

Breve análisis de la concentración de la potencia de minado en Bitcoin

Luis Llases¹

Fecha de recepción: 3 de marzo de 2022/ fecha de aceptación: 14 de marzo de 2022

Resumen: Bitcoin es una red informática descentralizada que permite el envío de valor entre sus usuarios. Para ello se utiliza una unidad de cuenta intercambiable y fraccionable denominada bitcoin. La característica principal de este sistema es que no necesita de una unidad central que lo administre, funciona mediante un sistema de incentivos que asegura que una serie de usuarios denominados mineros actúen de tal manera que las transacciones puedan realizarse de forma segura. Básicamente, estos mineros compiten entre ellos por añadir nuevas transacciones al libro contable, para lo que deben resolver un problema matemático establecido por el sistema. Para hacerlo deben consumir una serie de recursos (hardware informático, electricidad, etc.) con los que generan una potencia de procesamiento con que resolver el problema matemático. Como pago por el gasto que realizan los mineros reciben una recompensa en forma de nuevos bitcoins minados y de comisiones de los usuarios.

Es condición necesaria para que la red sea segura el que la actividad minera permanezca descentralizada. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un aumento de la concentración de la potencia de procesamiento. Dada la importancia de esta cuestión para la criptomoneda, este trabajo ha tratado de entender cuáles han sido las razones de la concentración y si pueden considerarse como tendencias que seguirán operando a largo plazo. El trabajo concluye que la reducción de las recompensas de los mineros y las economías de escala han sido las principales causantes de la concentración y que al menos la primera de dichas causas seguirá operando en el largo plazo.

Palabras clave: Bitcoin, criptomoneda, concentración, minería.

[en] A brief analysis of the concentration of Bitcoin mining power

Abstract: Bitcoin is a decentralized computer network that allows the sending of value among its users. For this, an interchangeable and fractionable account unit called bitcoin is used. The main characteristic of this system is that it does not need a central unit to administer it, it works through an incentive system that ensures that a series of users called miners act in such a way that transactions can be carried out safely. Basically, these miners compete with each other to add new transactions to the ledger, for which they must solve a mathematical problem established by the system. To do so, they must consume some resources (computer hardware, electricity, etc.) with which they generate a processing power to solve the mathematical problem. As payment for the expense that the miners make, they receive a reward in the form of new mined bitcoins and users' commissions.

It is a necessary condition for the network to be secure that the mining activity remains decentralized. However, recent years have seen an increase in the concentration of processing power. Given the importance of this issue for cryptocurrency, this work has tried to understand what the reasons for the concentration have been and if they can be considered as trends that will continue to operate in the long term. The study concludes that the reduction in miners' rewards and economies of scale have been the main causes of concentration and that at least the first of these causes will continue to operate in the long term.

Keywords: Bitcoin, cryptocurrency, concentration, mining.

Sumario. 1. Introduction. 2. ¿Cómo funciona la red Bitcoin? 3. Constatación empírica del proceso de concentración. 4. Causas del proceso de concentración. 4.1. El proceso de concentración en la teoría marxista. 4.2. El tamaño de la inversión rentable en la minería de Bitcoin. 4.3. El alza en el volumen de la unidad productiva. 5. Conclusiones. 6. Bibliografía.

Cómo citar: Llases, L. (2021). Breve análisis de la concentración de la potencia de minado en Bitcoin, en *Papeles de Europa* 34, 29-39.

JEL: L69.

¹ llasesluis@gmail.com

Grupo de Energía, Economía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid

1. Introducción

Bitcoin es una red que permite hacer envíos de valor de una forma descentralizada a través de unas unidades fraccionables denominadas bitcoins². En enero de 2019 se cumplieron diez años desde que la red empezó a funcionar. En esos diez años los cambios en el ecosistema que gira alrededor de la criptomoneda han sido extraordinariamente rápidos. El precio de un bitcoin ha pasado de ser prácticamente nulo hasta casi llegar a alcanzar, según datos de blockchain.com (2020), los 20.000\$ a finales de 2017. Este crecimiento no se circunscribe únicamente al precio, el gasto energético de las redes de las seis criptomonedas más importantes ha alcanzado un nivel similar al que tuvo Bélgica en 2016, siendo Bitcoin el causante del 75% de ese consumo (Rauchs et al., 2018). Por tanto, no es de extrañar que Bitcoin en particular y las criptomonedas en general hayan dado mucho de qué hablar estos últimos años.

La pretensión del trabajo es centrarse en un aspecto que, aunque de gran importancia para la red, suele ser relativamente desconocido para aquellos que no han profundizado un poco en el funcionamiento de la criptomoneda, a saber, el de la minería de Bitcoin. Para funcionar de forma descentralizada Bitcoin necesita de unos usuarios denominados mineros que se encargan de validar las transacciones, gastando para ello una serie de recursos que se transforman en potencia de computación o potencia de minado y recibiendo a cambio nuevos bitcoins y comisiones de los usuarios. Si bien es cierto que la minería de Bitcoin es relativamente pequeña en comparación con otros sectores, también lo es que, según datos de blockchain.com (2020), en este último año ha generado de media unos ingresos de casi 13 millones de dólares diarios (suponiendo que los bitcoins obtenidos por los mineros fueron vendidos en el mismo día de su adquisición), lo cual tampoco puede considerarse despreciable. Y lo que es más importante, desde hace ya un tiempo han surgido voces que alertan sobre el peligro de que exista una posible tendencia a la concentración de la actividad minera, es decir, a que el proceso de validación de transacciones esté cada vez en menos manos (Arnosti and Weinberg, 2018; Beikverdi and JooSeok Song, 2015; Dowd and Hutchinson, 2015), cuestión que podría suponer el colapso del sistema. Ya desde la creación de Bitcoin se sabía que una concentración del 51% o superior de la potencia de minado supondría un grave peligro para la red. Además, en los últimos años se ha planteado que aún con una concentración menor podrían darse ciertos problemas (Bonneau et al., 2015). Dada la relativa importancia de este asunto, y una vez constatado que efectivamente se ha producido un proceso de concentración de la potencia de minado en el sector, el trabajo tratará de contestar a las preguntas de por qué ésta se ha producido y de si es de esperar que continúe en el futuro. Para ello la teoría marxista puede ser de gran ayuda, ya que la cuestión de concentración de la producción y sus consecuencias ha sido un tema muy tratado dentro del marxismo.

Con el fin de dar explicación a este fenómeno, el trabajo se estructurará en torno a cinco apartados. En el segundo apartado, el posterior a esta introducción, se expondrá el funcionamiento técnico de la criptomoneda, poniendo el acento sobre todo en aquellas cuestiones que tienen que ver con la minería. En el tercero se hará un repaso de la información existente que permite confirmar que se ha producido un proceso de concentración de la potencia de minado en los últimos años. El cuarto apartado, el central de este trabajo, tratará sobre la cuestión de la concentración de la potencia de minado; a tal fin, se dividirá en varios subapartados. En el primero de ellos se expondrá de forma sucinta la cuestión de la concentración de la producción en la teoría marxista. En el segundo subapartado se tratará el porqué de la reducción de la inversión rentable en la minería de Bitcoin, primero de los factores de concentración que operan en Bitcoin. En el tercer subapartado estudiará el alza en el volumen de la unidad productiva dentro del sector, el segundo de los factores de concentración. Finalmente, se terminará el trabajo con un apartado de conclusiones en que se expondrán los resultados a los que se ha llegado.

