

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CIÊNCIAS ECONÔMICAS

Arthur de Souza Calza

**A atividade dos mineradores de *bitcoin* frente os diferentes cenários: uma análise
microeconômica**

Florianópolis

2023

Arthur de Souza Calza

**A atividade dos mineradores de *bitcoin* frente os diferentes cenários: uma análise
microeconômica**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Ciências Econômicas do Centro Socioeconômico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas
Orientador: Professor Roberto Meurer, Dr.

Florianópolis

2023

Calza, Arthur de Souza

A atividade dos mineradores de bitcoin frente os diferentes cenários : uma análise microeconômica / Arthur de Souza Calza ; orientador, Roberto Meurer, 2023.
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Socioeconômico, Graduação em Ciências Econômicas,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Ciências Econômicas. 2. Teoria da Firma. 3. mineração.
4. bitcoin. 5. halving. I. Meurer, Roberto. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Ciências Econômicas. III. Título.

Arthur de Souza Calza

**A atividade dos mineradores de *bitcoin* frente os diferentes cenários: uma análise
microeconômica**

Florianópolis, 21 de novembro de 2023.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e aprovado pela banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Meurer, Dr.
Orientador

Prof. Helberte João França Almeida, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jaylson Jair da Silveira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a **versão original e final** do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado
adequado para obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas por mim e pelos demais
membros da banca examinadora.



Documento assinado digitalmente

Roberto Meurer

Data: 06/12/2023 12:11:56-0300

CPF: ***.262.889-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.(a) Roberto Meurer, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico esse trabalho a todos aqueles que contribuíram com minha formação acadêmica, profissional e, especialmente, humana.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, que desde que consigo me lembrar me incentivaram ao caminho da busca pelo conhecimento e uma contínua evolução em minhas ações como ser humano. Sem eles, não seria sombra do que sou.

Da mesma maneira, agradeço o restante da minha família: minha irmã Livia, minha avó, meus tios, tias, primos e parentes que me aconselharam, elogiaram, repreenderam, incentivaram e me fizeram ser todos os dias uma pessoa melhor do que o dia anterior.

Agradeço imensamente minha namorada, Amanda, companheira nos momentos bons e ruins, por cada palavra de incentivo, leitura atenta e interesse genuíno em área tão distante daquela que dedica sua vivência acadêmica e profissional. Seu amor foi combustível para meu desenvolvimento acadêmico e na construção desse trabalho.

Gostaria de agradecer a todos os amigos que me apoiaram ao longo da graduação. Sejam fruto da própria universidade, amizades antigas ou qualquer origem que um amigo pode ter, o conforto nas horas ruins e a alegria compartilhada nos bons momentos foram fundamentais para o prosseguimento da vida acadêmica.

Também gostaria de agradecer aos meus colaboradores no Posto Galo e, especialmente, no Mercado Bitcoin, que contribuíram muito para minha evolução profissional e humana. Aos últimos, agradeço por despertar meu interesse e me possibilitar o estudo sobre a criptoeconomia; este trabalho não existiria sem vocês.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos professores do curso de graduação do Centro Socioeconômico, que por diversas vezes mudaram minha percepção sobre fatos que já considerava conhecidos, abrindo as portas para novas ideias e interpretações. Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador Roberto Meurer, pela sua grande dedicação como professor e por todo apoio na construção deste trabalho.

“O sol é o mesmo, de uma forma relativa, mas você está mais velho”

(Waters, Gilmour, Wright e Mason, 1973)

RESUMO

O presente trabalho busca compreender a tomada de decisão dos mineradores de *bitcoin* frente a Teoria da Firma. Através de uma função de lucro da firma, são apresentadas as principais variáveis observadas pelos agentes em suas tomadas de decisão de produção. Além disso, são realizadas análises de viabilidade e de sensibilidade para uma firma hipotética considerando cenários anteriores e posteriores ao próximo *halving* do *bitcoin*, visando compreender o comportamento das firmas em cada nível de recompensa monetária. Os resultados apresentados apontam um comportamento em congruência com a teoria microeconômica dominante, com o custo de energia elétrica sendo o principal fator de minimização de custos em qualquer cenário.

