

IMPACTO AMBIENTAL DE LAS Criptomonedas

Trabajo final de grado

Ingeniería Agroambiental y del paisaje

Autor: Marc Subirats García

Tutor: Oscar Alfranca Burriel

10/6/22

RESUMEN

La creciente popularidad de las criptomonedas me ha hecho preguntarme si de verdad pueden ser una alternativa a las monedas convencionales desde una perspectiva ambiental. Este trabajo da contexto sobre las criptomonedas y las tecnologías usadas para crearlas y comerciarlas para posteriormente entrar en una revisión de la literatura dedicada al impacto ambiental y la sostenibilidad energética producido por estas. Los resultados son mostrados como consumo de energía eléctrica y emisiones de CO₂, este consumo de energía viene dado mayormente por la operación de minar. Determinamos que son un peligro para el desarrollo sostenible, que de seguir creciendo podrían convertirse en una gran amenaza para el medioambiente.

Palabra clave: Criptomonedas, bitcoin, minería, impacto ambiental, energía eléctrica

RESUM

La creixent popularitat de les criptomonedes m'ha fet preguntar-me si de veritat poden ser una alternativa a les monedes convencionals des d'una perspectiva ambiental. Aquest treball dona context sobre les criptomonedes i les tecnologies fetes servir per crear-les i comerciar-les per posteriorment fer en una revisió de la literatura dedicada a l'impacte ambiental i la sostenibilitat energètica produït per aquestes. Els resultats són mostrats com consum d'energia elèctrica i emissions de CO₂, aquest consum ve donat majorment per l'operació de minar. Determinem que són un perill per al desenvolupament sostenible, que de continuar creixent podrien arribar a convertir-se en una gran amenaça per al medi ambient.

Paraula clau: Criptomonedes, bitcoin, mineria, impacte ambiental, energia elèctrica

ABSTRACT

The growing popularity of cryptocurrencies has made me wonder if they can really be an alternative to conventional currencies from an environmental perspective. This work gives context to cryptocurrencies and the technologies used to create and trade them to later enter into a review of the literature dedicated to the environmental impact and energy sustainability produced by them. The results are shown as electricity consumption and CO₂ emissions, this energy consumption is mostly given by the mining operation. We determine that they are a danger to sustainable development, if they continue to grow, could become a major threat to the environment.

Keyword: Cryptocurrencies, bitcoin, mining, environmental impact, electric power

Índice

Índice de figuras	5
Índice de tablas	6
Símbolos y acrónimos	7
Prefacio.....	8
1. Introducción.....	9
2. Objetivos	10
3. Material y métodos.....	11
4. Introducción general al tema	12
4.1 Definición	12
4.2 Origen.....	13
4.3 Minería y blockchain	14
4.4 Proof of Work	16
4.5 Características	17
4.6 Criptomonedas más conocidas	19
5. Resultados	20
5.1 Consumo de energía eléctrica y huella de carbono	20
5.1.1 Hardware y hash rate	20
5.1.2 Comparación con otras tecnologías	33
5.1.3 Herramientas de cálculo diario	38
5.1.4 Comparación de los resultados	41
5.2 Energías empleadas.....	43
5.3 Otros impactos ambientales	46
5.4 Dinero convencional.....	50
6. Discusión	52
7. Conclusiones	53
8. Bibliografía	55

Índice de figuras

Figura 1 Blockchain	15
Figura 2 Precio del bitcoin.	18
Figura 3 Tabla de las principales criptomonedas	19
Figura 4 Evolución del hash rate en la red bitcoin	21
Figura 5 Hash rate, potencia, eficiencia y coste de diferentes tipos de dispositivos hardware.	22
Figura 6 Características de los dispositivos de las principales distribuidoras de hardware para mineros.	29
Figura 7 Tendencias en la adopción de tecnologías de uso generalizado.	34
Figura 8 Estimación del consumo eléctrico del bitcoin por el BECI.	39
Figura 9 Estimación del consumo eléctrico del bitcoin por el CBECI.....	40
Figura 10 Porcentaje del tipo de energía empleada para minar criptomonedas	44
Figura 11 Participación agregada de energías renovables en las fuentes de energía minera del bitcoin	45
Figura 12 Vida útil de los dispositivos ASIC lanzados entre 2014 y 2021.....	48

Índice de tablas

Tabla 1 Tipo de hardware en funcionamiento en el 2018	24
Tabla 2 Tipo de hardware que suponen que estará en funcionamiento en el futuro	25
Tabla 3 Principales empresas distribuidoras de hardware y el porcentaje de hardware distribuido por estas.....	26
Tabla 4 Hash rate y eficiencia de los diferentes tipos de dispositivos.	27
Tabla 5 Estimaciones finales de la potencia requerida.....	27
Tabla 6 Consumo medio de energía eléctrica en MJ requerida para producir criptomonedas y minerales por valor de un dólar.....	36
Tabla 7 Potencia final requerida por cuatro criptomonedas	37
Tabla 8 Estimaciones finales del consumo eléctrico de los estudios revisados sobre el bitcoin.....	41
Tabla 9 Comparación de potencia demandada y de huella de carbono entre criptomonedas y las monedas convencionales	51

Símbolos y acrónimos

P2P: Peer to Peer (de igual a igual)

PoW: Proof of work (prueba de trabajo)

SHA: Secure Hash Algorithm (Algoritmo de hash seguro)

PoS: Proof of Stake (prueba de participación)

CPU: Central Processing Unit (unidad central de procesamiento)

GPU: Graphics Processing Unit (unidad de procesamiento gráfico)

FPGA: Field-programmable gate array (dispositivo de naturaleza programable)

ASIC: Application-Specific Integrated Circuit (circuito integrado para aplicaciones específicas)

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

H: Hash

IP: Internet Protocol (Protocolo internet)

CBECI: Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Energy (Consumo de energía eléctrica del bitcoin por Cambridge)

BECI: Bitcoin Energy Consumption Energy (Consumo de energía eléctrica del bitcoin)

Prefacio

A simple vista, la tecnología de las criptomonedas no parece estar muy relacionada con los conocimientos impartidos por un grado como el de la ingeniería agroambiental y del paisaje, a pesar de esto las causas que han incentivado este trabajo son varias. Para empezar las criptomonedas están ligadas a la energía eléctrica y los sistemas eléctricos, así como por supuesto a los diferentes tipos de fuentes de energía utilizadas de las que estoy interesado y las cuales se han tratado de alguna forma durante el grado, aun con esto este podría no ser un motivo de peso para realizar un TFG sobre el tema, lo que sí que lo es en mi opinión es el hecho de se puede hacer una valoración del impacto ambiental que lleva a cabo esta tecnología a través del consumo eléctrico necesario para crearlas producirlas y comerciarlas. Una valoración que no solo tenga en cuenta el consumo o la potencia eléctrica, sino también la huella de carbono que pueden llegar a emitir con tanto gasto de electricidad.

La posibilidad que tienen las criptomonedas de afectar directamente al desarrollo sostenible ambiental me parece una razón de peso para analizarlas, pues el aumento de huella de carbono provocado por estas podría derivar en la contaminación del medioambiente, la perdida de ecosistemas tal y como los conocemos y en cambios climáticos que pueden afectar, por ejemplo, al mundo de la agricultura entre otros.

Estas son las causas que han motivado este trabajo, ¿acaso las criptomonedas pueden llegar a estar dentro de unos términos que no supongan un peligro para la sostenibilidad ambiental? Esta pregunta y la propuesta de este trabajo surge sobre todo debido al enorme auge que han tenido las criptomonedas durante los últimos años y la importancia que podrían suponer para la vida cotidiana, ya que estas son publicitadas como cambio para las monedas convencionales.

1. Introducción

La crisis climática es un problema acuciante en la actualidad, es una realidad que hacen falta cambios y medidas para lograr reducir las emisiones de carbono de cara a un futuro próximo. La constante contaminación puede causar daños irreversibles para el planeta que afecten de manera negativa a nuestra generación y generaciones posteriores. Por esto, diferentes organismos y países han propuesto una serie de planes como puede ser el estado de emergencia climática o los objetivos de desarrollo sostenible, con la principal finalidad de reducir el impacto ambiental del ser humano.

A pesar de la gran fama que tienen las criptomonedas a día de hoy, no es común saber exactamente el proceso de creación y de comercialización de estas. Su fama está muy ligada con la especulación y la posibilidad de ganar dinero con su compraventa. Lo que se pretende con este trabajo es conocer más sobre cómo funciona este mundo y partir de aquí, averiguar si son o no una amenaza para el medioambiente.

2. Objetivos

La finalidad del trabajo es determinar el impacto ambiental que llevan a cabo las operaciones relacionadas con crear, extraer y comercializar las criptomonedas. Estas operaciones se podrían reducir en el principal proceso conocido como “minar”, concepto que será definido en el primer apartado “Introducción general al tema”. Los objetivos de este trabajo se dividirán en un primer objetivo principal y unos secundarios.

Objetivo principal:

- Estimar el impacto y la sostenibilidad ambiental de las criptomonedas, entendido como la energía eléctrica consumida y las emisiones de CO₂ emitidas para producirlas y comercializarlas.

Objetivos secundarios:

- Estudiar la sostenibilidad ambiental de las criptomonedas respecto a otras tecnologías actuales.
- Determinar qué tipos de energía se emplean para producirlas
- Valorar otros impactos ambientales que puedan estar adheridos a la producción de criptomonedas
- Comparar las emisiones y el consumo eléctrico de las criptomonedas con el del dinero convencional y el sistema bancario actual.

3. Material y métodos

Este TFG es un trabajo bibliográfico en el que se realizó una investigación de la literatura científica revisada por pares sobre el impacto ambiental relacionado con las criptomonedas. Se revisaron un total de 29 artículos, la búsqueda de estos se hizo el día 2 de octubre de 2021. La literatura revisada está compuesta por estudios, artículos e informes de organismos competentes que recopilé de buscadores y webs como Google Scholar, Scopus y ResearchGate. Las palabras claves que utilicé para la búsqueda de la literatura fueron: "cryptocurrency", "environmental", "energy" y "consumption"

El criterio fundamental fue escoger aquellos que daban estimaciones finales con cifras representativas del consumo energético o la huella de carbono emitida, a partir de esta primera premisa se seleccionaron aquellos estudios que basaban sus metodologías en los dispositivos usados para la creación y comercialización de las criptomonedas, además, de estudios que se dedicaban a comparar las criptomonedas con otras tecnologías. También se escogieron para la revisión literaria dos herramientas de cálculo diario del consumo eléctrico del bitcoin, por último, se escogieron artículos que estimaban otros impactos ambientales relacionados y algunos que hacían algún tipo de comparativa con el sistema bancario. Pocos estudios determinan el consumo energético de otras criptomonedas que no sean el bitcoin, seguramente debido a que es la más popular y la que más valor de precio total distribuido tiene, por ello será la más repetida durante todo el trabajo.

El primer paso del trabajo fue realizar un primer apartado totalmente necesario donde se resumiera cómo funciona esta nueva tecnología con el propósito de comprender los resultados obtenidos. La investigación de la literatura se basó en: recopilar las estimaciones y los resultados obtenidos por los diferentes estudios, desarrollar las metodologías de estos y subrayar sus limitaciones. Todo esto con la finalidad de recoger los datos más relevantes para el objetivo del trabajo.

4. Introducción general al tema

Este apartado va a ser dedicado a explicar los conceptos más básicos sobre estos activos digitales. Es necesario entender que es esta tecnología, de que está compuesta, que aplicaciones tiene y todo lo relacionado sobre ellas en un plano general. Es importante conocerlas para posteriormente poder comprender los resultados finales.

4.1 Definición

Las criptomonedas son unidades monetarias solo presentes en internet, monedas virtuales que se intercambian a través de la red. La principal característica que define a las criptomonedas y que las diferencia de otras monedas virtuales, como lo son las presentes en algunos videojuegos, es la descentralización.

Este concepto implica que las criptomonedas no están controladas por autoridades centrales, como pueden ser bancos o instituciones (Rosic, 2020). Esto significa que el usuario tiene el control absoluto de todos sus activos y no depende de nadie más para poder almacenar, gestionar y enviar su dinero. No hay dependencia de terceros, por lo tanto, se dejará de tener un punto central que controle el funcionamiento de la red y serán los propios participantes (todos aquellos que se dediquen a extraerla y crearla) los que se encarguen de gestionar los datos. Con este método lo que se consigue es que las decisiones las puedan tomar los implicados mediante métodos de consenso (Darlington, 2021). Gracias a esto, en caso de una caída de internet por parte de alguno de los participantes, no supondría un problema, la red seguiría funcionando gracias a la actividad de los demás.

El Banco de España las define como “instrumentos de pago que amparadas en una de las tecnologías más innovadoras del momento -la blockchain o cadena de bloques- permiten compras, ventas y otras transacciones financieras” además añaden “ni las tocamos con las manos ni las podemos llevar en el bolsillo, ya que no tienen soporte físico”.

El Banco Central Europeo dice que bitcoin “se trata esencialmente de una unidad de valor digital que se puede intercambiar electrónicamente y que no existe en forma física. En lugar de una única autoridad u organización, una red de ordenadores crea y rastrea los bitcoins utilizando fórmulas matemáticas complejas”. También las define

como “un activo especulativo. Dicho de otra manera, es una puesta para obtener un beneficio, pero con riesgo de perder lo invertido”. Además, no las cataloga de moneda de curso legal y, por lo tanto, “no es competente, ni regular, ni prohibir el bitcoin y otras criptomonedas”.

Un concepto muy importante que les da el nombre a las criptomonedas es la criptografía, la criptografía permite a las criptomonedas tener un alto grado de seguridad gracias a las técnicas de cifrado y codificado. Estas técnicas están basadas en el uso de algoritmos.

4.2 Origen

Satoshi Nakamoto es el seudónimo de la persona o grupo de personas a las que se le atribuye la creación de Bitcoin en 2009. Nakamoto publica un documento llamado "A Peer-to-Peer Electronic Cash System" con el propósito de poder realizar transacciones de igual a igual y donde expone la manera de llegar a realizar esta idea inicial; "Lo que hace falta es un sistema de pago electrónico basado en prueba criptográfica en lugar de confianza, permitir que dos partes interesadas hagan transacciones directamente entre sí sin necesidad de un tercero". Establece el buen uso de la criptografía como la base para que funcione, gracias a la aplicación de esta asegura acabar con los problemas de doble pago (Nakamoto, 2008).

