).

Luego, mediante la utilización de estadísticas, se analizará la situación actual de la red de minado y la fuente de generación de la energía utilizada por esta. A la luz de ello, se identificará el consumo energético y el volumen de gases de efecto invernadero que ello provoca. Progresando en el trabajo, se buscará comprobar la rentabilidad de la utilización de energías renovables analizando el impacto financiero en el minado de *Bitcoin*. A mayor abundamiento, se analizará el estado actual del ecosistema *Bitcoin*, mencionando los distintos proyectos y objetivos discutidos por la comunidad en miras de lograr mayor eficiencia energética y reducir el impacto en el ambiente del protocolo actual que es intensivo en uso de energía eléctrica.

Más adelante, se estudiarán las posibilidades de utilización de energía que, de otro modo, se vería desperdiciada, ejemplificando con empresas y proyectos que se encuentran en pleno desarrollo actualmente. De este modo, se pretenderá comprobar si existen beneficios en la relación entre el cuidado ambiental y el minado de *Bitcoin* y, también, su capacidad de volverse carbono negativo y la conveniencia económica de su utilización para la mitigación de la emisión de gases.

Por último, se considerarán los desafíos y escollos que tiene *Bitcoin* por delante. En este sentido, se revisarán las variables que podrían afectar y/o dificultar la migración energética del protocolo y su injerencia en lo analizado a lo largo del trabajo. En relación con ello, se observarán las limitaciones existentes y las posibles soluciones y/o complementos que podrían permitir sortearlas, de manera de lograr que *Bitcoin* no solo arribe al objetivo de convertirse en una industria sostenible, sino que encuentre un beneficio redituable en ello.

DESARROLLO

Capítulo I: Energía. Sostenibilidad y renovables

Sostenibilidad

La energía ha supuesto una temática de estudio y de interés a lo largo de la historia del hombre. La propia supervivencia del hombre y la satisfacción de sus necesidades básicas depende en gran medida de la energía, del mismo modo que los grandes inventos y mejoras tecnológicas que han ido concatenándose con el devenir de los años se han mantenido estrechamente vinculados a la fuente de energía que los alimentaba. Posteriormente, con la sucesiva aparición de desastres naturales, problemas climáticos y contaminación, la sociedad y la comunidad internacional comenzó a focalizarse en los recursos utilizados para la generación de energía, producción de bienes y consumo. El ambiente, su cuidado y desarrollo comenzaron a formar parte de la agenda política de los Estados como respuesta a estas acuciantes problemáticas.

En efecto, puede identificarse a 1972 con la celebración de la “Conferencia Internacional sobre el Medio Humano” (también conocida como “Conferencia de Estocolmo” por la sede de su realización en Estocolmo, Suecia) como el puntapié inicial donde el interés pasaba no solo por la gestión y aprovechamiento de los recursos naturales, sino que, a su vez, se tomaba en consideración su preservación. El resultado de dicha reunión fue la “Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano” consistente en una serie de proclamas y 26 principios cuyo objeto, además de la conservación del ambiente, era sentar pautas de manejo ambiental. Asimismo, comienzan a introducirse nociones referidas al aprovechamiento y explotación de recursos no solo en miras al desarrollo presente sino asegurando la posibilidad de las generaciones futuras de gozar de estos (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano, 1972).

Como puede vislumbrarse, la concepción de una explotación racional de los recursos con el objeto de garantizar su disponibilidad para el futuro comenzaba a ocupar un rol fundamental en las discusiones sobre la temática ambiental. Posteriormente, en 1987, se da a conocer el informe “Nuestro futuro común” (también conocido como “Informe Brundtland” en referencia a quien presidió la comisión y fuera Primera Ministra de Noruega, la doctora Gro Harlem Brundtland) presentado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (en adelante, la “Comisión”). Dicho informe deviene crucial en el tópico bajo análisis en tanto enuncia por primera vez la noción de “desarrollo sostenible”.

Puntualmente,

Está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, duradero, o sea, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. El concepto de desarrollo duradero implica límites – no límites absolutos, sino limitaciones que imponen a los recursos del medio ambiente del estado actual de la tecnología y de la organización social y la capacidad de la biosfera de absorber los efectos de las actividades humanas (...) El desarrollo duradero a nivel mundial exige que quienes son más ricos adopten modos de vida acordes con medios que respeten la ecología del planeta, en el uso de la energía, por ejemplo (...) Pero en último término, el desarrollo duradero no es un estado de armonía fijo, sino un proceso de cambio por el que la explotación de los recursos, la dirección de las inversiones, la orientación de los progresos tecnológicos y la modificación de las instituciones se vuelven acordes con las necesidades presentes tan bien (sic) como con las futuras (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

De la caracterización realizada por la Comisión en el “Informe Brundtland”, puede identificarse la noción basal del concepto del desarrollo sostenible, el aprovechamiento de los recursos en el presente de manera que no se comprometa la capacidad de explotación por parte de las generaciones futuras. A su vez, la concepción de desarrollo sostenible acarrea una noción más amplia, no solo orientada al uso

racional de la energía, sino a la aplicación de esta concepción “intergeneracional” en las inversiones, tecnologías e incluso instituciones. A propósito de ello y no en vano, el informe afirma que el desarrollo sostenible deberá sostenerse, principalmente, en la voluntad política (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

Continuando con el análisis del Informe Brundtland, la investigación introduce entre sus inferencias el estudio de las energías y las posibles alternativas en busca del desarrollo. Lo que es más, analiza el consumo mundial de energía para la época y contempla 2 hipótesis sobre las futuras necesidades de energía y el comportamiento del suministro y la demanda. A su vez, investiga sobre el uso de los combustibles fósiles (a los cuales refiere como “el dilema permanente”) y, en lo que compete al presente trabajo, se adentra en las energías renovables a quienes, en contraposición al “dilema” que suponen los combustibles fósiles, identifica como “un potencial sin aprovechar” (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

Incluso, en su informe la Comisión caracteriza a las energías renovables como más eficientes y poseedoras de un mejor funcionamiento para usos rurales y suburbanos y, lo que resulta aún más interesante para la época en la que fue redactado el informe, destaca su menor exposición a fluctuaciones de precio y desembolsos de moneda extranjera (en comparación a los combustibles fósiles)¹. Del mismo modo, reconoce la existencia en gran parte de los países de algún tipo de recurso renovable lo que permitiría acercarse a la independencia energética y/o “autosuficiencia”, ello en contraposición a la situación que se verifica en los combustibles fósiles donde las reservas de dicho recurso se encuentran concentradas en un menor número de naciones (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

Como nota adicional, si bien se profundizará sobre la temática de energías renovables a la brevedad, es pertinente destacar

[l]a necesidad de una transición continua hacia una combinación más amplia y duradera de energías. A ello pueden contribuir de manera apreciable las fuentes de energía renovables, sobre todo gracias a técnicas nuevas o mejoradas, pero su aprovechamiento dependerá a corto plazo de la supresión o por lo menos atenuación de ciertas barreras económicas e institucionales que entorpecen su uso y que en algunos países son enormes (...) La Comisión entiende que debe hacerse todo lo posible por explotar el potencial de energía renovable, que deberá ser el fundamento de la estructura mundial de energía en el siglo XXI (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987).

Pocos años después, en 1992, se celebra la “Cumbre de la Tierra” en Rio de Janeiro, Brasil. Dicha cumbre resulta vital para la materia en tanto recoge las conclusiones del “Informe Brundtland” y concluye con la “Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo” y el “Programa 21”. La primera supone la reafirmación de la “Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano”, la enunciación de 27 principios y la cristalización del desarrollo sostenible (siguiendo la terminología del “Informe Brundtland”) como pauta y guía para el futuro de la humanidad y el planeta tierra. El principio tercero refleja claramente esta afirmación: “El derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras.” (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992a).

Además, especial mención debe hacerse a los principios cuarto y octavo de la “Declaración de Río” en tanto profundizan las preocupaciones que oportunamente había denotado el “Informe Brundtland” para así indicar que “[a] fin de alcanzar el desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente

¹ Resulta menester resaltar la contemporaneidad de los postulados del informe en tanto los precios de los combustibles y energía han fluctuado enormemente en los últimos años como consecuencia de crisis sanitarias, pandemias y guerras, siendo muchas veces objeto de especulación e, incluso, utilizados como herramienta de negociación por países exportadores del recurso y/o poseedores de grandes reservas.

deberá constituir parte integrante del proceso de desarrollo y no podrá considerarse en forma aislada” (principio 4), del mismo modo que “[para] alcanzar el desarrollo sostenible y una mejor calidad de vida para todas las personas, los Estados deberían reducir y eliminar las modalidades de producción y consumo insostenibles y fomentar políticas demográficas apropiadas.” (principio 8). Ciertamente, la comunidad internacional continuaba expresando la necesidad de modificar los métodos de producción de manera que el desarrollo y la continuidad de estos se encuentre en relación armónica con el cuidado del ambiente². Aquí podría incorporarse la noción de una industria sostenible, siendo aquella que se alinea con el desarrollo sostenible (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992a).

Por su parte, el Programa 21 contiene numerosas recomendaciones para el abordaje de “los problemas acuciantes de hoy y también trata de preparar al mundo para los desafíos del próximo siglo”. A su vez, el Programa 21 contempla su propia mutabilidad, es decir, su capacidad de evolucionar y/o modificarse en función del cambio que sufran las necesidades y/o para permitir su adaptación a nuevas circunstancias. En línea con la Declaración de Río, dentro de sus recomendaciones apunta directamente al consumo y la producción recomendando el uso eficiente de energía y, profundizando aún más, el “fomento del uso ecológicamente racional de las fuentes de energía nuevas y renovables” y el “fomento del uso ecológicamente racional y sostenible de los recursos naturales renovables” (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992b).

Posteriormente, en el 2002 en Johannesburgo, Sudáfrica se celebró la “Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible”. En dicha cumbre, se efectuó una declaración política a través de la cual se reafirmaban los compromisos asumidos en cumbres, conferencias y declaraciones previas, al mismo tiempo que se resolvió un plan de aplicación para las decisiones tomadas en el marco de la cumbre. Al respecto, dentro de las consideraciones del plan de aplicación, se buscaba el fomento del financiamiento a la utilización de energías renovables en miras al uso eficiente de energía. En línea con ello, hacía propias las conclusiones de la Comisión de Desarrollo Sostenible en su novena reunión en relación con la búsqueda de recursos financieros y el destino de capital de inversión para promover el uso de energías que favorezcan el desarrollo sostenible (tanto del sector público como del sector privado)³ (Organización de las Naciones Unidas, 2002).

Además, en miras a la modificación del consumo y producción insostenible pueden citarse los siguientes postulados:⁴

- c) Idear y difundir tecnologías alternativas con objeto de aumentar la proporción de la producción de energía correspondiente a las fuentes renovables, incrementando la eficiencia energética y utilizando en mayor medida tecnologías avanzadas, como las tecnologías menos contaminantes para el aprovechamiento de los combustibles fósiles;
- d) Combinar, cuando proceda, el uso más amplio de recursos energéticos renovables, la utilización más eficiente de la energía, una mayor aplicación de las tecnologías más modernas, como las tecnologías avanzadas y menos contaminantes para el aprovechamiento

² Vale decir que la noción de desarrollo sostenible y los objetivos y principios que derivan de esta resultan de mayor amplitud y contemplan factores como la eliminación de la pobreza, la dignidad del hombre y factores sociales en relación con el desarrollo desigual a nivel mundial. A los fines de este trabajo, nos ceñiremos al análisis en términos de sostenibilidad ambiental, producción y explotación de recursos naturales.

³ Específicamente, refiere al párrafo 3 de la sección A y el párrafo 30 de la sección D de la decisión 9/1 de la Comisión de Desarrollo Sostenible que puede consultarse en el siguiente enlace: [http://daccess-ods.un.org/access.nsf/Get?OpenAgent&DS=E/2001/29%20\(SUPP\)&Lang=S](http://daccess-ods.un.org/access.nsf/Get?OpenAgent&DS=E/2001/29%20(SUPP)&Lang=S)

⁴ Corresponde citar -también- el postulado f) orientado a la industria petrolera y que, como se verá más adelante, es un área donde *Bitcoin* posee potencial como alternativa sostenible: “f) Apoyar las medidas por reducir las llamaradas o fugas de gas asociadas con la producción de petróleo crudo, en particular proporcionando asistencia financiera y técnica a los países en desarrollo, con la participación del sector privado;” (Organización de las Naciones Unidas, 2002)

de los combustibles fósiles y la utilización sostenible de los recursos energéticos convencionales, que podrían satisfacer la necesidad cada vez mayor de energía a largo plazo para lograr el desarrollo sostenible;

e) Diversificar el suministro de energía perfeccionando las tecnologías existentes o ideando otras menos contaminantes y más eficientes, accesibles y económicas, en particular las que se utilizan para el aprovechamiento de los combustibles fósiles y las fuentes de energía renovables, incluida las de energía hidroeléctrica, y transfiriéndolas a los países en desarrollo en condiciones favorables mutuamente convenidas. Aumentar considerablemente, con carácter urgente, la proporción de fuentes renovables de energía utilizadas en todo el mundo (...).

(Organización de las Naciones Unidas, 2002)

Luego de Johannesburgo, fue el turno nuevamente de Rio de Janeiro de officar como sede en el año 2012 en lo que se conoció como la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible” (más conocida como “Rio +20” en alusión al periodo transcurrido entre las reuniones celebradas en dicha ciudad). La conferencia de “Rio+20” significó un gran avance en la materia y en la búsqueda de la concreción del propósito del desarrollo sostenible. Específicamente, el producto de la reunión fue el documento final titulado “El futuro que queremos”, a través del cual los estados reafirmaron sus compromisos en torno al desarrollo sostenible junto con los principios y planes de aplicación establecidos en anteriores cumbres y/o conferencias (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2012).

A su vez, en el marco del documento “El futuro que queremos”, los intervinientes no solo reiteraron acuerdos previos (como se mencionó precedentemente) sino que, como hito trascendental en la consecución del desarrollo sostenible, resolvieron

establecer un proceso intergubernamental inclusivo y transparente sobre los objetivos de desarrollo sostenible que esté abierto a todas las partes interesadas con el fin de formular objetivos mundiales de desarrollo sostenible, que deberá acordar la Asamblea General (...) El grupo de trabajo presentará a la Asamblea en su (...) un informe que incluirá una propuesta de objetivos de desarrollo sostenible para que esta los examine y adopte las medidas adecuadas. (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2012)

Adicionalmente, identificaron la importancia y necesidad de adoptar medidas tendientes a la trazabilidad del progreso en la concreción de los objetivos a fijarse. De este modo, entre sus declaraciones, indicaron el establecimiento de metas e indicadores que pudiesen dar cuenta de los avances que sucedan. Incluso, dichos indicadores se constituirían y analizarían en función de los niveles de desarrollo que tuviesen las distintas naciones involucradas. Por añadidura, solicitaron a los órganos de Naciones Unidas (en el marco de sus mandatos) su apoyo a efectos de la recopilación de información global con sustento científico relacionada con el desarrollo sostenible, comprometiéndose, a su vez, a otorgar financiamiento a países en desarrollo para lograr este cometido (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2012).

Dicho proceso intergubernamental iniciado a partir de “Rio+20” culminó en la adopción de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (en adelante, los “ODS”) en la “Cumbre de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo Sostenible” celebrada en Nueva York, Estados Unidos de Norteamérica en septiembre del 2015. Referente a ello, los representantes de las naciones intervinientes resolvieron la adopción del plan “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” compuesto por una declaración, los reconocidos 17 ODS y más de 150 metas. Conforme indica su nombre, tras su entrada en vigor el 1 de enero de 2016, los ODS y metas “guiarán las decisiones que adoptemos durante los próximos 15 años” (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2015).

En relación con la temática y objeto de estudio del presente, merece la pena destacar los siguientes objetivos junto con sus metas (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2015):

Tabla 1

Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas

Objetivo	Metas
<p><u>Objetivo de Desarrollo Sostenible N°7</u>: Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos (energía asequible y no contaminante)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos. 2. De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas. 3. De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética. <p>a. De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.</p> <p>b. De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.</p>
<p><u>Objetivo de Desarrollo Sostenible N° 12</u>: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles (producción y consumo responsable).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicar el Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, con la participación de todos los países y bajo el liderazgo de los países desarrollados, teniendo en cuenta el grado de desarrollo y las capacidades de los países en desarrollo. 2. De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. 3. De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha. 4. De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales.

Objetivo	Metas
	<p>convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente.</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. 6. Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes. 7. Promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas y prioridades nacionales. 8. De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza. <ol style="list-style-type: none"> a. Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles. b. Elaborar y aplicar instrumentos para vigilar los efectos en el desarrollo sostenible, a fin de lograr un turismo sostenible que cree puestos de trabajo y promueva la cultura y los productos locales. c. Racionalizar los subsidios ineficientes a los combustibles fósiles que fomentan el consumo antieconómico eliminando las distorsiones del mercado, de acuerdo con las circunstancias nacionales, incluso mediante la reestructuración de los sistemas tributarios y la eliminación gradual de los subsidios perjudiciales, cuando existan, para reflejar su impacto ambiental, teniendo plenamente en cuenta las necesidades y condiciones específicas de los países en desarrollo y minimizando los posibles efectos adversos en su desarrollo, de manera que se proteja a los pobres y a las comunidades afectadas.
<p><u>Objetivo de Desarrollo Sostenible N°13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (acción por el clima).</u></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países 2. Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales 3. Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la

Objetivo	Metas
	<p>adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.</p> <p>a. Cumplir el compromiso de los países desarrollados que son partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de lograr para el año 2020 el objetivo de movilizar conjuntamente 100.000 millones de dólares anuales procedentes de todas las fuentes a fin de atender las necesidades de los países en desarrollo respecto de la adopción de medidas concretas de mitigación y la transparencia de su aplicación, y poner en pleno funcionamiento el Fondo Verde para el Clima capitalizándolo lo antes posible.</p> <p>b. Promover mecanismos para aumentar la capacidad para la planificación y gestión eficaces en relación con el cambio climático en los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo, haciendo particular hincapié en las mujeres, los jóvenes y las comunidades locales y marginadas</p>

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida de “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 2015)

A tan solo 2 meses de celebrada la cumbre en Nueva York, en diciembre de 2015, se llevó a cabo la "Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático" en París, Francia. Esta conferencia tuvo la particularidad de que en ella se celebró el hoy reconocido “Acuerdo de París” con el objetivo de establecer medidas para reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Acuerdo de París, 2015; Organización de las Naciones Unidas, s.f.a; Organización de las Naciones Unidas, s.f.b). Específicamente, su Artículo 2 establece:

Artículo 2

1. El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objetivo, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:

- a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;
- b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y
- c) Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

2. El presente Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

(Acuerdo de París, 2015. Artículo 2°)

Asimismo, en dicho acuerdo los Estados contrajeron obligaciones tales como las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (“CDN”). De este modo, a través de las CDN, los Estados continuaron profundizando sus compromisos y se obligaron, entre otras cosas, a establecer planes de acción y adaptación para la reducción de las emisiones y combatir la crisis climática debiendo, incluso, actualizarlos y volverlos más ambiciosos cada 5 años (Acuerdo de París, 2015; Organización de las Naciones Unidas, s.f.b; Organización de las Naciones Unidas, s.f.c).

Neutralidad de Carbono y Carbono Negativo

Cabe referir que parte de la comunidad internacional ha reconocido que, a fin de alcanzar los objetivos del acuerdo, es menester no solo reducir rápidamente las emisiones, sino que debe profundizarse aún más de manera de alcanzar la neutralidad de carbono. Específicamente, la neutralidad de carbono refiere a que el neto entre las emisiones de gases de efecto invernadero y las absorciones realizadas por otras vías sea equivalente a cero (aplicable a Estados e industrias). De esta manera, la compensación entre emisiones puede realizarse, por ejemplo, mediante sumideros de carbono (bosques, océanos, suelos) y/o compra de créditos de carbono. A su vez, derivada de la neutralidad de carbono aparece la figura de carbono negativo cuyo sentido es que los gases absorbidos superan a aquellos emitidos por la actividad (Acuerdo de París, 2015; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República Argentina, s.f.; Organización de las Naciones Unidas, s.f.b.; Parlamento Europeo, 2019; Parlamento Europeo, 2022).

Energías renovables

Como puede observarse, la noción de sostenibilidad encuentra íntima relación con las denominadas energías renovables. Desde la génesis y articulación del concepto desarrollo sostenible (comprendido en la idea de industria sostenible), la identificación de las energías renovables como eje axial de la consecución del objetivo del desarrollo sostenible ha provocado que tanto el sector público como el privado comiencen a adoptar medidas en la búsqueda de aumentar la participación de este tipo de energías en el sistema de generación energético mundial. En el presente apartado se realizará su caracterización y descripción, así como, también, se expondrán indicadores de tendencias y evolución de costos a propósito de su creciente implementación a nivel mundial.

Preliminarmente, puede entenderse a las energías renovables como aquellas derivadas de fuentes naturales (solar, geofísica, biológica, entre otras) cuya regeneración y/o reposición sucede de forma más rápida que su consumo. En contraposición, los combustibles fósiles se encuentran de forma limitada en el planeta y su proceso de formación y/o reposición demora millones de años. Asimismo, cuentan con la característica de generar menores emisiones de gases de efecto invernadero (en oposición a los combustibles fósiles que requieren combustión para su utilización como generadores de energía) y, es por ello, que revisten vital importancia para la crisis relacionada con el cambio climático. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; Naciones Unidas, s.f.)

En línea con ello,

RE [Renewable Energy] obtained from the continuing or repetitive flows of energy occurring in the natural environment and includes resources such as biomass, solar energy, geothermal heat, hydropower, tide and waves and ocean thermal energy, and wind energy. However, it is possible to utilize biomass at a greater rate than it can grow, or to draw heat from a geothermal field at a faster rate than heat flows can replenish it. On the other hand, the rate of utilization of direct solar energy has no bearing on the rate at which it reaches the Earth. [La Energía Renovable es obtenida de los flujos continuos o repetitivos de energía que ocurren en el ambiente natural e incluye recursos como la biomasa, la energía solar, el calor geotérmico, la energía hidroeléctrica, la marea y las olas y la energía térmica oceánica, y la energía eólica. Sin embargo, es posible utilizar la biomasa a una velocidad mayor de la que puede crecer, o extraer calor de un campo geotérmico a una velocidad más rápida que la de los flujos de

calor. Por otra parte, la tasa de utilización de la energía solar directa no influye en la velocidad a la que llega a la Tierra.] (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011)

Seguidamente, a propósito de la cita precedente, se individualizarán y describirán las energías renovables utilizadas en la actualidad.