2. ¿Cómo funciona la red Bitcoin?

Como ya se ha adelantado en la introducción del trabajo, Bitcoin es una red informática entre pares que permite hacer envíos de valor de una forma descentralizada a través de unas unidades fraccionables denominadas bitcoins³. Estos bitcoins tienen la pretensión de actuar como monedas y pueden intercambiarse por mercancías (siempre y cuando sean comúnmente aceptados). Lo particular de este sistema es que no se necesita para el envío de bitcoins de una unidad central que verifique las transacciones, sino que la responsabilidad de esa verificación está repartida entre los usuarios de la propia red que quieran encargarse de ello. Esta particular forma de funcionar tiene que ver con cuál era el objetivo original de los desarrolladores de la criptomoneda. Ellos pretendían crear un sistema que permitiera “a dos partes interesadas [...] realizar transacciones directamente sin la necesidad de un tercero confiable” (Nakamoto, 2008, p. 1). Para entender correctamente el funcionamiento del sistema, que se explica a continuación, conviene tener presente este objetivo.

² A lo largo del trabajo, cuando la palabra “bitcoin” aparezca con la inicial en mayúscula es porque se hace referencia a Bitcoin como sistema con un determinado funcionamiento, bien sea como idea o como red informática tangible. Cuando bitcoin aparece con la inicial en minúscula se hace referencia a las unidades de cuenta (“monedas”) que se utilizan dentro de la red o a bitcoin como mercancía.

³ Para la realización de este apartado se han consultado los siguientes autores: Antonopoulos (2014), Badev y Chen (2014), Berentsen y Schär (2018), Conesa (2019), Kroll et al. (2013), Nakamoto (2008), Velde (2013). En cualquier caso, en la mayoría de los artículos sobre la criptomoneda también se explica con mayor o menor profundidad su funcionamiento.

La red Bitcoin la forman un conjunto de usuarios que pueden entrar y salir de ella libremente. Todo usuario de la red tiene la capacidad de crear de forma ilimitada pares de claves, una pública y otra privada. La clave pública se puede identificar con la dirección o el número de cuenta del usuario, todo aquel que quiera enviarle fondos necesitará conocerla. Por el contrario, la clave privada es la que permite a un usuario hacer uso de los fondos asignados a una determinada clave pública. Así, cuando se quiere hacer una transacción se debe especificar la clave pública desde la que se envía, la clave pública a la que se envía, la cantidad de bitcoins a enviar y la comisión que se llevará el minero que incluya la transacción en la cadena de bloques (esto se explicará a continuación), y el mensaje debe ser firmado con el mensaje encriptado con la clave privada. De este modo se puede asegurar que quien envía el mensaje es verdaderamente quien controla esa clave pública⁴. Sin embargo, se plantea en este punto una importante cuestión: si no hay una autoridad central, ¿quién se ocupa de validar las transacciones? y ¿cómo puede un usuario saber que los bitcoins que le envían no han sido ya gastados previamente? Es aquí donde entra un tipo especial de usuarios, los mineros, que se encargan de validar las transacciones y añadirlas a un libro contable público, la cadena de bloques (“blockchain”), que permite situar las transacciones en un determinado momento en el tiempo.

Cuando un usuario ordena una transacción, esta se propaga por la red, pero no se habrá hecho efectiva hasta que sea incluida en la cadena de bloques. Son los mineros los que se encargan de agrupar las transacciones válidas en bloques para después añadirlos a la cadena. Para poder añadir un bloque a la cadena, los mineros generan un bloque candidato con las nuevas transacciones que han podido recopilar y compiten entre ellos en la resolución de un problema matemático denominado prueba de trabajo. Para intentar resolver el problema un minero debe utilizar potencia de procesamiento, y para ello necesita consumir una serie de recursos (equipo informático, electricidad, etc.). El primero que consigue resolverlo es el que añade a la cadena el nuevo bloque. Una vez es añadido, su validez es fácilmente verificable por todos y la competición comienza de nuevo, esta vez para añadir el siguiente bloque. Este proceso se repite indefinidamente.

Dado que el trabajo se centra en el sector de la minería de Bitcoin merece la pena profundizar en la naturaleza del problema de minado. El problema se basa en una función criptográfica denominada función hash. “Es una función criptográfica (H) que, dada una entrada x (cualquier texto o valor de longitud variable), devuelve una salida h (denominada digest o hash) de longitud fija ($H(x)=h$)” (Conesa, 2019, p. 10)⁵. La función está construida de tal modo que es muy fácil hallar h dado x, pero es casi imposible hallar x dado h, o encontrar dos x distintos que den el mismo h. La prueba de trabajo consiste en pedir a los mineros que encuentren un valor denominado “nonce” tal que “ $H(\text{información del bloque, nonce}) = \text{valor que comience con n ceros}$ ” (Conesa, 2019, p. 15), es decir, que encuentren un valor que añadido a la información del bloque dé como resultado de la función hash otro valor que comience con una cantidad determinada de ceros. La forma de resolver el problema es dando valores aleatorios al “nonce” en la función hash hasta que salga una respuesta con el requisito establecido. Por tanto, el trabajo que realizan principalmente las computadoras es aplicar una y otra vez la función hash lo más rápido posible hasta dar con la solución. Consecuentemente, la potencia de computación del hardware se mide en hashes por segundo (H/s) o en sus respectivos múltiplos (MH/s, GH/s, TH/s, etc.).

El problema está hecho para que alguien consiga resolverlo más o menos cada diez minutos. Su dificultad se adapta cada 2016 bloques a la potencia de procesamiento que los mineros aportan a la red cambiando la cantidad de ceros que deben estar al comienzo del resultado de la función hash (a más ceros más difícil es el problema⁶), de modo que por muchos recursos que consuman los mineros siempre resolverán el problema, de media, cada diez minutos. Al añadir el bloque a la cadena, el minero recibe una recompensa en bitcoins. Esa recompensa empezó siendo 50 BTC y se reduce a la mitad cada 210.000 bloques (aproximadamente cada cuatro años). También recibe las comisiones que los usuarios hayan incluido en sus transacciones. La razón de ser de estas comisiones es que los usuarios buscan que los mineros prioricen sus transacciones con respecto a las de los demás. Cuando la red tiene un exceso de transacciones con respecto a las que pueden incluirse en un bloque las comisiones suben, cuando hay pocas transacciones las comisiones bajan. Esta competición entre los mineros tiene dos finalidades. La primera, distribuir nuevos bitcoins a la red. La generación de nuevas “monedas” está diseñada con la idea de imitar a los metales preciosos⁷, existen bitcoins en cantidad limitada y según se van extrayendo es cada vez más difícil encontrarlos. Esto está a su vez relacionado con otra de las motivaciones de la creación de la criptomoneda, la

⁴ Esta cuestión de los pares de claves está basada en un método criptográfico denominado criptografía asimétrica. “La criptografía asimétrica se puede comparar con un candado con dos llaves: si se realiza una encriptación (cierre de candado) con S [clave privada], solo se podrá descifrar con P [clave pública] (apertura de candado) y viceversa [es decir, que si se encripta con la pública solo se podrá descifrar con la privada]” (Conesa, 2019, p. 10). Una de las utilidades de la criptografía asimétrica es la de “autenticar al emisor de un mensaje” (Conesa, 2019, p. 10). Si el emisor envía un mensaje y firma con el mismo mensaje, pero encriptado por su clave privada, el receptor (o cualquiera que conozca el mensaje y la clave pública del emisor) podrá utilizar la clave pública del emisor para descifrar la firma y asegurarse de que lo escribió él, si el contenido del mensaje y el de la firma descifrada es el mismo puede estar seguro de que solo quien posea la clave privada ha podido enviarlo.