El término criptografía (una de las bases de las criptomonedas) surge mucho antes, a principios de los ochenta, con David Chaum que diseñó el algoritmo que permitiría el anonimato y la utilización de seudónimos en las transacciones.

La idea de criptomoneda que quiso desarrollar Nakamoto fue descrita por primera vez por Wai dai, en 1998, como moneda descentralizada y protegida gracias al uso de la criptografía.

A partir de ahí y con el bitcoin como pionera, con el paso de los años salieron otras criptomonedas con la intención de mejorar este ecosistema.

4.3 Minería y blockchain

A las redes descentralizadas se les llama redes P2P (de igual a igual), una red donde todos los usuarios participan como iguales (Nakamoto, 2008). Los mineros son los principales partícipes de esta tecnología y su principal trabajo es registrar la información de intercambio de transacciones que se produce entre los usuarios, básicamente se encargan de llevar un registro contable.

Una criptomoneda es un registro de transacciones que indica como ha sido transferida de un usuario a otro. Cuando alguien hace una transacción, esta tendrá que quedar registrada dentro de la contabilidad general, además de ser distribuida a los demás miembros de la red para que todos puedan actualizar su registro contable (Darlington, 2021). Con tantos participantes y transacciones simultáneas sería complicado no tener los registros descoordinados o diferentes unos de otros. Para solucionar este posible problema se crean bloques, estos son agrupaciones de diferentes transacciones que ocurren en la red de la criptomoneda (Nakamoto, 2008).

Los mineros son los encargados de crear estos bloques, además de verificar si las transacciones agrupadas son correctas (Islam, 2020). Verificar una transacción se basa en comprobar si la persona que realiza la transacción es de verdad propietario del dinero que está enviando. Este proceso es sencillo, pues está todo en el registro general, ahí podemos ver todas las transacciones que se han hecho hasta la fecha de manera pública y gracias a esta comprobar cuánto activo de esta criptomoneda tiene la persona que hizo la transacción (Darlington, 2021).

Cuando un minero tiene formado un bloque, el siguiente paso será compartirlo con el resto de miembros de la red, así todos tendrán el mismo registro de transacciones actualizado.

La creación de bloques puede dar casos donde los mineros hayan verificado y añadido una misma transacción en su bloque, para evitar este problema de posibles dobles pagos se usa criptografía y competición entre mineros (Pernice, 2021).

Cuanta más potencia computacional disponga un minero tardará menos tiempo en resolver el algoritmo criptográfico necesario para la creación de un bloque. Una vez creado el bloque lo tendrá que unir al registro, este nuevo bloque se unirá al último de la cadena de bloques, conocida como blockchain.

Blockchain es una estructura de datos conformada por bloques encadenados unos con otros por su hash (número identificador único e irrepetible de cada bloque), básicamente es una cadena de bloques donde se almacena la información de manera transparente, descentralizada e inmutable (Darlington, 2021). Una vez añadido el bloque a la blockchain, las transacciones de este bloque no podrán ser agrupadas por otros mineros en su bloque, así se evitan problemas de dobles pagos (Nakamoto, 2008). En la **figura 1** podemos ver una pequeña representación de una blockchain.

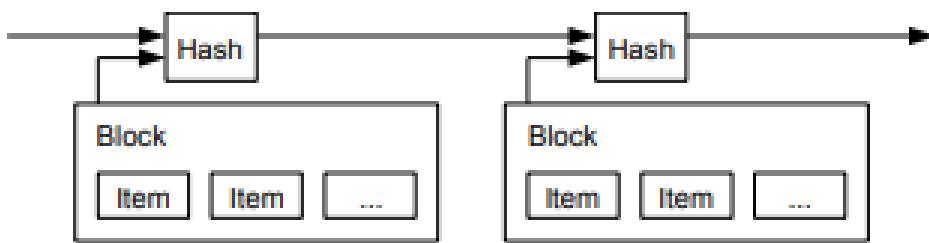


Figura 1 Blockchain. Representación de una cadena de bloques. "item" representa a las transacciones
Nota. De "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System," de S. Nakamoto, 2008, p.2
(<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>).

Para poder crear un bloque se necesita potencia computacional, este es el "precio" a pagar para ser minero. La potencia computacional entendida como la cantidad de hardware disponible y el rendimiento al que trabaja.

La creación de bloques se hace a partir de la resolución de rompecabezas criptográficos, a este proceso se le llama Proof of Work y es la principal causa de gasto de energía (Rosic, 2020). La resolución de estos problemas criptográficos está basado en el algoritmo de hash seguro, funciones que permiten modificar cualquier dato en una secuencia de números aleatoria, en el caso del bitcoin el algoritmo utilizado es el SHA-256 (Islam, 2020). El rompecabezas criptográfico se basa en modificar los dígitos de una secuencia de números aleatoria hasta encontrar la secuencia correcta, la solución (Islam, 2020). La única forma de resolverlos es probar y probar invirtiendo mucha computación hasta encontrar la combinación correcta, este proceso es automático.

Los mineros reciben una recompensa por verificar transacciones y crear bloques para la blockchain, la recompensa es una cantidad de la propia criptomonedas que están ayudando a ser intercambiada entre los demás usuarios (Pernice, 2021). Por lo tanto, minar es la única manera de crear por ejemplo nuevos bitcoins, solo es posible generarlos ayudando a validar intercambios de bitcoins entre personas. La producción de una criptomonedas existe a través de las recompensas que recibe el minero por añadir bloques

a la cadena, todo este sistema existe a partir de se hagan y se verifiquen las transacciones de la red.

4.4 Proof of Work

El PoW es un mecanismo de consenso utilizado para que algunos de los participantes de la red, los conocidos como mineros, calculen códigos alfanuméricos válidos, llamados hashs, esto es para verificar las transacciones de una criptomonedas y agregar el siguiente bloque a la cadena de bloques (Rosic, 2020). Es un mecanismo a la disponibilidad de cualquiera que tenga un mínimo de hardware y conexión a internet, pero como hemos mencionado en el punto anterior, es un mecanismo competitivo que recompensa al que tiene mayor potencia computacional.

Hay un máximo de transacciones que se pueden realizar en un mismo momento, pero cualquier minero, independientemente de si son muchos o no, podrá entrar en la carrera para validar y minar un bloque. Este sistema está hecho de tal forma que la acción de minar tarde siempre más o menos lo mismo, mientras más mineros haya más difícil de resolver serán los problemas criptográficos (Nakamoto, 2008). El bitcoin en concreto tiene un límite de unidades programado, cuando llegue a un número concreto de producidos ya no se podrán extraer minando, la producción se detendrá, es un límite puesto por los propios creadores (Nakamoto, 2008).

La premisa de que a mayor potencia computacional tengas, mayor probabilidad de minar bloques tendrás, se ha traducido en la construcción de las llamadas granjas mineras, sitios que consisten en grandes cantidades de hardware destinadas a minar criptomonedas. El minado se empezó haciendo mediante CPU hasta pasar a las gráficas GPU con el propósito de mejorar la eficiencia y la productividad. A medida que ha ido avanzando la tecnología de los ordenadores también lo ha hecho la de las granjas hasta llegar a los dispositivos FPGA y los ASIC, dispositivos que mejoran la potencia y el rendimiento de los anteriores y que son de uso específico, ya que se dedican sólo a realizar minado (Stoll, 2019). La formación de estas granjas ha provocado la escasez y aumento de precios de tarjetas gráficas y dispositivos tecnológicos necesarios para la minería (Martín, 2021). Las granjas mineras por su necesidad de grandes cantidades de energía eléctrica se construyen por ejemplo en centrales hidráulicas o de carbón en desuso, también en naves industriales nuevas dedicadas exclusivamente a la minería.

Para minimizar los problemas de consumo de energía del PoW han surgido criptomonedas con mecanismos de minería basados en otros tipos de sistemas. La Prueba de participación "Proof of Stake", consiste en un mecanismo que deja de utilizar la potencia computacional para la minería y se basa en ofrecer o dejar tus monedas como símbolo de participación y confianza (Rosic, 2020). Gracias a la cantidad aportada de criptomonedas como participación tendrás más o menos posibilidades de minar bloques, además estas criptomonedas tuyas las podrás retirar siempre que quieras. Esto arregla algunos problemas del PoW, la cantidad de mineros que se dediquen a minar bloques se verá reducida y, por tanto, el consumo de energía será menor.

Quien tenga más cantidad de criptomoneda congelada en una cartera digital tendrá más recompensas para la minería de la misma (Rosic, 2020). Por supuesto debe decirse que este mecanismo hace que algunas de las características con las que definimos las criptomonedas no se vean totalmente representadas, como es la descentralización total.

En cualquier caso, la minería basada en PoW es la más extendida y utilizada, siendo el consumo de energía provocada por esta la que desarrollaremos en la memoria de este trabajo final de grado.

4.5 Características

Las criptomonedas tienen unas propiedades diferenciadoras del dinero convencional que proporcionan distintas ventajas y desventajas que hay que conocer para comprender que aportan en la sociedad.

A continuación, se realiza una lista de las principales características:

- La descentralización, que ya hemos mencionado anteriormente, tiene una serie de pros y contras como, por ejemplo, la difícil legislación, el bajo coste de las tarifas por transacciones comparadas con las monedas convencionales o la dificultad de la caída total del sistema (Darlington, 2020).
- Las transacciones son irreversibles, una vez hecha la transacción con su confirmación, no se podrá cancelar, independiente a quién o con qué propósito lo hayas enviado (Rosic, 2020).
- Las transacciones son pseudoanónimas, esto significa que podemos ver de una manera pública todas las transacciones que se realizan en una red, lo que no podemos hacer es identificar a la persona que realiza la transacción (Rosic, 2020).

Esto implica la posibilidad de facilitar actividades ilícitas, como son el lavado de dinero o compra de productos ilegales. Temas por los que se intentan introducir más regulaciones.

- La volatilidad es también una de sus principales características, y es la que da paso a la especulación. El mercado de las criptomonedas es el que más fluctúa a nivel global, consecuentemente es muy inestable y esto se aprovecha para invertir. Como vemos en Pastor (2021), existe un caso muy famoso, el que se vivió en mayo de 2021, con un tweet de una persona influyente en este mundo, hizo que el valor del bitcoin bajara considerablemente, como se puede apreciar en la **figura 2**

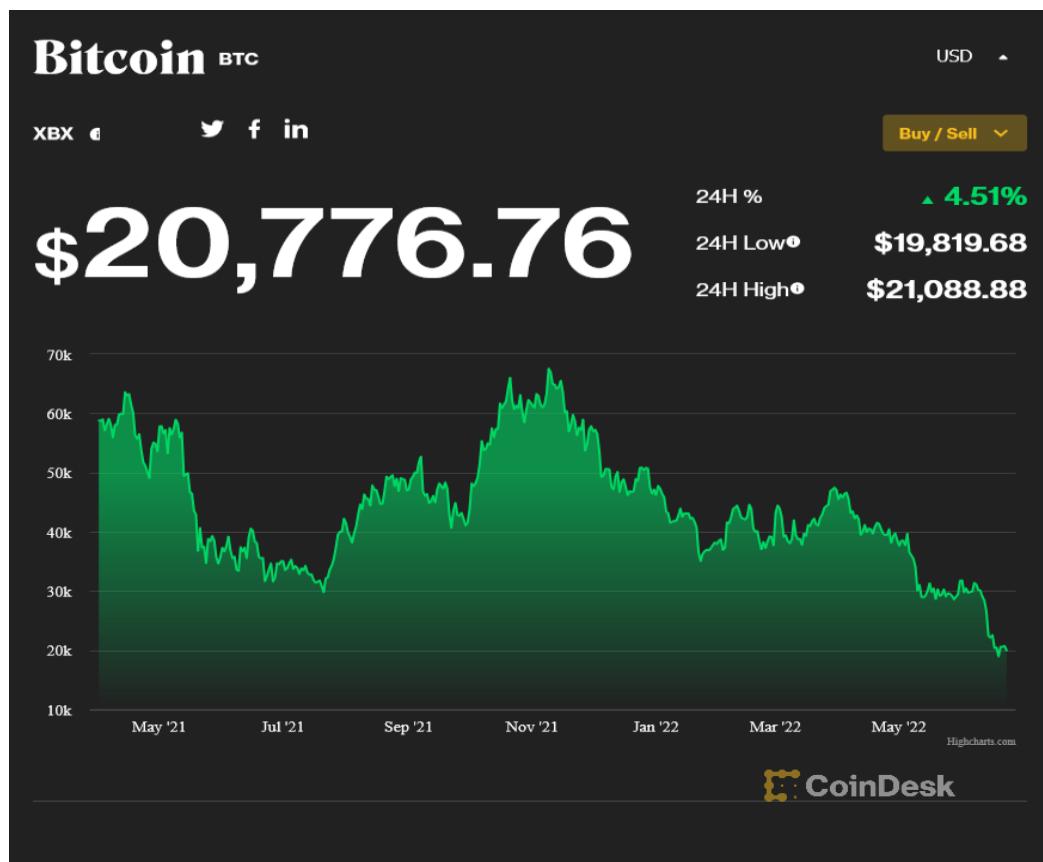


Figura 2 Precio del bitcoin. De abril del 2021 hasta junio del 2022. Nota. De CoinDesk, (<https://www.coindesk.com/price/bitcoin/>).

- Se pueden realizar transacciones desde cualquier lugar con rapidez y eficacia, no se puede rastrear a los usuarios, pero si el camino que hacen las criptomonedas, su registro digital (Rosic, 2020).
- Prometen ser seguras gracias a la criptografía, a las cuentas solo tienen acceso los propietarios (Rosic, 2020), aunque se conozcan casos de robos en algunas plataformas de intercambio de criptomonedas, como se explica en Sánchez (2021).

- Es un mundo más o menos accesible siempre que dispongas de un dispositivo electrónico y la posibilidad de descargar el software necesario.

4.6 Criptomonedas más conocidas

Hoy en día hay una gran cantidad de criptomonedas, sus bases a gran escala no dejan de ser las mismas, con una marca y una publicidad detrás de cada una para hacerlas conocidas y que puedan crecer. Algunas de ellas se crean con la idea de mejorar sus antecesoras en apartados tanto de tecnología como de economía.

Según coinmarketcap.com, el 25 de junio de 2021 existían 19999, ya que es un activo descentralizado y cualquier persona con conocimientos informáticos puede crear una.

En la **figura 3** podemos ver una lista de las principales criptomonedas teniendo en cuenta su valor distribuido.