Bioenergía

La bioenergía es energía generada a partir de la utilización de material orgánico cosechado, recuperado o cultivado (denominado biomasa y que puede incluir madera, carbón vegetal, abono, residuos, cultivos, entre otros) que, en virtud del tratamiento específico dado (combustión, descomposición, por ejemplo) permite la producción y/o generación de calor, electricidad, biogás y biocombustibles. En virtud de ello, este tipo de energía encuentra diversas aplicaciones y es explotada por varios sectores como consecuencia de su uso para la producción eléctrica, de calor o bien para transporte. No obstante, no toda energía generada a partir de biomasa es considerada renovable, ya que, dependiendo el método y/o procedimiento al cual se exponga, la generación de energía puede redundar en altos grados de contaminación. Del mismo modo, su aplicación es limitada en tanto un crecimiento exponencial de las plantaciones de bioenergía afectaría los usos de la tierra y podría aumentar los índices de deforestación (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.a; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

Consecuentemente, se diferencia entre la biomasa “tradicional” y la “moderna”. Por un lado, la biomasa “tradicional” es frecuente en los países en vías de desarrollo y refiere a la utilización de madera, carbón, residuos y abono de manera poco sustentable (generalmente combustión). Su más frecuente utilización es residencial y con la finalidad de iluminar, cocinar o calefaccionar ambientes. Como consecuencia de la combustión, se generan impactos negativos en la salud y en el plano ambiental. Por el contrario, la biomasa considerada “moderna” encuentra su uso más común en el sector industrial y sus aplicaciones con tecnologías de mayor eficiencia suelen ser la generación de electricidad, calor, una combinación de ambos y, también, para el transporte de combustibles. Incluso, la biomasa utilizada difiere de la generalmente usada en la “tradicional” (el carbón fósil se encuentra entre los más empleados, siendo altamente contaminante) aprovechando desechos y cultivos específicos (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.a; Naciones Unidas, s.f.).

Energía Eólica

La energía eólica supone aquellas tecnologías que, beneficiándose de la energía cinética del viento, producen energía eléctrica. Mediante la utilización de aerogeneradores, turbinas y/o molinos compuestos por aspas/hélices cuyo movimiento producto del viento gira, a su vez, un rotor de un generador que produce energía eléctrica. Este mecanismo de generación de energía ha sido utilizado desde antaño, sin embargo, fruto de la evolución tecnológica y la reducción de costos, se ha convertido en una de las energías renovables con mayor potencial. (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.f; Naciones Unidas, s.f.) Al respecto, dependiendo de su ubicación (puede ser terrestre/continental *-on shore-* o sobre superficie acuática *-off shore-*), “el potencial técnico de la energía eólica excede la actual producción global de electricidad” (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

Profundizando, en el último periodo ha aumentado enormemente la capacidad de generación eléctrica de la energía eólica tanto *on-shore* como *off-shore*. No obstante, el potencial de generación, así como la aplicación de mejoras tecnológicas encuentra limitantes en función de su ubicación. En el plano *on-shore*, la capacidad actual de generación es mayor y, del mismo modo, existe mayor despliegue a nivel mundial (más aun siendo una tecnología que viene siendo utilizada desde hace milenios) siendo usuales los parques eólicos. Por su parte, en el plano *off-shore* la primera planta fue dispuesta en Dinamarca en el año 1991 y, como es de esperarse, los desarrollos tecnológicos tienen menor

desarrollo que aquellos orientados al segmento *on-shore*, sin perjuicio de que ambos segmentos se ven -en muchos casos- beneficiados por los mismos avances (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.f; Naciones Unidas, s.f.).

A modo de ejemplo y en relación con esto último, se ha avanzado en torno al incremento del tamaño de las hélices con el objeto de reducir el Costo Nivelado de Energía⁵, ya que, se genera mayor electricidad al mismo tiempo que se reducen los costos asociados a la producción de las unidades. Si bien este avance beneficia a ambas, los avances referidos al aumento del tamaño de las hélices y su diseño encontrará mayores limitaciones *on-shore* (como ser su transporte, disposición y costos asociados en el plano logístico, por mencionar algunos) que *off-shore* (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

Además, el mercado *on-shore* se encuentra más avanzado en tanto existe producción a mayor escala y, también, sus costos de producción son menores en comparación a *off-shore*. No obstante, de un tiempo a esta parte, el despliegue *off-shore* ha ido incrementando en tanto permite el aprovechamiento del recurso en lugares donde la disposición *on-shore* se ve impedida por el estado actual de la tecnología y/o el uso de la tierra. A su vez, el viento *off-shore* tiene mayor capacidad de generación energía eléctrica (se considera que el recurso es mejor *off-shore* que *on-shore*) y, en línea con lo expuesto precedentemente, se utilizan hélices de mayor tamaño lo que redundará, también, en mayor capacidad de generación (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

Energía Geotérmica

Se conoce a la energía geotérmica como aquella generada a partir de la energía térmica que se encuentra en el interior de la Tierra, por debajo de la superficie. Específicamente, se realiza la extracción de calor el cual puede ser utilizado de manera directa para calefacción y/o refrigeración o, asimismo, para su transformación en electricidad. De todos modos, los recursos geotérmicos son clasificados de manera diferenciada en virtud de su composición e, incluso, únicamente aquellos recursos geotérmicos que alcancen temperaturas moderadas y altas tienen la capacidad de ser aplicados a la generación de energía eléctrica -estos recursos se encuentran generalmente ubicados donde existe actividad de placas tectónicas y/o zonas de grietas geológicas o, también, en sus límites- (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.f; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

En línea con lo expuesto, los recursos geotérmicos son clasificados en: (i) convectivos (hidrotérmicos); (ii) conductores y (iii) acuíferos profundos. Los primeros incluyen fluidos y vapor (usualmente ubicados en áreas donde se alcanzan temperaturas por encima de los 1000°C a menos de 10km de profundidad); los segundos, rocas y magma a diferentes temperaturas y, los terceros, fluidos en áreas porosas y/o zonas de agrietamiento, pero carecen de una fuente magmática de calor. Del mismo modo, las tecnologías empleadas para el manejo de los recursos se agrupan en función de su utilización para generación de electricidad, uso directo para calefacción y/o refrigeración y uso combinado para calefacción y generación de electricidad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

Sintetizando,

The main advantages of geothermal energy are its low cost and its ability to operate year-round at high capacity factors. This allows it to provide firm, dispatchable electricity and, if incentivized, ancillary services to the electricity system. As the penetration of solar and wind power grows, these characteristics become more valuable. (...) There are different geothermal technologies with distinct levels of maturity. Technologies for direct use, such as district

⁵ Conocido como LCOE, se define más adelante.

heating, geothermal heat pumps and heating greenhouses, are widely used and can be considered mature. The technology for electricity generation from hydrothermal reservoirs with naturally high permeability is also mature and reliable, with commercial operations since 1913. [Las principales ventajas de la energía geotérmica son su bajo costo y su capacidad de operar durante todo el año con factores de alta capacidad. Esto le permite proporcionar electricidad constante, capaz de ser despachada y, si se incentiva, servicios auxiliares al sistema eléctrico. A medida que la energía solar y eólica penetran aún más, estas características se vuelven más valiosas. (...) Existen diferentes tecnologías geotérmicas con distintos niveles de madurez. Las tecnologías de uso directo, como la calefacción en urbanizaciones, las bombas de calor geotérmicas y la calefacción de invernaderos, son ampliamente utilizadas y pueden considerarse maduras. La tecnología para la generación de electricidad a partir de reservas hidrotérmicas con alta permeabilidad natural también es madura y confiable, con operaciones comerciales desde 1913.] (International Renewable Energy Agency, s.f.b)

Energía Hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica se beneficia del ciclo hidrológico y, de este modo, aprovecha la energía cinética del agua generada cuando esta asciende o desciende. También utilizada desde la antigüedad, actualmente la energía hidroeléctrica representa la fuente renovable de energía con mayor capacidad de generación de energía eléctrica (a modo de ejemplo, el 99% de la electricidad que abastece al Reino de Noruega proviene de fuentes hidroeléctricas). A grandes rasgos, puede caracterizarse a las centrales hidroeléctricas en relación con su funcionamiento e instalación: (i) fluviales; (ii) embalse y (iii) de bombeo. Vale destacar que, adicionalmente a las mencionadas, se está avanzando en el desarrollo y testeado de energía hidroeléctrica a partir de la integración de turbinas a infraestructura y/o canales de agua ya existentes⁶ (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, 2023a; International Renewable Energy Agency, 2023b; International Renewable Energy Agency, s.f.c; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

En primer término, las centrales fluviales son aquellas que se encuentran dispuestas sobre el cauce de un río beneficiándose, de este modo, de la propia corriente fluvial (generalmente una porción del río es desviada a un canal que desemboca en una turbina hidráulica, conectada a un generador eléctrico). Si bien pueden contar con capacidad de almacenamiento de energía, su generación depende principalmente de las variaciones de la corriente de agua (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

Por otro lado, las centrales de embalse son las generalmente conocidas represas donde se almacena agua para su utilización posterior. A diferencia de las centrales fluviales, su capacidad de generación no responde necesariamente a la corriente del canal de agua debido a que el agua es almacenada independizándose, de este modo, de las variaciones que pudiese haber en la vía fluvial. Es menester destacar que la construcción de estas infraestructuras no se encuentra ajena a controversias debido a que puede afectar al ambiente y/o ecosistemas provocando que, sus detractores, sostengan la implementación a pequeña escala (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

⁶ Véase: (i) Kunalan, K. T. ., Ng, C. Y., & Maldar , N. R. (2022). A performance investigation of a multi-staging hydrokinetic turbine for river flow. *Progress in Energy and Environment*, 17, 17–31. <https://doi.org/10.37934/progee.17.1.1731> y (ii) VanZwieten J., McAnally W., Ahmad J., Davis T., Martin J., Bevelhimer M., Cribbs A., Lippert R., Hudon T., Trudeau M. (2015). In-Stream hydrokinetic power: Review and appraisal. *Journal of Energy Engineering* 141 (3): 04014024. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000197](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000197)

En último lugar, pueden identificarse las centrales hidroeléctricas de bombeo. Estas centrales, a diferencia de las mencionadas anteriormente, operan principalmente como centrales de almacenamiento y no como infraestructura eminentemente generadora de energía. Profundizando en este aspecto, estas centrales bombean agua desde depósitos ubicados en zonas bajas a embalses que se encuentran por encima de ellos (como es de esperarse, este proceso consume energía). De este modo, el agua es bombeada en momentos de baja demanda energética y es reservada para utilización en función de la demanda de energía eléctrica. En consecuencia, el agua es almacenada y, al incrementar la demanda de electricidad, el flujo de agua es invertido de manera de que esta descienda permitiendo, de esta manera, el aprovechamiento de su energía cinética (como en los otros tipos de centrales referidos) logrando de esta manera generar electricidad para abastecer la red (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

Energía Oceánica

Si bien aún se encuentra en una etapa experimental y de desarrollo, la energía oceánica es aquella derivada de la utilización del agua marina, olas y corrientes de agua para la producción de energía eléctrica y/o calor. Asimismo, estas tecnologías buscan beneficiarse, también, de la temperatura y salinidad del agua marina. Específicamente, se identifican las siguientes fuentes y/o recursos derivados del océano con potencialidad para la generación de energía: (i) oleaje (cinética): derivado de la acción del viento en la superficie del agua; (ii) mareas y corrientes derivadas de estas (cinética): surgen producto de fuerzas gravitacionales; (iii) temperatura oceánica (térmica): conversión de las diferencias de temperatura entre la superficie (mayores temperaturas por el efecto del sol) y las profundidades (temperaturas frías) y (iv) salinidad (potencia osmótica o energía azul): diferencia de salinidad entre agua dulce y agua del océano. Debido a la disponibilidad del recurso, se estima que su potencial de generación supera ampliamente las necesidades energéticas actuales de la humanidad (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.d; Naciones Unidas, s.f.).

Energía Solar

La energía solar, tal como su nombre lo indica, es aquella generada a partir de la radiación del sol. En este sentido, es la fuente de energía más abundante a nivel mundial permitiendo su implementación a lo largo y ancho del planeta. (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.e; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.). Presenta enorme potencial para mitigar la crisis por el cambio climático y aportar energía que abastezca la demanda global, en tanto, de acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change (2011), la tasa a la cual la energía solar es interceptada es 10.000 veces mayor a la tasa de consumo de energía de la humanidad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011). El aprovechamiento de la radiación del sol, es decir, la generación de energía solar puede ser principalmente de 2 maneras: (i) energía solar de concentración y (ii) energía solar fotovoltaica.

Por un lado, la energía solar de concentración (“ESC”) es una tecnología mediante la cual se produce electricidad a partir de la implementación de un sistema de espejos que funcionan como colectores de la radiación del sol que es concentrada en ellos. Al respecto, existen 2 sistemas de concentración: lineal (más frecuentes, utilizan concentradores cilíndricos parabólicos) y puntual (dispuestos con menor frecuencia, aunque tienen la capacidad de alcanzar mayores temperaturas, las torres solares son el ejemplo más utilizado en la actualidad). De este modo, a partir de la concentración de la radiación y la generación de calor, se produce el calentamiento de líquido y/o gas a partir del cual se abastece una turbina y se produce electricidad. Vale la pena decir que gran parte de la electricidad generada en la actualidad tiene como base el calentamiento de fluidos, de manera que este tipo de tecnología ofrece una alternativa renovable a la fuente de generación de calor por lo que su implementación podría realizarse sobre la infraestructura ya existente (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.e; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

Por su parte, la energía solar fotovoltaica (“FV”) consiste en la transformación directa de la radiación del sol en electricidad. En este sentido, apoyada en el efecto fotoeléctrico y través de la disposición de celdas fotovoltaicas (también llamadas paneles solares) compuestas por semiconductores, la transformación a energía eléctrica es realizada sin sistemas adicionales (como ser una turbina en el caso de la ESC). A su vez, al consistir en módulos que pueden disponerse de manera independiente y prácticamente en cualquier lugar (se requiere terreno estable y luz solar) su aplicación puede darse en sectores “fuera de la red”, de manera que es común su uso residencial en lugares aislados. Del mismo modo, en los casos en que se encuentran conectados a la red, la energía generada y no utilizada por el usuario generador puede inyectarse en esta a efectos de obtener beneficios económicos. (International Energy Agency, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; International Renewable Energy Agency, s.f.e; Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina, s.f.; Naciones Unidas, s.f.).

Corresponde mencionar que,

The cost of manufacturing solar panels has plummeted dramatically in the past decade, making them not only affordable, but also often the cheapest form of electricity. Solar module prices fell by up to 93% between 2010 and 2020. During the same period, the global weighted-average levelised cost of electricity (LCOE) for utility-scale solar PV projects fell by 85%. [El costo de la fabricación de paneles solares se ha desplomado drásticamente en la última década, haciéndolos no solo asequibles, sino también a menudo la forma más barata de electricidad. Los precios de los módulos solares cayeron hasta un 93% entre 2010 y 2020. Durante el mismo período, el costo nivelado de la energía (LCOE)⁷ global para los proyectos solares fotovoltaicos a escala de servicios públicos cayó un 85%.] (International Renewable Energy Agency, s.f.e)

Análisis de Costos de las Energías Renovables

Conforme lo expuesto, es posible observar las numerosas alternativas existentes en el campo de la energía renovable, su potencial y/o capacidad de generación con el distintivo de reducir las emisiones de gases contaminantes. En el último tiempo, gran parte de las objeciones a su implementación y adopción a gran escala redundaban en el alto costo de estas tecnologías y la inversión requerida. Con el devenir de los años y producto de las fluctuaciones de precios de los combustibles tradicionales que afectaban la energía (junto con el agravamiento de la crisis climática), su adopción comenzó a expandirse fomentando, en consecuencia, el desarrollo tecnológico e investigación sobre la materia. En la actualidad, las energías renovables poseen la característica no solo de ser más rentables y/o económicas sino de generar más puestos de trabajo en comparación a los combustibles fósiles (Naciones Unidas, s.f.). En el presente apartado se analizarán los costos de las energías renovables y sus proyecciones con el objeto de comprobar su conveniencia no solo desde el aspecto ambiental sino también desde una perspectiva económico-financiera.

Primeramente, corresponde realizar una nota aclaratoria. La energía que se suministra a la red es producto del desarrollo de un determinado proyecto donde, previo a su implementación, se realiza su análisis y valuación. En este sentido, en el plano de la valuación de proyectos las métricas más comúnmente utilizadas son el Valor Actual Neto (comúnmente conocido como “VAN”), la Tasa Interna de Retorno (“TIR”) y/o el *Weighted Average Cost of Capital* (“WACC”) en tanto la metodología de mayor aplicación es el Flujo de Fondos Descontados. Este último usualmente denominado “DCF” por sus siglas en inglés (Rosenbaum, J. & Pearl, J., 2009).

En relación con ello, cabe destacar que, en el último tiempo, en el caso de los proyectos de energía, comenzó a utilizarse una métrica denominada Costo Nivelado de Energía (también denominado costo nivelado de la electricidad y, en adelante, “LCOE” por sus siglas en inglés). Específicamente, el

⁷ Este concepto se desarrolla en el apartado siguiente “*Costos*”.

LCOE refiere a los ingresos estimados que se requieren para recuperar los costos y/o inversión involucrados en la construcción y/u operación de un generador de energía durante un periodo específico (U.S. Energy Information Administration, 2022). En otras palabras, permite identificar los costos a partir de los cuales se vuelve rentable la comercialización de energía generada a partir del proyecto determinado y, a partir de ello, determinar si la inversión es rentable en el periodo de recupero especificado. De este modo, a diferencia de la valuación referida en el párrafo precedente, esta métrica permite observar el valor al cual es necesario enajenar la energía (en función de los costos asociados) permitiendo, de este modo, la comparación entre proyectos de energía que utilizan distintos recursos.

A continuación, se expone su fórmula de cálculo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014):

Figura 1

Fórmula de cálculo del Costo Nivelado de Energía

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t + O\&M_t + F_t + C_t + D_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- I_t : Inversión en un periodo t
- $O\&M_t$: Gastos de operación y mantenimiento en un periodo t
- F_t : Gastos de combustible en un periodo t
- C_t : Gastos de carbono en un periodo t
- D_t : Gastos de desmantelamiento/retiro en un periodo t
- E_t : Energía generada en un periodo t
- r : tasa de descuento
- n : duración estimada del proyecto

International Energy Agency (“IEA”). Inicialmente creada en 1974 con el objeto de colaborar en la gestión de respuestas coordinadas por parte de la comunidad internacional a posibles disrupciones en el suministro de petróleo, la IEA se encarga de realizar recomendaciones a los gobiernos en torno a la sostenibilidad, rentabilidad y confiabilidad en materia energética. Hoy en día sus actividades no se abocan únicamente a la industria petrolera, sino que se extendieron, ampliando su objeto de estudio y recomendaciones a las energías renovables, eficiencia energética, mercados de electricidad, gestión de oferta y demanda, entre otros (International Energy Agency, s.f.a).

La IEA elabora anualmente desde 1998 un estudio denominado *World Energy Outlook* (en adelante, “WEO”) el cual “based on objective data and dispassionate analysis (...) provides critical analysis and insights on trends in energy demand and supply, and what they mean for energy security, environmental protection and economic development” [basado en datos objetivos y análisis imparcial (...) brinda un análisis crítico y perspectivas sobre las tendencias de la oferta y la demanda de energía, sus implicancias para la seguridad energética, protección del ambiente y el desarrollo económico] (International Energy Agency, s.f.b).

Para llevar a cabo sus predicciones y proyecciones en el marco del WEO, la IEA realiza la conformación de 3 escenarios: (i) escenario de cero emisiones netas para el año 2050 (“Escenario ZNE” por sus siglas en ingles); (ii) escenario de compromisos asumidos (“Escenario APS”) y (iii) escenario de políticas establecidas (“Escenario STEPS”). Cabe agregar, los escenarios poseen en

común el incremento de la demanda de energía derivada del crecimiento económico y demográfico estimado a nivel mundial. No obstante, su diferenciación radica en la respuesta a dicha demanda por parte de la comunidad internacional. En este sentido, los modelos contemplan y proyectan en función de las distintas respuestas a la crisis global de energía, las medidas tomadas por los Estados y gobiernos y como influyen las inversiones (públicas y privadas) y, por último, la manera en que los consumidores satisfacen sus necesidades energéticas (International Energy Agency, 2022).

A mayor abundamiento, cada escenario incluye en su análisis variables de crecimiento económico y demográfico (constantes en los 3 escenarios), precios de energía, minerales y carbón y, también, costos de las tecnologías de generación de energía. Por un lado, en línea con lo antedicho, las variables de crecimiento económico y demográfico se mantienen uniformes en los escenarios planteados. Por el contrario, los precios de energía, minerales y carbón presentan variaciones en tanto se modeliza teniendo en cuenta la hipotética oferta-demanda del escenario y la evolución de los mercados, inversiones, tecnologías y políticas. Idéntica situación sucede con los costos de las tecnologías, existiendo diferencias en función del grado de adopción y/o expansión de las distintas tecnologías en los distintos escenarios (International Energy Agency, 2022).

Al respecto, los precios del petróleo y gas tienden a volverse más caros con el tiempo en virtud de que las mejoras tecnológicas que pudiesen abaratar los costos se ven compensadas por la reducción de las reservas de dichos recursos (se estima que se volverán más difíciles de extraer y de desarrollar). Opuesto a ello, si bien ha habido aumentos recientes en los costos de las energías renovables (siendo de todas maneras la opción más eficiente en términos de costos para muchos países), existe un amplio margen para las mejoras tecnológicas y de eficiencia que se estima reducirán los costos e, incluso, reducirán la dependencia a materiales considerados críticos. Como consecuencia, los costos de las energías limpias se estiman continuarán descendiendo en menor o mayor medida dependiendo de las regulaciones y normas que pudiesen dictarse y beneficien estas tecnologías y, también, del grado de despliegue y expansión (International Energy Agency, 2022).

En otro orden de ideas,

The scenarios assume that there is no quick or stable end to the war in Ukraine, and that international sanctions on Russia remain in place for a prolonged period. However, they assume a gradual normalization of the international situation of other major resource-holders subject to sanctions, notably Iran and Venezuela. [Los escenarios asumen que no habrá una finalización rápida o estable a la guerra en Ucrania y que las sanciones internacionales a Rusia se mantendrán por un periodo prolongado. Sin embargo, asumen la normalización gradual de la situación internacional de otros grandes poseedores del recurso sujetos a sanciones, especialmente Irán y Venezuela.] (International Energy Agency, 2022).

Puntualizando en las características particulares de cada escenario, el Escenario NZE parte de niveles altos de demanda de combustibles fósiles y emisiones y busca la estabilización de las temperaturas globales a 1,5°C por encima de los niveles preindustriales (en línea con los objetivos del Acuerdo de París). A su vez, como su nombre lo indica, este escenario normativo busca reducir las emisiones netas globales de CO₂ a 0 para el 2050 (sin depender de la reducción de emisiones por fuera del sector energético), diferenciando la velocidad en la que se alcanza dicha meta de acuerdo al grado de desarrollo de los países (economías desarrolladas alcanzan el objetivo de 0 emisiones netas con anterioridad a aquellas menos desarrolladas). Del mismo modo, cumple con los ODS referidos al acceso universal a la energía -ODS N°7 mencionado anteriormente- (International Energy Agency, 2022).

Por otro lado, el Escenario APS contempla y asume que los Estados y sus gobiernos cumplirán de manera satisfactoria los compromisos ambientales asumidos en el plano internacional incluyendo: (i) CDN contraídas en el Acuerdo de París; (ii) metas de 0 emisiones netas y (iii) compromisos de acceso a la energía. Sin embargo, el Escenario APS considera estos compromisos sin analizar sobre la existencia (o inexistencia) de políticas específicas que aseguren su implementación y cumplimiento.