⁵ Existen varias funciones hash, la de Bitcoin se construye a partir de la función SHA256: “H is the Bitcoin hash function, in this case $H(S)=\text{SHA256}(\text{SHA256}(S))$ ” (Malone and O’Dwyer, 2014, p. 2).

⁶ “A valid output of the block header hash must belong to the subset of outputs which have certain number of leading zeros. More zeros indicate a smaller subset and greater difficulty of finding a valid hash” (Valfells and Egitsson, 2016, p. 1675).

⁷ “Esta adición estable de una cantidad constante de monedas nuevas es análoga a mineros de oro gastando recursos para agregar oro a la circulación. En nuestro caso, es el tiempo del CPU y la electricidad que se gasta” (Nakamoto, 2008, p. 4).

desconfianza hacia los bancos centrales como organismo regulador⁸. La segunda, permitir que las transacciones sean verificadas y añadidas de forma segura al libro de cuentas (cadena de bloques) de forma descentralizada. Por convención, los mineros trabajan para añadir bloques sobre la cadena más larga. Un minero podría intentar engañar a la red haciendo una transacción mientras que intenta alargar la cadena desde el bloque anterior al de su transacción, ofreciendo una nueva cadena en la que su transacción no ha sido hecha y en la que por lo tanto conserva los bitcoins que había gastado. El problema para él es que salvo que posea la mayor parte de la potencia de procesamiento de toda la red será prácticamente imposible que consiga generar una cadena tan larga como la que el resto de mineros “honestos” generarán mientras tanto. Esta imposibilidad práctica de hacer “trampas” (salvo que se posea una importante cuota del total de la potencia de procesamiento de la red), junto con el incentivo de la recompensa, hace que los mineros trabajen para el sostenimiento de la red a la vez que buscan su propio interés. Sin embargo, si algún minero o grupo de mineros en colusión tuvieran la mayor parte de la potencia de procesamiento de la red entonces tendrían la posibilidad de romper las reglas. De ahí la importancia de estudiar esta cuestión y de establecer el paralelismo entre el concepto de concentración de la producción y el de concentración de la potencia de minado.

3. Constatación empírica del proceso de concentración

La concentración de la potencia de minado en Bitcoin se da en dos niveles. Como se ha explicado en el apartado anterior, los mineros compiten por añadir un bloque a la cadena y obtener una recompensa en forma de nuevos bitcoins y comisiones pagadas por quienes quieren hacer las transacciones. La probabilidad para un minero individual de resolver el problema de minado y añadir el bloque es igual a la proporción que existe entre la potencia de procesamiento desplegada por ese minero y la potencia del conjunto de la red (Arnosti and Weinberg, 2018; Bonneau et al., 2015; Dowd and Hutchinson, 2015; Valfells and Egilsson, 2016). Esto significa que, si todo permanece estático, en el largo plazo cada minero obtendrá una porción de la recompensa total que ofrece la red igual a la proporción que existe entre la potencia de procesamiento desplegada por ese minero y la potencia del conjunto de la red.

Sin embargo, la potencia de minado de la red no es para nada fija. La consecuencia es que una racha de mala suerte puede provocar que un minero tarde más de lo esperado en obtener una recompensa, y que durante el tiempo que ha estado esperando se haya modificado la potencia de procesamiento de la red, haciendo que sus probabilidades de obtener la recompensa sean menores. Esto significa un verdadero riesgo y provoca que para minimizarlo la mayoría de los mineros se agrupen en “pools de minería” en los que varios mineros actúan como si fueran uno solo, aportando todos su potencia de minado y repartiendo luego la recompensa de forma proporcional a la potencia que cada uno ha aportado, quedando además una parte para el administrador del “pool”. Estos “pools” son administrados por una empresa que es la encargada de gestionar la potencia de minado que aportan los mineros y repartir las recompensas, pudiendo ofrecer también algunos servicios adicionales (Bonneau et al., 2015; Derks et al., 2018; Dowd and Hutchinson, 2015).

Como se puede ver en el Gráfico 1, los “pools” de minería han supuesto un importante elemento de concentración de la potencia de procesamiento en el sector. Sin embargo, no hay nada que indique, ni en el plano teórico ni en el empírico, que la concentración deba seguir en aumento⁹. En lo teórico, una vez que un minero ha conseguido minimizar la probabilidad de una mala racha, por ejemplo, perteneciendo a un “pool” que alcance el 10% o el 15% de toda la red, no parece que tenga mucho incentivo a irse a uno mayor, su riesgo es ya bastante bajo. Por otro lado, al observar el Gráfico 1, vemos que el tamaño de los diferentes “pools” ha sido cambiante y que no existe una clara tendencia hacia que la potencia de minado se centralice en cada vez menos “pools”.

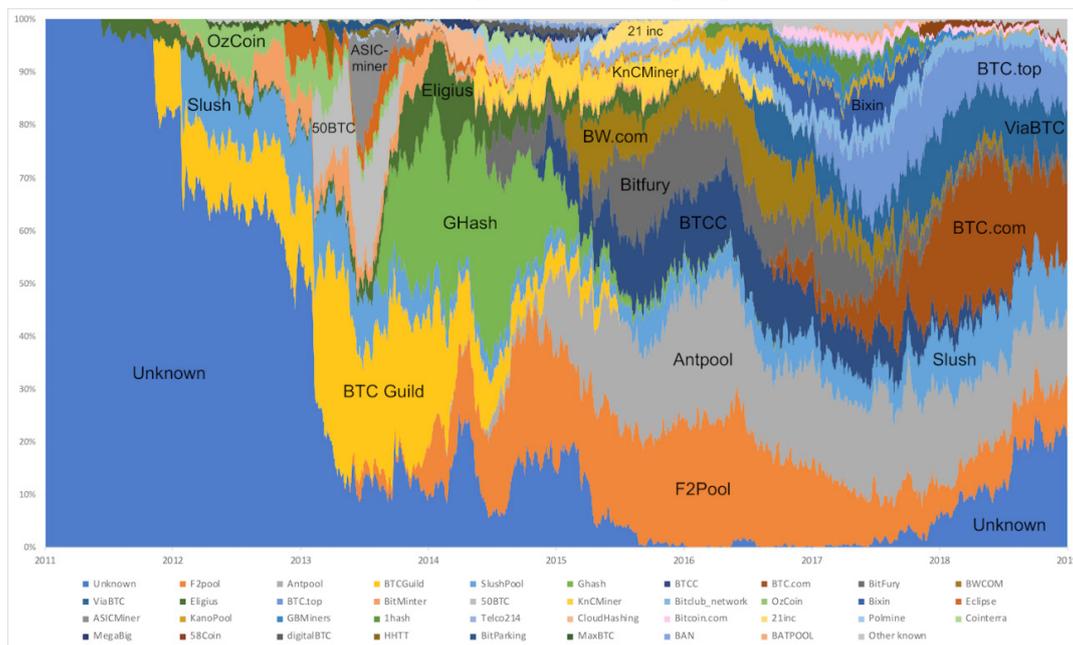
Hasta aquí se ha tratado uno de los niveles de la concentración, el que se da en los “pools”. Pero a su vez, dentro de esos “pools” existe una distribución de la potencia de minado que es muy importante para el análisis, ya que indica el tamaño de las empresas de minería dentro del sector más allá de cómo estén agrupadas. En este sentido, es algo generalmente aceptado el que la minería ha pasado de ser una actividad llevada a cabo por aficionados en los primeros momentos de la criptomoneda a ser una actividad profesionalizada que llevan a cabo empresas de gran tamaño. Sin embargo, se plantean problemas a la hora de comprobar esto empíricamente con cierto rigor, ya que no existe manera de saber la distribución dentro de los “pools” si no es porque estos faciliten directamente la información o porque lo hagan los propios mineros. Por suerte, existen al menos dos