#	Name	Price	24h %	7d %	Market Cap	Volume(24h)	Circulating Supply
1	Bitcoin BTC	\$20,344.30	-0.81%	-3.78%	\$391,850,782,605	\$28,414,191,017 1,383,181 BTC	19,075,000 BTC
2	Ethereum ETH	\$1,092.81	-0.74%	-2.36%	\$134,173,663,670	\$14,749,957,996 13,332,172 ETH	121,276,706 ETH
3	Tether USDT	\$0.9993	+0.02%	+0.04%	\$66,929,894,124	\$45,787,031,174 45,821,120,702 USDT	66,979,725,012 USDT
4	USD Coin USDC	\$0.9999	-0.03%	-0.06%	\$55,754,332,517	\$4,791,591,790 4,791,907,135 USDC	55,758,001,834 USDC
5	BNB BNB	\$226.78	+3.77%	+5.34%	\$37,027,589,754	\$1,130,765,901 4,986,229 BNB	163,276,975 BNB
6	Binance USD BUSD	\$0.9995	+0.02%	-0.31%	\$17,523,945,244	\$4,498,204,323 4,500,601,250 BUSD	17,533,283,108 BUSD
7	Cardano ADA	\$0.4699	-0.53%	-4.59%	\$15,853,352,384	\$722,221,776 1,537,028,919 ADA	33,739,028,516 ADA
8	XRP XRP	\$0.3268	+0.69%	+3.53%	\$15,796,988,341	\$959,781,298 2,937,193,052 XRP	48,343,101,197 XRP
9	Solana SOL	\$37.03	+3.60%	+19.64%	\$12,687,439,302	\$1,434,523,385 38,740,979 SOL	342,639,115 SOL
10	Dogecoin DOGE	\$0.06353	+0.02%	+11.70%	\$8,428,804,070	\$469,775,195 7,394,338,947 DOGE	132,670,764,300 DOGE

Figura 3 Tabla de las principales criptomonedas. Ordenadas según el valor de mercado total de la oferta circulante a fecha de 23/6/22. Nota. De CoinMarketCap, (<https://coinmarketcap.com>)

5. Resultados

5.1 Consumo de energía eléctrica y huella de carbono

En este apartado nos dedicamos a analizar artículos, estos muestran el consumo de energía eléctrica de algunas criptomonedas, la mayoría se centran en bitcoin, ya que actualmente está representando aproximadamente el 46% de capitalización del ecosistema de las criptomonedas. Con el propósito de que el texto sea esclarecedor, agruparemos los artículos según las metodologías y perspectivas utilizadas, además también se elabora una tabla con todos los resultados obtenidos para poder compararlos.

5.1.1 Hardware y hash rate

Hay algunos estudios dedicados a calcular el impacto ambiental provocado por las criptomonedas, teniendo como principal punto de mira el tipo y la cantidad de hardware utilizado para minar y teniendo en cuenta el hash rate, estos estudios son los que se analizarán a continuación.

El hash rate indica la cantidad de operaciones computacionales que un minero o una red de mineros en todo su conjunto es capaz de realizar con el fin de resolver los acertijos criptográficos. El hash rate es la unidad de medida que equivale a la cantidad de hash realizados por segundo.

Este primer estudio sobre bitcoin de O'Dwyer & Malone (2014) es de los más antiguos que he revisado y sus datos y estimaciones podrían estar un poco obsoletas. Uno de los puntos importantes en los que desemboca es que se necesita un mejor hardware para que la minería sea más eficiente y rentable.

Calculan la energía eléctrica consumida y el impacto ambiental del hardware gracias a información pública sobre bitcoin, la red bitcoin y las transacciones. Comparan costos de energía y monetarios con las recompensas obtenidas por bloque cerrado. Por último, se calcula el total de la energía eléctrica consumida por bitcoin para concluir que es comparable al consumo total de Irlanda.

Un punto importante para entender este y otros estudios que trabajaremos, es que la dificultad de un rompecabezas criptográfico depende de la velocidad a la que trabaje el hardware y del número de mineros que participan en la red, aun con esto, la red bitcoin en concreto está programada para modificar esta dificultad para que siempre se tarde de media el mismo tiempo para encontrar el hash correcto y poder cerrar el bloque (Nakamoto, 2008). Se podrá cerrar un bloque alrededor de cada 10 minutos y esta dificultad se ajusta cada 2016 bloques cerrados, para estar siempre alrededor de este tiempo. Podemos ver la evolución del hash rate en la **figura 4**.

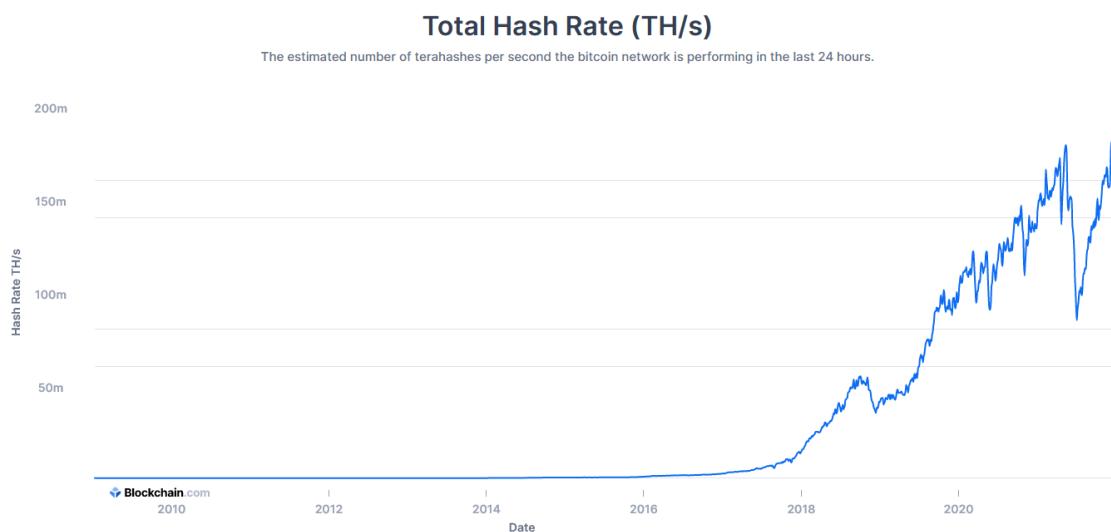


Figura 4 Evolución del hash rate en la red bitcoin. Nota. De Blockchain.info, (<https://www.blockchain.com/>).

El hash rate ha crecido mucho más rápido durante estos tres últimos años, debido al masivo crecimiento de la popularidad de las criptomonedas, debido directamente al aumento de mineros y de granjas mineras.

El texto en cuestión se centra como ya se ha dicho en el tipo de hardware y su eficiencia. La premisa de que cuando aumente el número de mineros suba la dificultad de cerrar un bloque ha derivado en la tendencia de creación de nuevo tipo de hardware con mejor eficiencia (O'Dwyer & Malone, 2014). Quien tenga los mejores dispositivos tendrá ventaja, calculará el hash en menos tiempo y consumirá menos energía eléctrica. Gracias a esto un minero tendrá más posibilidad de cerrar un bloque y de tener un mejor beneficio.

La evolución del hardware ha sido muy necesaria para que los mineros puedan seguir manteniendo beneficios, pero también simultáneamente ha ayudado a reducir la

huella de carbono, puesto que este nuevo tipo de hardware es bastante mejor con respecto a la eficiencia energética.

Escogen valores de precio de kWh bajos, para obtener un límite inferior y se tienen en cuenta unas recompensas promedias por minar.

En la **figura 5** se muestran resultados de los diferentes tipos de hardware recopilados. Los rendimientos funcionan según el hardware que se utiliza. Si se trabaja con CPU/GPU están debajo de los 2 Mhash/J, los FPGA son 10 veces más rentables que estos y los ASIC son excesivamente mejores que cualquiera de estos.

Name	Type	Hash Rate <i>R</i> (Mhash/s)	Power Use <i>P</i> (W)	Energy Efficiency <i>E</i> (Mhash/J)	Cost (\$)
Core i7 950	CPU	18.9	150	0.126	350
Atom N450	CPU	1.6	6.5	0.31	169
Sony Playstation 3	CELL	21.0	60	0.35	296
ATI 4850	GPU	101.0	110	0.918	45
ATI 5770	GPU	214.5	108	1.95	80
Diligent Nexys 2 500K	FPGA	5.0	5	1	189
Monarch BPU 600 C	ASIC	600000.0	350	1714	2196
Block Erupter Sapphire	ASIC	333.0	2.55	130	34.99

Figura 5 Hash rate, potencia, eficiencia y coste de diferentes tipos de dispositivos hardware.
Dispositivos considerados antiguos en la actualidad. Nota. De “Bitcoin Mining and its Energy Footprint,” de K.J.. O’Dwyer y D. Malone, 2014, p. 283 (<https://doi.org/10.1049/cp.2014.0699>).

Aseguran que la eficiencia entre un hardware básico y uno especializado es de 2Mhash/J y 2000Mhash/J respectivamente, con lo que hay muchos resultados de por medio. Se espera que se utilicen la combinación de diferentes tipos de hardware y que, por tanto, esté entre estos dos valores. Estiman la potencia demandada de bitcoin entre 0,1 y 10 GW, márgenes que abarcan demasiado. Comparan la potencia requerida por el bitcoin con un país como Irlanda que está en los 3 GW.

La problemática con este artículo es que los datos son del 2014 y están desfasados. La lista del hardware recopila algunos que ya no se utilizan por la baja eficiencia, además, las estimaciones finales abarcan un rango de valores demasiado grande.

En Vranken (2017), se utiliza un método similar al visto en O’Dwyer & Malone (2014), pero con datos más actualizados y centrándose en estimar el consumo para el 1 de enero del 2017.

Estiman un valor de límite inferior del consumo de energía eléctrica para bitcoin, es decir, como si siempre se empleara el hardware más eficiente disponible en aquel momento, el valor obtenido es de 45 MW. Para el límite superior suponen que el hardware activo son los que reportan ingresos iguales a los costes de la energía eléctrica.

Por la fecha que el estudio quiere recopilar, la red de minería al completo de bitcoin cerraba un bloque cada 10 minutos por una recompensa de 12,5 bitcoins con un precio en ese momento de 1000 dólares cada uno, esto en total resultan unos ingresos diarios de, 1,8 millones dólares (Vranken, 2017). Establecen la media del precio del kWh en 6 centavos de dólar, en consecuencia, el consumo eléctrico es de 1,3 GW. Concluyen comparando resultados con otros estudios, que un rango de 0,1 a 0,5 GW es una estimación razonable para el consumo de electricidad del bitcoin.

En Köhler & Pizzol (2019) se realiza un estudio del impacto ambiental de minar bitcoins. Se cuantifica como consumo de energía eléctrica y huella de carbono, desde una perspectiva muy distinta, aplicando un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Aseguran que esta es una mejor opción que metodologías vistas en otros artículos, porque la mayoría no tienen en cuenta la ausencia de datos a la hora de estimar los resultados, es conveniente tener presente la falta de según qué datos, para sacar una conclusión final. Por estas razones, creen que el ACV es el método indicado, pues ayudara a hacer una revisión exhaustiva de todo el camino del activo: extracción de la materia prima, procesos de producción, fase de uso, eliminación y reciclaje.

Los resultados obtenidos para el 2018 son de 31,29 TWh de consumo y 17,29 Mt CO₂ emitido con alrededor de 15 y 60 millones de TH/s. A través de varios modelos y con la ayuda de un software especializado elaboran dos tipos de ACV, el “atribucional” para el impacto ambiental de 2018 y el “consecuente” para el impacto a futuro.

La información de la ubicación de la minería del bitcoin es muy importante, pero es escasa e incierta. En este artículo, la información sobre esto se basa en la investigación de otros dos estudios, de aquí se toman también los datos de cantidades de hardware existentes en funcionamiento. Estos datos los encontramos en la **tabla 1**.

Tabla 1 Tipo de hardware en funcionamiento en el 2018

Dispositivos	Porcentaje utilizado (%)
Antminer S9	79,9
Avalon 841	7,6
Ebang E10	6,7
Otros	5,8

Nota. Adaptado de "Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining," de S. Köhler y M. Pizzol, 2019, *Environmental Science & Technology*, 53, p. 13600 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05687>).

Sobre estos equipos se tienen en cuenta tres etapas: la producción, el consumo eléctrico y el fin de la vida útil. Para el peso del hardware y la vida útil tomaron como referencia el BECI (1,5 años de vida útil).

Para el modelo "atribucional" mezclan tres casos: uno como si se utilizara solo energía hidroeléctrica, otro solo carbón y el último como si se utilizara una mezcla de las dos. Se moldean distribuciones geográficas de diferentes estudios. Una vez tienen el modelo, prueban cuáles son las variables más importantes, cambiándolas, aumentándolas y disminuyéndolas. Variables como la vida útil y el hash rate.

Para el modelo "consecuente" se presupone un aumento de la demanda minera eléctrica. Se realizan tres ensayos: el primero en el que la distribución geográfica no afecte a la demanda energética, sino que lo hará la red eléctrica. El segundo donde solo se incluyen las tecnologías de minería marginal, cuando la demanda minera aumente, aumentarán los equipos más eficientes. El tercero donde los problemas de aumento de demanda se resolverán con cambios en la distribución geográfica, los mineros se moverían a países o regiones con mejores condiciones meteorológicas, mejores energías y precios. En la **tabla 2** podemos ver el hardware tenido en cuenta para el método de "consecuente".

Tabla 2 Tipo de hardware que suponen que estará en funcionamiento en el futuro

Dispositivos	Porcentaje utilizado (%)
Antminer S15	70
Ebang E11	20
Avalon 1041	10

Nota. Adaptado de "Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining," de S. Köhler y M. Pizzol, 2019, *Environmental Science & Technology*, 53, p. 13601 (<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05687>).

El modelo "atribucional" responde a cuál será el impacto de la red bitcoin bajo unos supuestos específicos. Estiman que el consumo de energía por cada TH/s extraída es de 27,14 mWh, esto significa que se consumieron 31,29 TWh en 2018. Son valores similares a los de otros estudios comentados también en este trabajo. Las variaciones son debidas a que otros estudios hacen la estimación con el valor de hash rate de un día en concreto, el día que se haya realizado el análisis. Aquí en cambio se calcula la cantidad del hash rate total en un año. Cada TH/s produjo 15 mg de CO₂ en 2018, esto hace un total de 17,29 Mt de CO₂ emitidos.