Este escenario y sus asunciones se encuentra asociadas a un aumento de las temperaturas globales de 1,7°C para el año 2100 (50% de probabilidades). Esta diferencia entre el Escenario APS y el NZE es denominada la “*Ambition Gap*” (“brecha de la ambición”), ya que, significa que los compromisos asumidos no son lo suficientemente ambiciosos como para alcanzar la meta del 1,5°C (International Energy Agency, 2022).

Finalmente, contrario al Escenario APS, el Escenario STEPS focaliza sobre las medidas y políticas llevadas a cabo por los Estados en función de sus compromisos asumidos. En este sentido, se centra en lo que efectivamente realizan para cumplir sus metas y no en las obligaciones asumidas *per se*. De esta manera, IEA efectúa una revisión por cada sector y las políticas, regulaciones y medidas que se encuentran siendo implementadas permitiendo inferir hacia donde podría dirigirse el sistema energético en caso de no surgir e implementarse nuevas políticas sectoriales. Este escenario y sus asunciones se encuentra asociadas a un aumento de las temperaturas globales de 2,5°C para el año 2100 (50% de probabilidades). La diferencia entre el Escenario STEPS y el APS es denominada la “*Implementation Gap*” (“brecha de la implementación”) en tanto demuestra la diferencia entre las obligaciones asumidas y las políticas puestas en práctica para su consumación o, en otras palabras, la insuficiencia y/o falta de eficacia de dichas políticas (International Energy Agency, 2022).

Seguidamente, se exponen los resultados del WEO:

Tabla 2

Resultados del World Energy Outlook 2022

Energía	LCOE ¹ (USD/MWh)								
	Escenario NZE			Escenario APS			Escenario STEPS		
	2021	2030	2050	2021	2030	2050	2021	2030	2050
Estados Unidos de Norteamérica									
Nuclear	100	100	100	100	100	100	105	100	95
Carbón	165	n.a.	n.a.	165	n.a.	n.a.	95	210	n.a.
Gas CCGT ²	80	130	n.a.	85	130	n.a.	60	70	110
Solar fotovoltaica	50	30	25	50	30	25	50	30	25
Eólica <i>on-shore</i>	35	30	30	35	30	30	35	30	30
Eólica <i>off-shore</i>	120	60	40	120	65	45	120	70	50
Unión Europea									
Nuclear	140	115	115	140	115	115	140	120	105
Carbón	230	n.a.	n.a.	220	n.a.	n.a.	180	255	n.a.
Gas CCGT	145	195	n.a.	160	240	n.a.	155	270	n.a.
Solar fotovoltaica	50	35	25	50	35	25	50	35	30
Eólica <i>on-shore</i>	55	50	45	55	50	45	55	50	45
Eólica <i>off-shore</i>	60	35	25	60	35	25	60	40	30
China									
Nuclear	65	65	65	65	65	60	65	65	60

Energía	LCOE ¹ (USD/MWh)								
	Escenario NZE			Escenario APS			Escenario STEPS		
	2021	2030	2050	2021	2030	2050	2021	2030	2050
Carbón	230	n.a.	n.a.	80	105	195	75	80	95
Gas CCGT	145	195	n.a.	110	130	155	115	130	140
Solar fotovoltaica	50	35	25	35	20	15	35	20	15
Eólica <i>on-shore</i>	55	50	45	45	40	35	45	40	40
Eólica <i>off-shore</i>	60	35	25	100	55	35	100	55	40
India									
Nuclear	75	65	65	70	65	65	75	65	65
Carbón	60	n.a.	n.a.	60	85	205	60	55	50
Gas CCGT	75	100	n.a.	90	105	145	95	100	105
Solar FV	35	20	15	35	20	15	35	20	15
Eólica <i>on-shore</i>	45	35	35	45	40	35	45	40	35
Eólica <i>off-shore</i>	120	65	45	120	70	45	120	75	50

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida de International Energy Agency, 2022.

¹ WACC (*r*) utilizada para cálculo varía según la tecnología: (i) Nuclear, Carbón y Gas CCGT = 7-8%; (ii) Solar Fotovoltaica y Eólica *on-shore* = 3-6% y (iii) Eólica *off-shore* = 4-7%.

² CCGT: Turbina de gas de ciclo combinado.

U.S. Energy Information Administration (“EIA”). Creada y establecida por la *Department of Energy Organización Act* de 1977, la Administración de Información Energética (“EIA”, por sus siglas en inglés) es la autoridad principal del gobierno federal de los Estados Unidos encargada del análisis estadístico en materia energética. Para llevar a cabo dicha tarea, la EIA recopila, evalúa y difunde información independiente e imparcial con el objeto de promover la formulación de políticas adecuadas, eficiencia de los mercados y, también, informar a la sociedad sobre la energía y su vinculación e interacción con la economía y el ambiente. Cabe destacar que, si bien se encuentra vinculada al Departamento de Energía de los Estados Unidos, la EIA al igual que sus informes, análisis y proyecciones son independientes y no requieren aprobación alguna por parte del gobierno norteamericano (U.S. Energy Information Administration, s.f.b.).

Por su parte, la EIA realiza anualmente su *Annual Energy Outlook*⁸ (“AEO”) a través del cual analiza las tendencias en materia energética y, en consecuencia, brinda proyecciones atinentes a la producción y consumo de energía en Estados Unidos. En este sentido, a través de la conformación de casos de referencia, el AEO realiza proyecciones hasta el 2050 en base a su *National Energy Modeling System* (“NEMS”) y en función de metodologías y asunciones específicas (U.S. Energy Information Administration, 2022). Al respecto,

investment in the expansion of electric generation capacity requires an assessment of the competitive value of generation technologies in the future that is determined as part of a complex set of modeling systems. To better understand investment decisions in NEMS, we

⁸ Al momento de la presentación del presente, se encuentra publicado el AEO correspondiente al año 2023 (disponible en: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>). No obstante, la publicación de las proyecciones del LCOE concernientes al AEO 2023 aún se encuentran pendientes de divulgación (estimadas para abril 2023). En virtud de dicha circunstancia, se expondrán las proyecciones y resultados relativos al AEO 2022, en tanto son las más recientes estimaciones del LCOE realizadas por la EIA.

use specialized measures that simplify those modeled decisions. [la inversión en la expansión de la capacidad de generación eléctrica requiere una evaluación del valor competitivo de las tecnologías de generación en el futuro que es determinado como parte de un complejo conjunto de sistemas de modelado. Para entender mejor las decisiones de inversión en NEMS, utilizamos medidas especializadas que simplifican esas decisiones modeladas.] (U.S. Energy Information Administration, 2022)

En virtud de ello, se exponen los resultados del AEO:

Tabla 3

Resultados del Anual Energy Outlook 2022

Energía	LCOE ¹ (USD/MWh)											
	Mínimo			Máximo			Promedio Simple			Promedio Ponderado		
	2024	2027	2040	2024	2027	2040	2024	2027	2040	2024	2027	2040
Sin beneficios impositivos												
Carbón USC ²	-	73,86	70,43	-	101,25	97,93	-	82,61	79,46	-	n.a. ⁶	n.a.
CCGT ³	30,99	34,30	35,35	47,40	50,09	76,22	36,81	39,94	44,05	35,53	37,05	40,29
TDC ⁴	95,83	106,02	105,5	132,85	145,46	174,35	107,42	117,86	121,87	104,07	123,84	116,75
Nuclear	-	82,76	80,09	-	98,78	95,22	-	88,24	85,28	-	n.a.	n.a.
Geotérmica	-	36,86	33,74	-	41,57	48,18	-	39,82	41,91	-	39,61	41,64
Biomasa	-	79,87	77,25	-	141,03	138,23	-	90, 17	86,53	-	n.a.	n.a.
Eólica <i>on-shore</i>	28,36	30,01	29,13	64,14	65,65	63,46	37,80	40,2	40,08	34,92	37,8	36,08
Eólica <i>off-shore</i>	-	109,88	79,79	-	170,31	117,39	-	136,5	98,01	-	n.a.	n.a.
Solar FV	29,96	30,13	27,45	48,23	48,58	44,18	36,07	36,49	33,42	33,07	36,09	29,48
Solar FV (híbrida) ⁵	43,54	43,15	39,77	68,51	67,97	62,45	52,68	52,53	48,63	48,37	58,62	44,21
Hidroeléctrica	-	48,96	48,66	-	82,65	82,08	-	64,27	63,83	-	n.a.	n.a.
Con beneficios impositivos												
Carbón USC	-	73,86	70,43	-	101,25	97,93	-	82,61	79,46	-	n.a.	n.a.
CCGT	30,99	34,30	35,35	47,40	50,09	76,22	36,81	39,94	44,05	35,53	37,05	40,29
TDC	95,83	106,02	105,5	132,85	145,46	174,35	107,42	117,86	121,87	104,07	123,84	116,75
Nuclear	-	76,23	75,02	-	92,25	90,14	-	81,71	80,20	-	n.a.	n.a.
Geotérmica	-	34,98	32,15	-	39,25	45,41	-	37,62	39,63	-	37,43	39,34
Biomasa	-	79,87	77,25	-	141,03	138,23	-	90, 17	86,53	-	n.a.	n.a.
Eólica <i>on-shore</i>	19,59	30,01	29,13	55,37	65,65	63,46	29,03	40,2	40,08	26,15	37,8	36,08
Eólica <i>off-shore</i>	-	86,34	79,79	-	128,93	117,39	-	105,38	98,01	-	n.a.	n.a.
Solar FV	24,22	27,93	25,52	38,77	44,95	41	29,16	33,83	31,07	26,69	33,46	27,40
Solar FV (híbrida)	35,96	40,30	37,26	56,09	63,30	58,34	43,43	49,03	45,54	39,96	54,71	41,41

Energía	LCOE ¹ (USD/MWh)											
	Mínimo			Máximo			Promedio Simple			Promedio Ponderado		
	2024	2027	2040	2024	2027	2040	2024	2027	2040	2024	2027	2040
Con beneficios impositivos												
Hidroeléctrica	-	48,96	48,66	-	82,65	82,08	-	64,27	63,83	-	n.a.	n.a.

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida de U.S. Energy Information Administration, 2022.

¹ Todos los LCOE son calculados en base a un periodo de recupero de 30 años. A su vez, la WACC (*r*) utilizada para cálculo varía según el año: (i) 2024 = 5,6%; (ii) 2027 = 6,2% y (iii) 2040 = 6,5%.

² UCS: ultra supercrítico

³ CCGT: Turbina de gas de ciclo combinado.

⁴ TDC: Turbina de combustión.

⁵ Solar FV híbrida: tecnología solar fotovoltaica con un sistema de almacenamiento de energía acoplado (batería con capacidad de almacenamiento de 4 horas).

⁶ n.a: no aplica en tanto no se espera que se implementen y/o construyan nuevas plantas y/o centrales que aumenten su capacidad de generación.

Como puede observarse, el AEO establece LCOE mínimos y máximos y, a partir de ellos, la conformación de 2 promedios, uno simple y otro ponderado. Al respecto, los parámetros mínimo y máximo responden a la diferencia existente entre los LCOE en función de la región donde los proyectos son dispuestos. En este sentido, los valores más bajos responden a lugares donde el recurso posee mejores cualidades, disponibilidad y/o menores costos mientras que, por el contrario, los máximos se corresponden a lugares donde el recurso posee peores características y/o disponibilidad y/o costos más elevados (U.S. Energy Information Administration, 2022).

Como consecuencia de ello, el promedio simple es realizado sin tomar en cuenta dichas variables en tanto el promedio ponderado sí considera dichos factores y, para su realización, se estima que la implementación de las distintas tecnologías será realizada en aquellas regiones donde el LCOE sea menor. Derivado de esto, nótese que los resultados del LCOE en la columna ponderada se encuentran cercanos al límite inferior de los rangos mínimo y máximo (U.S. Energy Information Administration, 2022).

Por otro lado, la EIA también considera para el cálculo de los LCOE los beneficios impositivos otorgados distintas tecnologías. Específicamente, en el AEO se tuvieron en cuenta el *Production Tax Credit* (“PTC”) y el *Investment Tax Credit* (“ITC”). Al respecto, el PTC representa un crédito impositivo en función de los MW/h generados y la tecnología detrás de dicha generación (dependiendo de la energía de la cual se trate los créditos pueden alcanzar los USD25 por MW/h). A los fines de su incorporación en el modelo, el crédito es ajustado por inflación y se estima que aquellos proyectos que entren en funcionamiento con posterioridad al 2026 no recibirán el PTC U.S. Energy Information Administration, 2022).

Como su nombre lo indica, el ITC es un crédito impositivo otorgado como consecuencia de las inversiones realizadas. En este caso, el modelo asume que los proyectos de energía solar que entren en funcionamiento con anterioridad al 1° de enero del 2024 recibirán el ITC completo (30%). Posteriormente, el ITC se reduce al 26% para los proyectos solares que se activen entre el 2024 y 2025 y, luego, al 10% (31 de diciembre del 2025 en adelante). Si bien los proyectos de energía eólica califican para cualquiera de ambos beneficios, el modelo supone que aquellos con tecnología *on-shore* se acogerán al PTC y los *off-shore* al ITC en tanto poseen mayores costos de capital (el AEO asume

que recibirán el 30% en caso de encontrarse en funciones para el 31 de diciembre de 2035) (U.S. Energy Information Administration, 2022).

Oxford Martin School, University of Oxford (“OXMS”). Dependiente de la Universidad de Oxford, el Oxford Martin School (“OXMS”) es un centro de investigación creado en el 2005 en virtud de las donaciones realizadas por el Dr. James Martin. Dichas contribuciones se encuentran actualmente catalogadas como la mayor donación a la Universidad de Oxford de toda su historia (Oxford Martin School, s.f.). Concretamente, de acuerdo con el OXMS

Our academics work across more than 30 solutions-focused, pioneering research programmes that cut across disciplines to find solutions to the world's most urgent challenges. From renewable energy to ocean sustainability, and from the future of work to tackling inequality, we foster ground-breaking collaborations between researchers working at the frontiers of knowledge. The unifying theme is that the research must be of the highest academic calibre, tackle issues of global significance, and could not have been undertaken without our support.

Underpinning all our research is the need to translate academic excellence into real-world impact, from innovations in science, medicine and technology, through to expert advice and policy recommendations. [Nuestros académicos trabajan a través de más de 30 programas de investigación innovadores y centrados en soluciones que abarcan diversas disciplinas para encontrar soluciones a los desafíos más urgentes del mundo. Desde la energía renovable a la sostenibilidad oceánica y, desde el futuro del trabajo a la lucha contra la desigualdad, fomentamos colaboraciones innovadoras entre investigadores que trabajan en las fronteras del conocimiento. El término unificador es que la investigación debe ser del más alto calibre académico, abordar cuestiones de importancia mundial y no podría haberse llevado a cabo sin nuestro apoyo.

La base de toda nuestra investigación es la necesidad de traducir la excelencia académica en impacto en el mundo real, desde innovaciones en ciencia, medicina y tecnología, hasta asesoramiento experto y recomendaciones de políticas.] (Oxford Martin School, s.f.)

Recientemente, investigadores pertenecientes al *Institute for New Economic Thinking* del OXMS realizaron un estudio en torno a la transición energética y sus costos denominado “*Empirically grounded technology forecasts and the energy transition*” (en adelante, “Estudio EGTFFET” o el “EGTFET”). Al respecto, parten de la premisa de que la descarbonización del sistema energético mundial y su implementación a efectos de combatir el cambio climático han encontrado resistencia en virtud de los costos que acarrearía. En función de ello, argumentan que los modelos económicos sobre energía han subestimado las tasas a las cuales se han desplegado y expandido las energías renovables e, incluso, han sobreestimado sus costos. A partir de ello, plantean un enfoque diferenciado basado en la utilización de evidencia empírica y métodos de predicción estadísticos (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022). Seguidamente, se explicará la metodología empleada y los resultados obtenidos.

Como primera medida, el Estudio EGTFFET determina los costos asociados a las distintas tecnologías en función de datos y series históricas existentes. Cabe destacar que la disponibilidad de dicha información supone una complejidad en sí misma, ya que la información de costos de las distintas tecnologías no cuenta con la misma periodicidad y/o antigüedad en tanto su uso se ha dado en distintos momentos de la historia (costos y precios del carbón datan de hace 1 siglo mientras que los valores de la energía eólica y solar comienzan entre las décadas del '70 y '90 del siglo pasado). En este sentido, a diferencia de los estudios antes referidos, el LCOE es un componente que hace al modelo más no es calculado por este (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Puntualmente, el modelo considera: (i) petróleo; (ii) carbón (materia prima); (iii) gas (materia prima); (iv) electricidad generada a partir de carbón; (v) electricidad generada a partir de gas; (vi) nuclear; (vii) hidroeléctrica; (viii) bioenergía; (ix) eólica; (x) solar FV; (xi) baterías (litio y de flujo redox de

vanadio); (xii) hidrogeno y electrolizadores y (xiii) redes eléctricas. De este modo, el modelo se construye en base a información considerada “clave” (*key*) como ser: (i) precio del petróleo crudo, gas natural y carbón (serie de datos temporales larga); (ii) LCOE del carbón, gas, nuclear, hidroeléctrica, bioenergía, eólica y solar FV (serie de tiempo corta/mediana) y (iii) costos de capital de baterías de litio, baterías de flujo redox de vanadio y electrolizadores (serie de tiempo corta/mediana) (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022). Vale decir,

While the real-world energy system includes many other technologies, we used this limited ensemble because (1) it covers most of the current final and useful energy of the system (around 90%), (2) it includes sufficiently many diverse technologies for representing a wide range of energy transition pathways, and (3) it maintains a level of simplicity suitable for conveying our main results on future technology costs and their uncertainties. [Mientras que el sistema energético del mundo real incluye muchas otras tecnologías, utilizamos este conjunto limitado porque (1) cubre la mayor parte de la energía final y útil actual del sistema (alrededor del 90%), (2) incluye suficientes tecnologías diversas para representar una amplia gama de rutas para la transición energética, y (3) mantiene un nivel de simplicidad adecuado para transmitir nuestros principales resultados sobre los costos tecnológicos futuros y sus incertidumbres.] (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022)

A su vez, las tecnologías son separadas en 2 grupos a efectos de realizar las proyecciones en tanto su comportamiento difiere. Por su parte, los combustibles fósiles son *commodities* que cotizan en los mercados lo que implica que, siguiendo la teoría de los mercados eficientes, las variaciones en sus precios son aleatorias e impredecibles (*random walk*). En consecuencia, en virtud de dichas características, las proyecciones de sus valores (petróleo, carbón y gas) son realizadas mediante el modelo autorregresivo AR(1). Por el contrario, las restantes tecnologías son caracterizadas como tecnologías que se encuentran desarrollándose y mejorando y, en consecuencia, son objeto de otros métodos para la determinación de sus proyecciones. Así, el Estudio EGTFFET plantea 2 alternativas: (i) ley de Moore y/o (ii) ley de Wright (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Por un lado, la ley de Moore (aplicada de forma generalizada) sostiene que los costos decrecen de manera exponencial como una función de tiempo. Por otro lado, la ley de Wright predice que los costos decrecerán en virtud de la producción acumulada o, en otras palabras, los costos decrecen en tanto se benefician del aprendizaje previo y/o experiencia pasada. Si bien los investigadores optaron por la utilización de la ley de Wright, los modelos fueron testeados con la ley de Moore siendo sus conclusiones en términos cualitativos similares. Asimismo, cabe destacar que la precisión de la ley de Wright fue testada de manera empírica con los datos históricos de manera de obtener su grado de certeza y capacidad predictiva (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022). A modo de resumen,

Under Moore’s law, costs are assumed to change exogenously over time, independent of policy and investment. Under Wright’s law, costs depend on experience. Although experience does not directly cause costs to drop, it is correlated with other factors that do, such as level of effort and R&D, and has the essential advantage of being relatively easy to measure. (...) In this paper, we focus on Wright’s law because it satisfies the basic intuition that exerting greater effort induces greater effects. [Bajo la ley de Moore, se asume que los costos cambian exógenamente con el tiempo, independientemente de la política y la inversión. Según la ley de Wright, los costos dependen de la experiencia. Aunque la experiencia no provoca directamente la caída de los costes, se correlaciona con otros factores que sí lo hacen, como el nivel de esfuerzo y la I+D, y tiene la ventaja esencial de ser relativamente fácil de medir. (...) En este artículo, nos centramos en la ley de Wright porque satisface la intuición básica de que ejercer un mayor esfuerzo induce mayores efectos.] (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022)

Una vez determinados los métodos de proyección de costos, el EGTFFET define 5 escenarios sobre los cuales se despliegan las tecnologías para, a partir de estos, realizar una distribución de costos futuros

proyectados. Los escenarios son: (i) sin transición (“Escenario ST”); (ii) transición rápida (“Escenario TR”); (iii) transición lenta (“Escenario TL”); (iv) transición lenta con preminencia de energía nuclear (“Escenario TLN”) y (v) composición histórica (“Escenario CH”). Este último, el Escenario CH, implica que la actual participación de las distintas tecnologías en el sistema de generación de energía se mantendrá sin modificaciones, proyectándose una expansión del 2% anual para el sistema en su conjunto (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022). A continuación, se detallan las características de los restantes escenarios.