⁸ On February 11, 2009, Nakamoto gave an explanation of the thinking behind Bitcoin in an e-mail announcing its launch: “The root problem with conventional currency is all the trust that is required to make it work. The central bank must be trusted not to debase the currency, but the history of fiat currencies is full of breaches of that trust. . . . With e-currency based on cryptographic proof, without the need to trust a third-party middleman, money can be secure and transactions complete.” (Dowd and Hutchinson, 2015, p. 358).

⁹ Hay quien sí cree que existe una tendencia a que cada vez existan menos pools con mayores agrupaciones porcentuales de la potencia de minado. La idea es que, si los mineros son adversos al riesgo y pueden de esta manera incurrir en menos riesgos siendo la recompensa la misma, tenderán a agruparse en pools cada vez mayores (Dowd and Hutchinson, 2015).

estudios que han tenido la posibilidad de encuestar a empresas participantes en el sector y que han obtenido información en este sentido. En el más reciente se presentan los siguientes datos:

Gráfico 1. Distribución de la potencia de minado por “pools de minería”.



Fuente: Coin Metrics Team (2019).

“on average, one third of the pool’s total hashrate is provided by the top-1% contributors, whereas 10% of active pools members contribute 68%. Nevertheless, figures are widely divergent: some pools indicate that up to 70% distribution of their total hashrate is supplied by the top-1% of their members, whereas others are much more distributed in that only 30% of the total hashrate is provided by 10% of the pool members” (Rauchs et al., 2018, p. 86).

El problema de estos datos es que incorporan pools de otras criptomonedas y no incluyen ninguna desagregación. En cualquier caso, no hay razón para pensar que la concentración en Bitcoin sea menor que en aquellas, más bien al contrario, ya que es la más madura. Además, dado el peso que la minería de Bitcoin tiene en el conjunto de la minería de criptomonedas (como se ha dicho previamente citando este mismo estudio, alrededor del 75% del consumo energético de la minería de las 6 principales criptomonedas corresponde a Bitcoin) es de esperar que los datos reflejen ese peso. Adicionalmente, se pueden aportar los datos de otro estudio presentado el año anterior por la misma entidad:

“For the purpose of this analysis, 11 participating organisations [en el estudio entraban 48 mineros, de los cuales 30 eran mineros individuales y 18 eran organizaciones] have been designated as ‘large’ mining organisations. We estimate that the large mining organisations in this study cover over 50% of the total professional mining sector in terms of global hash rate as well as the scale of mining hardware manufacturing and cloud mining operations” (Hileman and Rauchs, 2017, p. 90).

En este caso los datos se refieren únicamente a la minería de Bitcoin, por lo que se refuerza la idea de que las cifras del párrafo anterior se ven desinfladas por la inclusión de “pools” de otras criptomonedas. Se puede afirmar por tanto que a nivel de empresa minera existe también un proceso de concentración de la potencia de minado que ha llevado de un sector formado por multitud de mineros de pequeña escala a uno en el que la mayoría de la potencia de minado se concentra en manos de muchos mineros, pero de gran tamaño. Una vez constatado este hecho se puede pasar a explicar cuáles son las razones de este fenómeno.

4. Causas del proceso de concentración

4.1. El proceso de concentración en la teoría marxista

Desde la teoría marxista se entiende que el proceso de concentración de la producción se debe a la existencia de una tendencia al “alza en el volumen medio de la unidad productiva” (Sweezy, 1969, p. 280) que sobrepasa al incremento del volumen del mercado, es decir, del de la inversión total rentable. Dicha tendencia tiene

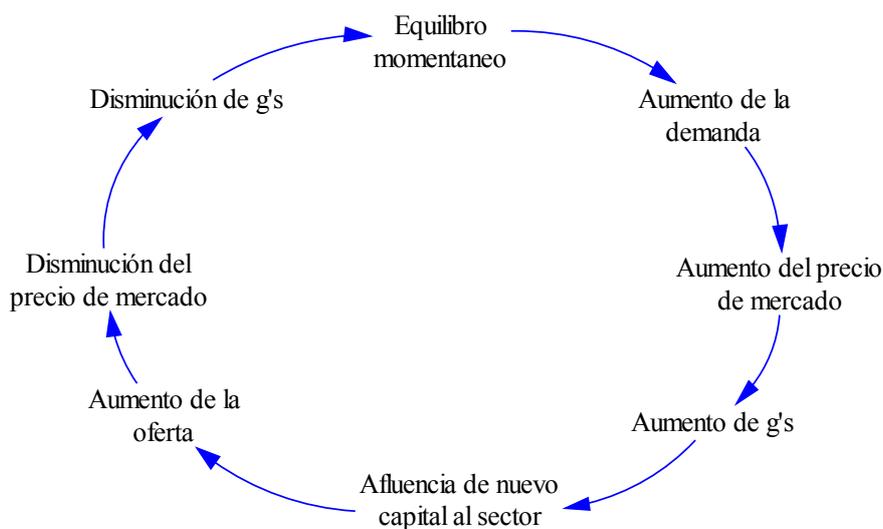
que ver con las economías de escala, es decir, con la reducción de costes que supone operar con una unidad productiva mayor. En la pugna competitiva, aquellas empresas más eficientes conseguirán mayores ganancias, mientras que las menos eficientes podrán llegar incluso a tener pérdidas. Se generalizará de este modo la escala productiva más eficiente, ya sea por adaptación o por quiebra de las empresas más pequeñas. A su vez, la posibilidad de ese aumento de las dimensiones medias de la empresa viene dado por los procesos de concentración y centralización del capital que aparecen explicados en Marx (1959a). El proceso de concentración del capital se ocasiona por la acumulación que lleva a cabo cada capital individual, por el contrario, la centralización del capital es resultado de la unión de varios capitales individuales. Esta unión puede venir dada por la absorción de empresas por parte de otras mayores o por la agregación de varios capitales bajo una misma dirección por mediación del sistema de crédito, entendiéndose el sistema de crédito en un sentido que sobrepasa el sistema bancario y que comprende todas las formas de financiación de las empresas¹⁰.