Con los cambios de parámetros, vieron que subir y bajar tanto el consumo como el hash rate tenía una consecuencia directa proporcional con la huella de carbono, pero cambiar la vida útil de los dispositivos hacía variar poco la huella. Concluyen que "La fase de uso es el principal contribuyente a la huella de carbono con 99,043%". La producción de equipos y la vida útil solo contribuyen 0,932% y 0,025%, respectivamente. Añaden que "Los dispositivos hardware utilizados en el modelo de referencia atribucional contribuye a una participación similar a la minería y a la huella de carbono. Por ejemplo, el Bitmain Antminer S9 constituye el 79,9% de los equipos de minería, y aporta el 80,7% del carbono total."

El modelo "consecuente" responde a que ocurrirá con el aumento de la demanda en el futuro. En el primer escenario donde lo más importante son los cambios de hash rate, obtienen unas emisiones de 13,3 mg de CO₂. El segundo escenario es el tecnológico, que solo asume los equipos de minería más eficientes, este tuvo unas emisiones de 7,74 mg de CO₂. El último escenario que depende de las ubicaciones de los mineros tiene una huella de carbono de 3,2 mg de CO₂. Por tanto, se podría decir que las energías renovables si son un tema relevante para bajar el gasto de energía, y aunque a los resultados del

modelo "atribucional" no se consideraba importante la vida útil de los dispositivos, aquí vemos que la eficiencia de estos si es un parámetro a destacar.

En el estudio Stoll et al (2019) estiman que en noviembre de 2018 el consumo del bitcoin sumó 45,8 TWh. En el mejor de los casos la huella de carbono oscilaría entre 0, si las energías empleadas fueran todas renovables, y 51 Mt de CO₂ en caso de que la energía empleada se generase quemando carbón. Llegados a este punto se repite la limitación de la falta de información fiable en temas de ubicación de “pools” (agrupación de mineros por medio de un servidor) mineras. A pesar de estas limitaciones, sus estimaciones de emisiones de CO₂ entran en unos rangos lógicos.

Disponen de información de las principales distribuidoras de hardware, gracias a estas saben el tipo de hardware utilizado y donde se ubican geográficamente todos estos dispositivos, basándose en las IP. Con estos datos, se encargarán de medir el consumo de energía total, además realizan la conversión a huella de carbono a través de las emisiones de las regiones donde se encuentran. Se tiene en cuenta los rendimientos del hardware y algo que no habíamos visto en artículos anteriores, los sistemas de refrigeración. La cantidad de hardware empleado y la eficiencia son dos puntos clave (Stoll, 2019). El porcentaje de participación de las tres grandes distribuidoras se muestra en la **tabla 3**. La **tabla 4** muestra su estimación sobre el rendimiento y las eficiencias de los dispositivos.

Tabla 3 Principales empresas distribuidoras de hardware y el porcentaje de hardware distribuido por estas.

Distribuidoras	Porcentaje total de hardware distribuido (%)
Bitmain	78
Canaan	9
Ebang	13

Nota. Adaptado de “The Carbon Footprint of Bitcoin,” de C. Stoll., L. Klaaßen y U. Gallersdörfer, 2019, Joule, 3(7), p. 1649 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>).

Tabla 4 Hash rate y eficiencia de los diferentes tipos de dispositivos.

Tipos de dispositivos	Hash rate (GH/s)	Eficiencia (J/GH)
CPU	0,01	9000
GPU	0,2-2	1500-400
FPGA	0,1-25	100-45
ASIC	45	0,05

Nota. Adaptado de “The Carbon Footprint of Bitcoin,” de C. Stoll., L. Klaassen y U. Gellersdörfer, 2019, Joule, 3(7), p. 1651 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>).

Las estimaciones finales salen de un punto intermedio entre, el límite superior, donde existe un punto de equilibrio entre los ingresos y los gastos de electricidad, y el límite inferior, que lo calculan como si todos los mineros tuvieran el hardware más eficiente (Stoll, 2019). De aquí sale la **tabla 5**.

Tabla 5 Estimaciones finales de la potencia requerida.

Años	Potencia (MW)
2016	345
2017	1637
2018	5232

Representada como MW. Nota. Adaptado de “The Carbon Footprint of Bitcoin,” de C. Stoll., L. Klaassen y U. Gellersdörfer, 2019, Joule, 3(7), p. 1649 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>).

Para noviembre de 2018 les salía que bitcoin había tenido un consumo de 37 y 56,2 TWh con el hardware de mayor y menor eficiencia respectivamente. Para la localización se rastrean varios IP, la de los dispositivos en funcionamiento y de los servidores donde están conectados. Aunque con un alto grado de incertidumbre obtienen que el 68% de los mineros está en China, el 17% en Europa y el 15% en Norteamérica. A partir del consumo de energía y del país donde se consume esta energía se estima una huella de carbono de entre 22 y 22,9 Mt CO₂, teniendo en cuenta las IP de dispositivos y servidores de las granjas. Estas emisiones equivalen a la de un país entre Jordania y Sri Lanka. Creen que, aunque la emisión de bitcoin no suponga un gran porcentaje de las emisiones globales debería tenerse en cuenta su huella de carbono producida.

Aunque es menos relevante para el desarrollo de este apartado, hacen una crítica a los datos mostrados sobre ubicaciones mineras y proveedores. Se ven truncadas las

bases de descentralización de las criptomonedas, debido a que 4 de las granjas más importantes de China cerraron la mitad de los bloques totales de bitcoin y la distribuidora de hardware Bitmain, distribuye dispositivos mineros a 3 de estas 4 (Stoll, 2019).

Añaden que las demás criptomonedas que también utilizan el mecanismo de consenso PoW podrían llegar a aumentar el consumo alrededor de 40 kWh por año, esto sumado al crecimiento continuo del bitcoin traería un gran consumo total.

El siguiente estudio de Vries (2018), hace una estimación del límite inferior para 2018 con los hardware más eficientes disponibles en el momento. La estimación final, con una eficiencia de 0,098 J/GH y como vemos en la figura 6, un total 26 trillones de hash por segundo, resulta en un consumo en torno a 2,55 GW, que es comparable con el consumo de Austria.

Como otros tantos estudios, en este no se añaden el consumo de los equipos de refrigeración y están muy condicionados por la falta de datos de la gran mayoría de mineros. Estos, trabajan a puerta cerrada y no dan ninguna información de lo que hacen (de Vries, 2018), además en este caso se tiene en cuenta solo un tipo de hardware, que es una clara limitación.

La información de hardware distribuido viene dada a partir de datos de chips vendidos por empresas externas a Bitmain, estos chips son componentes de los dispositivos mineros. Gracias a ello estiman la producción de dispositivos, unas estimaciones poco fiables, de esta forma nunca se sabrá la cantidad total producida de un modelo concreto, pues unos el mismo tipo de chip se usan para diferentes dispositivos.

En la **figura 6** podemos ver información sobre los distintos tipos de hardware existentes en ese momento. Esta lista es muy diferente a la mostrada en la **figura 5**, con el paso del tiempo ha habido una clara evolución a un hardware de mejor eficiencia.

Machine	Hashrate (TH/s)	Power Use (W)	Power Efficiency (J/GH)
Antminer S9	14	1,372	0.098
Antminer T9	12.5	1,576	0.126
Antminer T9+	10.5	1,332	0.127
Antminer V9	4	1,027	0.257
Antminer S7	4.73	1,293	0.273
AvalonMiner 821	11	1,200	0.109
AvalonMiner 761	8.8	1,320	0.150
AvalonMiner 741	7.3	1,150	0.160
Bitfury B8 Black	55	5,600	0.11
Bitfury B8	47	6,400	0.13

Figura 6 Características de los dispositivos de las principales distribuidoras de hardware para mineros. Las principales distribuidoras son: Bitmain, Bitfury y Canaan. Nota. De “Bitcoin’s Growing Energy Problem,” de A. de Vries, 2018, Joule, 5(2), p. 803 (<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>).

Hay un problema que se refleja durante la búsqueda del trabajo, la falta de estudios y metodologías para estimar el consumo de energía eléctrica de otras criptomonedas que no sean el bitcoin. El estudio de Gallersdörfer (2020) trata de una metodología para evaluar el consumo energético de las criptomonedas más allá del bitcoin.

Recoge la tasa de hash de las 20 criptomonedas con mayor capitalización de mercado en 2020, estas suponen el 98% del total del mercado. Estas, se diferencian en tipos de dispositivos y algoritmos de hash utilizados (Gallersdörfer, 2020). Dividen la tasa de hash de la red por la eficiencia de los dispositivos mineros y obtienen la potencia nominal. Las 20 en total suponen una potencia demandada de 6,27 GW y el bitcoin de 4,29 GW. Como en otros estudios la información sobre el hardware no es completamente fiable, no se sabe con exactitud tipos de hardware y la cantidad que tiene cada minero, además también consideran los factores de emisiones marginales.

Podemos decir que el punto de vista escogido para este trabajo es bueno, aunque el bitcoin suponga dos tercios del consumo energético, las otras 19 representan un consumo suficientemente significativo para tenerlas en cuenta a la hora de evaluar la huella de carbono.

El artículo de Li et al (2018), centra sus experimentos sobre la eficiencia minera de la criptomoneda Monero y diez algoritmos de hash. Ejecutan un análisis estadístico con datos en un punto de referencia concreto y obtienen resultados experimentales de la minería de Monero. Los resultados indicaron que el algoritmo de hash influye

principalmente en la eficiencia minera, el análisis de datos, los experimentos y la estimación del consumo de electricidad de Monero en el mundo. El tipo de logaritmo utilizado para minar la criptomoneda evaluada es un tema del que todavía no se ha profundizado en los estudios planteados en el trabajo, se suele estudiar el más usado, el hash 246 que es el empleado por la minería de bitcoin.

Ponen sobre la mesa algunos desafíos para poder calcular la energía emitida por las criptomonedas. Para empezar, debemos comentar que el número total de las criptomonedas es incierto, cualquier persona puede desarrollar o crear una nueva. El número total de las que existen cambia todos los días, aunque esto en principio no debería ser una limitación significativa, ya que las criptomonedas más pequeñas y desconocidas representan un porcentaje mínimo en el consumo eléctrico.

Es importante comentar la dificultad de convertirse en minero. Todo el mundo que tiene conexión a internet, un ordenador y un software adecuado puede unirse a la actividad minera. Esto no debería ser un tema que comprometa los resultados finales, ya que lo normal es que si no puedes acceder a un pool o una granja minera con un nivel computacional muy alto nunca resultaría rentable convertirse en minero, pues nunca podrás cerrar un bloque antes que las empresas, granjas y pools más grandes del mundo. Finalmente, debido a una de las principales propiedades de las criptomonedas, que son no trazables, hace muy complicado conocer la situación de la actividad minera, esto va directamente ligado a la falta de datos fiables comentados en casi todos los demás artículos (Li, 2018).

Explican que hacen las estimaciones del consumo energético por parte de la criptomoneda Monero porque existe una base de datos relativamente alta y disponible para esta criptomoneda (Li et al, 2018). En el momento del estudio ocupaba el puesto 12 entre todas las criptomonedas, con una capitalización de mercado de más de 3,9 mil millones de dólares. Los mineros de Monero solo pueden usar dispositivos CPU y GPU.

Para el estudio se hizo un caso práctico, utilizaban tres computadoras portátiles y dos de escritorio, con las que median la energía proveniente de la CPU y GPU. El estudio se llevó a cabo en abril de 2018 en China con unas temperaturas y humedad estables, para que así las computadoras se dedicaren a ejecutar el software necesario para la minería sin ninguna influencia. Una vez establecido el sitio, gracias a instrumentos y medidores supieron la potencia de los dispositivos. Se cogen muestras de dos horas, una con el ordenador encendido sin ejecutar ninguna tarea y la otra hora minando. Se registra el

consumo de energía y el hash rate de los dispositivos expuestos, todos en las mismas condiciones expuestas anteriormente.

Hicieron un análisis estadístico para analizar la información de la base de datos online. A partir de la distribución de las granjas más conocidas se establece una distribución general de la geolocalización de los mineros. A partir de aquí estimaran las emisiones de carbono teniendo en consideración el país o la región en la que se encuentran.

Esta no es la mejor forma de hacerlo, damos por hecho que los mineros no tienen por qué estar conectados a servidores locales (Li et al, 2018). Además, existe una falta de evaluación de los equipos de refrigeración, con lo cual los datos finales podrán estar subestimados.

Descubren que cada algoritmo de hash tiene una eficiencia concreta, independientemente del tipo de minería. Los algoritmos tienen diferente hash rate, aunque estén minando la misma criptomoneda, cuando se utiliza el mismo algoritmo de hash las eficiencias de extracción de los cinco equipos mostraron fluctuaciones. Básicamente, indican que la eficiencia minera es relativa al algoritmo.

Los resultados conseguidos sobre el consumo de Monero en 2018 son de 645,62 GWh de electricidad en el mundo. Según el artículo suponiendo que existe un 4,7% de actividad minera en China, el consumo es de al menos 30,34 GWh, contribuyendo con una emisión de carbono de entre 19,12 y 19,42 mil toneladas desde abril a diciembre de 2018. Las estimaciones finales son equivalentes a 74 MW, un porcentaje muy pequeño del consumo de las criptomonedas comparado con las estimaciones vistas hasta ahora del bitcoin.

El artículo relativamente reciente de Vries (2020), cree que los métodos utilizados actualmente por los estudios de bitcoin son propensos a realizar estimaciones optimistas. Por ejemplo, aseguran que los mineros todavía emplean dispositivos de generaciones anteriores siempre que sigan siendo rentables, ya que tienen una mayor disponibilidad y menores costes de adquisición. No se tiene en cuenta en otros estudios, así como otros factores, como las circunstancias del mercado, la variación estacional y geográfica, distintos puntos clave para el precio de la electricidad (de Vires, 2020).

En China, en la época de lluvia, que va desde abril hasta octubre aproximadamente, el precio de la electricidad está muy barato para las centrales hidroeléctricas, inferior a 1 centavo de dólar por kWh (de Vries, 2020). A veces la escasez

de los chips con los que se hace el hardware especializado, provoca falta de este mismo dispositivo. Los mineros para aprovechar esta época del año tan rentable en cuanto a costes de electricidad, escogen generaciones de dispositivos anteriores que tienen menos costes de adquisición y más stock disponible (de Vries, 2020).