El Escenario ST contempla el crecimiento del uso de los combustibles fósiles de acuerdo con las tendencias históricas durante una década para, luego, estabilizarse. Al alcanzar dicha meseta, la cuota de participación de las energías solar y eólica en el sistema energético aumenta a razón del 10% anual (por debajo de sus promedios históricos) de manera de alcanzar el 50% del total de generación de electricidad para el año 2060. Además, se asume un crecimiento constante del 2% para toda la energía útil por lo que, en consecuencia, se compensa el estancamiento del crecimiento de los combustibles fósiles con el crecimiento de las energías eólica y solar debido a su economicidad. Este Escenario ST es utilizado como punto de referencia para la comparación con los demás escenarios de transición. (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Por su parte, el Escenario TR asume que las energías limpias y las tecnologías de almacenamiento crecen en línea con los datos históricos hasta dominar el sistema de generación de energía para, después, establecerse a partir del 2040 en una tasa de crecimiento del 2% anual (porcentaje de crecimiento estimado para todo el sistema energético). A su vez, la caída de los combustibles fósiles se relaciona principalmente con la electrificación de las industrias y el transporte. En consecuencia, para el 2040 las fuentes carbono neutrales generan el 90% de la electricidad y proveen el 81% de la energía incrementándose, luego, al 91% y 97% para el 2050 y 2060, respectivamente (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Como su nombre lo indica, en el Escenario TL la transición hacia fuentes de energía limpias se da de manera paulatina hasta el 2050 para, *a posteriori*, acelerarse (para 2050 el suministro eléctrico proveniente de energías limpias alcanza el 80% y, el 20% restante, derivado del gas). En línea con ello, el crecimiento de las energías eólica y solar se estima a aproximadamente la mitad de sus tasas históricas por varias décadas. La descarbonización de las industrias y el transporte sucede, también, de manera lenta pudiendo observarse recién sus efectos para mediados de siglo. Por su lado, el Escenario TLN se conforma de idéntica manera con la diferencia de que la energía nuclear crece a un 8% anual por lo que su participación en la generación de energía ocupa un rol preponderante quitándole, en consecuencia, participación a las energías eólica y solar. En el marco de ambos escenarios, para el 2070 el 88% de la energía proviene de fuentes no contaminantes (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Posteriormente, el costo neto presente (“NPC”, por sus siglas en inglés) es calculado mediante la aplicación de un enfoque directo de costos ingenieriles (“*direct engineering costs approach*”) en donde, los costos totales de cada escenario son computados sumando los costos de las tecnologías que lo componen y su proporción. A su vez, los costos de infraestructura que no se encuentran directamente cubiertos por dichas tecnologías son estimados y, como métrica para los costos de generación de energía, se utiliza el LCOE. Luego, con el objeto de aplicar los métodos probabilísticos de proyección de costos para cada escenario se utiliza el método de Monte Carlo generando, de este modo, un muestreo aleatorio de distintas trayectorias futuras de costos. Una vez realizado, se descuentan de manera exponencial los costos futuros obteniendo el NPC del escenario *sub examine* (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Sintetizando los resultados obtenidos,

The expected relative net present cost of a rapid green energy transition is negative at all discount rates up to around 25%, and lower than any other scenario modelled here. Therefore, in terms of energy system and technology costs alone, implementing the Fast Transition

scenario is a bet worth taking. The expected payoff of the bet (i.e. the expected NPC savings up to 2070) is around 5-15 trillion dollars. In addition, (...) the probability that this bet will pay off at all (i.e. that the NPC of the Fast Transition will be lower than that of another scenario, in a pairwise comparison) is around 80%, when compared against any other scenario. This is by far the safest bet, out of all the scenarios. [El costo actual neto relativo esperado de una rápida transición a la energía verde es negativo con todas las tasas de descuento hasta alrededor del 25%, y más bajo que cualquier otro escenario modelado. Por lo tanto, en términos de costos de sistemas de energía y tecnología, implementar el Escenario de Transición Rápida es una apuesta que vale la pena tomar. La rentabilidad esperada de la apuesta (es decir, los ahorros esperados de NPC hasta 2070) es de alrededor de 5 a 15 billones de dólares. Además, (...) la probabilidad de que esta apuesta valga la pena (es decir, que el NPC de la transición rápida sea inferior al de otro escenario, en una comparación por parejas) es de alrededor del 80%, cuando se compara con cualquier otro escenario.] (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022)

En virtud de lo expuesto, es menester señalar la relevancia de que aún en los supuestos en los que se establezca una tasa de descuento elevada, el Escenario TR continúa imponiéndose a los restantes escenarios demostrando una economicidad sustantiva de las energías renovables frente a la continuidad y/o inalterabilidad del ratio de uso de los combustibles fósiles. Asimismo, no debe obviarse que el estudio no contempla costos asociados a daño climático y/o multas que pudiesen imponerse por la utilización de combustibles fósiles y la contaminación asociada a ellos por lo que podría estimarse que la diferencia entre costos de los escenarios podría incrementarse aumentando, aún más, la rentabilidad del Escenario TR frente a los restantes (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022).

Por último, como colofón al presente capítulo y atinente a lo considerado

There are also other important benefits of accelerating the green transition beyond those directly associated with reducing adverse climate change impacts. The most obvious co-benefit is reduced mortality and morbidity from the elimination of the air pollution associated with fossil fuel use. For example, the World Health Organization estimates that 4.2 million lives per year are lost to ambient air pollution, caused mostly by fossil fuels.

The volatility of fossil fuel prices also has significant adverse impacts on the global economy. The renewable energy transition will likely substantially reduce the volatility of energy prices. From a geopolitical point of view, the use of renewables together with P2X fuels might also offer energy security to many countries that are currently dependent on others. Finally, providing cheap renewable energy to low income countries can accelerate energy inclusion and contribute to meeting many of the Sustainable Development Goals, including lifting the estimated 1 billion people out of energy poverty.

Finally, a rapid decarbonisation of the energy system dramatically reduces our annual emissions, potentially buying more time to develop approaches for decarbonising the much harder-to-abate sectors, such as agriculture, steel, cement, and air transport. [Existen también otros beneficios importantes de acelerar la transición verde más allá de los directamente asociados con la reducción de los efectos adversos del cambio climático. El co-beneficio más evidente es la reducción de la mortalidad y la morbilidad por la eliminación de la contaminación atmosférica asociada con el uso de combustibles fósiles. Por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud estima que se pierden 4,2 millones de vidas al año debido a la contaminación del aire, causada principalmente por los combustibles fósiles.

La volatilidad de los precios de los combustibles fósiles también tiene importantes efectos adversos en la economía mundial. La transición hacia las energías renovables probablemente reducirá sustancialmente la volatilidad de los precios de la energía. Desde un punto de vista geopolítico, el uso de energías renovables junto con combustibles P2X también podría ofrecer

seguridad energética a muchos países que actualmente dependen de otros. Por último, el suministro de energía renovable barata a los países de bajos ingresos puede acelerar la inclusión energética y contribuir al logro de muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, incluida la eliminación de la pobreza energética estimada en 1.000 millones de personas.

Por último, una rápida descarbonización del sistema energético reduce drásticamente nuestras emisiones anuales, lo que podría ganar más tiempo para desarrollar enfoques para descarbonizar los sectores mucho más difíciles de reducir, como la agricultura, el acero, el cemento y el transporte aéreo.] (Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D., 2022)

Capítulo II: Finanzas Descentralizadas y Criptomonedas

Con el devenir de los tiempos, la concepción tradicional de las finanzas se ha visto puesta en jaque. Como era de esperarse, dicha industria no ha sido ajena a la continua y vertiginosa evolución de la tecnología. En este sentido, las finanzas tradicionales, caracterizadas como finanzas centralizadas (en adelante, “CeFi” por sus siglas en inglés), comenzaron a sufrir cuestionamiento en torno a su funcionamiento y su estructura. Al respecto, la existencia de una autoridad central instaurada como garante de la seguridad y validez de las transacciones, vio cuestionado el activo fundamental sobre el cual se sostiene: la confianza. Las sucesivas crisis económicas, los procesos inflacionarios, el letargo en su adaptación a la velocidad del mundo actual, entre otros supuestos, comenzaron a erosionar su rol de indispensable y única manera de prestar servicios financieros (Ammous, 2018).

A mayor abundamiento, comenzó a cuestionarse la existencia de intermediarios entre las partes, la velocidad en la ejecución de las transacciones, los costos, la falta de transparencia de las entidades financieras, la tenencia de los activos y la seguridad. Asimismo, comenzó a exigirse mayor facilidad y menor complejidad en el acceso a los servicios financieros, de manera de reducir la exclusión financiera y promover el acceso a las finanzas para mayor cantidad de individuos (Ammous, 2018).

En este marco, en contraposición a las CeFi y buscando dar respuesta a las exigencias y demandas mencionadas, surgen las denominadas finanzas descentralizadas (en adelante, “DeFi” por sus siglas en inglés). Tal como su nombre lo indica, las DeFi tienen como objeto la eliminación de cualquier autoridad central que pudiese establecer condiciones y/o normas que regulen la actividad. En relación con ello, el principal desafío radicaba en encontrar la solución a la inexistencia de un órgano de contralor que garantizara la validez de las transacciones y operaciones que se realizaran entre las partes y, más aún, el problema central que aquejaba cualquier intento de creación de monedas digitales: el *double spending*. El intercambio de activos en un ecosistema CeFi permitiría que esa entidad garantice que un individuo no efectúe más de una transacción con el mismo activo y, a su vez, realice la compensación de cuentas (Ammous, 2018).

Frente a ello y como respuesta a dichos desafíos, surge la denominada *Blockchain*. Con la inclusión de esta tecnología, se pretendía la creación de un registro inalterable de transacciones para, de este modo, brindar seguridad y transparencia a las transacciones digitales que llevaran a cabo los individuos intervinientes en una red. Sucintamente, como su nombre lo indica, la *Blockchain* es una cadena de bloques con datos e información, concatenados de manera secuencial y compartida entre los usuarios que intervienen en ella. En otras palabras, se trata de un registro (en este caso formado por bloques que contienen información) que es compartido entre muchos usuarios de manera que, para modificarlo, se requiere el consentimiento de la gran mayoría. De este modo, fundamentado en la distribución y el carácter colaborativo que representa a la tecnología *Blockchain*, los garantes de la seguridad y validez de la red son los propios usuarios, eliminando la necesidad de un tercero interviniente (Ammous, 2018).

De este modo, el surgimiento de un registro que garantice inalterabilidad, accesibilidad para todos sus usuarios, permita el control de estos siendo transparente y, a su vez, permita que las transacciones operen sin intermediarios se constituyó como cimiento de un nuevo modelo de finanzas. Continuando

con el análisis, se enumeran y desarrollan las principales propiedades de las DeFi (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021):

1. Transparencia. Las DeFi facilitan la trazabilidad de las transacciones, otorgando de este modo claridad y facilitando la verificación de una manera pública y sin necesidad de requisitos adicionales ni prohibiciones (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021);
2. Tenencias. Las DeFi otorgan la posibilidad a los usuarios de custodiar sus activos de manera independiente, pudiendo operar y disponer de ellos con libertad absoluta. No obstante, es usual que los usuarios recurran a entidades centralizadas que custodien sus activos (denominados *Exchanges* y entre los que puede mencionarse a Binance, KuCoin, entre otros) que encuentran mayor semejanza con las instituciones financieras tradicionales. En caso de que los usuarios decidan la custodia independiente, se utilizan billeteras virtuales (*Wallets*) quedando los riesgos enteramente en cabeza del individuo, ya que, en caso de olvidar las claves de acceso, los activos se perderían sin posibilidad de ser recuperados (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021);
3. Privacidad. Usualmente, las DeFi garantizan mayor privacidad y anonimato que las CeFi. En este sentido, los usuarios pueden contar con distintas *Wallets* sin necesidad de tener sus datos personales asociados. No obstante, los *Exchanges* centralizados suelen exigir más información del individuo y, en muchos casos, son la única alternativa para convertir monedas de curso legal (ej: dólar estadounidense) a criptomonedas, por lo que suele hablarse de un anonimato parcial y/o relativo (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021);
4. Orden de ejecutoriedad de las transacciones. En las redes *Peer to Peer* (abreviado P2P, referido a la relación directa entre los usuarios sin la figura del intermediario), los usuarios comparten de manera pública las transacciones que deben ejecutarse. Debido a la inexistencia de una autoridad central, suele competirse por obtener prioridad en la ejecución de una operación (accediendo a pagar una mayor comisión, por ejemplo) de manera que el orden de ejecución de las transacciones es maleable y puede ser modificado (pudiendo llevarse a cabo manipulaciones del mercado). Por el contrario, en las CeFi las regulaciones y normas que atañen a la actividad establecen lineamientos de como las transacciones deben ordenarse y, en consecuencia, ser ejecutadas (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021);
5. Mercados *non-stop*. Los mercados CeFi suelen operar en días y horarios hábiles (a modo de ejemplo, los principales mercados de Estados Unidos como ser la bolsa de Nueva York - NYSE- y el NASDAQ operan de lunes a viernes) mientras que, como consecuencia de las características inherentes de la *Blockchain* y la continuidad ininterrumpida de su funcionamiento, los mercados DeFi suelen operar las veinticuatro horas del día, los trescientos sesenta y cinco días del año. En consecuencia, no existen los fenómenos del *trading* previo a la apertura del mercado ni post cierre de los mercados (sin perjuicio de la escasez de liquidez que suele caracterizar dichos periodos). A mayor abundamiento, debido a la compresión horaria de las CeFi, los usuarios se ven forzados a ingresar en un acortado periodo de tiempo provocando, en muchos casos, la caída de los sistemas debido a la enorme demanda (muchas veces debido a fenómenos específicos de los mercados que provocan oportunidades de inversión o, por el contrario, necesidad de descargar activos). Incluso, la caída de los servidores puede deberse a medidas preventivas (poco transparentes) tendientes a evitar caídas bruscas de los mercados y/o problema de liquidez como ser el caso de

Gamestop, por mencionar alguno⁹ (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021);

Por otro lado, corresponde comentar sobre una de las grandes operaciones financieras de las CeFi y, en general, de cualquier servicio financiero: las operaciones de financiamiento. En este sentido, las instituciones financieras comenzaron realizando operaciones de crédito, prestando dinero que los usuarios depositaban en ellas a otros individuos que requerían liquidez para satisfacer distintas necesidades (inversiones, comprar bienes y servicios, entre otros). En este sentido, la realización de la figura de intermediación financiera permitió que las economías crezcan en tanto otorgaba liquidez a quienes no la poseían (a cambio de una tasa, denominada tasa activa), recompensaba a los individuos que depositaban su excedente de liquidez en las instituciones (recibiendo una tasa pasiva) y brindaba a la institución prestamista un rendimiento basado, a grandes rasgos, en la diferencia entre la tasa de otorgamiento del préstamo y la tasa que se abonaba a quienes depositaban el excedente de liquidez (Ammous, 2018).

No obstante, el individuo solicitante debía cumplir con determinados requisitos preestablecidos para el otorgamiento del crédito. Si bien los requisitos suelen variar dependiendo las políticas económicas y el estado de la economía en el periodo correspondiente (flexibilizándose o volviéndose más rígidos), respondiendo a la injerencia de factores externos (estado de la economía y liquidez mundial) y/o internos (inflación, desempleo, demanda y oferta de dinero), el principio fundamental es evaluar la capacidad de repago del préstamo contraído por el individuo y, de este modo, asegurar el cobro y la restitución de las sumas prestadas con el agregado de la tasa de interés establecida en el contrato de préstamo correspondiente.

En este marco, aparece el interrogante de las operaciones de financiamiento en las DeFi. Al respecto, tal como se mencionó anteriormente, no existe la figura de una entidad central que regule las operaciones ni garantice la capacidad crediticia y/o de repago de un individuo y las variables de seguridad y garantía que pudiese demandar el prestamista (siendo que en este caso se trata de operaciones P2P y/o sin un ente centralizado) permitirían cuestionar la posibilidad de otorgar y/o recibir créditos. No obstante, las operaciones de otorgamiento de préstamos son usuales en el ámbito de las DeFi y, como es de esperarse, operan de manera distinta a las CeFi. En este aspecto, como respuesta a la falta de *rating* crediticio y dificultad de ejecutoriedad, los préstamos CeFi se caracterizan por la exigencia de un colateral (en muchos casos, sobredimensionado).

Siguiendo a Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A. (2021),

The most prevalent form of lending and borrowing in DeFi happens in the so-called lending pools. A lending pool is in essence a smart contract that orchestrates lender and borrower assets, as well as other essential actors (e.g., liquidators and price oracles). Typically, a lender makes cryptocurrencies available for borrowing by depositing them into a lending pool. A borrower hence collateralizes into and borrows from the lending pool. Note that borrowers also automatically act as lenders when the lending pool lends out the collateral from borrowers. Assets deposited by users in lending pools are not protected by traditional CeFi regulations such as bank deposit protection which protects a banking institution's customer deposit account up to a certain threshold of fiat currency. [La forma más frecuente de prestar y endeudarse en DeFi ocurre en los llamados *lending pools*. Un *lending pool* es, en esencia, un contrato inteligente que organiza los activos de prestamistas y prestatarios, así como otros actores esenciales (por ejemplo, liquidadores y oráculos de precios). Por lo general, un prestamista facilita las criptomonedas para el préstamo al depositarlas en un *lending pool*. Un prestatario, por lo tanto, brinda un colateral como garantía y toma prestado del *lending pool*. Cabe hacer notar que los prestatarios también actúan automáticamente como prestamistas

⁹ Véase: <https://www.reuters.com/business/court-dismisses-claims-robinhood-wrongly-restricted-meme-stock-trades-2022-01-27/> y <https://www.forbes.com/sites/dereksaul/2022/08/11/class-action-suit-moves-forward-against-robinhood-over-halting-meme-stock-trading/?sh=1e2bae3364b3>.

cuando el *lending pool* presta el colateral (garantía) de estos prestatarios. Los activos depositados por los usuarios en *lending pools* no están protegidos por las regulaciones tradicionales de CeFi, como pueden ser la protección de depósitos bancarios que protege la cuenta de depósito de clientes de una institución bancaria hasta un cierto umbral de moneda fiduciaria.] (Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A., 2021)

Tras haber sentado el presente marco y haber realizado este breve análisis y diferenciación entre las DeFi y CeFi, corresponde dar paso a una temática íntimamente relacionada con el objeto de estudio del trabajo. Como se refirió precedentemente, una de las características fundamentales de las DeFi, como su nombre lo indica, es la inexistencia de un ente central que regule el comportamiento del sistema financiero y, en línea con ello, que se encargue de controlar el circulante de la moneda y su emisión. A continuación, se focalizará en y ampliarán estos conceptos.

Emisión de Criptomonedas

Como toda moneda, sea digital o física, las criptomonedas (en adelante, también abreviadas como “Cripto”) se encuentran sujetas a un mecanismo de generación y/o emisión. No obstante, su particularidad radica en que, a diferencia de las monedas utilizadas a lo largo y ancho del mundo (tales como el dólar estadounidense, euro, yen japonés y peso argentino, por mencionar algunas), su emisión no se encuentra supeditada a la voluntad discrecional de una entidad central con agenda de política monetaria sino que, por el contrario, pueden ser “creadas”, con las particularidades de cada caso, por la totalidad de los usuarios de la red. Dicho esto, corresponde observar los dos mecanismos principales de consenso a través de los cuales incorporan nuevas transacciones de Cripto a la red (acarreado, dependiendo el protocolo, la generación y/o emisión de criptomonedas derivadas de las recompensas otorgadas a quienes intervengan en dicha tarea¹⁰): *Proof of Work* y *Proof of Stake*¹¹.

Bitcoin y el Minado de Criptomonedas: Proof of Work

Conforme se mencionó previamente, *Bitcoin* ostenta el título de haber sido la primer Cripto en ser creada. Su nacimiento en manos de Satoshi Nakamoto se rastrea hasta el año 2008 y encuentra su fundamento en el *White Paper* titulado “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”. Al respecto, en él (al igual que en los *White Papers* pertenecientes a cada una de las Cripto existentes) se establecen los cimientos del proyecto y sus lineamientos principales. Cabe destacar que *Bitcoin*, tal como indica el título de su *White Paper*, fue ideado como un sistema electrónico de pago sin intermediarios, es decir, directo entre usuarios -término conocido como *Peer to Peer* y muchas veces referido y abreviado como P2P- (Ammous, 2018; Nakamoto, 2008).

Como es de esperarse, estipular cómo se emitirán y/o generarán los *Bitcoins* adquiere un rol relevante al momento de concebir un proyecto de este tipo. A su vez, asociado a este supuesto y como mencionamos previamente, se destaca el problema central de las monedas digitales: comprobar que el usuario no haya utilizado la misma moneda en diferentes transacciones (*double spending*). Consecuencia de estas variables, surge la relación entre *Blockchain*, criptografía, *Proof of Work* y demás conceptos asociados que serán profundizados a continuación.

Tal como indica su nombre en inglés, la *Blockchain* supone una cadena de bloques concatenados que, en el caso de *Bitcoin*, funciona como registro de las transacciones que han sucedido a lo largo del tiempo (este registro es referido como *Ledger*). De este modo, su trazabilidad permite rastrear la

¹⁰ Se ampliará y profundizará en estos conceptos más adelante.

¹¹ A los fines de la realización del presente trabajo, tal como se adelantó en el introito, se refieren los mecanismos de las criptomonedas con mayor capitalización del mercado: *Bitcoin* y *Ethereum*. En este sentido, las menciones a la inexistencia de sistemas centrales de generación de Cripto se deben a la circunscripción del análisis a dichos activos y sus métodos de consenso.

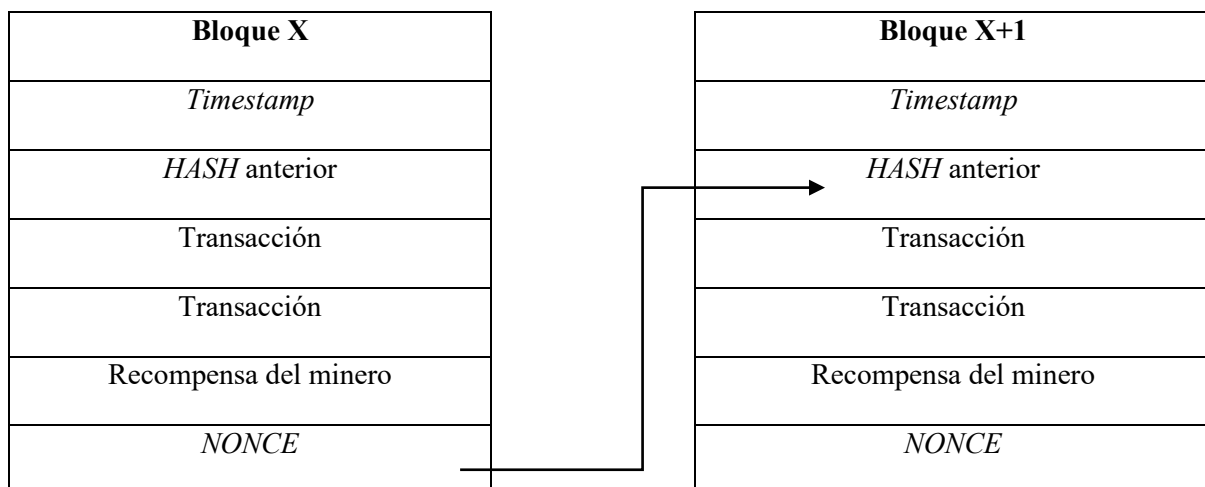
primera transacción realizada con *Bitcoin* años atrás. Asimismo, los bloques que contienen las transacciones se entrelazan entre sí, utilizando una función matemática criptográfica denominada *hash*. Puntualmente, en el caso de *Bitcoin* se utiliza la función SHA-256 cuyo objetivo primordial es brindar seguridad a la red, permitiendo que los bloques se unan entre sí mediante un código compuesto por 64 caracteres (256 bits). En otras palabras, la función matemática *hash* toma una entrada arbitraria de datos y la convierte en una salida de longitud fija que representa de manera única los datos de entrada¹² (Back, A., 2002; Bayer, D., Haber, S. & Stornetta, W.S., 1992; Haber, S. & Stornetta, W. S., 1991; Nakamoto, 2008; National Institute of Standards and Technology, 2015).

Es en este punto donde aparecen los denominados “mineros”. Como puede observarse, la red funciona y registra las transacciones a medida que se unen bloques de manera concatenada mediante un código encriptado. Este código, como se verá seguidamente, se genera y determina como consecuencia de la información existente en los bloques y es único, es decir, el *hash* que une un bloque con los restantes (precedente y siguiente) es desconocido por la red y, para que las transacciones continúen registrándose, debe ser resuelto. En efecto, la resolución de dicho “acertijo” requiere el uso de carga computacional y mecanismo de “prueba y error” dando, a quien dé con la respuesta, una recompensa en *Bitcoin*. Dicha respuesta, calculada de forma “aleatoria”, es el denominado *Nonce* (acrónimo que significa *Number that can only be used once*, número de un solo uso) y es aquí donde radica la complejidad de la tarea encomendada (Back, A., 2002; Bayer, D., Haber, S. & Stornetta, W.S., 1992; Haber, S. & Stornetta, W. S., 1991; Nakamoto, 2008).