Por su parte, el tamaño de la inversión total rentable en un sector viene dado en un proceso que está unido a la formación de precios. Según la teoría de Marx (1959b) los precios de mercado tienden a orbitar alrededor de lo que él llama precios de producción. Estos precios de producción son una modificación de los valores y se forman por la competencia entre los distintos capitales por obtener la mayor plusvalía posible en comparación al capital invertido (ya sea capital constante o capital variable). La competencia entre capitales provoca que la rentabilidad media de todos los sectores, es decir, su tasa de ganancia sectorial (g'_s), sea igual entre sí y que por lo tanto la suma de los precios de todas las mercancías de una determinada clase tienda a ser iguales a su coste más una ganancia que corresponde al producto de la tasa de ganancia media a nivel social (g'_m) por el capital invertido (K):

$$\text{Precio de producción} = \text{coste} + g'_m \cdot K \quad (1)$$

Un ejemplo puede ser ilustrativo de esta tendencia: si el precio de mercado de la mercancía A es superior a su precio de producción y por tanto g'_s es mayor que a g'_m existirá una tendencia a que capital de otros sectores se mueva hacia el sector productor de A en busca de mayores ganancias. Al hacerlo aumentará la producción de A y disminuirá el precio, con el consiguiente descenso de g'_s . Una vez g'_s y g'_m sean iguales dejaría de entrar nuevo capital en el sector y el precio de mercado será igual al precio de producción. Lo contrario ocurriría si el precio de A fuera menor a su precio de producción, saldría capital hacia otros sectores hasta que g'_s y g'_m se igualaran. Este proceso, aunque en esencia ocurre como se ha descrito, no lo hace sino de forma muy imperfecta, ya que cada capitalista no tiene información sobre lo que va a hacer el resto ni sobre cuáles serán los cambios en los gustos de los consumidores, solo lo sabrá a posteriori, cuando la inversión se haya hecho e intente vender las mercancías. La sucesión de acontecimientos descrita está esquematizada en la Figura 1. Por medio de este proceso, a la vez que se ajusta el precio de mercado al precio de producción, también se determina el tamaño de la inversión rentable. En la fórmula anterior viene dado como K.

Figura 1. Dinámica general de la tendencia capitalista al equilibrio.



Fuente: elaboración propia.

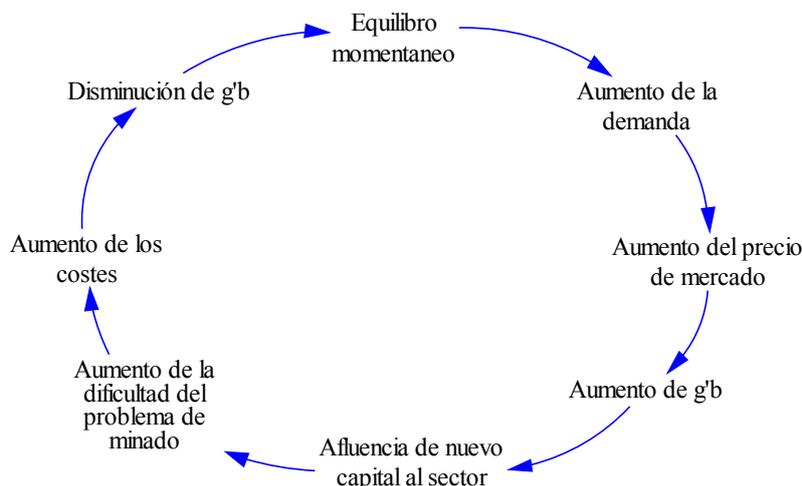
¹⁰ “Según el empleo que da Marx a la expresión, el sistema de crédito ha de entenderse en un sentido amplio que incluya no solamente los bancos, sino todo el mecanismo financiero de las empresas de inversión, mercados de valores, etc” (Sweezy, 1969, p. 281).

6. El tamaño de la inversión rentable en la minería de Bitcoin

El proceso general descrito anteriormente, aunque útil como punto de partida, no es el que se sigue en la minería de Bitcoin. La modulación de la producción solo es posible en aquellos sectores que fabrican mercancías totalmente reproducibles que no necesitan de algún factor escaso del que no se puede disponer a partir de un determinado nivel de producción. Como se ha visto en el apartado segundo, los bitcoins no son totalmente reproducibles. El número de ellos que existe está predeterminado para cada momento del tiempo. A esto se une que los bitcoins no se compran para ser consumidos, sino como medio de intercambio, de reserva de valor o de obtención de ganancias especulativas (Baek and Elbeck, 2015; Hileman and Rauchs, 2017; Rauchs et al., 2018). Eso provoca que la oferta de bitcoins que diariamente se encuentra en el mercado dependa muy poco de la cantidad generada ese mismo día. La unión de su no reproducibilidad con el hecho de que la criptomoneda siempre se compra para posteriormente ser vendida, no para consumirse, provoca que su precio flote libremente sin pauta definida, dependiendo solo de la oferta y de la demanda diaria en el mercado. Sin embargo, existe aún así una tendencia a que la tasa de ganancia media de los mineros de bitcoins (g'_b) se iguale con la del resto de sectores. Para ello son fundamentales dos elementos del diseño de la criptomoneda. El primero es que no hay limitaciones a la entrada y la salida de capital del sector, cualquiera puede conectar computadores para intentar resolver el problema de minado. El segundo es que las condiciones de producción (dificultad del problema de minado) se modifican según la potencia de procesamiento que el conjunto de los mineros apliquen para resolver la prueba de trabajo que permite añadir bloques a la cadena.

Teniendo en cuenta esas dos características, podemos deducir cuál es el proceso particular que lleva a que se produzca la igualación entre g'_b y g'_m . Si se parte de un momento de equilibrio en el que g'_b es igual a g'_m y se plantea un aumento de la demanda se verá cómo el precio de mercado de bitcoin aumenta, aumentando también el valor de las recompensas de los mineros medidas en dólares e incrementándose g'_b . La mayor g'_b atraerá nuevo capital al sector y esto aumentará la potencia de procesamiento del conjunto de los mineros. El aumento de la potencia de procesamiento conllevará un aumento de la dificultad del problema de minado, lo que supondrá que se reduzcan las recompensas por potencia de procesamiento aportada a la red, o lo que es lo mismo, el número de bitcoins conseguidos por el capital invertido. Este aumento de los costes y del capital invertido por bitcoin conseguido conllevará una reducción de g'_b . Es de suponer que la entrada de capital continúe hasta que g'_b se iguale a g'_m . De esta manera se llegaría nuevamente a un momentáneo equilibrio. La Figura 2 resume este razonamiento.

Figura 2. Dinámica de costes y g' en el sector de la minería de Bitcoin.



Fuente: elaboración propia.