La distribuidora de hardware Canaan en el primer semestre en 2019 vendió 252862 unidades de series A8 A9 (eficiencias de 0,1 y 0,09J/GH respectivamente) y más antiguas. En el segundo semestre de 2018 vendió 292826 unidades, vemos entonces que hay una gran demanda y que no solo los últimos hardware salidos al mercado son los únicos vendidos. También son vendidos algunos con menores eficiencias como Antminer S17 de Bitmain o la serie A10 de Canaan que tienen un rendimiento de 0,0625J/GH. Hasta el tercer semestre de 2019 no hubo un verdadero cambio de generación respecto a ventas, vendieron 200.000 unidades de la nueva generación (de Vries, 2020).

Analizando datos de venta y cuotas de mercado, concluyen que una eficiencia energética media ponderada conservadora de todas las unidades mineras en la red asciende a 0,0917J/GH a 30 de septiembre de 2019. Esta eficiencia equivale a un consumo eléctrico de 87,1 TWh por año, con esos números el bitcoin consumiría lo mismo que Bélgica. Creemos entonces que la forma en que los mineros hacen uso de sus dispositivos posteriormente a la compra de estos es una cuestión que complica las estimaciones y conclusiones finales (de Vries, 2020).

El Sedlmeir (2020) es otro de los estudios más actuales sobre la blockchain y el bitcoin, representa sus estimaciones con un límite superior y uno inferior. Consideran su metodología una forma válida para calcular cualquier criptomoneda que utilice PoW.

Dado que tanto la dificultad de los puzzles criptográficos como la frecuencia con la que se encuentran las soluciones son fácilmente observables, se puede calcular el valor esperado de la frecuencia mínima de cálculos (hash rate) necesaria para resolver los puzzles tan a menudo como se observa (Sedlmeir, 2020). El límite inferior se entiende como que el total de la potencia consumida es igual o mayor al hash rate total y se calcula suponiendo que se usa el mejor hardware disponible en ese momento. El límite superior se calcula suponiendo que los mineros son “honestos” es decir, el único propósito para minar es obtener las ganancias justas. Las recompensas mineras junto a las tarifas de transacción han de ser iguales a los ingresos mineros e iguales o mayores a los costes totales de la minería y la energía consumida.

Con estas precisas se obtienen los siguientes resultados. El consumo de electricidad entre 60 y 125 TWh por año para Bitcoin. Esto se encuentra en el rango del consumo anual de electricidad de países como Austria (75 GWh) y Noruega (125 GWh). En consecuencia, una sola transacción de PoW actualmente requiere suficiente energía eléctrica para satisfacer las necesidades del hogar alemán de tamaño medio durante semanas, o incluso meses (Sedlmeir, 2020).

5.1.2 Comparación con otras tecnologías

Dedicaremos esta sección a revisar estudios que estiman el impacto ambiental de las criptomonedas, comparándolas con tecnologías ya conocidas, como por ejemplo internet o actividades económicas "similares" como la minería tradicional.

Según el artículo de Mora et al. (2018) el bitcoin podría aumentar la temperatura global 2 °C. Llegan a este valor a partir de datos sobre el bitcoin del 2017 y los extrapolan a los años venideros, conservando unos valores de emisiones constantes. Ellos mismos hacen una recopilación del hardware utilizado para minar bitcoin y recogen las emisiones de los países donde se realiza la minería, estiman entonces que el bitcoin en 2017 emitió 69 Mt de CO₂. Extrapolan a partir de la información del World Bank, que dice que cada año se ejecutan a nivel mundial 314,2 mil millones de transacciones y que según Digiconomist en 2017 el bitcoin participó en el 0,033%. Suponen que las energías y los combustibles empleados por la minería de bitcoin permanecerán estables y afirman que el número total de transacciones mundiales es el número total al que debería de llegar el bitcoin.

Con todo esto, para llegar a sus conclusiones finales con los datos recopilados, emplean modelos de sistemas ESM, junto con el CO₂ emitido por la producción del bitcoin, la demanda de electricidad del hardware empleado y el lugar donde se genera la electricidad. Multiplican el número de hash requerido en un bloque por la eficiencia del hardware aleatoriamente escogido de su lista, siempre teniendo en cuenta la dificultad de resolución de cada bloque para calcular cuánto hash han sido necesarios para resolver los bloques. Para reducir la variabilidad de la muestra, repiten los cálculos 1000 veces con todas las elecciones de hardware aleatorio. Encuentran el país donde se minan los bloques buscando las empresas que reclaman cada bloque. Para la estimación del CO₂ emitido por

estos países cogen datos que indican el tipo de combustible empleado para la generación de energía, con esto y los valores estándares de emisión de CO₂ de estos combustibles obtienen un valor que, multiplicado por el consumo eléctrico de cada bloque, según el país donde haya sido resuelto, resulta en el CO₂ emitido por el bitcoin.

La conclusión final, como ya hemos comentado, es que el consumo de energía eléctrica producido por bitcoin hace que las emisiones de CO₂ aumenten y esto se traduzca en una subida de 2 °C en el calentamiento global (Mora et al, 2018). Este último paso lo estiman suponiendo que la tecnología bitcoin evolucionara y se desarrollara, entendiendo desarrollo como la adopción de esta tecnología por la población, con el mismo ritmo o menor que otras tecnologías ya estudiadas. La comparación de la evolución entre varias tecnologías se muestra en la **figura 7**. Se tardaría 22 años en subir esos 2 °C si se tienen en cuenta tecnologías de adopción más lentas como lo fue el lavavajillas, en cambio, se tardarían 11 años teniendo en cuenta tecnologías que tuvieron una adopción más rápida por parte de la población como lo fueron las tarjetas de crédito (Mora et al, 2018). El artículo afirma que la evidencia actual nos dice que el bitcoin ha tenido un crecimiento acelerado y que podría estar más cerca de la tendencia de las tarjetas de crédito o de internet.

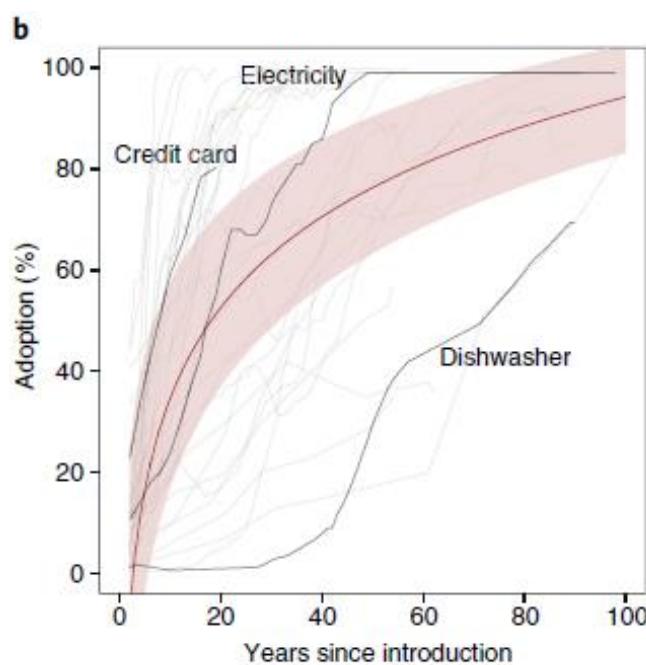


Figura 7 Tendencias en la adopción de tecnologías de uso generalizado. El área sombreada en rojo indica los márgenes de los cuantiles superior e inferior, siendo la línea roja la tendencia media entre las tecnologías. Las líneas grises indican tendencias para cada una de las tecnologías. Nota. De "Bitcoin emissions alone could push global warming above 2 °C," de C. Mora., R. Rollins., K. Taladay., M. Kantar., M. Chock., M. Shimada y E. Franklin, 2018, *Nature Climate Change*, 8, p. 932 (<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0321-8>).

Este artículo tiene muchas limitaciones, posibles errores en las estimaciones y metodologías que creo que no son las más adecuadas, por ello quedará descartado para la agrupación de resultados finales. La lista de hardware es muy inexacta, pues como vemos en otros artículos, el uso de hardware varía mucho con el tiempo, es una tendencia que se use el hardware más avanzado para tener la mayor rentabilidad posible. La lista que ellos forman está compuesta por hardware de todo tipo, es decir, tendrán muestras con hardware que probablemente no se utilicen o se utilicen en muy poco porcentaje comparado con los más modernos u otros.

En Dittmar & Praktiknjo (2019), señalan sobre este artículo que el escenario propuesto es poco probable, pues implicaría triplicar el consumo de energía eléctrica. Llegar a esto sería complicado teniendo en cuenta las limitaciones de las infraestructuras y los precios de la electricidad (Dittmar & Praktiknjo, 2019). Añaden, esto es algo que subrayamos, puesto que lo vemos en otros artículos revisados que tienen más validez, que ni el protocolo actual de bitcoin ni el consumo eléctrico es proporcional a la tasa de transacciones, pero si es proporcional al hash rate o lo que es lo mismo a la cantidad de hash que se calculan por segundo. El hash rate está impulsado por las recompensas que reciben los mineros, la eficiencia del hardware, los precios de la electricidad y el valor de bitcoin, por lo tanto, hacer una metodología solo a partir de los bloques cerrados y de las transacciones realizadas lo consideramos un error.

En Krause & Tolaymat (2018), cogen datos públicos sobre minería y hardware y miden el CO₂ emitido gracias a factores de emisión de los países donde se realiza la minería y las demandas de energía de las redes donde se realizan estas operaciones. Esta metodología identifica diferencias en las emisiones de CO₂ de acuerdo con las combinaciones energéticas nacionales y la cantidad media consumidas para generar una criptomoneda.

Recogen datos desde el 1 de enero del 2016 hasta el 30 de junio del 2018, calculan la energía requerida para la producción de cuatro criptomonedas: Bitcoin, Ethereum, Litecoin y Monero. La finalidad de este estudio es compararlas con la minería tradicional de minerales y metales, más concretamente: aluminio, cobre, oro, platino y metales de tierras raras. Los datos de consumo eléctrico se ven reflejados en la **tabla 6**.

Tabla 6 Consumo medio de energía eléctrica en MJ requerida para producir criptomonedas y minerales por valor de un dólar.

Consumo de energía (MJ/\$)			
Criptomonedas		Minerales	
Bitcoin	17	Aluminio	122
Ethereum	7	Cobre	4
Litecoin	7	Oro	5
Monero	14	Platino	7
		Metales de tierras raras	9

Resultados estimados entre el 1 de enero de 2016 y el 30 de junio del 2018. Nota. Adaptado de “Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies,” de M J. Krause y T. Tolaymat, 2018, 1, p. 711 (<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>).

Cogen estas cuatro criptomonedas porque aseguran que son las más destacadas en ese momento y de las que hay más información disponible. Como vemos en la tabla 6 el aluminio es el único mineral que supera a las criptomonedas en cuanto a consumo de energía eléctrica para producir un valor de mercado equivalente. Tres de estas criptomonedas están aumentando el hash rate y que podrían aumentar el consumo en el futuro, las 4 juntas emiten entre 3 y 15 millones de toneladas de CO₂ (Krause & Tolaymat, 2018).

En 2018 el valor de las criptomonedas bajó, pero el hash rate sigue subiendo, por esto es por lo que no son proporcionales y seguirán subiendo hasta que finalice la producción (Krause & Tolaymat, 2018). Aseguran que en agosto del 2018 se realizaban aproximadamente 50 billones de hash por segundo en la red bitcoin. Los datos sobre el consumo de energía y del combustible de los minerales las cogen de informes de la industria y de análisis de ciclo de vida, sacados de otras literaturas y de organismos competentes.

Los datos referentes a las criptomonedas son datos diarios, cogen los requisitos energéticos diarios, la media de minutos, los bloques completados en ese día, la recompensa que obtienen los mineros de cada bloque completado y el precio de la criptomoneda en dólares. La energía y la potencia por cada criptomoneda la obtienen a partir de multiplicar la eficiencia energética del hardware que ellos consideran que ha sido utilizado. En la **tabla 7** podemos ver que, en 2018, a pesar de que los datos no son del año entero solo hasta el 30 de junio, ya marcan un valor bastante mayor al que se

venía estimando en los años anteriores, por lo tanto, podemos decir que existe un aumento de la demanda de energía eléctrica.

Tabla 7 Potencia final requerida por cuatro criptomonedas.

Potencia (MW)			
Año	2016	2017	2018
Bitcoin	283	948	3441
Ethereum	24	299	1165
Litecoin	3,4	30	330
Monero	4,5	23	97

Medida como MW. Los datos del 2018 son datos de la mitad del año, hasta el 30 de junio. Nota. Adaptado de “Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies,” de M.J. Krause y T. Tolaymat, 2018, 1, p. 715 (<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>).

Realizan también una estimación para 2017, aunque ellos mismos recalcan que no es lo más apropiado. Teniendo en cuenta que bitcoin supone la mitad del valor total de las criptomonedas, asumen que esta será la responsable aproximadamente de la mitad del consumo de todas ellas y que el total resultaría en unos 16,6 billones de kWh por año.

El artículo tiene una serie de limitaciones y diferencias respecto a otros. No incluye costos de sistemas de enfriamiento, sistemas indispensables en cualquier computadora, puesto que se mantienen funcionando las 24 horas del día, tampoco incluyen el mantenimiento del hardware y hay falta de otros datos, algo menos relevantes como los costes de operación, de infraestructuras, mano de obra y residuos electrónicos. Aunque sean datos difíciles de obtener y no son tan relevantes a la hora de analizar los resultados, unas estimaciones reales siguen siendo importantes para este estudio y cualquier otro. Debido a la falta de estos datos, podemos considerar las estimaciones finales de este estudio como resultados a la baja o de límite inferior. Los estudios a los que se adhiere este para sacar los datos de energía consumida por la producción de los minerales, utilizan también la energía invertida para la gestión de residuos, algo que no se tiene en cuenta en el caso de las criptomonedas porque son datos insignificantes (Krause & Tolaymat, 2018) .

La energía consumida por kg de mineral, la consideran estática para el período de tiempo del estudio, argumentan que los cambios en la demanda y los precios de los minerales son insignificantes comparadas a la volatilidad de las criptomonedas. El estudio

proporciona datos de coste de energía necesarios para generar una cantidad equivalente al valor de 1 dólar de distintos metales y criptomonedas. Una buena metodología para calcular la sostenibilidad de las criptomonedas, aunque las limitaciones y la carencia de datos mencionada anteriormente, podría suponer un cambio en los resultados finales. Como conclusiones finales dicen que el consumo de energía eléctrica de tanto Bitcoin como Litecoin van a seguir aumentando, Monero parece bajar por un cambio de código, y prácticas como la de Ethereum de pasar a PoS podría reducir el impacto en un futuro.