Específicamente, la particularidad radica en que la función SHA-256 permite encriptar los mensajes de manera “sencilla” a partir de la entrada de datos, pero no permite descubrir el mensaje cifrado a partir del *hash* (su eficiencia radica en la tarea prácticamente imposible de descifrar el mensaje a partir del *hash*). Asimismo, la modificación de un dato mínimo del mensaje cifrado produciría un *hash* completamente distinto lo que asigna una mayor seguridad al protocolo. Cada bloque contiene un *timestamp* que asigna temporalidad y permite identificar la preexistencia de los *Bitcoins* de la transacción (primero debo tenerlos para transferirlos), el *hash* del bloque anterior, las transacciones entre las partes, el *nonce* y la recompensa para los mineros. Es decir, el minero registra una transacción adicional en el bloque que representa su recompensa por su “trabajo” y, a su vez, supone la emisión de nuevos *Bitcoins* (Back, A., 2002; Bayer, D., Haber, S. & Stornetta, W.S., 1992; Haber, S. & Stornetta, W. S., 1991; Nakamoto, 2008; National Institute of Standards and Technology, 2015).

Figura 2

Concatenación de bloques en la Blockchain



¹² Cabe mencionar que la seguridad de la red es uno de los argumentos y estándares principales que sostienen los defensores de *Proof of Work* frente a otros mecanismos de consenso como ser *Proof of Stake*.

Fuente: Elaboración propia a base de Nakamoto, S. (2008), Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.

Vale agregar que la propia seguridad de la red, demanda que el *hash* que encripta el mensaje y debe descubrirse tiene que cumplir determinadas condiciones. Puntualmente, se exige un determinado número de ceros (0) que se van ajustando en función de la velocidad de procesamiento de las transacciones. Es decir, si las transacciones se procesan lento, la dificultad disminuye y viceversa (el objetivo es que los bloques se agreguen a la cadena en un tiempo aproximado de 10 minutos). De esta manera, para encontrar el *hash* que cumpla las condiciones demandadas, los mineros carecen de alternativas más que la “prueba y error” para dar con el *nonce* que permita la obtención del *hash* exigido por la red. Dicho de otra manera, el *hash* contiene la información de las transacciones, el *timestamp* y la recompensa y es el *nonce* el dato faltante (el “acertijo”) que debe ser encontrado (Back, A., 2002; Bayer, D., Haber, S. & Stornetta, W.S., 1992; Buterin, 2014; Haber, S. & Stornetta, W. S., 1991; Nakamoto, 2008).

Por otro lado, continuando con lo expresado anteriormente en relación con la recompensa de los mineros, cada bloque contiene nuevos *Bitcoins* aumentando el circulante de la Cripto. Dicho fenómeno, realizando una analogía con la emisión de cualquier moneda, podría acarrear efectos inflacionarios y reducir su valor, ya que, se agrandaría la oferta sin importar la demanda existente. En este aspecto, entra en consideración un fenómeno previsto en el protocolo conocido como *Halving*. Al respecto, en el *White Paper*, Nakamoto previó la reducción de la recompensa de los mineros cada 210.000 bloques minados (sucede aproximadamente cada 4 años)¹³. De esta manera, no solo se controla la oferta de *Bitcoin* sino que se desincentiva la minería al reducir la recompensa. No obstante, ello es relativo en tanto desincentivar la minería se relaciona -también- con la evolución de la cotización de *Bitcoin*, ya que, si aumenta su valor, la recompensa obtenida podría representar menos *Bitcoins* pero mayores ingresos en moneda. (Ammous, 2018; Nakamoto, 2008)

Recopilando lo referido anteriormente, este mecanismo de validación y generación de Cripto que requiere carga computacional y “prueba y error” para obtener la recompensa es lo que se conoce como *Proof of Work*. Nakamoto (2008) en el *White Paper* de *Bitcoin* indica:

The steps to run the network are as follows:

- 1) New transactions are broadcast to all nodes.
- 2) Each node collects new transactions into a block.
- 3) Each node works on finding a difficult proof-of-work for its block.
- 4) When a node finds a proof-of-work, it broadcasts the block to all nodes.
- 5) Nodes accept the block only if all transactions in it are valid and not already spent.
- 6) Nodes express their acceptance of the block by working on creating the next block in the chain, using the hash of the accepted block as the previous hash.

[Los pasos para ejecutar la red son los siguientes:

- 1) Se difunden nuevas transacciones a todos los nodos.
- 2) Cada nodo recopila las nuevas transacciones en un bloque.
- 3) Cada nodo trabaja en encontrar una prueba de trabajo difícil para su bloque.
- 4) Cuando un nodo encuentra una prueba de trabajo, difunde el bloque a todos los nodos.
- 5) Los nodos aceptan el bloque solo si todas las transacciones en él son válidas y no se han gastado previamente.
- 6) Los nodos expresan su aceptación del bloque trabajando en la creación del siguiente bloque en la cadena, utilizando el hash del bloque aceptado como hash anterior.] (Nakamoto, 2008)

¹³ Originalmente, la recompensa por cada bloque minado era de 50 *Bitcoins*. El último *halving* ocurrió en mayo de 2020, cuando la recompensa se redujo a 6.25 BTC por bloque.

Sin perjuicio de lo expuesto hasta el momento, el mecanismo de *Proof of Work* no se encuentra exento de críticas siendo su elevado consumo de energía su axial talón de Aquiles (circunstancia que será analizada más adelante). En este sentido, sus principales detractores traccionan para que *Bitcoin* mute de *Proof of Work* a *Proof of Stake* de manera de reducir sus requerimientos energéticos. Asimismo, frente a dicha circunstancia, su principal competidora de capitalización de mercado, *Ethereum*, siguió ese camino y llevó a cabo la tan demandada metamorfosis, cambiando su mecanismo de *Proof of Work* a *Proof of Stake* en lo que se conoció como *The Merge* (Ethereum Foundation, s.f.a; Ethereum Foundation, s.f.b; Ethereum Foundation, s.f.c).

***Ethereum y el Staking: Proof of Stake*¹⁴**

Si bien el protagonista del presente trabajo es *Bitcoin*, no puede dejarse de mencionar el protocolo *Ethereum* y su conversión al mecanismo *Proof of Stake*. En este sentido, la pertinencia de su inclusión en el presente radica en la alternativa que supone el cambio de mecanismo en miras a lograr el objetivo de reducir la demanda energética de *Bitcoin* y, a su vez, lograr su conversión en una industria sostenible. El antecedente de la migración de *Ethereum* no hace más que presionar a los defensores del *Proof of Work* y permite dar paso al análisis de este mecanismo de validación.

Primeramente, corresponde efectuar un breve racconto de *Ethereum* y su génesis. Concebida por Vitalik Buterin en 2014, *Ethereum* se encontraba basada en *Bitcoin* pero buscaba no solo ser una plataforma para efectuar transacciones, sino ser enteramente programable, permitir el desarrollo de aplicaciones y ejecución de programas incorporando en su red los contratos inteligentes (Buterin, 2014). Específicamente, Buterin (2014) plasmaba su ideario de proyecto en el *White Paper* estableciendo que

The intent of Ethereum is to merge together and improve upon the concepts of scripting, altcoins and on-chain meta-protocols, and allow developers to create arbitrary consensus-based applications that have the scalability, standardization, feature-completeness, ease of development and interoperability offered by these different paradigms all at the same time. [La intención de Ethereum es fusionarse y mejorar los conceptos de *scripting*, *altcoins* y meta-protocolos en cadena, y permitir a los desarrolladores crear aplicaciones arbitrarias basadas en el consenso que tengan la escalabilidad, estandarización, funciones, facilidad de desarrollo e interoperabilidad que ofrecen estos diferentes paradigmas, todo ello al mismo tiempo] (Buterin, 2014)

Si bien inicialmente el protocolo *Ethereum* utilizaba el mecanismo de *Proof of Work*, en septiembre del 2022, realizó su pasaje a *Proof of Stake* en el proceso que se denominó *The Merge*. En este sentido, quienes intervenían en la generación de estas criptomonedas debieron reacondicionar su manera de participar en la conformación del *Blockchain* de la red y pasaron a ser validadores en lugar de mineros. Al respecto, dejó de ser necesario el descubrimiento de un código específico y la utilización de sofisticadas máquinas (conocidas como *miners*) para transicionar hacia un modelo basado en la tenencia de activos por parte del validador.

Al respecto, en dicho proceso se produjo la conjunción de la *execution layer* original de *Ethereum* con la nueva *consensus layer*. Por un lado, la *execution layer* original, denominada *Mainnet*, supone, resumidamente, la capa y/o red donde se procesaban los contratos inteligentes y ejecutaban los programas de la *Blockchain* de *Ethereum*. De este modo, los mineros interactuaban con dicha red, validaban las transacciones y obtenían su recompensa -nótese que se trataba de un mecanismo *Proof of Work* por lo que su funcionamiento replicaba el ya descrito anteriormente para *Bitcoin*- (Ethereum Foundation, s.f.a; Ethereum Foundation, s.f.b; Ethereum Foundation, s.f.c).

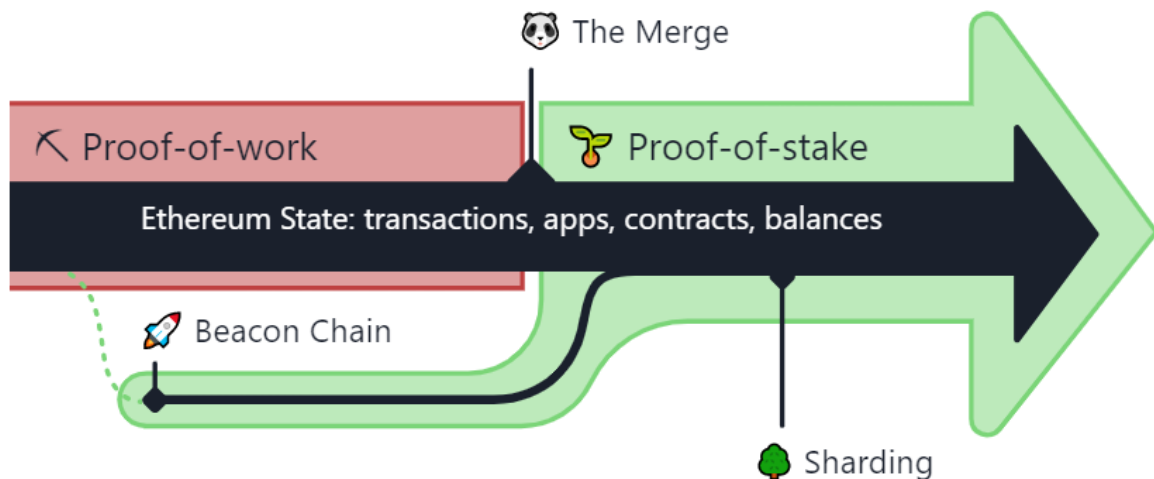
¹⁴ Con el objeto de lograr mayor claridad expositiva y toda vez que generalmente se refiere a la criptomoneda como *Ethereum* (nombre de la aplicación) y no como *ETH* (criptomoneda que sostiene a *Ethereum* y que pertenece a la red), se utilizará la primera denominación para referirse a la Cripto.

Por otro lado, la *consensus layer*, conocida como *Beacon Chain*, fue creada en el 2020 y contaba con validadores (mecanismo *Proof of Stake*) en lugar de mineros. Dicha *layer*, funcionaba en paralelo a la *Mainnet* (sin procesar ni registrar las transacciones que sucedían en ella) y, en cambio, se encontraba siendo testeada por lo que se ocupaba simplemente de alcanzar consenso sobre su propio estado mediante la validación de los estados de cuenta de los validadores. En consecuencia, una vez culminada la etapa de prueba, el siguiente paso fue que la *Beacon Chain* alcanzara consenso con datos en tiempo real. Una vez implementado el Merge, la *Beacon Chain* se convirtió en la *Blockchain* donde se registraban todas las operaciones de la red *Ethereum*, incluyendo las transacciones y los estados de cuenta (Ethereum Foundation, s.f.a; Ethereum Foundation, s.f.b; Ethereum Foundation, s.f.c).

El siguiente gráfico ilustra de manera sintética lo descrito:

Figura 3

Implementación y funcionamiento de The Merge en la red de Ethereum



Fuente: Ethereum Foundation, s.f.c

Sucintamente podría describirse el funcionamiento basado en *Proof of Stake* de la siguiente manera,

Proof-of-stake underlies certain consensus mechanisms used by blockchains to achieve distributed consensus. In proof-of-work, miners prove they have capital at risk by expending energy. Ethereum uses proof-of-stake, where validators explicitly stake capital in the form of ETH into a smart contract on Ethereum. This staked ETH then acts as collateral that can be destroyed if the validator behaves dishonestly or lazily. The validator is then responsible for checking that new blocks propagated over the network are valid and occasionally creating and propagating new blocks themselves. [*Proof of Stake* subyace determinados mecanismos de consenso utilizados por *Blockchains* para lograr un consenso distribuido. En *Proof of Work*, los mineros demuestran que tienen capital en riesgo al gastar energía. *Ethereum* usa *Proof of Stake*, donde los validadores depositan explícitamente capital en la forma de *ETH* en un contrato inteligente dentro de *Ethereum*. Este *ETH* depositado actúa como colateral que puede ser destruido si el validador se comporta de manera deshonesto o perezosa. El validador es entonces responsable de comprobar que los nuevos bloques propagados a lo largo de la red sean válidos, y de crear y propagar nuevos bloques por sí mismo.] (Ethereum Foundation, s.f.b)

Cabe destacar que, en virtud de la implementación del mecanismo *Proof of Stake*, la emisión de *Ethereum* se vio también modificada. En este caso, los validadores reciben recompensas por su labor,

no obstante, no solo aún no pueden disponer de dichas acreencias¹⁵ (implicando que existen activos emitidos pero inmovilizados) sino que el control del circulante se realiza a partir de la “quema” de *Ethereum*. De este modo, a diferencia del sistema de “emisión preestablecida” que caracteriza *Bitcoin* y el *halving*, en el caso de *Ethereum* los usuarios que realizan transacciones deben abonar una tarifa cuyo valor se ajusta en virtud del volumen transaccional imperante en la red controlando, en consecuencia, el fenómeno inflacionario y devaluación que podría acarrear la emisión ininterrumpida de *Ethereum* (Ethereum Foundation, s.f.a). En otras palabras,

The opposite force to ETH issuance is the rate at which ETH is burned. For a transaction to execute on Ethereum, a minimum fee (known as a “base fee”) must be paid, which fluctuates continuously (block-to-block) depending on network activity. The fee is paid in ETH and is *required* for the transaction to be considered valid. This fee gets *burned* during the transaction process, removing it from circulation. [La fuerza opuesta a la emisión de *ETH* es la velocidad a la que se quema *ETH*. Para que una transacción se ejecute en *Ethereum*, se debe pagar una tarifa mínima (conocida como “tarifa base”), que fluctúa continuamente (bloque a bloque) dependiendo de la actividad de la red. La tarifa se paga en *ETH* y es necesaria para que la transacción se considere válida. Esta tarifa se quema durante el proceso de transacción, eliminándola de la circulación.] (Ethereum Foundation, s.f.a)

En definitiva y a la luz de lo expuesto hasta el momento, la eliminación del trabajo computacional y su reemplazo por el depósito de una determinada cantidad de criptomonedas¹⁶ para poder actuar como validador, trae aparejado la disminución en la demanda energética. Además, la demanda energética requerida hoy en día para oficiar como validador no es más que la de una computadora con conexión a internet, confrontando así con las exigencias que posee una *pool* de *miners* para poder dar con el código que conforme un nuevo bloque en la *Blockchain* de *Bitcoin*. Asimismo, sin perjuicio del cambio en el mecanismo de consenso y los requerimientos energéticos de cada uno, el cambio de la fuente de energía (sea el caso de *Bitcoin* o *Ethereum*) permitiría que una red se volviese carbono neutral (p.ej. utilizando energías renovables) viendo dicha circunstancia más factible en una red como la de *Ethereum* que posee menores exigencias: se estima que *The Merge* redujo en más del 99,9% el consumo energético y emisiones de gases de *Ethereum* (Crypto Carbon Ratings Institute, 2022; Ethereum Foundation, s.f.c).

Capítulo III: Bitcoin y Sostenibilidad: Perspectivas, Desafíos y Soluciones.

Como puede desprenderse de lo expuesto en el capítulo precedente, ambos métodos de validación son dependientes de energía para poder funcionar. No obstante, en virtud de sus características intrínsecas de funcionamiento, podría sostenerse que requieren energía para funcionar en escalas diametralmente distintas. Mientras que en uno se requiere demostrar tenencias de Cripto para actuar como validador (*Ethereum* y el *Proof of Stake*), el otro demanda trabajo computacional intensivo para asumir el rol de minero (*Bitcoin* y el *Proof of Work*). La Casa Blanca (2022) en su informe referido a las implicancias en el plano energético y climático indicaba,

The scale and sources of electricity used by computing devices depend on the technology that a crypto-asset uses to ensure security and validity, or its consensus mechanism. For PoS blockchains, computing tasks can be performed by general-purpose computers or servers. The latter can be located in conventional data centers across a network. In PoS blockchains, these computing devices are known as validator nodes (which participate in consensus protocols and produce new blocks) and full nodes (which verify transactions). (...) PoW blockchains also use general-purpose nodes to verify transactions, validate consensus protocols, and store consensus copies of the blockchain. However, computing for popular cryptoassets that use PoW blockchains is also performed by specialized semiconductors, based on application-

¹⁵ Situación que cambiará con la implementación del *Shanghai Upgrade*, inicialmente fechado para abril 2023.

¹⁶ Al momento de redactar estas líneas se requieren 32 *ETH*.

specific integrated circuits (ASICs) contained in “mining rigs” that perform PoW computations. These mining rigs are often located in “mining” facilities that generally purchase grid electricity and can represent large local electricity loads. [La escala y las fuentes de electricidad utilizadas por los dispositivos informáticos dependen de la tecnología que un cripto-activo utiliza para garantizar la seguridad y la validez, o su mecanismo de consenso. Para las cadenas de bloques *Proof of Stake* (PoS), las tareas informáticas pueden ser realizadas por computadoras de propósito general o servidores. Estos último pueden estar ubicados en centros de datos convencionales conectados a una red. En las *Blockchains* PoS, estos dispositivos informáticos se conocen como nodos validadores (que participan en protocolos de consenso y producen nuevos bloques) y nodos completos (que verifican transacciones). (...) Las cadenas de bloques *Proof of Work* (PoW) también usan nodos de propósito general para verificar transacciones, validar protocolos de consenso y almacenar copias del consenso de la cadena de bloques. Sin embargo, el trabajo computacional para los criptoactivos más populares que usan cadenas de bloques PoW también es realizada por semiconductores especializados, basados en circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASICs) contenidos en “*rigs* de minería” que realizan PoW. Estos *rigs* mineros a menudo se encuentran en instalaciones “mineras” que generalmente compran electricidad de la red y pueden representar grandes cargas en la red local de electricidad.] (White House Office of Science and Technology Policy, 2022)

En relación con esto último, podría indicarse que la demanda y/o el consumo energético no deviene el problema principal del mecanismo de *Proof of Work* y *Bitcoin*. El conflicto suscitado y la incompatibilidad de dicha prueba de consenso con la sostenibilidad y las emisiones de gas de carbono se encuentra en la fuente de la cual proviene la energía utilizada. Al respecto, demandar elevadas cantidades de Kwh pero satisfacerlas con fuentes renovables no revestiría problemas frente a la problemática del cambio climático (Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C., 2020). En este plano y sirviendo a estos fines, tener una demanda energética menor, pero satisfacerla íntegramente con combustibles fósiles generaría mayor perjuicio en materia ambiental. En consecuencia, a continuación, se analizará el estado actual de la red de minado de *Bitcoin*, sus fuentes de energía y composición.

Análisis del Consumo Energético de la Red de Minado de *Bitcoin*

En virtud de lo expuesto hasta el momento y como se refirió anteriormente, en el presente apartado se ilustrará la demanda energética y, a su vez, a partir de qué fuentes satisface sus necesidades energéticas la red *Bitcoin*. Asimismo, cabe destacar que muchas de las operaciones y redes de minado funcionan de manera reservada (por razones impositivas, regulatorias, legales, entre otras) y sus operaciones pueden cesar y/o (re)comenzar en relación con el comportamiento de otras variables. En este sentido, los estudios y estadísticas que se expondrán poseen metodologías específicas, disimiles en muchos casos, que se exhibirán junto con los datos.

Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index

Elaborado por el *Cambridge Centre for Alternative Finance*, el *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index* (en adelante, “CBECEI”) brinda información estimada sobre la demanda energética de *Bitcoin*. El modelo toma como idea basal que los mineros utilizarán el equipamiento de minado siempre que este resulte redituable económicamente en virtud de su consumo eléctrico y el coste asociado en dicho sentido. En consecuencia, el rendimiento económico toma únicamente los costos vinculados con el consumo de electricidad dejando de lado conceptos como amortización, costo de adquisición, costo de mantenimiento, refrigeración, entre otros (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.c).

A mayor abundamiento, el consumo estimado se calcula mediante la utilización de dos límites (uno superior y otro inferior) donde se asume que los mineros utilizan los ASICs (también denominados “*miners*” que, como se mencionó precedentemente son diseñados especialmente para minar *Bitcoin*)

más energéticamente eficientes (límite inferior) por un lado y, por el otro, los menos eficientes (límite superior) del mercado siempre y cuando su utilización sea rentable en términos económicos (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.c).

Puntualmente, el modelo económico de Cambridge utilizó como base el desarrollado por Levand (2017) quien indica

We can calculate the upper bound for the global electricity consumption of Bitcoin miners by assuming they deploy the least efficient hardware of their time and never upgrade it. As to the lower bound it can be calculated by assuming everyone has upgraded to the most efficient hardware. [Podemos calcular el límite superior del consume global de electricidad de los mineros de *Bitcoin* asumiendo que desplieguen el hardware menos eficiente de su época y nunca lo actualicen. Respecto al límite inferior, puede calcularse asumiendo que todos lo han actualizado al hardware más eficiente.] (Levand, 2017)

Adicionalmente, vale la pena hacer notar que el modelo asume, en función de valores utilizados en investigaciones previas y a partir de la realización de encuestas a mineros el costo de la energía en USD0,05 Kwh. Esta suposición implica que los resultados del modelo varíen notablemente si se toman valores más elevados de energía, ya que, ello acarrearía una disminución de la energía consumida. Por el contrario, un costo de energía menor, provocaría que se eleve el consumo energético (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.c).

De este modo, a partir de los dos límites establecidos, se establece un mejor escenario asumiendo que los mineros utilizan un conjunto de *miners* económicamente rentables en lugar de adoptar uno de los dos modelos presupuestos (menos eficiente y más eficiente). Al respecto, el modelo parte de la premisa de una distribución equitativa de los *miners* entre los mineros, dejando de lado diferencias en la producción y venta de equipamiento y/o disparidades en la adquisición de los modelos más rentables por parte de mineros -los *miners* no necesariamente son adquiridos en el mismo momento o apenas son puestos en el mercado- (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.c).