Este razonamiento, además de mostrar la concreción en la minería de Bitcoin de la tendencia a la igualación de las tasas de ganancia entre sectores, arroja una importante conclusión: existe una relación entre g'_m , el precio de bitcoin, el nivel de las recompensas en bitcoins que reciben los mineros, los costes en que incurren las empresas a la hora de aportar potencia de minado y el capital invertible de forma rentable en el sector. En esta relación, g'_m viene dada por condiciones establecidas a escala mundial (el capital global invertido y el monto total de plusvalía extraída de los trabajadores), el precio de bitcoin por interacciones que se dan día a día en el mercado entre los compradores y los vendedores de la criptomoneda y el nivel de las recompensas está preestablecido en el código de Bitcoin. Por su parte, el coste en que incurren los mineros lo supondremos de

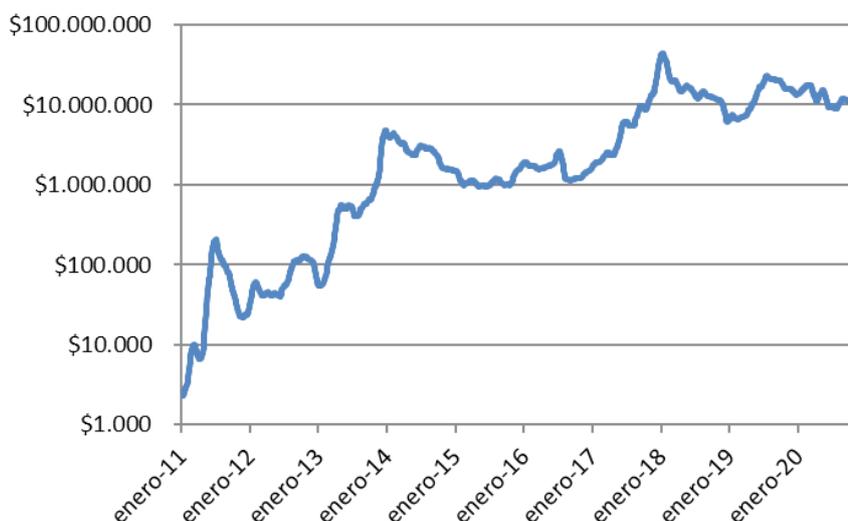
momento proporcional al capital invertido. Si bien esto no es cierto, ya que dependiendo de la tecnología y del precio de los insumos la proporción será cambiante, es muy útil a nivel expositivo. Más adelante este supuesto será eliminado. Teniendo todo eso en cuenta, el capital invertible de forma rentable en el sector es dependiente de $g'm$, del precio de bitcoin y del nivel de las recompensas:

$$\left\{ \begin{array}{l} g' = \frac{R \cdot P - C}{K}; K = \frac{R \cdot P - C}{g'}; K = \frac{R \cdot P - cte \cdot K}{g'}; K = \frac{R \cdot P}{g' + cte} \\ C = cte \cdot K \end{array} \right.$$

Donde K es el capital invertido en dólares americanos, R es la recompensa en bitcoins que recibe el conjunto de los mineros por unidad de tiempo, P es el precio de un bitcoin en dólares americanos, C son los costes en que incurren los mineros por unidad de tiempo, cte es la proporción que el coste supone con respecto al capital invertido y $g'm$ es la tasa de ganancia que de media se obtiene por la inversión de un capital por unidad de tiempo.

Si suponemos constante $g'm$ en el corto-medio plazo (es de esperar que el nivel de explotación de la fuerza de trabajo y el capital invertido a nivel global no se modifiquen drásticamente a menos que se dé una crisis importante o un cambio político significativo), la cantidad de capital invertible de forma rentable por los mineros pasa a depender únicamente de las recompensas obtenidas al minar un bloque medidas en dólares. De este modo, sobre la base de los datos expuestos en el Gráfico 2, que recoge las recompensas de los mineros a lo largo del tiempo, se puede afirmar que el tamaño de la inversión rentable en el sector minero ha tenido un fuerte período de crecimiento desde sus inicios hasta diciembre de 2014. Desde esas fechas hasta octubre de 2016 el mercado se contrajo, gozando posteriormente de un nuevo período de expansión desde ese mes hasta diciembre de 2017, mes en que empezó un nuevo período de contracción que se ha alargado hasta momentos muy recientes.

Gráfico 2. Ingresos diarios de la minería de Bitcoin en dólares americanos¹¹.



Fuente: elaboración propia con datos de blockchain.com

Es de esperar que los dos periodos marcados de ingresos decrecientes hayan sido uno de los factores explicativos del aumento de los niveles de concentración por el estrechamiento de la inversión rentable que supone. Por otro lado, en el largo plazo es de suponer que el mercado siga contrayéndose. Recordemos que las recompensas que obtienen los mineros medidas en bitcoins se reducen a la mitad cada cuatro años. Esto provocará a la larga una reducción de las recompensas medidas en dólares.

Ciertamente existen varios factores contrarrestantes, pero no parece que ninguno de ellos tenga la capacidad de compensar indefinidamente la caída de las recompensas. El primer factor contrarrestante es el precio de la criptomoneda, aunque es verdad que existen períodos de fuerte crecimiento, no es de esperar que estos puedan alargarse indefinidamente. Un aumento constante de su precio exigiría un persistente incremento de su uso como medio de intercambio, como bien especulativo o como reserva de valor y si bien no es descartable que aún pueda seguir creciendo, es seguro que a larga (en el mejor de los casos cuando sea comúnmente conocido y utilizado) se estancará. El segundo factor contrarrestante es la comisión que los usuarios pagan para que se prioricen sus transacciones. El monto de las comisiones depende del número de transacciones por bloque y de la demanda de hacer transacciones. Si la demanda de hacer transacciones aumenta (por el aumento del uso de

¹¹ Para evitar las oscilaciones diarias del precio de bitcoin se han tomados datos promediados, de modo que cada dato es la media de 30 días.

la criptomoneda) aumentarán las comisiones. Sin embargo, un aumento de las comisiones supondría un lastre para la difusión de Bitcoin, que perdería usuarios frente a otras tecnologías. Existen varias posibles soluciones a este problema, sin embargo, al implementarlas la cantidad de comisiones se reduciría. En consecuencia, la compensación de la caída de las recompensas por medio de las comisiones se hace también imposible. El último factor contrarrestante es la disminución de la proporción de los costes corrientes con respecto al capital invertido. Abandonamos por tanto el supuesto de que la proporción permanece constante. Cuanto menor sea la proporción, mayor será el capital que se puede invertir de forma rentable, sin embargo, una vez tomara el valor cero (valor al que, claro está, tampoco podría llegar nunca) ya no podría seguir disminuyendo, alcanzando así su límite como elemento de compensación.

7. El alza en el volumen de la unidad productiva

Para seguir avanzando en la comprensión de la concentración de la potencia de minado es conveniente profundizar más en la competencia dentro del sector. Se puede asignar a cada minero un coste y una cantidad de capital invertido por potencia de minado desplegada, del mismo modo que antes se hacía como una media para el conjunto del sector. Podemos afirmar que un minero que opere en las condiciones medias tendrá una g' igual a g'_b (que será igual a g'_m si el sector está en situación de equilibrio). Por otro lado, si consigue desplegar una determinada cantidad de potencia de minado con un coste o una inversión que está por debajo de la media, su g' será superior a la de la media del sector. Lo contrario ocurrirá si sus costes o la inversión que necesita están por encima de la media, pudiendo incluso llegar a operar con pérdidas, momento en el cual desconectará sus equipos. Hasta aquí el razonamiento no es distinto del que podría desplegarse para cualquier otro sector. La diferencia está en que mientras que en otros sectores la presión se ejerce principalmente a través del precio, en la minería de Bitcoin se ejerce apropiando directamente una mayor parte de la recompensa y reduciendo la del contrario.