5.1.3 Herramientas de cálculo diario

Hoy en día existen dos herramientas para estimar el consumo de energía eléctrica de bitcoin a diario: CBECI (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Energy) de la universidad de Cambridge y el BECI (Bitcoin Electricity Consumption Energy) de Digiconomist, estos últimos también tienen una herramienta para calcular el consumo de la criptomoneda Ethereum (Ethereum Energy Consumption Index).

El BECI propone una nueva variante para la metodología del consumo energético, una variante con perspectiva económica. Apuestan por una metodología con unas bases distintas de las vistas hasta ahora, creen que la falta de información de todo lo relacionado con los dispositivos mineros llevan a los estudios a hacer supuestos desacertados. En la **figura 8** se pueden ver las estimaciones de consumo eléctrico anual medido en TWh desde el 10 de febrero de 2017 hasta la actualidad.

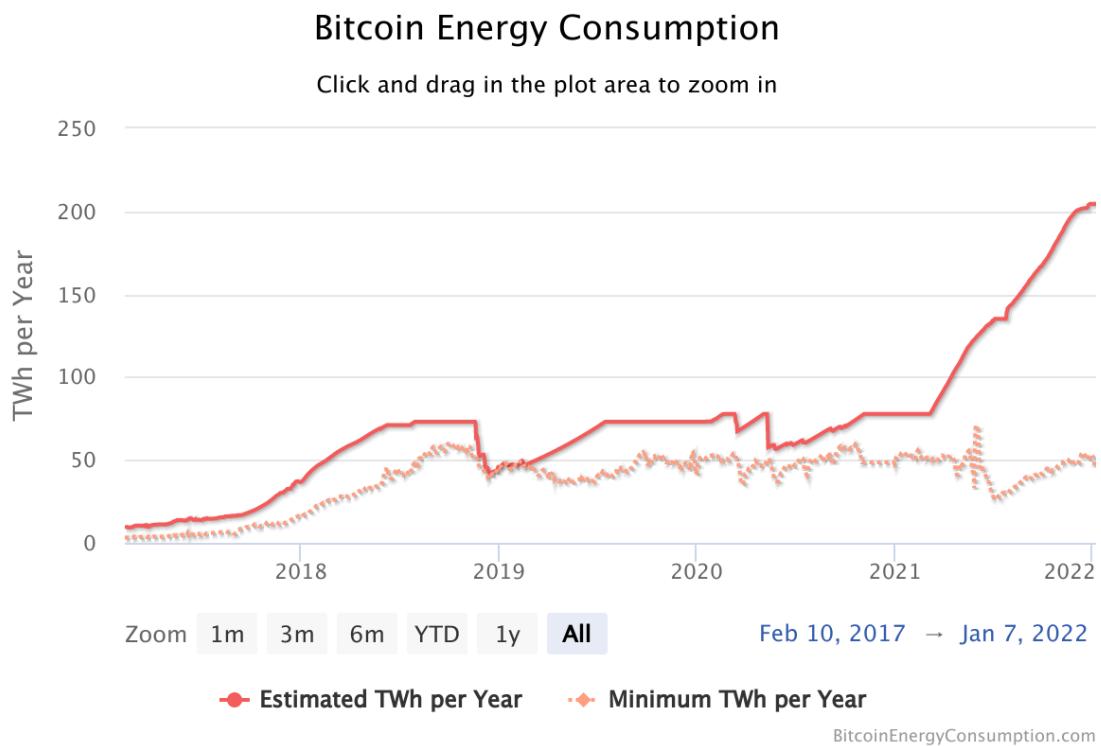


Figura 8 Estimación del consumo eléctrico del bitcoin por el BECI. Unidades en TWh. Desde el 10 de febrero del 2017 hasta el 7 de enero de 2022. Nota. De Digiconomist, (<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/>).

Los datos de consumo eléctrico anuales el 31 de diciembre de 2021 son de 204,5 TWh, equivalen a los de un país como Tailandia. Las emisiones son 97,44 Mt de CO₂, equivalen a la huella de carbono de un país como Kuwait. Los datos de la misma fecha por una sola transacción son, 2197,79 kWh y 1043,95 kg CO₂.

La metodología de este índice se basa en relacionar costes e ingresos de los mineros. Calculan ingresos totales de minería, establecen los porcentajes de los costes eléctricos de la minera incluyendo el coste del hardware y el de los equipos de refrigeración en un promedio de 60% de los ingresos totales por minar y el precio del kWh en 5 centavos de dólar. Gracias a ello tendrán los costes totales que serán convertidos a consumo energético.

Para "Ethereum Energy Consumption Index" siguen los mismos supuestos y métodos, solo cambia el precio del kWh de 5 a 10 centavos, ya que estos ejecutan otro algoritmo de hash que no permite el uso de los dispositivos ASIC, utilizan gráficas GPU. Bitcoin y Ethereum juntos ocuparían el puesto número 12 en la lista de países que más electricidad consume del mundo, según el BECI. Ethereum, en principio, ya está en procesos de cambio de PoW a PoS, de momento siguen produciendo a base de PoW. El

problema de este índice es que se hace el análisis de un día concreto y se extrae hacia delante, pero el precio del bitcoin es muy volátil y, por tanto, el porcentaje de los costes variará.

El CBECI elige una metodología basada en el umbral de la rentabilidad de diferentes tipos de equipos mineros como punto de partida, a partir del cual calculan el límite inferior, el superior y la estimación final. La estimación final está entre el límite inferior y el superior, más aproximada al caso real. En la **figura 9** se pueden ver las estimaciones de consumo eléctrico anual medido en TWh desde el 1 de julio de 2010 hasta el 31 de diciembre de 2021.

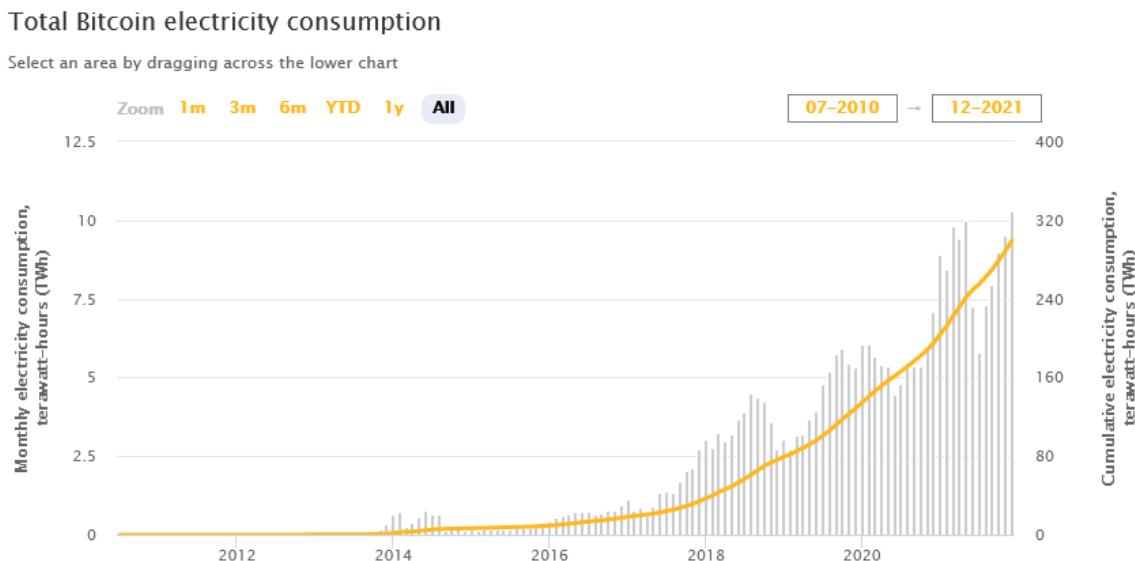


Figura 9 Estimación del consumo eléctrico del bitcoin por el CBECI. Ponecia en TWh. Desde el 1 de julio del 2010 hasta el 31 de diciembre del 2021. Nota. De The Cambridge Centre for Alternative Finance, 2019 (<https://ccaf.io/cbeci/index>).

El consumo eléctrico anual el 31 de diciembre de 2021 fue 13,4 GW. El límite inferior tiene siempre la misma limitación como ocurre en otros estudios, el mejor hardware no puede llegar a todo el mundo, además tarda un tiempo significativo entre salir al mercado y ser instalado. No solo eso, sino que también como ya hemos comentado, existen generaciones desfasadas que continúan siendo rentables en lugares donde las energías sean más baratas o momentos en los que suba el precio del bitcoin. El límite superior está algo lejano a la realidad, aunque se aproveche hardware de otras generaciones, los mineros siempre querrán los más nuevos, que son los que le darán más

beneficios. La estimación final es la más aproximada y en la que se hacen las suposiciones más lógicas. Los mineros hacen combinaciones de diversos tipos de hardware que siguen siendo rentables (CCFA, 2019). Suponen que todos estos dispositivos se distribuyen de igual modo entre todos los mineros, con las limitaciones que esto conlleva, todos los mineros nunca tendrán la misma cantidad de los mismos dispositivos, pero los resultados obtenidos con estas suposiciones son acertados.

5.1.4 Comparación de los resultados

A continuación, se muestra una comparativa entre los diferentes estudios revisados que tratan sobre bitcoin. La **tabla 8** recopila todas las estimaciones finales del consumo eléctrico llevado por bitcoin.

Tabla 8 Estimaciones finales del consumo eléctrico de los estudios revisados sobre el bitcoin.

Estudio	Año de la estimación						
	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Krause (A)		283	948	3441			
Dwyer and Malone	100-10000						
Vranken (B)			100-500				
Köhler and Pizzol				3572			
Stoll (C)		345	1637	5232			
De Vries (D)				2550	9943		
Gallersdöfer (E)						4290	
McCook	115						
CBECI (F)			2640	4120	7530	9560	12330

Resultados finales representados como potencia demandada en MW, tasa a la que los mineros usan la electricidad. (A) La estimación de 2018 sólo corresponde al promedio de los seis primeros meses. (B) Estimación hecha a partir del 1 de enero. (C) 2016 estimación hecha a partir de diciembre, 2017 estimación hecha a partir de diciembre y en 2018 estimación hecha a partir de noviembre. (D) La estimación de 2018 hecha el 30 de septiembre (E) Estimación hecha el 1 de mayo. (F) Todas las estimaciones para el 1 de diciembre.

La **tabla 8** muestra una amplia gama de resultados, algunos más dispares, otros más parecidos, cada uno resultante de una metodología y unas pautas concretas. Con el tiempo, las metodologías se han ido puliendo, aun con eso las estimaciones son

mejorables. Como ya hemos ido avisando la falta de información ha llevado a los diferentes estudios a realizar suposiciones para poder llegar a unas conclusiones finales, en algunos casos estas consideraciones hechas son demasiado simples y conllevan posibles sobreestimaciones y subestimaciones. Aun con esto podemos ver que el consumo tiende a crecer.

La mayoría de estudios se hacen a partir del hash rate y de la eficiencia de los dispositivos en funcionamiento. Para partir de estos puntos se necesita información de las ventas por parte de las distribuidoras. Además, también existen otras limitaciones lógicas, como puede ser el tiempo que pasa entre la compra de un dispositivo y su instalación o que algunos de estos dispositivos pueden estar parte de su vida útil fuera de servicio por reparaciones u otros motivos. De momento se sabe poco sobre el grado en que los mineros manipulan sus dispositivos. Para tener estimaciones más cercanas a la realidad también necesitaríamos datos proporcionados directamente por parte de las granjas mineras.

5.2 Energías empleadas

El impacto ambiental de las criptomonedas depende directamente de la fuente de energía primaria utilizada para generarlas. Algunos estudios descuidan este punto, pero es una parte clave saber cuán sostenible es la energía consumida. Por esto, saber la ubicación de los mineros y las granjas, es fundamental para determinar la cantidad de energía renovable usada para minar criptomonedas. En este apartado revisaremos aquellos estudios que a la hora de estimar los consumos de energía de las criptomonedas realizan también una búsqueda de los tipos y la cantidad de energías renovables empleadas.

En el estudio de Vries (2019), se trabaja este tema de las ubicaciones y porcentajes de energía renovable aprovechada por los mineros. No saben los datos exactos del consumo de la minería de bitcoin, porque no existe información exacta de cuantos dispositivos están en funcionamiento. Entonces estiman que a partir de la potencia computacional de la red calculada por la herramienta de Digiconomist, que en 2018 como mínimo el consumo estaba en 40 TWh, equivalente al consumo que tiene Hungría y que como mucho estaría en 62,3 TWh, equivalente al consumo de Suiza.

Critican el argumento de que el impacto ambiental será limitado, debido a la producción finita de bitcoin. La obtención de recompensas o la probabilidad de obtenerlas es más baja cuanto más mineros existan y no hay un límite de mineros que puedan entrar a competir por cerrar bloques. Aunque el bitcoin sea finito, una vez se haya terminado seguirán existiendo las tarifas de transacción que serán los incentivos para seguir con la actividad del cierre de bloques (de Vries, 2019).

Por estos motivos es importante poner el punto de mira en el hardware más eficiente energéticamente hablando y aquellos sitios que dispongan de energías renovables. El objetivo de los mineros es buscar el hardware puntero más rentable, con los que poder cerrar bloques antes que los otros mineros y con los que saquen el mayor beneficio posible. Por eso también tienen muy presente los sitios donde la energía sea más barata, independientemente de que sean renovables o no, puesto que es un factor clave para su propio beneficio (de Vries 2019). Según este artículo, el 48% de la minería mundial se encuentra en Sichuan China, sustentada sobre todo con energía hidroeléctrica de la que disponen de sobra, esto atrae a las compañías mineras. La energía hidroeléctrica

está sujeta a la estacionalidad, es decir, su producción varía en función de la época del año en la que se encuentren (de Vries 2019). Las temporadas bajas se sustentan mayoritariamente con la energía del carbón. Sichuan emite entre 265 y 579 g de CO₂/kWh, que es un resultado más cercano al emitido por la energía eléctrica de gas natural, que son 469 d de CO₂ /kWh que, a la emitida por la hidroeléctrica, 4 g de CO₂/kWh. La estacionalidad de las hidroeléctricas los lleva a construir centrales de carbón para paliar las temporadas bajas, las más calurosas y secas (de Vries 2019).