A continuación, se exponen los resultados del modelo CBECI:

Tabla 4

Resultados del Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index

Demanda energética de la red <i>Bitcoin</i>		
Escenario	Electricidad requerida	Consumo energético (anual)
<i>Hardware</i> más eficiente (límite inferior)	6,93 GW	60,71 TWh
<i>Hardware</i> menos eficiente (límite superior)	22,96 GW	201,30 TWh
Mejor escenario	14,25 GW	124,94 TWh

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida de Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.b.

En línea con lo mencionado precedentemente, las amplias diferencias entre los límites radican en la eficiencia energética del *miner* utilizado, demostrando un mayor consumo en aquellos *miners* que aprovechan en menor medida los recursos. En este sentido, el incentivo de los mineros no solo pasa por las recompensas que otorga la propia red de *Bitcoin* y el método de *Proof of Work*, sino que se observa un incentivo en la utilización de *miners* más eficientes y con mejor aprovechamiento o menor consumo energético, ya que, a menor consumo, menor costo y mayor ganancia neta. A efectos ilustrativos, el consumo energético del mejor escenario (124,94 TWh) se encuentra apenas por debajo del consumo energético que tuvo la Argentina en el 2021 (127 TWh) según la Administración de Información Energética de los Estados Unidos¹⁷ (U.S. Energy Information Administration. s.f.a.).

Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index

En otro orden de ideas, el *Cambridge Centre for Alternative Finance* también estudia las emisiones de gas de efecto invernadero de *Bitcoin* y, en este sentido, analiza mediante qué fuentes satisface sus necesidades energéticas. A tal efecto, creó el denominado *Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index* (“CBGGEI”). Por su parte, el CBGGEI sigue una metodología similar a la utilizada en el CBCECI en tanto toma como parámetros dos límites diametralmente opuestos y, a partir de estos, calcula un mejor escenario que se posiciona entremedio de los dos polos. En línea con ello, el límite inferior es aquel más amigable con el ambiente y, el superior, aquel que causa mayores emisiones de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, redundaría en un mayor perjuicio para el ambiente (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.f.).

Profundizando en estos últimos aspectos, el límite inferior (amigable con el ambiente) toma como premisa que los mineros utilizan energía que proviene enteramente de una fuente hídrica (energía renovable a partir de la utilización de la energía cinética del agua). Por el contrario, el límite superior (perjudicial para el ambiente) toma como variable basal que los mineros utilizan energía proveniente en su totalidad de combustibles fósiles, específicamente, del carbón. A su vez, en ambos supuestos se mantiene la intensidad de la red constante y, del mismo modo, al utilizar enteramente una única fuente de generación de energía eléctrica, la intensidad de sus emisiones coincide con la de su fuente -energía hídrica o carbón, según sea el caso- (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.f.).

Por su parte, en lo que hace al mejor escenario, se considera el uso de las siguientes fuentes de energía:

Tabla 5

Fuentes de energía consideradas en el Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index

Fuente de generación de energía	Detalle (en caso de corresponder)
Nuclear	Se consideran únicamente los reactores de agua ligera (agua presurizada y en estado de ebullición)

¹⁷ Cabe destacar que los consumos energéticos de un país y su cálculo revisten una mayor complejidad y se encuentran afectados por variables socioeconómicas tanto de la población como del propio país (existen diferencias en las necesidades de países en vías de desarrollo y desarrollados, por ejemplo). No obstante, se utiliza dicha comparación por su capacidad de ilustrar el volumen energético demandado y, a su vez, por ser una comparación realizada normalmente por medios de comunicación y la sociedad en su conjunto.

Fuente de generación de energía	Detalle (en caso de corresponder)
Solar	Fotovoltaica y termosolar de concentración
Eólica	Continental y <i>off-shore</i>
Otros renovables	Geotermal, bioenergía y energía marina.

Fuente: Elaboración propia a partir de Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.f.

En función de ello, a efectos de determinar la intensidad de las emisiones, entra en consideración la ubicación de los mineros y, derivado de ello, qué fuentes de generación de energía se encuentran disponibles y en qué medida estas contribuyen en la generación electricidad de esa ubicación determinada. Como limitante, los investigadores señalan que la información de determinadas locaciones y la capacidad y velocidad que tienen los mineros de resolver los acertijos computacionales (*Hashrate*) no siempre se encuentra disponible (el *hashrate* empezó a ser calculado en septiembre del 2019) y/o actualizada por lo que el modelo se construye a partir de tres intervalos de tiempo contruidos de diferente manera (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.f; Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.d).

En primer lugar, el intervalo “histórico” (18 de julio del 2010 al 31 de agosto del 2019) asume que los mineros se encuentran distribuidos proporcionalmente a lo largo y ancho del mundo y, en este sentido, toma el porcentaje que representa cada país en la generación eléctrica a nivel mundial. Segundo, el intervalo “constatado” (septiembre del 2019 a diciembre del 2021, fecha en la que se actualizó por última vez el mapa geográfico de mineros) utiliza los valores de *hashrate* por país de manera de ubicar geográficamente a los mineros y, en función de ello, contempla la red eléctrica de dicha ubicación y como esta se compone, es decir, si proviene de fuentes fósiles o renovables. El último intervalo, denominado “predictivo” (enero 2022 a la fecha) asume que la información más actualizada es una buena aproximación de la distribución de los mineros y el *hashrate* por país (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.f).

A continuación, se exponen los resultados del modelo CBGGEI:

Tabla 6

Resultados del Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de <i>Bitcoin</i>	
Escenario	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (expresadas en millones de toneladas de dióxido de carbono) (anual)
Fuente: Energía hídrica (límite inferior)	2,62 MtCO ₂ e
Fuente: Carbón (límite superior)	125,07 MtCO ₂ e

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de <i>Bitcoin</i>	
Fuente: Mix (mejor escenario)	63,31 MtCO ₂ e

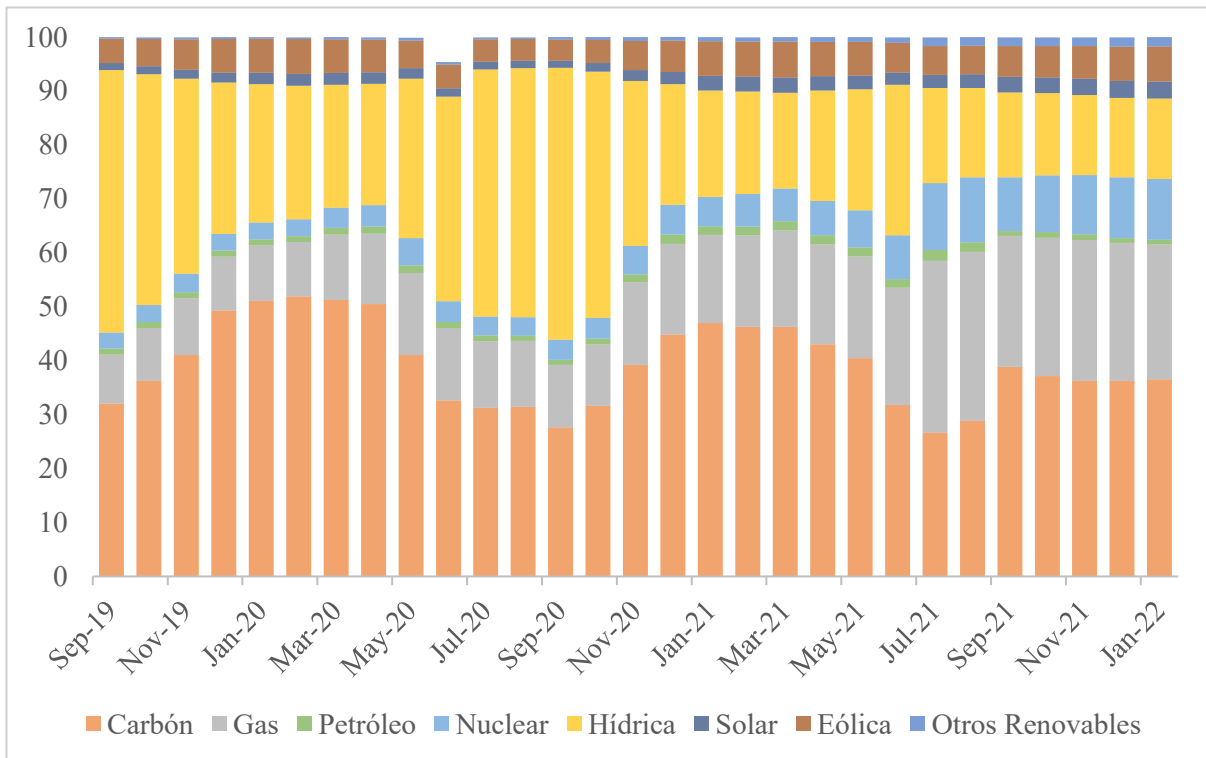
Fuente: Elaboración propia a partir de Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.e.

Conforme surge de los resultados obtenidos, se observa a las claras las abismales diferencias de emisiones en tanto se utilice energía eléctrica derivada de combustibles fósiles (carbón), o bien, energías limpias como ser energía hídrica. El mejor escenario estima las emisiones observando la ubicación geográfica de los mineros y las fuentes de energía que abastecen la red de dicha ubicación, teniendo en cuenta las consideraciones de los intervalos y la información disponible expuestas precedentemente (cabe destacar que los valores obtenidos se encuentran sujetos a modificaciones en tanto la publicación de información más actualizada, ampliaría el intervalo “constatado” reduciendo la influencia en los resultados del intervalo “predictivo”).

En relación con esto último, a partir del estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero y el estudio de la electricidad y su fuente de generación, se han computado las fuentes de generación de energía y su porcentual en la electricidad que consumen los mineros de *Bitcoin*. De este modo, los resultados obtenidos adquieren relevancia para el presente trabajo en tanto permiten, junto con las emisiones de gases de efecto invernadero, dar una aproximación de la sostenibilidad de *Bitcoin* (es menester recordar que el límite inferior del modelo CBGGEI donde se asumía un uso pleno de fuentes renovables, acercaba a *Bitcoin* a la neutralidad en las emisiones de dióxido de carbono). Seguidamente, se exponen los porcentajes obtenidos:

Figura 4

Fuentes de energía utilizadas para minar Bitcoin (Cambridge Bitcoin Greenhouse Gas Emissions Index)



Fuente: Elaboración propia a partir de Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.e.

Como puede desprenderse del gráfico precedente, los combustibles fósiles han ocupado un rol preponderante en la generación de energía eléctrica utilizada para minar *Bitcoin*, siendo su punto más bajo en septiembre del 2020 donde suministró el 40,17% y el más alto en marzo del 2021 alcanzando el 65%. No obstante, el uso de energías renovables no debe ser subestimado en tanto alcanzó valores en torno al 50% en distintos intervalos de tiempo (septiembre del 2019 y julio a octubre del 2020) habiendo disminuido su participación en el último periodo. A su vez, en línea como lo referido anteriormente, la fuente de energía utilizada dependerá de la ubicación de los mineros en tanto la producción de energía eléctrica y su fuente difiere en función del país que se trate y los recursos a los cuales tiene acceso. En este aspecto, cabe mencionar que la minería de *Bitcoin* a lo largo del último tiempo ha sido más intensiva en países como China, Estados Unidos, Kazajistán y Rusia¹⁸ (Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.e; Cambridge Centre for Alternative Finance, s.f.a).

Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index

Elaborado por el investigador neerlandés Alex de Vries (cuyos *papers* en la temática de estudio serán tratados en el presente) y utilizado como comparable en los modelos elaborados por *Cambridge* descriptos anteriormente, el *Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index* (“DBECI”) analiza el consumo energético de los mineros de *Bitcoin* bajo la premisa de que los ingresos de los mineros y sus costos se encuentran relacionados. De este modo, el consumo total de la red de *Bitcoin* se encuentra vinculada con los ingresos de los mineros de manera que, cuanto mayor sean los ingresos producto de la minería, mayor cantidad de *miners* (demandantes de energía) pueden ser soportados (se asume que alrededor del 60% de los ingresos son destinados a costos operativos). Asimismo, el modelo presume que la incorporación de *miners* continuará siempre y cuando ello sea rentable y la obtención de una ganancia sea posible previendo, en este punto, que el mercado alcanzará un equilibrio en algún momento del tiempo). (*Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index*,s.f.)

Profundizando en este aspecto, en primera medida se calculó el total de ingresos previstos por el minado y, a partir de dicha cifra, se estimó cuánto fue destinado a costos operativos de electricidad (60%, conforme se mencionó precedentemente). Luego, se calcula cuánto efectivamente gastan los mineros en electricidad, es decir, por kWh (estimado en USD0,05 al igual que en el modelo CBECI) y, posteriormente, el valor obtenido es convertido en consumo de energía. (*Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index*,s.f.)

Seguidamente, se exponen los resultados del DBECI:

Tabla 7

Resultados del Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index

Variable	Consumo energético
Una única transacción de <i>Bitcoin</i>	807,53 kWh
<i>Bitcoin</i> (total de la red)	89,50 tWh (anual)

Fuente: Elaboración propia a partir de *Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index*, s.f.

Conforme surge de los resultados obtenidos, el modelo DBECI arroja valores por debajo del mejor escenario de CBECI y cercanos al límite inferior (aquel que asume el uso de la maquinaria más

¹⁸ Se volverá sobre este punto más adelante (véase cita de Vries A, Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C., 2021- p.42 del presente-).

eficiente). En este sentido, el consumo energético previsto en el modelo *sub examine* inferiría que el consumo energético de los *miners* se posiciona cercano al ideal de eficiencia en lugar del límite superior del CBECI (ineficiencia energética de los *miners*). En consecuencia, efectuando una comparación lineal en este aspecto y dejando de lado la fuente de generación de energía (o asumiendo una generación mixta), un menor consumo energético podría permitir inferir una menor emisión de gases de efecto invernadero. Al respecto, a continuación, se observarán las emisiones de acuerdo con modelo DBECI y, posteriormente, los porcentuales de las fuentes de generación de energía eléctrica.

Tabla 8

Emisiones de gases de efecto invernadero (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index)

Variable	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
Una única transacción de <i>Bitcoin</i>	450,41 kgCO ₂
<i>Bitcoin</i> (total de la red)	49,92 MtCO ₂ (anual)

Fuente: Elaboración propia a partir de Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, s.f.

Como puede advertirse, las emisiones arrojadas por el modelo DBECI se posicionan por debajo del mejor escenario establecido por el modelo CBECI (*mix* de energía), estimando menores emisiones de gases de efecto invernadero (en línea con un consumo energético menor de la red en su conjunto). Asimismo, cabe destacar que, si bien el modelo aplica una metodología similar a la utilizada por CBECI donde la locación de los mineros y su capacidad de procesamiento (*hashrate*) asume un rol preponderante (se obtiene un estimado de las emisiones en virtud de su ubicación y, a partir de ello, se contempla el mecanismo de generación de energía utilizado en la región correspondiente), el modelo DBECI se diferencia del CBECI al contemplar dentro de sus suposiciones los costos operativos asociados a la minería, estableciéndolos en un 60% de los ingresos obtenidos (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, s.f.)

Por otro lado, respecto a la fuente de generación y en línea con lo observado en el CBGGEI, se estima que el porcentual generado a partir de energías renovables disminuyó de un promedio del 41,6% en el 2020 al 25,1% en agosto del 2021. (Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index, s.f.; de Vries A, Gellersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C., 2021). En este sentido, de Vries A, Gellersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2021) indican

A possible explanation for this decline is that the Bitcoin network no longer had access to hydropower from the Chinese provinces of Sichuan and Yunnan. Before the crackdown in China, miners seasonally relocated to these provinces to take advantage of their abundant hydropower. After the wet season, they migrated back to coal-dependent provinces, such as Xinjiang and Inner Mongolia (...) After the mining crackdown in China, miners primarily migrated to other countries such as Kazakhstan and the United States. Consequently, the share of natural gas in the electricity mix nearly doubled from 15% to 30.8% (...) the potential shift from coal resources in China to coal resources in Kazakhstan may have had a major impact on the average carbon intensity of electricity consumed by the Bitcoin network [Una posible explicación de este declive es que la red *Bitcoin* ya no tenía acceso a la energía hidroeléctrica de las provincias chinas de Sichuan y Yunnan. Antes de la prohibición en China, los mineros se trasladaban estacionalmente a estas provincias para aprovechar su abundante energía hidroeléctrica. Después de la temporada de lluvias, migraban de nuevo a provincias dependientes del carbón, como Xinjiang y el interior de Mongolia (...) Luego de la prohibición a la minería en China, los mineros migraron principalmente a otros países como

Kazajstán y los Estados Unidos. En consecuencia, la participación del gas natural en el mix eléctrico casi se duplicó del 15% al 30,8% (...) el cambio potencial de los recursos de carbón en China a los recursos de carbón en Kazajstán puede haber tenido un impacto importante en la intensidad de carbono promedio de la electricidad consumida por la red Bitcoin.] (de Vries A, Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C., 2021)

Bitcoin Mining Council

Creado por Michael Saylor durante el año 2021, el *Bitcoin Mining Council* (“**BMC**”) es un foro voluntario cuyo objetivo es “promover la transparencia, compartir las mejores prácticas y educar al público en los beneficios del *Bitcoin* y su minado”. (Bitcoin Mining Council) Asimismo, el BMC cuenta con la adhesión de múltiples empresas dedicadas al minado de *Bitcoin* que suministran información: Asicxchange, Alpha Miner, Argo Blockchain, Arkon Energy, Atlas Mining, atNorth, Bit5ive LLC, BitDeer, Bit-Digital, Bitfarms, Bitfury, Bitriver, Bitquest, BlockFusion, BlockWare Solutions, BlockWare Mining, BTCM, Celsius Network, Compass Mining, Compute North, Core Scientific, Cormint, Cowa, DMG Blockchain Solutions, Delta Mining, Frontier Mining, Gem Mining, GMR, GMT, Galaxy Digital, Hive Blockchain, HMTech, Horizon Kinetics, Hut8, Iris Energy, JKL Mining, Marathon Digital Holdings, Mawson Infrastructure Group, Merov, Mined Map, Mining Store, NFN8 Group, Poolin, PrimeBlock, Riot Blockchain, Sato, SBI Crypto, Stronghold Digital Mining, Soluna, Summit, Terawulf, True North y US Bitcoin Corp¹⁹(Bitcoin Mining Council, s.f.).

Desde sus comienzos en el 2021, el BMC ha estado publicando informes trimestrales donde se realiza un análisis del estado de la red, el consumo energético, la seguridad, *hashrate*, entre otros factores. En este sentido, basándonos en el informe del último trimestre del 2022²⁰, las empresas que brindan información (las 53 pertenecientes al BMC representan el 48,4% de la red de minado) se someten a una encuesta donde contestan 4 preguntas:

1. ¿Cuánta electricidad consume una flota de *miners* en el día?
2. ¿Cuál es el porcentaje de energías renovables utilizadas en el mix de energía consumida por una flota de *miners*?
3. ¿Cuál es el valor agregado total de *hashrate* de la empresa en el día?
4. ¿se realiza algún tipo de reducción y/o disminución (*curtail*) de la minería? En caso de hacerlo, ¿qué cantidad de horas y mWh son recortados en el trimestre?
(Bitcoin Mining Council, 2022d)

A continuación, se exponen los resultados arrojados por el BMC para el año 2022 referidos al consumo energético de *Bitcoin*:

Tabla 9

Resultados del Bitcoin Mining Council 2022

Variable	Consumo energético (anual)
<i>Bitcoin</i> (total de la red)	275TWh

Fuente: Elaboración propia a partir de Bitcoin Mining Council, 2022d

¹⁹ Cabe destacar que entre las empresas mencionadas se encuentran incluidas las más importantes en virtud de su capitalización de mercado. Al respecto, véase el siguiente artículo publicado en *Yahoo Finanzas*: <https://finance.yahoo.com/news/top-15-bitcoin-mining-companies-135559095.html?>

²⁰ Informe más reciente a la fecha en que se redacta el presente.

En virtud de los resultados arrojados por BMC, puede desprenderse que el consumo energético superaría los modelos analizados precedentemente. A su vez, el consumo superaría el límite superior (*hardware* menos eficiente) establecido en el modelo CBECEI y, del mismo modo, el consumo energético estimado por CBGGEI. No obstante, si bien en base a lo observado la demanda energética superaría ampliamente los otros modelos (inclusive el supuesto de ineficiencia de *hardware* del CBECEI), el informe de BMC sostiene el uso de energías renovables en un 63,8% por parte de los integrantes del BMC y un estimado del 58,8% para la totalidad de la red de minería de *Bitcoin*. De este modo, el mayor consumo energético expresado no necesariamente implicaría mayores emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los otros modelos consultados (Bitcoin Mining Council, 2022d).

Al respecto, seguidamente se exponen las emisiones de gases de efecto invernadero estimadas por BMC:

Tabla 10

Emisiones de gases de efecto invernadero (Bitcoin Mining Council 2022)

Variable	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
<i>Bitcoin</i> (total de la red)	40 MtCO ₂ (anual)

Fuente: Elaboración propia a partir de Bitcoin Mining Council, 2022d

En línea con lo previsto, los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero estimados por BMC se posicionan por debajo tanto del mejor escenario del modelo CBGGEI como, también, del modelo DBECEI. En este aspecto, la diferencia con ambos modelos podría radicar en que estos contemplan la ubicación de los mineros (en el caso del modelo CBGGEI se hace referencia al mejor escenario) y realizan un estimado de sus emisiones en función del *mix* de fuentes de generación eléctrica que se encuentran en dicha región y como este se compone (porcentaje de fuentes de energía renovable, fósiles, nuclear, etc.). En contraposición a esta metodología, BMC encuesta a los mineros y estos brindan información sobre la energía utilizada y su fuente, sin que ello se relacione necesariamente con la energía generada en la región donde operan (Bitcoin Mining Council, 2022d).

Los resultados obtenidos y el uso estimado de energía renovable arrojado por las encuestas realizadas por BMC, sugieren que la industria de la minería global de *Bitcoin* “se mantenga como una de las industrias más sostenibles a nivel global” (Bitcoin Mining Council, 2022d). Asimismo, sin perjuicio del consumo energético anual estimado, el estudio realizado indica que la industria de la minería continúa ganando eficiencia, y según el BMC se espera un incremento del triple en el consumo anual para los próximos cuatro años y, a su vez, del doble para los cuatro años subsiguientes. Ello, de acuerdo con BMC, se vería influenciado por el fenómeno del *halving* (como mencionamos anteriormente, la reducción de la recompensa de los mineros cada 210.000 bloques y, en términos relativos, desincentivo a la minería) y permitiría indicar que la minería de *Bitcoin* será más eficiente energéticamente en los próximos ocho años (Bitcoin Mining Council, 2022d).

Proyectos y Soluciones para la Sostenibilidad de la Minería de *Bitcoin*

Luego de haber descripto y analizado el estado actual de la red de minería de *Bitcoin* puede desprenderse que, si bien los porcentajes varían en función de cada uno de los estudios estadísticos, las energías renovables ocupan un lugar preponderante en la generación de energía utilizada por *Bitcoin* para su minado. No obstante, como se observó anteriormente, la proporción en la que dichas energías y/o tecnologías asisten depende, en muchos casos, de la propia conformación de la matriz energética de la región en la que se asientan los mineros (decisión generalmente motivada por los

costos de la energía en los diferentes territorios). A su vez, en virtud de los costos ya analizados, es menester destacar que

Mining cryptocurrency with the help of renewable energy not only will help the miners regarding their profitability but also has a significant impact on the environment as well, and as previously stated in our paper, electricity is the main source of energy for mining and to reduce the electricity consumption there is no way but to use renewable source of energy (...)