Para explicarlo recordemos el principio de este apartado, la recompensa que apropia un minero es igual, en el largo plazo, al porcentaje de la potencia de minado que tiene con respecto al total de la red. Como ya se ha dicho previamente los mineros se agrupan en “pools” para asegurar recibir su respectiva recompensa en el menor tiempo posible. En virtud de este hecho se puede asumir, sin que sea una simplificación exagerada, que cada minero recibe directamente una porción de las recompensas totales igual al porcentaje de la potencia de minado que tiene con respecto al total de la red. Cuando un minero consigue ser más eficiente que sus compañeros, disminuyendo el coste y la inversión necesaria para desplegar una determinada potencia de minado, obtiene una sobreganancia y además tiene la oportunidad de aumentar su cuota de mercado (aumentando su inversión) sin que su g' disminuya por debajo de la media. Adicionalmente, al aumentar su cuota de mercado, es decir, al apropiarse una mayor parte de las recompensas, consigue reducir la de sus competidores. Y no es solo que las recompensas de los competidores se reduzcan, sino que el coste en que estos incurren se mantiene constante, por lo que ven reducida su g' . Esto les sitúa en una posición de debilidad que les empuja hacia la disyuntiva de adaptarse o de perecer en la lucha competitiva.

Los costes en que incurren los mineros dependen principalmente de cinco factores: el precio de la energía eléctrica, las temperaturas del lugar en que se asientan las instalaciones mineras, la fiscalidad que impera en el territorio en el que se asientan, el tamaño de inversión (economías de escala) y la eficiencia del hardware minero. De los cinco factores señalados, los tres primeros provocan una tendencia a la concentración geográfica¹² de la minería, que no es la que se está estudiando en este trabajo. Basta con decir que, por un lado, los mineros tienden a situarse en lugares donde existen excedentes de electricidad y por tanto esta es más barata. Por otro lado, también suelen buscar lugares fríos que les permiten abaratar costes en la refrigeración de los equipos. Y finalmente, donde la fiscalidad les es más favorable, bien sea porque los impuestos son reducidos o porque pueden recibir subvenciones. Aquellos lugares donde existe una conjunción de los tres factores son los ideales, siendo, no obstante, el factor de las temperaturas el menos importante (Rauchs et al., 2018).

Los otros dos factores, la eficiencia del hardware y las economías de escala, deben ser estudiados con más detenimiento, ya que teóricamente podrían ser la clave de la concentración a nivel empresarial¹³. Una mejora en la eficiencia de hardware que utilizan los mineros permite a quien la tiene desplegar una potencia de mi-

¹² “Surveyed miners were asked to rank the most important decision factors used for assessing the suitability of a location for a new mining facility [...]. The following five factors stand out: 1. Access to ample and low-cost electricity supply [...]. 2. Friendly regulatory environment [...]. 3. Stable political situation [...]. 4. Good Internet connectivity [...]. 5. Cold climate [...]. Interestingly, the presence of cheap land and skilled labour was ranked much lower, suggesting that these are only secondary factors with minor impact on decision-making” (Rauchs et al., 2018, p. 77).

¹³ Arnosti y Weinberg (2018) mantienen que son las asimetrías en los costes y las economías de escala las que provocan la concentración. En este trabajo se ha preferido concretar en las asimetrías de costes derivadas del desarrollo de hardware porque se ha entendido que son asimetrías que surgen internamente a la propia dinámica competitiva. Las asimetrías de costes que dependen de factores geográficos pueden ser determinantes en un primer momento, cuando aún se está definiendo la forma de la competencia, pero una vez está claro cuáles son los factores importantes es lógico pensar que las empresas se situarán sistemáticamente en las zonas más ventajosas y esa asimetría dejará de ser determinante. Y las que dependen de otras cuestiones técnicas pueden a su vez catalogarse dentro de las economías de escala si para aplicar dicha técnica hace falta aumentar el volumen de la inversión.

nado superior a la del resto con unos costes menores o con una inversión menor. Esto supondrá que su g' será superior a la media. Aquel que disponga de esta tecnología tendrá un incentivo a seguir invirtiendo más capital en el sector. Al hacerlo irá desplazando a los mineros con hardware antiguo y menos eficiente. Si el nuevo hardware está a disposición de todo el mundo el resultado no tiene que ser una mayor concentración en el sector, simplemente se sustituirá paulatinamente el antiguo por el nuevo. A partir de un determinado momento el hardware antiguo operará con pérdidas y desaparecerá definitivamente. Ahora bien, si el nuevo hardware está solo a disposición de un número limitado de mineros, entonces estos ganarán cuota de mercado con respecto al resto, ya que serán los únicos capaces de llevar cabo inversión en los nuevos equipos.

Este razonamiento lleva a pensar que las empresas desarrolladoras de nuevo hardware deberían ocupar una parte importante de la cuota de mercado. Sin embargo, esto no ha sido así. La mayor parte de la producción de hardware especializado en minería de Bitcoin (y del resto de criptomonedas que utilizan su misma función criptográfica) la lleva a cabo la empresa Bitmain Technologies, que tuvo en 2018 un 74,5% de la cuota de mercado, no teniendo el siguiente competidor ni siquiera el 6%. Esta empresa participa también directamente en la minería, pero solo ostenta entre el 3% y el 4% de la potencia de minado de toda la red. Cabría preguntarse el motivo de que no tenga una participación mayor dada su posición en la producción de hardware. La razón probablemente es que no tiene necesidad de ello, dada su enorme cuota de mercado es capaz de imponer precios de monopolio a los mineros, con lo que consigue absorber una parte de las recompensas sin necesidad de aumentar su participación directa en la minería. Por otra parte, dentro de su estrategia está también la de reducir las comisiones de los “pools”, disminuyendo con ello los gastos en que incurren los mineros y aumentando sus ventas como empresa productora de hardware. Ostenta la propiedad de Antpool y BTC.com y es el máximo inversor de ViaBTC. Bitmain reduce las comisiones que cobra en sus propios “pools” para obligar al resto de competidores a hacer lo mismo, disminuyendo así la parte de las recompensas que apropian los “pools” y aumentando la que se apropia en la venta de hardware. Adicionalmente a todo esto, su control sobre la potencia de minado le permite ser una voz importante en los desarrollos futuros de la criptomoneda (ya que los cambios que se implementan en Bitcoin dependen de que se llegue a un consenso entre quienes aportan potencia de minado a la red, teniendo los que la agrupan, los “pools”, un papel importante) (Ferreira et al., 2019).

El otro elemento fundamental en la reducción de costes por potencia de minado desplegada son las economías de escala¹⁴. Algunos de los gastos en que incurren los mineros para mantener y hacer funcionar su hardware se reducen si se conectan muchos equipos a la vez en un mismo lugar. El problema a la hora de estudiar esta cuestión es que no existen de momento en la literatura cálculos directos que relacionen la proporción en que el tamaño de la inversión reduce los costes. En cualquier caso, pueden aproximarse algunas cuestiones desde la teoría. Existe una importante diferencia entre la cuestión de las economías de escala y la incorporación de nuevo hardware. En lo referente al hardware la barrera está en poder disponer de él o no y el momento en el que se dispone. Sin embargo, una vez que se tiene se puede volver a entrar en la competición de forma rentable. Por el contrario, las economías de escala generan barreras de entrada. Un nuevo competidor que quiera entrar tendrá que hacerlo con un tamaño tal que le permita ser competitivo con respecto al resto. Al generalizarse la nueva escala y siempre que no haya aumentado el tamaño del mercado, el nivel de concentración aumentará indefectiblemente. De esto se deduce que las economías de escala han sido otro de los factores clave a la hora de explicar el nivel de concentración de potencia de minado.