Otro estudio que trata el tema de las energías empleadas para la producción de las criptomonedas es el de Blandin, et al., (2020). Encontraron en algunas fuentes de datos y encuestas para el año 2018, que la participación de las renovables era del 76%, más tarde confirmaron que este porcentaje representaba una mezcla de energías, ya que las renovables se sustentan con otras energías, normalmente de combustibles fósiles. La verdadera participación total de las renovables de las fuentes consultadas era de un 39%. Según los mineros encuestados, sus operaciones mineras funcionan como en la **figura 10**.

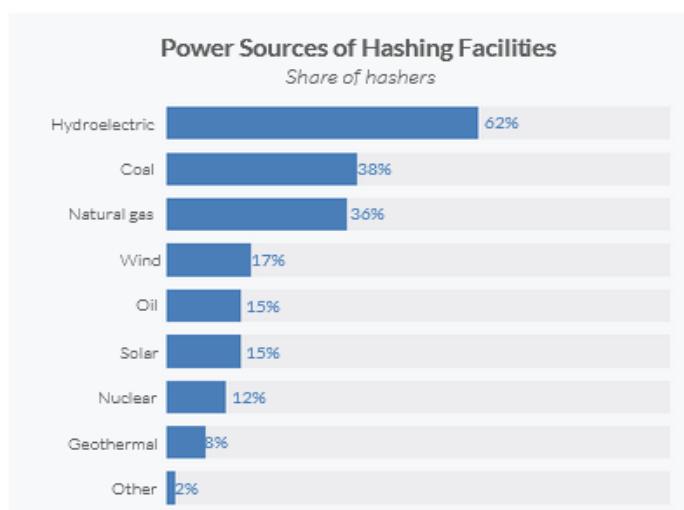


Figura 10 Porcentaje del tipo de energía empleada para minar criptomonedas. Datos aportados por un grupo de mineros. Nota. De 2020 CCAF 3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study, por Blandin, et al., 2020, p. 27 (<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3700822>).

Gracias al mapa interactivo de la distribución geográfica de la potencia de hash de bitcoin de CBECI y la combinación con datos de encuestas a mineros pudieron elaborar los porcentajes de la **figura 11**, donde podemos ver que el porcentaje total de renovables establecido por el CBECI es 29 %.

Region	Regional average share of renewables	Regional share of Bitcoin hashpower	Regional weighted share of renewables in Bitcoin mining
Asia-Pacific	26%	77%	20%
Europe	30%	10%	3%
Latin America and the Caribbean	20%	1%	0%
Middle East and Africa	NA	4%	NA
North America	63%	8%	5%
Global		100%	29%

Figura 11 Participación agregada de energías renovables en las fuentes de energía minera del bitcoin. Nota. De 2020 CCAF 3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study, por Blandin, et al., 2020, p. 28 (<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3700822>).

Estos datos se han tomado desde septiembre de 2019 hasta abril de 2020 y fueron proporcionados por tres de las mayores empresas y granjas mineras, que representan el 37% del hash rate total. Están lejos de tener datos del 100% de los mineros, pero podrían ser buenas estimaciones.

Aunque se estima que China acoge a la mayor parte de la red minera de bitcoin, reguladores en la región de Mongolia Interior y otras provincias de China ya se han movido para prohibir la minería de bitcoin por supuestas preocupaciones ambientales (Blandin et al, 2020). La energía renovable es intermitente y los mineros de bitcoin necesitan una fuente de energía activa permanentemente, con el que los mineros han optado por las energías basadas en combustibles fósiles.

La ubicación es un tema a tratar, pues es muy importante de cara al impacto ambiental. Los mineros o las granjas mineras tienden a moverse allá donde les salga más rentable, aquí entran renovables como las hidroeléctricas de Sichuan pero también las de carbón en Mongolia (Blandin et al, 2020).

5.3 Otros impactos ambientales

Cuando se quiere estimar el impacto ambiental en emisiones de CO₂ no solo influye el consumo de energía, aparte de la minería existen otros procesos relacionados que producen CO₂, aunque no sean de las mismas dimensiones y se traten en pocos artículos, podrían ser importantes y significativos para introducirlos en la conversación. Como ya sabemos, para producir criptomonedas se necesita una gran cantidad de potencia computacional, esto significa que se utilizarán muchos dispositivos que funcionarán las 24 horas del día. Llegará un momento en el que dejen de hacer su función, se queden obsoletos y se conviertan en desechos, es decir, en residuos electrónicos.

La producción de hardware se ha vuelto un círculo que se va alimentando y haciendo mayor, cuanto más valor y más popular es bitcoin o las criptomonedas en general, más empresas se quieren meter el mundo de la minería. Esto provoca que el proceso de hacer y cerrar un bloque sea más difícil y requiera más energía para resolverse con el que se vuelve una actividad que da menos beneficios. Es una oportunidad para que las empresas que venden hardware aprovechen para vender nuevo hardware más eficiente para que la minería pueda salir rentable. Será rentable cuando las recompensas obtenidas por bloque sean mayores al gasto de energía eléctrica y los costes de los nuevos equipos. Consecuentemente, el hardware más antiguo queda obsoleto, otros mineros tendrán nuevos dispositivos más rápidos que los antiguos, esto supondría la realización de un menor número de bloques y menos ingresos para aquellos que no renueven su sistema computacional. Este hardware anticuado pasará a ser un desecho electrónico.

En el estudio de Vries (2019), del que ya hemos hablado, también se trabaja la problemática de los desechos electrónicos. Cuando los dispositivos llegan al final de su vida útil, se convierten en residuos, establecen esta vida útil en 1,5 años. Obtiene los datos de cantidad de dispositivos a partir de la potencia computacional. Estiman que en octubre de 2018 hubo 3,91 millones de máquinas Antminer S9 con un rendimiento de 57,7 exahashes/s y se produjeron 16442 toneladas, en diciembre el rendimiento fue de 19,9 exahashes/s y se produjeron 5973 toneladas. Por tanto, anualmente son 10948 toneladas de residuos electrónicos, equivalen a los de un país como Luxemburgo. Estos residuos anuales equivalen a emitir 134 g de CO₂ por transacción. No existen datos reales de la cantidad de desechos electrónicos provocados por VISA, pero

ellos estiman a partir de saber que disponen de dos sedes que generan 560 toneladas, emiten unos 0,0045 g de CO₂ por transacción. Vemos que, la diferencia entre el CO₂ emitido por las transacciones de dinero convencional y las hechas por las de criptomonedas es abismal (Vries, 2019).

de Vries & Stoll (2021), trata exclusivamente del tema y es más actual que el anterior, utilizan una metodología para estimar los residuos electrónicos generados por el hardware empleado para la minería del Bitcoin. Durante 2021 se producen 30 kt de residuos globales y esperan que aumente en un 70% de aquí a 2050. Años atrás empresas como Bitmain, especializada en hardware para minar Bitcoin, que producían el 76% del hardware distribuido, se encargaba de dar datos de sus ventas Vries & Stoll (2021) ahora ya no lo hacen, lo cual no favorece a los estudios sobre el tema. La existencia de instalaciones ilegales podría suponer sesgos en las muestras Vries & Stoll (2021). Estos emplean datos públicos para sus estimaciones, datos de consumo de Digiconomist donde en 2021 los mineros consumían 117 TWh anuales y datos para estimar la cantidad de hardware activo. Según el artículo, "China ha albergado históricamente a la mayor parte de la red Bitcoin, pero formalmente recolecta solo el 16% de todos los desechos electrónicos generados."

Como en el anterior artículo mencionado, estos establecen la vida útil de los dispositivos en 1,5 años a partir de información de terceros, se ayuda en sus estimaciones a partir de especificaciones públicas del producto en las que se ilustra tanto la potencia computacional como la eficiencia energética y peso del equipo. Para saber cuándo deja de ser rentable un dispositivo deben saber la potencia computacional estimada de toda la red bitcoin, además de la cantidad de criptomonedas extraídas por día, incluyendo las tarifas de transacción y los costes de energía asociados con la minería. Serán 5 centavos por kWh, dato sacado del CBECI que es común en otros artículos y estudios como el BECI, a partir de ahí obtienen un valor de eficiencia energética, cuando la eficiencia de un dispositivo esté por debajo de ese valor dejará de ser rentable y en ese momento se convertirá en un residuo. En la **figura 12** podemos ver la vida útil de los ASIC lanzados entre 2014 y 2021, de donde sacan una vida útil media de 1,29 años.

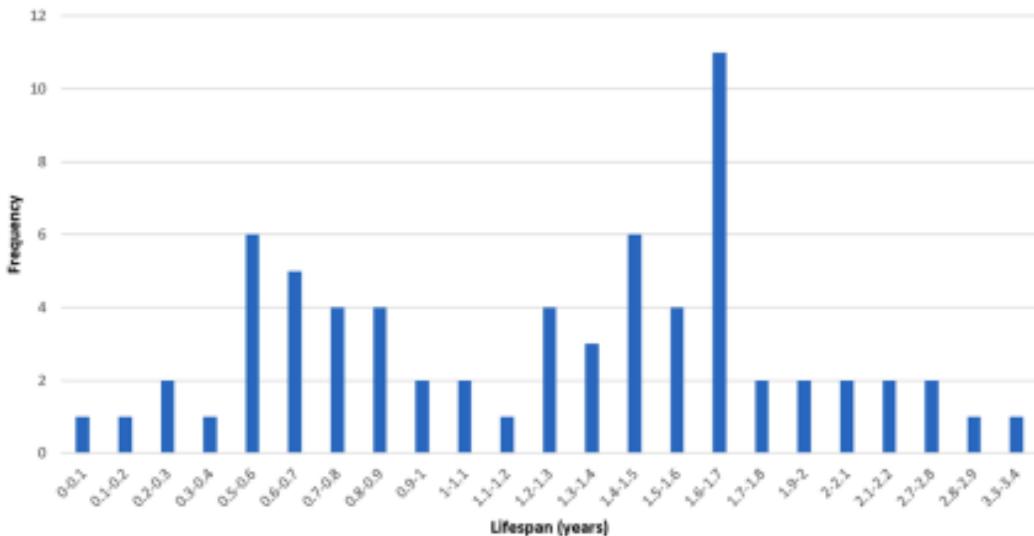


Figura 12 Vida útil de los dispositivos ASIC lanzados entre 2014 y 2021. Nota. De “Bitcoin’s growing e-waste problem,” de A. de Vries y C. Stoll, 2021, *Resources, Conservation and Recycling*, 175, p. 5 (<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>).

Teniendo en cuenta solo el hardware más utilizado, el Atminer S9 que tiene un rendimiento de 0,098 J/GH, estiman que el peso de total es de 21,54 kt, que son 1,5 millones de dispositivos. En 2021, con la combinación de distintos dispositivos activos y la vida útil de 1,5 años, se generan 39,75 kt de hardware que son 2,9 millones de dispositivos. Cuando cambian la vida útil a 1,29 años se generan 30,7 kt lo que equivale a los residuos generados en un año por Holanda y que se traduce en 272 g de residuos por transacción.

El estudio tiene varias limitaciones, por ejemplo, ellos consideran que la vida útil de un dispositivo termina cuando ya no es rentable, pero los mineros no tienen por qué deshacerse de ellos. El precio del bitcoin es muy volátil y podría llegar el día en el que los dispositivos vuelvan a ser beneficiosos, aunque guardarlos no suele ser una práctica común, ya que las nuevas generaciones siempre serán más beneficiosas y te supondría un coste adicional de almacenamiento. Establecen la tasa de electricidad en 5 centavos de dólar el kWh, un dato que variaría dependiendo de la región del mundo donde se encuentre cada minero. Aseguran que no es un punto que cambiaría mucho los resultados y las conclusiones finales, puesto que la mayoría de mineros se encuentran en el mismo sitio, aunque no deja de ser una limitación. Existe un problema que ya hemos comentado y es el comienzo de la vida útil. Esta la cuentan desde la fecha de lanzamiento, no de la instalación, además no tienen datos de otros desechos electrónicos utilizados en el ámbito de la minería de criptomonedas como los equipos de enfriamiento, las luces, cables...

La producción masiva de este tipo de hardware requiere muchos materiales necesarios para su producción como son los chips, estos están causando desabastecimiento y provocando la subida de precios de otros productos que también los necesitan. Podemos decir entonces que es un tema a destacar en cuanto a huella de carbono y que podría serlo más de cara al futuro, con el crecimiento que están teniendo anualmente podría llegar hasta las 64,35 kt de residuos al año a medio plazo.

5.4 Dinero convencional

Como hemos visto en los artículos y estudios ya revisados en apartados anteriores, es muy típico comparar la potencia eléctrica demandada por las criptomonedas, o por bitcoin, en la mayoría de casos, con el consumo de un país. Darle un sitio al bitcoin en la lista de países y su consumo eléctrico ayuda a tener contexto sobre la magnitud del impacto ambiental que pueden llevar a cabo las criptomonedas. Aunque quizás sea más preciso compararlo con un sistema que se dedica también a las transacciones como es el sistema bancario y con las monedas convencionales, ya que algunas criptomonedas ofrecen servicios similares y pueden llegar a ser una alternativa a estos sistemas.

El BECI compara las criptomonedas con VISA, una empresa que se encarga de realizar transacciones. VISA consume alrededor de 74 mil GJ, en 2019 registraron 138,3 mil millones de transacciones. Podemos decir que el consumo de VISA es mucho menor por transacción que el consumo de bitcoin, de hecho, las transacciones de VISA podrían ser realizadas gracias a la energía consumida por una sola transacción de bitcoin en promedio (Digiconomist, s.f.). La diferencia de huella de carbono entre estas dos, es aún mayor, la transacción de VISA emite 0,4 g CO₂, la emitida por bitcoin es de, 1045,95 kg CO₂ por transacción. Existe un límite por parte de las transacciones de bitcoin que se pueden ejecutar en un segundo, con este límite en el mejor de los casos se podrían llegar a los 220 millones de transacciones por año. El sistema financiero global llega a realizar alrededor de 700 mil millones de pagos digitales. Con las políticas actuales de bitcoin nunca podrían ser sustitutivas de las monedas convencionales, eso sí, para consumir electricidad no tienen límite. El artículo hace una comparación con Hungría, el bitcoin consume más energía que este país, pero no podría soportar las transacciones que se llevan a cabo en él (Digiconomist, s.f.).