In the coming future, the profits from this type of cryptocurrency mining might encourage a broader spectrum of further investments in renewable assets, which not only helps miner to attain more profits but also helps the environment as using renewable energy will not cause any damage to our environment. [La minería de criptomonedas con la ayuda de energía renovable no solo ayudará a los mineros en cuanto a su rentabilidad, sino que también genera un impacto significativo en el medio ambiente y, como se indicó anteriormente en este documento, la electricidad es la principal fuente de energía para la minería y para reducir el consumo de electricidad no hay otra manera que el uso de fuentes renovables de energía (...)]

En el futuro próximo, los beneficios de este tipo de minería podrían fomentar un espectro más amplio de nuevas inversiones en activos renovables, que no solo ayuda a los mineros a obtener más beneficios, sino que también ayuda al medio ambiente, ya que el uso de energías renovables no causará ningún daño a nuestro medio ambiente.] (Gundaboina, L., Badotra, S., Bhatia, T. K., Sharma, K., Mehmood, G. Fayaz, M. *et al.*, 2022)

En virtud de ello, existen diversos proyectos e iniciativas dentro de la comunidad *Bitcoin* en miras de intensificar el uso de energías renovables con el objeto de lograr la sostenibilidad de la red y reducir los costos asociados a la generación de energía. A continuación, se detallan las iniciativas más resonantes.

Crypto Climate Accord

Lanzado en el 2021 e inspirado en el Acuerdo de París, el *Crypto Climate Accord* (“CCA”) representa una iniciativa del sector privado cuyo objetivo es la descarbonización de la industria Cripto y *Blockchain*. Al respecto, el CCA cuenta con más de 200 empresas e individuos que actúan como colaboradores involucrándose con el asesoramiento, desarrollo e implementación de soluciones en relación al CCA (el CCA también cuenta con la colaboración de los *Climate Champions* de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). Asimismo, el CCA cuenta con más de 100 signatarios que, además de su rol como colaboradores, asumieron de manera pública la obligación de alcanzar la neutralidad de carbono en relación con sus operaciones y consumo de energía eléctrica derivadas de las Cripto. Del mismo modo, los signatarios deben reportar sus progresos en cuanto al cumplimiento de sus compromisos (Crypto Climate Accord, s.f.a.; Crypto Climate Accord, s.f.b; Crypto Climate Accord, s.f.c.). Puntualmente,

The Crypto Climate Accord’s overall objective is to decarbonize the global crypto industry by prioritizing climate stewardship and supporting the entire crypto industry’s transition to net-zero greenhouse gas emissions by 2040. The Accord has two specific interim objectives:

1. Achieve net-zero emissions from electricity consumption for CCA Signatories by 2030.
2. Develop standards, tools, and technologies with CCA Supporters to accelerate the adoption of and verify progress toward 100% renewably-powered blockchains by the 2025 UNFCCC COP30 conference.

[El objetivo general del Crypto Climate Accord es descarbonizar la industria cripto global priorizando la gestión climática y apoyando la transición de toda la industria cripto a cero emisiones de gases de efecto invernadero para 2040. El Acuerdo tiene dos objetivos provisionales específicos:

1. Lograr emisiones netas igual a cero derivadas del consumo de electricidad de los Signatarios del CCA para el 2030.
2. Desarrollar estándares, herramientas y tecnologías con los colaboradores del CCA para acelerar la adopción y verificar el progreso hacia *Blockchains* 100% renovables para la conferencia COP30 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2025.] (Crypto Climate Accord, s.f.a.)

A su vez, el acuerdo gira en torno a los siguientes principios: (i) construir sobre y basarse en el progreso ya existente (el sector eléctrico se encuentra en un proceso de descarbonización en tanto las energías renovables se han vuelto competitivas en términos de costos); (ii) reconocer el trabajo significativo que aún resta realizar (tener en cuenta la brecha entre la situación actual y lo que se busca lograr); (iii) moverse velozmente (aprovechar la agilidad e innovación tecnológica que posee Cripto para lograr la rápida descarbonización por parte de una industria, situación que el mundo aún no ha visto); (iv) el hecho de ser una tecnología de código abierto y descentralizada puede acelerar el progreso; (v) voluntario y orientado a los mercados y a la creación de valor agregado y (vi) guiado por la comunidad y colaborativo, carente de una autoridad central (Crypto Climate Accord, s.f.a.).

La iniciativa fue lanzada en conjunto por Energy Web, Rocky Mountain Institute (“RMI”) y Alliance for Innovative Regulation (“ARI”). Al respecto, Energy Web es un proyecto co-creado por el RMI, Grid Singularity (compañía desarrolladora de tecnologías *Blockchain*) y un grupo de 10 compañías (Shell, Tokio Electric, Semptra, Equinor, Centrica, Stedin, TWL, Singapore Power, Elia Group y Engie) con el objeto de aplicar tecnología *Blockchain* al sector energético de manera de reducir la complejidad y costos que implica la coordinación de sus actores, logrando cohesión en miras a lograr la descarbonización de dicho sector (Alliance for Innovative Regulation, s.f., Crypto Climate Accord, s.f.a; Crypto Climate Accord, s.f.c.; Energy Web, s.f.; Rocky Mountain Institute, s.f.).

Por otro lado, el RMI es una organización sin fines de lucro, independiente y apartidaria que, desde su creación en 1982, se dedica a la descarbonización de los sistemas de energía mediante un enfoque basado en los mercados y, luego del Acuerdo de París, con el objetivo de lograr la meta de temperatura del 1,5°C. Su labor en miras a combatir la crisis climática es realizada en conjunto con las comunidades, organizaciones, reguladores y sector privado. Respecto al ARI, se trata de una organización sin fines de lucro cuyo trabajo redundante en la inclusión financiera mediante el diálogo entre regulación, finanzas, tecnología y la sociedad amparándose en el uso de nuevas tecnologías e innovación (Alliance for Innovative Regulation, s.f., Rocky Mountain Institute, s.f.).

Bitcoin Clean Energy Initiative

Como su nombre lo indica, Bitcoin Clean Energy Initiative (“BCEI”) es una iniciativa fundada por Block Inc. con el objetivo de aportar conocimiento y colaborar en el desarrollo de soluciones innovadoras para la industria Cripto mediante la intersección del uso de energías renovables y la minería de *Bitcoin*. A través de la publicación de su investigación denominada “*Bitcoin is Key to an Abundant, Clean Energy Future*”, BCEI sostiene que *Bitcoin* posee la característica de ser un comprador de energía de última instancia. En función de ello, los escollos que pudiese suponer la estacionalidad y/o variabilidad de la generación de energía con fuentes eólicas y/o solares pueden ser sorteados mediante la instalación de *miners*. A modo de ejemplo, la demanda de energía no siempre se corresponde con la disponibilidad del recurso, ya que, la captación de energía a partir del sol sucede durante el día y no siempre la demanda se alinea con dicha producción, generando en muchos casos la pérdida de energía (Bitcoin Clean Energy Initiative, 2021).

Al respecto, sostiene que, si bien dichas variaciones pueden ser salvadas con la disposición de baterías que almacenen energía para luego utilizarla en función de la demanda, el establecimiento de estos proyectos renovables se vería mayormente beneficiado con la incorporación de *miners* en lugar de disponer -únicamente- unidades de generación y almacenamiento (Bitcoin Clean Energy Initiative, 2021). Puntualmente,

By combining miners with renewables + storage projects, we believe it could:

1. Improve the returns for project investors and developers, moving more solar and wind projects into profitable territory.
2. Allow for the construction of solar and wind projects even before lengthy grid interconnection studies are completed (as bitcoin miners can offtake the energy until selling to the grid becomes possible).
3. Provide the grid with readily available “excess” energy for increasingly common black swan events like excessively hot or cold days when demand spikes

[Combinar *miners* con proyectos de renovables + almacenamiento, creemos que podría:

1. Mejorar los rendimientos de los inversores y desarrolladores de proyectos, permitiendo que más proyectos solares y eólicos se vuelvan rentables.
2. Permitir la construcción de proyectos de energía solar y eólica, incluso antes de que se completen largos estudios de interconexión de la red (como los mineros bitcoin pueden consumir la energía hasta que la venta a la red se hace posible).
3. Proporcionar a la red eléctrica energía “excedente” disponible para eventos de cisnes negros cada vez más comunes como días excesivamente calurosos o fríos donde la demanda aumenta.] (Bitcoin Clean Energy Initiative, 2021)

Cabe destacar que, en línea con la investigación realizada por BCEI, Block Inc. en conjunto con Tesla y Blockstream se encuentra desarrollando un centro de minería de *Bitcoin* alimentado exclusivamente por energía solar y baterías (Sigalos, M., 2022, 08 de abril).

Certificados de Energía Renovable

Si bien no se circunscriben exclusivamente a la industria Cripto, los Certificados de Energía Renovable (“RECs”, por sus siglas en inglés) son un instrumento financiero cuya finalidad es otorgar la propiedad de los derechos sociales y ambientales de un proyecto de energías renovables a su titular. En este sentido, los RECs son un tipo de Certificado de Atribución de Energía que representan los derechos correspondientes a 1 MWh de energía generada de fuentes renovables. De este modo, mediante su adquisición, su tenedor puede alegar y acreditar que la electricidad consumida proviene de fuentes renovables, su colaboración en el fomento de estas tecnologías y, a su vez, la reducción de emisión de gases de efecto invernadero (Carbon Neutral +, 2022; The International REC Standard. s.f.; U.S. Environmental Protection Agency, s.f.).

En cuanto a su funcionamiento, toda vez que no puede determinarse el origen de la energía que se consume efectivamente de la red (la red se encuentra compuesta por energía proveniente de diversas fuentes no renovables y renovables), los RECs son emitidos en relación con un proyecto de energía renovable previamente registrado. En este sentido, se evalúa su capacidad de generación y, en consecuencia, se emiten RECs representativos de 1 MWh los cuales, posteriormente, son adquiridos por los interesados. Con ello, tras ser verificados por la entidad correspondiente, los tenedores pueden realizar declaraciones en torno a la sostenibilidad de sus fuentes de generación y consumo eléctrico. (Carbon Neutral +, 2022; The International REC Standard. s.f.; U.S. Environmental Protection Agency, s.f.).

Seguidamente, se exponen iniciativas que se benefician y utilizan este instrumento en miras a la lograr la sostenibilidad de *Bitcoin*.

Sustainable Bitcoin Protocol. El Sustainable Bitcoin Protocol (“SBP”) representa una novedosa propuesta en miras a la sostenibilidad de *Bitcoin* y la reducción de su huella de carbono. En este sentido, el SBP realiza la creación de un *token* denominado Sustainable Bitcoin Certificate (“SBC”) el cual supone un activo intercambiable cuya funcionalidad es garantizar que el minado del *Bitcoin* al cual se encuentra asociado fue realizado de manera sostenible. Al respecto, el protocolo SBP realiza una verificación del minado del *Bitcoin* por parte de los mineros comprobando que este se haya realizado de alguna de las siguientes maneras: (i) uso de energías renovables (ii) adquisición de

RECs, por sus siglas en inglés) y (iii) uso de tecnologías de mitigación y/o absorción de gases de venteo²¹(Sustainable Bitcoin Protocol, s.f.).

Al respecto, una vez realizada la verificación por parte de un tercero imparcial, los mineros reciben SBC en función de los *Bitcoin* minados. Una vez los mineros se hacen con los SBCs, estos pueden ser adquiridos por parte de inversores interesados permitiendo que estos adquieran exposición a *Bitcoin* de manera de diversificar su portafolio de inversión. A su vez, la verificación realizada por SBP garantiza la sostenibilidad del *Bitcoin* minado y permite que los inversores puedan acceder a activos que de otra manera no hubiesen podido lograrlo, ya que, las consideraciones en torno al consumo energético de *Bitcoin* reducen su atractivo para inversores interesados en inversiones sostenibles y/o con criterios Ambientales, Sociales y de Gobernanza -mejor conocido como “ESG”, por sus siglas en inglés- (Sustainable Bitcoin Protocol, s.f.).

En otras palabras,

Given the changing macro landscape that is challenging the traditional asset allocation framework, many institutional investors are adding a small percentage of Bitcoin to the asset allocation of their diversified portfolio, as Bitcoin adds volatility but also higher risk-adjusted returns. In 2021, 16% of financial advisors had allocated their clients to crypto. An additional 52% of financial advisors said they will “probably” or “definitely” allocate in 2022. A growing percentage of ESG mandated institutional investors cannot take advantage of this diversification due to the sustainability concerns of BTC. As of fall 2022, the primary vehicle for bitcoin holdings among financial institutions is through an ETF/ETP or Trust. In order for institutional grade managers to allocate Bitcoin, ESG criteria is a strong requirement, and SBP allows investors to hold BTC responsibly. [Dado el cambiante panorama macro que está desafiando el marco tradicional de asignación de activos, muchos inversores institucionales están agregando un pequeño porcentaje de Bitcoin a los activos de su cartera diversificada, ya que Bitcoin agrega volatilidad, pero también mayores rendimientos ajustados por riesgo. En 2021, el 16% de los asesores financieros había asignado a sus clientes a cripto. Un 52% adicional de los asesores financieros dijeron que “probablemente” o “definitivamente” asignarán en 2022. Un porcentaje creciente de inversores institucionales con mandato ESG no puede aprovechar esta diversificación debido a las preocupaciones de sostenibilidad de BTC. A partir del otoño de 2022, el vehículo principal para las tenencias de bitcoin entre las instituciones financieras es a través de un ETF/ ETP o Fondo. Para que los portafolios institucionales puedan tomar posiciones en Bitcoin, los criterios ESG son un requisito fuerte, y SBP permite a los inversores tener BTC de manera responsable.] (Sustainable Bitcoin Protocol, s.f.)

Por último, el SBP contempla un mecanismo de creación de SBC en relación con los *Bitcoin* ya minados y emitidos. En este sentido, los SBCs atinente a los *Bitcoins* ya en circulación se emiten como contrapartida de la adquisición de RECs en el mercado. De este modo, mediante este mecanismo se incentiva y se traslada capital al mercado de las energías renovables logrando fomentar el desarrollo de estas tecnologías. En línea con ello, se estima que se requieren más de USD30 mil millones en nuevos RECs para la creación de SBCs que representen la totalidad de la energía utilizada para minar el circulante actual de *Bitcoins* -alrededor del triple del volumen del mercado norteamericano de RECs- (Sustainable Bitcoin Protocol, s.f.).

Green Bitcoin Project. El Green Bitcoin Project (“GBP”) es una iniciativa que cuenta con el apoyo de Binance (*Exchange* con mayor volumen de operaciones) y The International REC Standard (entidad emisora de RECs) que, al igual que SBP, utiliza los RECs a efectos de otorgar a los tenedores de *Bitcoin* certificación de que sus Cripto provienen de fuentes renovables (Green Bitcoin Project, s.f.).

²¹ Se profundizará sobre la absorción de gases de venteo más adelante.

A diferencia de SBP, en el marco del GBP un inversor interesado en adquirir *Bitcoin* los compra a través de GBP a un valor mayor al de la cotización bursátil. En este sentido, la diferencia de valores (comprarlo “más caro”) se debe a que las sumas adicionales que el inversor abona son utilizadas para comprar RECs pertenecientes al proyecto renovable que el inversor elija. A su vez, estos RECs se calculan en función de la cantidad de *Bitcoins* que se deseen adquirir y, en consecuencia, son determinados en función de la energía eléctrica utilizada para minar esos *Bitcoin*. En función de ello, el consumo energético es compensado y el tenedor puede acreditar que la energía utilizada para minar su *Bitcoin* provino enteramente de fuentes renovables (Green Bitcoin Project, s.f.).

Aprovechamiento de Excedente Energético

Tal como se refirió anteriormente, *Bitcoin* tiene la capacidad de ser considerado un consumidor de energía de última instancia. De este modo, posee un potencial diferencial en tanto posee la facultad de aprovechar energía que, de otra manera, se vería “desperdiciada”. Por un lado, encontramos el fenómeno del venteo de gas (usual en la industria del petróleo, usualmente conocido por su nombre en inglés “*Flaring*”) y, por el otro, el excedente de energía fruto de los proyectos de energía renovable y la discrepancia entre demanda de energía y generación. Este excedente provoca que el generador de energía se vea en la obligación de reducir el suministro de energía (en los casos en que no cuente con baterías de almacenamiento, por ejemplo) debido al desequilibrio entre la oferta y la demanda (este fenómeno de reducción de la generación y/o pérdida de energía se conoce como “*Curtailment*”) (Bitcoin Clean Energy Initiative, 2021; Shan, R. & Sun, Y., 2019).

Flaring. El *Flaring* refiere a la quema del gas obtenido en la producción de petróleo. Al respecto, el gas es un subproducto de la industria petrolera el cual, en aquellos casos en que no resulte económicamente beneficioso su tratamiento (entubamiento, licuado y/o conversión a energía eléctrica para el aprovechamiento de la sociedad), es quemado con objeto de deshacerse de este. A su vez, existe también el fenómeno del *Cold Flaring*, siendo aquel donde el gas es liberado sin ser quemado. No obstante, este último reviste mayor peligrosidad y nocividad para el ambiente y el hombre (Innio, s.f.; Snytnikov, P. & Potemkin, D., 2022; Sustainable Bitcoin Protocol, s.f.; The World Bank 2022a; The World Bank, 2022b). A efectos de ilustrar la magnitud de este fenómeno,

It is estimated that global flaring decreased from 150 billion cubic meters (bcm) in 2019 to 142 bcm in 2020; this volume of flared gas is enough to power subSaharan Africa. If this amount of gas was used for power generation, it could provide about 750 billion kWh of electricity-more than the African continent’s current annual electricity consumption. [Se estima que la quema global disminuyó de 150 mil millones de metros cúbicos (bcm) en 2019 a 142 bcm en 2020; este volumen de gas quemado es suficiente para abastecer el África subsahariana. Si esta cantidad de gas se utilizara para la generación de energía eléctrica, podría proporcionar alrededor de 750 mil millones de kWh de electricidad, más que el consumo anual actual de electricidad del continente africano.] (The World Bank, 2022a)

En vistas de ello, Crusoe Energy es una empresa norteamericana cuya actividad radica en brindar soluciones al *Flaring*. Aprovechando el potencial de generación de energía de dicho fenómeno, Crusoe realiza instalaciones de centros de procesamiento de datos y/o minado *in situ* los cuales funcionan a partir de la energía generada por el gas que, de otra manera, hubiese sido quemado. Este proceso, denominado *Digital Flare Mitigation* genera sinergias permitiendo: (i) monetización de recursos que hubiesen sido desperdiciados y (ii) reducción de la contaminación (permitiendo la disminución de *Flaring* y beneficiando a la industria petrolera en el cumplimiento de las metas de reducción). En el 2022, Crusoe logró reunir financiamiento proveniente de firmas de *venture capital* por un total de USD505 millones (Benson, J., 2022, 21 de abril; Crusoe Energy, 2022a; Crusoe Energy, 2022b; Innio, s.f.; Snytnikov, P. & Potemkin, D., 2022; The World Bank, 2022a).

Curtailment. Tal como se mencionó precedentemente, el *Curtailment* refiere a la reducción del suministro y/o generación de energía en virtud de la discrepancia entre la disponibilidad y/u oferta y la demanda de energía. Este fenómeno es una característica de las fuentes de energía renovable

“estacionales” en virtud de la característica intrínseca del recurso (el comportamiento del sol y del viento no siempre se correlaciona con las necesidades energéticas). Este fenómeno supone una problemática a tener en consideración:

The capacity of solar and wind has increased rapidly in the last decade, but the problem of curtailment also rises due to the mismatch of intermittent generation and demand, transmission congestion, and many other reasons. In 2017, China has curtailed 7.3TWh solar generation and the Great Britain wasted 1.49TWh wind generation. Despite the argument that a proactive supply-shaping strategy, to curtail the renewable generation, is a cost-effective approach for the resource integration, the curtailment will reduce both the environmental and economic benefit from renewable power plants, lowering the return of public and private investors. [La capacidad de energía solar y eólica ha aumentado rápidamente en la última década, pero el problema del *Curtailment* también aumenta debido a la discrepancia entre la generación intermitente y la demanda, la congestión de la transmisión y muchas otras razones. En 2017, China el *Curtailment* de la generación solar fue de 7,3 TWh y Gran Bretaña ha desperdiciado la generación eólica de 1,49 TWh. A pesar del argumento de que una estrategia proactiva de modelado de la oferta para reducir la generación de energía de fuentes renovables es un enfoque rentable para la integración de los recursos, el *Curtailment* reducirá los beneficios ambientales y económicos de las plantas de energía renovable, reduciendo el rendimiento de los inversores públicos y privados.] (Shan, R. & Sun, Y., 2019)

Para dar respuesta a ello, la compañía Soluna efectúa la instalación de *miners* y centros de procesamiento de datos en plantas de generación de energía renovable. De este modo, los productores de energía encuentran un comprador de última instancia como *Bitcoin* el cual se abastece de la energía generada evitando, de esta manera, que el productor pierda energía y/o recurra al *Curtailment*.

Por otro lado, como ejemplo de la potencialidad que representa el aprovechamiento de la capacidad plena de generación, Shan, R. & Sun, Y. (2019) simularon los ingresos y costos que se pudiesen obtener si se minara con la energía que el *California Independent System Operator* debió recortar. Al respecto, los autores observaron que las ganancias netas de la minería de *Bitcoin* alimentada con la energía que fue objeto del *Curtailment* y, por consiguiente, en el periodo analizado (2018) no podría ser aprovechada en tanto no se producía, ascendía a un rango de entre USD5,1 y USD48,1 millones (dependiendo los *miners* utilizados). Además, notaron que el *Curtailment* se reducía aproximadamente en un 50,8%-79,9% (Shan, R. & Sun, Y., 2019).

Desafíos y Perspectivas

Tras su creación en 2008, la aceptación, implementación y adopción de *Bitcoin* por parte de la sociedad ha ido creciendo de manera exponencial coadyuvada por la sucesión de crisis financieras, escaladas inflacionarias y pérdida de confianza del público frente a las CeFi. Del mismo modo, así como aumentaban sus usuarios y defensores, comenzaron a plantearse desafíos o cuestionamientos a la Cripto. En este sentido, si bien se han destacado las amplias posibilidades y aplicaciones que presenta la red *Bitcoin* en el plano financiero y en relación con la sostenibilidad, en el presente apartado se analizarán los desafíos y críticas que *Bitcoin* debe enfrentar.

Consumo Energético

Como puede desprenderse del análisis realizado a lo largo del presente trabajo, la red de *Bitcoin* posee como característica intrínseca, en función de su mecanismo de *Proof of Work*, la necesidad de demandar energía de manera constante (en mayor o menor medida, dependiendo la estadística que se observe). Como contracara de ello, los inversores y la sociedad en su conjunto ha empezado a poner el foco no solo en la rentabilidad de los activos en los cuales invierte y/o conforma su portafolio, sino también en como estos se relacionan o se enmarcan en los factores ESG. En la actualidad, los activos y/o empresas que son consideradas contaminantes o irresponsables son mayormente cuestionadas y,

en muchos casos, provocan la fuga de capital que se asigna a inversiones a otros activos que se posicionen mejor en términos ESG.