8. Conclusiones

Con todo lo expuesto hasta aquí puede darse ya respuesta a las preguntas iniciales de la investigación. Como hemos visto, la minería de Bitcoin tiene una serie de particularidades con respecto al resto de sectores, sin embargo, la causa de la concentración de capacidad de minado es la misma que las de la concentración de la producción en otros sectores: el crecimiento de la escala rentable de producción con respecto al crecimiento del mercado. Ahora bien, en este trabajo nos hemos esforzado en intentar desentrañar la forma en que esta dinámica general opera en este sector en concreto.

En primer lugar, hemos visto que el tamaño de la inversión rentable depende principalmente del precio de la criptomoneda y de las recompensas que obtienen los mineros al generar un nuevo bloque. Hemos visto también que durante los períodos que van desde diciembre de 2014 hasta octubre de 2016 y de diciembre de 2017 hasta casi la actualidad las recompensas se contrajeron. Esto nos ha permitido concluir que dicha contracción debe ser una de las causas de la concentración observada. Por otro lado, en base al diseño de la criptomoneda, también hemos podido deducir que el tamaño de la inversión rentable en la minería tenderá a decrecer en el largo plazo. El nivel de las recompensas medidas en bitcoins que reciben los mineros por bloque se reduce a la mitad cada cuatro años. Esto supondrá una disminución de los ingresos que a larga no podrá ser compensado por ninguno de los factores contrarrestantes que hemos señalado en el texto (el aumento del precio de bitcoin,

¹⁴ “Economies of scale arise naturally due to non-linearity in the cost of storing, powering, and cooling hardware, and also potentially due to strategic behavior” (Arnosti and Weinberg, 2018, p. 1).

el aumento de las comisiones que pagan los usuarios por transacción y la disminución de los costes corrientes con respecto al capital invertido).

En segundo lugar, hemos visto la forma concreta en la que opera la competencia en la minería de Bitcoin y hemos planteado dos posibles causas de concentración adicionales a la reducción del tamaño del mercado: las asimetrías tecnológicas derivadas del desarrollo del hardware minero y las economías de escala. De entre las dos hemos descartado la primera porque, aunque existe un claro dominio de la producción de hardware minero por parte de la empresa Bitmain, esta no lo está utilizando para ganar cuota de mercado en la minería, sino que sigue una estrategia encaminada a ejercer su poder de mercado sobre los mineros imponiendo un “markup” en la venta del hardware especializado. La segunda en cambio sí que ha provocado una tendencia a la concentración, ya que ha ocasionado un aumento del volumen de las instalaciones mineras al aumentar el tamaño de inversión mínima necesaria para competir en el sector. No obstante, al contrario que en el caso de la reducción del total de la inversión rentable, no es posible asegurar que en el futuro continúe aumentando la escala de inversión de las instalaciones mineras. Esto depende principalmente de cómo evolucione en el futuro la técnica de este tipo de instalaciones.

9. Bibliografía

- Antonopoulos, A.M., 2014. *Mastering Bitcoin: unlocking digital cryptocurrencies*. O’Reilly Media, Inc.
- Arnosti, N., Weinberg, S.M., 2018. Bitcoin: A natural oligopoly. *ArXiv Prepr. ArXiv181108572*.
- Badev, A., Chen, M., 2014. Bitcoin: Technical Background and Data Analysis 39.
- Baek, C., Elbeck, M., 2015. Bitcoins as an investment or speculative vehicle? A first look. *Appl. Econ. Lett.* 22, 30–34.
- Beikverdi, A., JooSeok Song, 2015. Trend of centralization in Bitcoin’s distributed network, in: 2015 IEEE/ACIS 16th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD). Presented at the 2015 IEEE/ACIS 16th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), IEEE, Takamatsu, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SNPD.2015.7176229>
- Berentsen, A., Schar, F., 2018. A Short Introduction to the World of Cryptocurrencies. *Review* 100, 1–19. <https://doi.org/10.20955/r.2018.1-16>
- Bonneau, J., Miller, A., Clark, J., Narayanan, A., Kroll, J.A., Felten, E.W., 2015. SoK: Research Perspectives and Challenges for Bitcoin and Cryptocurrencies, in: 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy. Presented at the 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), IEEE, San Jose, CA, pp. 104–121. <https://doi.org/10.1109/SP.2015.14>
- Coin Metrics Team, 2019. Granular mining pool mapping with Bitcoin’s coinbase outputs. *Coin Metr. URL* <https://coinmetrics.io/mining-pool-mapping/> (accessed 8.3.20).
- Conesa, C., 2019. Bitcoin: ¿una solución para los sistemas de pago o una solución en busca de problema? *Doc. Ocas. Esp.* 1901.
- Derks, J., Gordijn, J., Siegmann, A., 2018. From chaining blocks to breaking even: A study on the profitability of bitcoin mining from 2012 to 2016. *Electron. Mark.* 28, 321–338.
- Dowd, K., Hutchinson, M., 2015. Bitcoin will bite the dust. *Cato J* 35, 357–382.
- Ferreira, D., Li, J., Nikolowa, R., 2019. Corporate capture of blockchain governance. *Eur. Corp. Gov. Inst. ECGI-Finance Work. Pap.*
- Hileman, G., Rauchs, M., 2017. 2017 Global Cryptocurrency Benchmarking Study. *SSRN Electron. J.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.2965436>
- Kroll, J.A., Davey, I.C., Felten, E.W., 2013. The economics of Bitcoin mining, or Bitcoin in the presence of adversaries, in: *Proceedings of WEIS*. p. 11.
- Malone, D., O’Dwyer, K.J., 2014. Bitcoin Mining and its Energy Footprint, in: 25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CICT 2014). Presented at the 25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CICT 2014), Institution of Engineering and Technology, Limerick, Ireland, pp. 280–285. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0699>
- Marx, C., 1959a. *El Capital: crítica de la economía política*. Libro primero, 2nd ed. Fondo de Cultura Económica, Bogotá.
- Marx, C., 1959b. *El Capital: crítica de la economía política*. Libro tercero, 2nd ed. Fondo de Cultura Económica, Bogotá.
- Nakamoto, S., 2008. Bitcoin: Un Sistema de Efectivo Electrónico Usuario-a-Usuario 9.
- Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G.C., Recanatini, M., Zhang, B.Z., 2018. 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. *SSRN Electron. J.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.3306125>
- Sweezy, P., 1969. *Teoría del desarrollo capitalista*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Valfells, S., Egilsson, J.H., 2016. Minting Money With Megawatts [Point of View]. *Proc. IEEE* 104, 1674–1678. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2594558>
- Velde, F., 2013. Bitcoin: A primer. *Chic. Fed Lett.* 317.