El problema de compararlo con VISA o las transacciones globales es que solo comparas transacciones, cuando en la misma operación de una transacción minera de PoW también se están produciendo nuevas criptomonedas. Se debería comparar también con la imprenta y la acuñación de las monedas convencionales. Esto es lo que hace el siguiente estudio de McCook (2014). La **tabla 9** muestra sus estimaciones finales de consumo energético y la huella de carbono.

Tabla 9 Comparación de potencia demandada y de huella de carbono entre criptomonedas y las monedas convencionales.

	Potencia demandada (MW)	Huella de carbono (millones de CO2)
Producción de moneda convencional	1256	6,7
Sistema bancario	74201	390
Minería Bitcoin	115	0,6

Nota. Adaptado de “An Order-of-Magnitude Estimate of the Relative Sustainability of the Bitcoin Network,” de H. McCook, 2014, p. 29 (https://bitcoin.fr/public/divers/docs/Estimation_de_la_durablete_et_du_cout_du_reseau_Bitcoin.pdf).

Los resultados de consumo del bitcoin los obtiene gracias a las eficiencias conocidas del hardware de 2014 y el hash rate del mismo año. Para realizar los cálculos de consumo de producción de moneda convencional solo toma datos del euro, el dólar y el yen. Con estos resultados finales la conclusión está clara, las monedas convencionales consumen muchísima más energía que las criptomonedas (McCook, 2014), pero este estudio tiene unos errores importantes. La comparación entre el sistema bancario y las criptomonedas que se hace en este estudio no es la adecuada, maneja dos variables que no son proporcionales. Para calcular el consumo de la industria financiera abarca de todo: sector de seguros, transporte de empleados, residuos, construcción de edificios... Además, tienen en cuenta las infraestructuras para el sistema bancario, como son los cajeros automáticos o las sucursales, sin embargo, no se consideran para bitcoin, aunque se sabe que existen cajeros automáticos de bitcoin y webs que sirven para proporcionar servicios de intercambio. Por último, hacen una gran extrapolación de datos, la información sobre el sistema financiero es obtenida por sucursales concretas de un solo banco.

Es evidente que la industria bancaria consume grandes cantidades de energía, que deberían revisarse para la reducción de su impacto ambiental, pero con un estudio desactualizado y con estas imprecisiones no podemos sacar conclusiones de si las criptomonedas son una posible solución para la sostenibilidad de esta industria. La literatura científica con el objetivo de comparar el consumo de las criptomonedas con el del sistema bancario y la producción de las monedas convencionales es muy imprecisa y prácticamente inexistente.

6. Discusión

El hash rate y la eficiencia energética de los dispositivos usados en la minería de las criptomonedas tienen una correlación causal directa con el consumo eléctrico generado por la producción de estas. Algunos de los estudios revisados más actuales han desarrollado metodologías precisas a pesar de tener varias limitaciones. La información sobre el hash rate y sobre el hardware empleado es clave para conseguir metodologías y estimaciones más sólidas. Para ayudar a que estudios futuros estimen un valor de consumo eléctrico y de huella de carbono más cercano a la realidad, es imprescindible transparencia y veracidad por parte de la mayoría de mineros y de las granjas mineras.

Durante todo el trabajo se han revisado artículos que tratan sobre criptomonedas que se basan en el mecanismo de consenso PoW. El funcionamiento de este mecanismo es el principal causante de las grandes cantidades de consumo eléctrico, una posible solución a esto sería cambiar de mecanismo de consenso, como por ejemplo a PoS. PoS es una alternativa que consiste en escoger a los mineros para cerrar bloques en función de la cantidad de criptomoneda invertida/depositada por estos. Este mecanismo ya está existente en otras criptomonedas, implementarlo supondría un ligero cambio en alguna de las principales propiedades por las cuales se conocen la mayoría de criptomonedas. Lo más relevante es que supondría una reducción de mineros para la validación de transacciones y la producción de criptomonedas y, por lo tanto, se reduciría la huella de carbono.

Uno de los objetivos de bitcoin y de algunas criptomonedas es que sea la divisa con la que hacemos todos nuestros intercambios, un sistema que desbanque al dinero convencional y al sistema bancario. La literatura sobre la comparativa del impacto ambiental que tienen estos dos sistemas es escasa y prácticamente inexistente. Los estudios vistos sobre este tema tienen ciertas lagunas, pues el sistema bancario no es demasiado transparente con sus datos de consumo. La comparativa es complicada de hacer, ya que el sistema bancario ofrece muchos más servicios que cualquier criptomoneda. Creemos que no es equiparable un sistema que da servicio a una cantidad de personas mucho mayor, además de ofrecer otros servicios distintos como préstamos o hipotecas. Para posibles futuros estudios se necesita información fiable por parte de los bancos y consensuar que servicios de los que ofrece el sistema bancario son comparables a los que ofrece una criptomoneda.

7. Conclusiones

En la actualidad la crisis climática es un asunto acuciante, el objetivo mundial es que para 2050 se reduzcan todas las emisiones de CO₂ al mínimo. A través de los resultados obtenidos sabemos que las criptomonedas, y en concreto el bitcoin, consumen grandes cantidades de energía eléctrica. Es complicado medir con exactitud el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂, y entender lo verdaderamente peligrosas que pueden ser para la sostenibilidad ambiental, a pesar de que existen instrumentos capaces de mostrar una estimación aproximada, pero podemos decir que el impacto que tiene el proceso minero sobre el medioambiente es evidente. A continuación, presentamos los puntos en los que concluimos.

- El proceso de minería definido por el PoW es la responsable de las grandes cantidades de energía consumida, aunque la suma del consumo de todas aquellas criptomonedas que usan PoW aumentarían las estimaciones finales, creemos que mostrar las estimaciones de la minería de bitcoin es suficiente para hacerse una idea del impacto global que tienen. Aun con todo esto, para tener unas evidencias más sólidas se debería añadir estimaciones sobre el consumo de ethereum, la segunda criptomoneda más importante y otras de las más grandes que utilicen PoW, porque supondría una subida considerable, podrían doblar las estimaciones finales.
- Como hemos visto en el apartado 5.1.4, el consumo ha ido creciendo con el paso de los años, desde el 2017 hasta el 2021 la subida ha sido muy elevada. Las estimaciones del consumo eléctrico de los estudios más actuales nos dicen que el bitcoin entre 2020 y 2021 consumía alrededor de 70 y 190 TWh muy a semejantes al consumo de Chile (75 TWh) y de Tailandia (190 TWh).
- La huella de carbono emitida por el bitcoin en 2021 ronda los 80-100 Mt de CO₂, parecidas a las emisiones de Catar (99 Mt).
- El crecimiento de las criptomonedas ha sido acelerado durante los últimos años, semejándose a otras tecnologías como la electricidad. En general, él minando de

criptomonedas consume mucha más energía que el minado tradicional de minerales. Una transacción de una criptomoneda emite bastante más cantidad de CO₂ (1045,95 kg) que una transacción realizada por una tarjeta de crédito de VISA (0,4 g).

- Los residuos electrónicos son otro tipo de impacto ambiental provocado por la minería de las criptomonedas. Este es un tema poco estudiado y que podemos considerar menos relevante debido a que en comparación con la principal problemática el impacto provocado por los residuos es bastante menos, aun con eso las estimaciones más actuales encontradas nos dicen que los residuos generados por el bitcoin son parejos a las generadas por Holanda.
- El incentivo al uso de las energías renovables podría llegar a ser un pequeño parche que ayude a reducir la huella de carbono causada por del consumo eléctrico. Los porcentajes de energía renovables empleada para minar son complicados de conocer con exactitud, por el momento podemos decir que la cifra más fiable es la de alrededor del 29% de fuentes renovales aprovechadas por la minería bitcoin.
- Comparado con el sistema bancario en su totalidad, las criptomonedas afectan al medioambiente en mucha menor medida, no obstante, estas últimas no ofrecen servicios a la misma cantidad de gente y tampoco ofrece los mismos servicios.
- La solución más efectiva para hacer de las criptomonedas una tecnología los más limpia y menos dañina posible para la sostenibilidad ambiental, sería ejecutar un cambio de proceso minero, un cambio del método de consenso PoW. El más sonado para suplir el puesto es el método de consenso conocido como PoS.

8. Bibliografía

Bibliografía en formato APA.

Banco Central Europeo. (febrero 13, 2018). ¿Qué es el bitcóin? Recuperado el 20 de octubre de 2021 de <https://www.ecb.europa.eu/ecb/educational/explainers/tell-me/html/what-is-bitcoin.es.html>

Banco de España. (febrero 8, 2018). Las criptomonedas o monedas virtuales.

Recuperado el 19 de octubre de 2021 de
https://clientebanco.bde.es/pcb/es/menu-horizontal/podemosayudarte/temas-interes/Las_criptomoned_ba71ad627517161.html

Berensten, A. & Schär, F. (2018). A Short Introduction to the World of Cryptocurrencies. Federal Reserve Bank of St. Louis Review, First Quarter 2018, 100(1), 1-16. <https://doi.org/10.20955/r.2018.1-16>

Blandin. A., Pieters, G., Wu, Y., Dek, A., Eisermann, T., Njoki, D. & Taylor, S. (2020). 2020 CCAF 3rd Global Cryptoasset Benchmarking Study. (pp. 21-30). SSRN Electronic Journal. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3700822>

Blockchain.info. (s.f.). Recuperado el 23 de noviembre de 2021 de
<https://www.blockchain.com/charts/hash-rate>

CoinDesk. (s.f.). Recuperado el 23 de junio de 2022 de
<https://www.coindesk.com/price/bitcoin/>

CoinMarketCap. (s.f.). Recuperado el 23 de junio de 2022 de <https://coinmarketcap.com>

Darlington, N. (noviembre 25, 2020). WhaBlockchian For Beginners: What is Blockchain Tecnology? A Step-by-Step Guide. Blockgeeks. Recuperado el 29 de octubre de 2021 de <https://blockgeeks.com/guides/what-is-blockchain-technology/>

de Vries, A. (2018). Bitcoin's Growing Energy Problem. Joule, 5(2), 801-805.

<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), 893-898. <https://doi.org/10.1016/j.joulr.2019.02.007>

de Vries, A. (2020). Bitcoin's energy consumption is underestimated: A market dynamics approach. Energy Research & Social Science, 70, 101721.

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101721>

de Vries, A. & Stoll, C. (2021). Bitcoin's growing e-waste problem. Resources, Conservation and Recycling, 175, 105901.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>

Digiconomist. (s.f.). Bitcoin Energy Consumption Index. Recuperado el 3 de enero de 2022 de <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption/>

Dittmar, L. & Praktiknjo, A. (2019). Could Bitcoin emissions push global warming above 2 °C?. Nature Climate Change, 9, 656-657.

<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0534-5>

Dourado, E. & Brito, J. (2014). Cryptocurrency. *The New Palgrave Dictionary of Economics*, 1-9.

https://www.researchgate.net/publication/298792075_Cryptocurrency

Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Christian, S. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. Joule, 4(9), 1843-1846.

[https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013.](https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013)

Islam, s. M. Azharul. (2020). Implications of Cryptocurrency for the World.

https://www.researchgate.net/publication/338594733_Implications_of_Cryptocurrency_for_the_World

Köhler, S. & Pizzol, M. (2019). Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining. Environmental Science & Technology, 53, 13598-13606.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05687>

Krause, M. & Tolaymat, T. (2018). Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. Nature Sustainability, 1, 711-718.
<https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7>

Li, J., Li, N., Cui, H., Wu, Z. & Peng, J. (2018). Energy consumption of cryptocurrency mining: A study of electricity consumption in mining cryptocurrencies. Energy, 168, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.046>

Martín, A. (agosto 19, 2021). La escasez de gráficas y chips de extenderá a 2022, según Nvidia. Hipertextual. Recuperado el 25 de octubre de 2021 de <https://hipertextual.com/2021/08/nvidia-la-escasez-de-graficas>

McCook, H. (2015). An Order-of-Magnitude Estimate of the Relatice Sustainability of the Bitcoin Network.
https://bitcoin.fr/public/divers/docs/Estimation_de_la_durabilite_et_du_cout_du_reseau_Bitcoin.pdf.

Mora, C., Rollins, R., Taladay, K., Kantar, M., Chock, M., Shimada, M. & Franklin, E. (2018). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2 °C. Nature Climate Change, 8, 931-933. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0321-8>

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.
<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

O'Dwyer, K.J.. & Malone, D. (2014). Bitcoin Mining and its Energy Footprint. 280-285. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0699>

Pastor, J. (mayo 17, 2021). Bitcoin cae en picado, y una vez más el motivo son los comentarios de Elon Musk. Xataka. Recuperado el 25 de octubre de 2021 de

<https://www.xataka.com/criptomonedas/bitcoin-cae-picado-vez-motivo-comentarios-elon-musk>

Pernice, I & Scott, B. (2021). Cryptocurrency. Internet Policy Review, 10(2).

<10.14763/2021.2.1561>

Rosic, A. (noviembre 25, 2020). What is cryptocurrency? Everything you need to know!. Blockgeeks. Recuperado el 26 de octubre de 2021 de
https://blockgeeks.com/guides/what-is-cryptocurrency/#What_is_cryptocurrency

Rosic, A. (junio 19, 2020). Proof of Work vs Proof of Stake: Basic Mining Guide. Blockgeeks. Recuperado el 26 de octubre de 2021 de
<https://blockgeeks.com/guides/proof-of-work-vs-proof-of-stake/>

Sánchez, Á. (agosto 17, 2021). Poly Network: el extraño caso del mayor robo de criptomonedas de la historia. El PAÍS. Recuperado el 24 de octubre de 2021 de
<https://elpais.com/economia/2021-08-17/poly-network-el-extrano-caso-del-mayor-robo-de-criptomonedas-de-la-historia.html>

Sedlmeir, J., Buhl, H.U., Fridgen, G. y Keller, R., 2020. The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. Business and Information Systems Engineering, 62, 6, 599-608. ISSN 18670202. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>.

Stoll, C., Klaassen, L. & Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. Joule, 3(7), 1647-1661. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>

The Cambridge Centre for Alternative Finance. (julio 2, 2019). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption. Recuperado el 25 de diciembre de 2021 de
<https://ccaf.io/cbeci/index>

Vranken, H. (2017). Sustainability of bitcoin and blockchains. Current Opinion in Environmental Sustainability, 28, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.04.011>