Si bien las tendencias indican que *Bitcoin* reducirá su consumo energético como resultado de la implementación de *miners* más eficientes e, incluso, que la electricidad consumida provendrá principalmente de fuentes renovables (por razones económicas y de conciencia ambiental), el mecanismo de *Proof of Work* que sostiene la red es demandante en términos energéticos.

Asimismo, autores como de Vries, A. (2019) sostienen que la utilización de energías renovables no es suficiente para solucionar el problema de la sostenibilidad de *Bitcoin*. Al respecto, argumenta que, si bien podría utilizarse energía renovable para minar, los *miners* son específicamente diseñados para realizar dicha tarea por lo que, una vez salgan al mercado *miners* más avanzados y eficientes, los mineros se verán tentados y, de alguna manera, obligados a cambiar los más antiguos por los nuevos. Como consecuencia de ello, siendo que los *miners* tienen una tarea específica y no pueden ser utilizados para realizar otras funciones se generan enormes cantidades de basura electrónica y/o *e-waste* (de Vries, A., 2018; De Vries, A., 2019; de Vries, A., 2020).

Además,

It is important to note that even though price movements may lengthen or shorten the economic lifetime of a specific ASIC miner machine type (...), Bitcoin's e-waste generation would still continue even under a stable price because of continuous hardware efficiency improvements. The latter ensures that older hardware will inevitably be disposed on a regular basis. [Es importante tener en cuenta que a pesar de que los movimientos de precios pueden alargar o acortar la vida económica de un tipo específico de máquina minera ASIC (...), la generación de residuos electrónicos de Bitcoin continuaría incluso bajo un precio estable debido a las continuas mejoras en la eficiencia del hardware. Este último asegura que el hardware más antiguo se dispondrá inevitablemente de forma regular.] (de Vries, A., 2019)

Así las cosas, los desafíos en este plano pueden ser compensados con las potencialidades descritas a lo largo del presente en cuanto a la sostenibilidad y atribuciones de ser un consumidor de energía de última instancia permitiendo que *Bitcoin* sea atractivo para inversores ESG. A su vez, existen perspectivas en cuanto a un *Bitcoin* carbono neutral e, incluso, carbono negativo a través de la capitalización del *Flaring*. Sin perjuicio de ello, el sendero recorrido por *Ethereum* con *The Merge* y su transición al método *Proof of Stake* generan presión y demanda sobre *Bitcoin* en torno a modificar su mecanismo de validación (los defensores del mecanismo *Proof of Work* esgrimen fundamentalmente su superioridad en términos de seguridad frente al *Proof of Stake*, dichos factores exceden el objeto del presente).

Regulación

Al igual que el conjunto de las Cripto, *Bitcoin* no se encuentra regulada a nivel global y son pocos los países que han incorporado legislación atinente a estos activos. Del mismo modo, la calificación que reciben varía en cada Estado e, incluso, no existe previsibilidad al respecto. A modo de ejemplo, como se refirió en el cuerpo del presente trabajo, China albergaba gran parte del *hashrate* para luego prohibir la minería de *Bitcoin*. Asimismo, la carencia de una autoridad central que regule la moneda genera dualidad de criterios, seduciendo a inversores más disruptivos y ahuyentando a inversores más tradicionales. Sin embargo, la creciente adopción por parte de la sociedad y su divulgación provocaron el interés de los Estados en legislar la materia por razones de transparencia, tributación y financieras.

Dotar a *Bitcoin* de un marco regulatorio claro y transparente atraería mayor capital e inversores generando mayor adopción del activo. En línea con esto, las probabilidades de ser objeto de un marco regulatorio beneficioso y no punitivo que permita atraer inversores se vislumbra con mayor posibilidad de suceso mediante la implementación de tecnologías renovables y su acercamiento al

carácter de industria sostenible. Como pudo observarse en los distintos compromisos asumidos por los Estados en el marco de convenciones internacionales, la necesidad de regulación de fomento para el sector renovable deviene imperativa, razón por la cual *Bitcoin* podría beneficiarse de dichos factores y la regulación que se dicte en consecuencia. Por el contrario, volverse más contaminante y mantener su etiqueta de industria extremadamente demandante en términos energéticos podría ocasionar que se castigue más su tenencia y/o minado volviéndola menos atractiva para potenciales inversores.

Pérdida de Rentabilidad

La pérdida de rentabilidad de *Bitcoin* supone un gran escollo para la red. Al respecto, en virtud del fenómeno del *halving* la recompensa que reciben los mineros disminuye paulatinamente. A su vez, la relación entre la recompensa y el valor del *Bitcoin* supone una moneda de 2 caras. Por un lado, el aumento del valor de *Bitcoin* permitiría que el minero obtenga una mayor recompensa, pero, por el contrario, vuelve al activo más atractivo generando mayores incentivos para que otros individuos se conviertan en mineros y aumentando la competencia. Por otro lado, la pérdida de valor de *Bitcoin* desincentivaría la minería en tanto la recompensa es menor y la minería se vuelve menos redituable.

En este escenario, el uso de energías renovables o excedentes (*Flaring* y *Curtailment*) permite combatir la pérdida de rentabilidad en tanto abaratan los costos energéticos en la mayor medida de lo posible. Continuar minando con costos energéticos más elevados disminuiría aún más la rentabilidad (independientemente de la pérdida o aumento de valor del *Bitcoin*).

Volatilidad

Si bien no es una característica exclusiva de *Bitcoin*, las fluctuaciones y variaciones de su precio generan mayores temores en los inversores. A modo de ejemplo, en el año 2021 alcanzó valores en torno a los USD60.000 para, luego, comenzar el año 2023 por debajo de los USD20.000. En este sentido, su volatilidad coadyuvada con la falta de regulación y descentralización provocan desconfianza en los inversores y su rechazo a su implementación como mecanismo de pago.

Como respuesta a ello, la necesidad de volverse sostenible y permitir a mayores inversores acceder al activo deviene fundamental en tanto su volatilidad vista de manera individual puede provocar aversión mientras que, en el marco de la composición y estructuración de un portafolio, puede permitir la diversificación de activos y riesgo.

CONCLUSIONES

El mundo y la sociedad se encuentran sujetos a un cambio vertiginoso y constante. Con el devenir de los años, las mejoras tecnológicas en busca de mejorar la vida del hombre y su desarrollo suceden cada vez de manera más rápida. Las finanzas no fueron ajenas a este fenómeno, debiendo adaptarse a la aparición de un nuevo modelo: las finanzas descentralizadas. El surgimiento de las finanzas descentralizadas y, junto con ellas, las criptomonedas han traído consigo nuevas maneras de concebir el dinero, la relación entre los usuarios y las instituciones financieras en sí mismas. Motivadas por el descontento social, la falta de confianza de los usuarios y la pérdida de confianza de las instituciones, las criptomonedas se erigen sobre la noción fundamental de descentralización y, a partir de ella, la inexistencia de una autoridad central generando, de alguna manera, una autorregulación por parte de los usuarios.

No obstante, toda innovación y todo desarrollo debe ser concebido de una manera íntegra, propendiendo a su relación armónica con el ecosistema donde se constituye. En este sentido, el planeta se encuentra afrontando una crisis climática sin parangón. Adentrado el siglo pasado, la comunidad internacional comenzó a exteriorizar sus preocupaciones y cuestionar la concepción de desarrollo. Es en este punto donde la figura de la sostenibilidad asume un rol preponderante, constituyéndose como la característica determinante del desarrollo futuro. De este modo, el desarrollo debe ser sostenible y, en consecuencia, concebirse desde un punto de vista económico, ambiental y social, promulgando por la inclusión y el cuidado del ambiente.

En este marco, como toda novel invención, su aceptación y/o asimilación no siempre es unánime. Si bien debajo del paraguas de las finanzas descentralizadas sus defensores sostienen sus atributos en relación con la inclusión financiera, las criptomonedas han recibido críticas en torno a su vinculación con el ambiente. A mayor abundamiento, los requerimientos intensivos de energía eléctrica para su emisión y/o generación las han puesto en el centro de los cuestionamientos. Sin embargo, desde la aparición de *Bitcoin* en el 2008 y la implementación del mecanismo *Proof of Work*, se ha avanzado en gran medida en estos aspectos. Ejemplo de ello es *The Merge* realizado por Ethereum y su transición al mecanismo *Proof of Stake* con el objetivo de reducir su demanda energética.

Preliminarmente, la relación entre *Bitcoin* y su mecanismo *Proof of Work* con el cuidado ambiental y la sostenibilidad podría vislumbrarse antagónica. Sin embargo, el presente trabajo expone que ello no es así. En virtud de lo analizado, puede observarse el potencial existente entre la articulación de sostenibilidad y *Bitcoin*. Las energías renovables deben ocupar un rol más preponderante a nivel mundial y, tal como se analizó previamente, *Bitcoin* puede colaborar en el fomento de su expansión. A propósito de ello, los desarrolladores de proyectos de este tipo pueden beneficiarse de la rentabilidad de *Bitcoin*, ya sea de manera transitoria o permanente, agregando valor y aumentando su retorno esperado.

De manera recíproca, *Bitcoin* también extrae valor del uso de las energías renovables, permitiéndole tender hacia su constitución como una industria sostenible. Desde una perspectiva ambiental, las razones son obvias. Ante la reticencia al cambio de mecanismo de validación en virtud de argumentos varios (dificultad de implementación, seguridad, etc.), su demanda energética y el uso de electricidad debe ser amigable con el ambiente y, en este aspecto, la alternativa de las energías renovables asume un rol protagónico, empero, su consumo energético no debe ser ignorado, debiendo propender hacia *miners* dotados de mayor eficiencia y menor consumo energético. Además, la capacidad de *Bitcoin* de oficiar como usuario de última instancia permite a esta tecnología hacer uso de energía que, de otra manera, sería desperdiciada (*Curtailment* y *Flaring*). Los objetivos en torno a su constitución como una industria sostenible y la consecución de la neutralidad de carbono ya han sido trazados y, como se desarrolló a lo largo del presente trabajo, son posibles. Asimismo, su transformación en una industria sostenible y el logro futuro de la neutralidad permite proponer un objetivo aún más ambicioso en virtud de las tecnologías existentes y en desarrollo: la conversión de *Bitcoin* en carbono negativo.

Desde un punto de vista económico-financiero, *Bitcoin* también es capaz de beneficiarse. Conforme se exhibió a lo largo de la exposición, la energía de fuentes renovables se ha vuelto más competitiva en términos económicos siendo una de las alternativas más baratas. A su vez, los diversos estudios en torno a sus costos futuros indican que esta tendencia continuará, convirtiéndose en la fuente de energía más económica en el futuro. En consecuencia, la reducción de costos asociados a la minería (siendo la electricidad el principal junto con la maquinaria específica) acarrea el aumento de su rendimiento. De igual modo, utilizar fuentes de energía limpia permite su conversión a una industria sostenible, situación que también posee implicancias positivas en el plano económico, ya que, supone la apertura a nuevos mercados y la atracción de capital inversor que hoy en día, en virtud de diversos factores entre los que se encuentra ESG, no interacciona con *Bitcoin*.

Finalmente, puede sostenerse que la hipótesis ha sido comprobada en tanto la conversión de Bitcoin a una industria sostenible podría acarrear enormes beneficios en el plano económico-financiero pudiendo detectarse, incluso, sinergia entre la sostenibilidad, las energías renovables y Bitcoin. En línea con lo expuesto a lo largo del presente trabajo, queda mucho camino por recorrer y son muchos los desafíos que hay por delante. El futuro es incierto pero el sendero luce, cuanto menos, apasionante.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo de Paris. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 12 de diciembre de 2015. Recuperado de: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf
- Alliance for Innovative Regulation (s.f.). Who We Are. Recuperado de: <https://regulationinnovation.org/who-we-are/>
- Ammous, S. (2018). *El Patrón Bitcoin: la alternativa descentralizada a los bancos centrales*. Deusto.
- Back, A. (2002). Hashcash – A Denial of Service Counter – Measure. Reuperado de: <http://www.hashcash.org/papers/hashcash.pdf>
- Bayer, D., Haber, S. & Stornetta, W.S. (1992). Improving the efficiency and reliability of digital time- stamping. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-9323-8_24
- Benson, J. (2022, 21 de abril). Bitcoin Firm Crusoe Energy Raises \$505 Million to Grow Flare-Gas Mining Business. *Decrypt.com*. Recuperado de: <https://decrypt.co/98424/bitcoin-firm-crusoe-energy-raises-505-million-grow-flare-gas-mining-business>
- Bevand, M. (2017). Electricity consumption of Bitcoin: a market-based and technical analysis. Recuperado de: <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/#economics>
- Bitcoin Clean Energy Initiative (2021). Bitcoin is Key to an Abundant, Clean Energy Future. Square. Recuperado de: <https://bitcoin.energy/>
- Bitcoin Mining Council (s.f.). <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2021a). Global Bitcoin Mining Data Review Q2 2021. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2021b). Global Bitcoin Mining Data Review Q3 2021. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2021c). Global Bitcoin Mining Data Review Q4 2021. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2022a). Global Bitcoin Mining Data Review Q1 2022. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2022b). Global Bitcoin Mining Data Review Q2 2022. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2022c). Global Bitcoin Mining Data Review Q3 2022. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>
- Bitcoin Mining Council (2022d). Global Bitcoin Mining Data Review Q4 2022. Recuperado de: <https://bitcoinminingcouncil.com/>

- Buterin, V. (2014). Ethereum Whitepaper. Recuperado de: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.a). Bitcoin Mining Map. Recuperado de: https://ccaf.io/cbeci/mining_map
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.b). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, Index. Recuperado de: <https://ccaf.io/cbeci/index>
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.c). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, Methodology. Recuperado de: <https://ccaf.io/cbeci/index/methodology>
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.d), FAQ. Recuperado de: <https://ccaf.io/cbeci/faq>
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.e). Greenhouse Gas Emissions, Index. Recuperado de: <https://ccaf.io/cbeci/ghg/index>
- Cambridge Centre for Alternative Finance (s.f.f). Greenhouse Gas Emissions, Methodology. Recuperado de: <https://ccaf.io/cbeci/ghg/methodology>
- Carbon Neutral + (2022). Certificados de Energía Renovable: qué son y para qué sirven. Recuperado de: <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-y-para-que-sirven-los-certificados-de-energia-renovable/>
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (2012). El futuro que queremos. Recuperado de: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N12/461/67/pdf/N1246167.pdf?OpenElement>
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://undocs.org/es/A/RES/70/1>
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano (1972). Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano. Recuperado de <https://undocs.org/es/A/CONF.48/14/Rev.1>
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992a). Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992b). Programa 21 [Agenda 21]. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21sptoc.htm>
- Comisión sobre el Desarrollo Sostenible. (2001). Informe sobre el noveno período de sesiones (Nueva York, 16 a 27 de abril de 2001). Recuperado de [http://daccess-ods.un.org/access.nsf/Get?OpenAgent&DS=E/2001/29%20\(SUPP\)&Lang=S](http://daccess-ods.un.org/access.nsf/Get?OpenAgent&DS=E/2001/29%20(SUPP)&Lang=S)
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987). Nuestro futuro común. Recuperado de <https://undocs.org/es/A/42/427>

- Crusoe Energy (s.f.a). Crusoe Energy. Recuperado de: <https://www.crusoeenergy.com/>
- Crusoe Energy (s.f.b.). Digital Flare Mitigation. Recuperado de: <https://www.crusoeenergy.com/digital-flare-mitigation>
- Crypto Carbon Ratings Institute (2022). The Merge: Implications on the Environmental Sustainability of Ethereum. Recuperado de: <https://carbon-ratings.com/>
- Crypto Climate Accord (s.f.a). Crypto Climate Accord. Recuperado de: <https://cryptoclimate.org/accord/>
- Crypto Climate Accord (s.f.b.). Supporters & Signatories. Recuperado de: <https://cryptoclimate.org/supporters/>
- Crypto Climate Accord (s.f.c.). What is the Crypto Climate Accord? Recuperado de: <https://cryptoclimate.org/>
- de Vries, A. (2018). Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*, 2 (5), 801 – 805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>
- de Vries, A. (2019). Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem. *Joule*, 3(4), p893–898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.007>
- de Vries, A. (2020). Bitcoin's energy consumption is underestimated: A market dynamics approach. *Energy Research & Social Science*, 70, 101721, ISSN 2214-6296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101721>.
- de Vries A, Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2021). Revisiting Bitcoin's carbon footprint. *Joule*, 6 (3), p498–502. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>
- Digiconomist Bitcoin Energy Consumption Index. Recuperado de: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Energy Web (s.f.). Why we exist. Recuperado de: <https://www.energyweb.org/why-we-exist/>
- Ethereum Foundation (s.f.a). How The Merge impacted ETH supply. Recuperado de: <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/issuance/>
- Ethereum Foundation (s.f.b). PROOF – OF – STAKE (POS). Recuperado de: <https://ethereum.org/en/developers/docs/consensus-mechanisms/pos/>
- Ethereum Foundation (s.f.c). The Merge. Recuperado de: <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/>
- Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. *Joule*, 4 (9), p.1843-1846. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013>
- Green Bitcoin Project (s.f.). Green Bitcoin Project. Recuperado de: <https://greenbitcoinproject.com/>

- Gundaboina, L., Badotra, S., Bhatia, T. K., Sharma, K., Mehmood, G. Fayaz, M. *et al.* (2022). Mining Cryptocurrency-Based Security Using Renewable Energy as Source. *Security and Communication Networks*, vol. 2022. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4808703>
- Haber, S. & Stornetta, W. S. (1991). How to stamp a digital document. *Journal of Cryptology*, 3: 99-11. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00196791>
- Innio (s.f). Using Flared Gas to Mine Cryptocurrency. *Innio.com*. Recuperado de: <https://www.innio.com/en/news-media/magazine/article/using-mined-gas-to-mine-cryptocurrency>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). Global Warming of 1.5°C. Cambridge University Press. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- International Energy Agency (2010). World Energy Outlook 2010. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010>
- International Energy Agency (2022). World Energy Outlook 2022. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- International Energy Agency (s.f.a). Mission. Recuperado de: <https://www.iea.org/about/mission>
- International Energy Agency (s.f.b). World Energy Outlook. Recuperado de: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>
- International Renewable Energy Agency (2023a). Renewable Capacity Highlights. Recuperado de: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_-_RE_Capacity_Highlights_2023.pdf?rev=a4a69a28b3a444f1b4ff02f6a6664bb4&hash=553011612FECB16B409DA315652AB9ED
- International Renewable Energy Agency (2023b). Renewable capacity statistics. Recuperado de: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- International Renewable Energy Agency (s.f.a). Bioenergy & biofuels. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels>
- International Renewable Energy Agency (s.f.b). Geothermal energy. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Geothermal-energy>
- International Renewable Energy Agency (s.f.c). Hydropower. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydropower>

- International Renewable Energy Agency (s.f.d). Ocean. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Ocean-energy>
- International Renewable Energy Agency (s.f.e). Solar energy. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>
- International Renewable Energy Agency (s.f.f). Wind energy. Recuperado de: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República Argentina (s.f.). ¿Qué es la neutralidad de carbono? Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/contenidos/neutralidad-de-carbono>
- Ministerio de Economía de la Nación de la República Argentina (s.f.). ¿Qué son las energías renovables? Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/que-son-las-energias-renovables>
- Naciones Unidas (s.f.). ¿Qué es la energía renovable? Recuperado de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- Nakamoto, S. (2008), Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Recuperado de: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- National Institute of Standards and Technology. (2015). Secure Hash Standard (SHS) (FIPS PUB 180-4). U.S. Department of Commerce. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.180-4>
- Organización de las Naciones Unidas (2002). Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://undocs.org/es/A/CONF.199/20>
- Organización de las Naciones Unidas (s.f.a). Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, 25 a 27 de septiembre de 2015, Nueva York. Recuperado de: <https://www.un.org/es/conferences/environment/newyork2015>
- Organización de las Naciones Unidas (s.f.b). El Acuerdo de París. Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Organización de las Naciones Unidas (s.f.c). Todo sobre las CDN. Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/all-about-ndcs>
- Oxford Martin School (s.f.). About us. Recuperado de: <https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/about/>
- Parlamento Europeo (2019). What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050? Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/priorities/climate-change/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>
- Parlamento Europeo (2022). Green Deal: key to a climate-neutral and sustainable EU. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/priorities/climate-change/20200618STO81513/green-deal-key-to-a-climate-neutral-and-sustainable-eu>

- Qin, K., Zhou, L., Afonin, Y., Lazzaretti, L., & Gervais, A. (2021). CeFi vs. DeFi -- Comparing Centralized to Decentralized Finance. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08157>
- Rocky Mountain Institute (s.f.). About. Recuperado de: <https://rmi.org/about/>
- Rosenbaum, J. & Pearl, J. (2009). Investment Banking: Valuation, Leveraged Buyouts, and Mergers & Acquisitions. New Jersey: Wiley Finance.
- Snytnikov, P. & Potemkin, D. (2022). Flare gas monetization and greener hydrogen production via combination with cryptocurrency mining and carbon dioxide capture. *iScience*, 25(2),103769. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103769>
- Shan, R. & Sun, Y. (2019). Bitcoin Mining to Reduce the Renewable Curtailment: A Case Study of Caiso. doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3436872>
- Sigalos, M. (2022, 08 de abril). Tesla, Block and Blockstream team up to mine bitcoin off solar power in Texas. *Cnbc.com*. Recuperado de: <https://www.cnbc.com/2022/04/08/tesla-block-blockstream-to-mine-bitcoin-off-solar-power-in-texas.html>
- Sustainable Bitcoin Protocol (s.f.). Whitepaper. Recuperado de: <https://www.sustainablebtc.org/news/sbp-white-paper>
- The International REC Standard (s.f.). An introduction to REC schemes. Recuperado de: <https://www.irecstandard.org/what-are-recs/>
- The World Bank (2022a). Flaring Management Guidance for the Oil and Gas Industry. Recuperado de: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/35178b35bcfb9bfd144079f84512ab7d-0400072022/flaring-management-guidance-for-the-oil-and-gas-industry>
- The World Bank (2022b). Global Gas Flaring Tracker Report. *Global Gas Flaring Reduction Partnership*. Recuperado de: <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/publication/2022-global-gas-flaring-tracker-report>
- U.S. Energy Information Administration (s.f.a.). International Energy Statistics. Recuperado de: <https://www.eia.gov/international/data/world>
- U.S. Energy Information Administration (s.f.b.). Mission and Overview. Recuperado de: https://www.eia.gov/about/mission_overview.php
- U.S. Energy Information Administration (2022). Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022. Recuperado de: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/electricity_generation.php
- U.S. Environmental Protection Agency (s.f.). Renewable Energy Certificates (RECs). Recuperado de: <https://www.epa.gov/green-power-markets/renewable-energy-certificates-recs>

- Way R., Ives M. C., Mealy P. & Farmer J.D. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Joule*, 6(9), 2057-2082. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>
- White House Office of Science and Technology Policy (2022), Climate and Energy Implications of Crypto-Assets in the United States. Recuperado de: <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/09/08/fact-sheet-climate-and-energy-implications-of-crypto-assets-in-the-united-states/>