Palavras-chave: Teoria da Firma; mineração; bitcoin; halving

ABSTRACT

The present work seeks to understand the decision-making of bitcoin miners considering the Theory of the Firm. Through a firm's profit function, the main variables observed by agents in their production decision-making are presented. Furthermore, feasibility and sensitivity analyzes are carried out for a hypothetical firm considering scenarios before and after the next bitcoin halving, aiming to understand the behavior of firms at each level of monetary reward. The results presented point to behavior in line with the dominant microeconomic theory, with the cost of electrical energy being the main cost minimization factor in any scenario.

Keywords: Theory of the Firm; mining; bitcoin; halving

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Validação de transações através de chave pública e chave privada	22
Figura 2 - Inclusão de blocos na blockchain	22
Figura 3 - Mapa de isoquantas.....	28
Figura 4 - Maximização dos lucros no curto prazo	32
Gráfico 1 - Projeção da oferta monetária e taxa de inflação do bitcoin no tempo e blocos adicionados na blockchain.....	24
Gráfico 2 - Distribuição global dos mineradores (Setembro 2019-Janeiro 2022).....	26
Gráfico 3 - Número de transações da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do bitcoin em dólares americanos (2009–2012).....	33
Gráfico 4 - Dificuldade de mineração da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do bitcoin em dólares americanos (2009–2023).....	34
Gráfico 5 - Evolução do hashrate total da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do bitcoin em dólares americanos (2009–2023).....	35
Gráfico 6 - Curvas de custo, receita e lucro médios de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	50
Gráfico 7 - Curvas de custo, receita e lucro totais de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	51
Gráfico 8 - Curvas de custo, receita e lucro marginais de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	52
Gráfico 9 - Efeito do preço do bitcoin sobre o lucro e tempo de payback de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	53
Gráfico 10 - Efeito do hashrate da rede sobre o lucro da firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	54
Gráfico 11 - Efeito do preço da tarifa de energia elétrica sobre o lucro e tempo de payback de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”	55
Gráfico 12 - Curvas de custo, receita e lucro médios de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”.....	60
Gráfico 13 - Curvas de custo, receita e lucro totais de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”	61
Gráfico 14 - Curvas de custo, receita e lucro marginais de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”.....	62

Gráfico 15 - Efeito do preço do bitcoin sobre o lucro e tempo de payback de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”	63
Gráfico 16 - Efeito do hashrate da rede sobre o lucro da firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”	63
Gráfico 17 - Efeito do preço da tarifa de energia elétrica sobre o lucro e tempo de payback de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pools com maior participação de mercado e blocos minerados (10/out/2023).....	37
Tabela 2 - Principais ASICs disponíveis no mercado e suas características (outubro de 2023)	44
Tabela 3 - Preço das tarifas elétricas para empresas mais baratas em março de 2023.....	45
Tabela 4 - Preço das tarifas de energia dos principais mineradores de bitcoin em 2023.....	45
Tabela 5 - Impacto do aumento da quantidade de ASICs sobre lucro e tempo de payback em um cenário “Pré-Halving”	49
Tabela 6 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 10% no preço do bitcoin e 15% no hashrate da rede em um cenário “Pré-Halving”	56
Tabela 7 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 15% no preço do bitcoin e 10% no hashrate da rede em um cenário “Pré-Halving”	57
Tabela 8 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 10% no preço do bitcoin e 15% no hashrate da rede em um cenário “Pré-Halving”	57
Tabela 9 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 15% no preço do bitcoin e 10% no hashrate da rede em um cenário “Pré-Halving”	58
Tabela 10 - Impacto do aumento da quantidade de ASICs sobre o lucro em um cenário “Pós- Halving”	59
Tabela 11 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 15% no preço do bitcoin e 10% no hashrate da rede em um cenário “Pós-Halving”	65
Tabela 12 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 10% no preço do bitcoin e 15% no hashrate da rede em um cenário “Pós-Halving”	65
Tabela 13 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 10% no preço do bitcoin e queda semanal de 15% no hashrate da rede em um cenário “Pós-Halving”	66

SUMÁRIO

• 1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA E PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 METODOLOGIA	16
• 2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 FUNÇÕES DA MOEDA	18
2.1.1 Meio de Pagamento	18
2.1.2 Unidade de Conta	19
2.2.3 Reserva de Valor	20
2.2 O BITCOIN	20
2.2.1 A <i>blockchain</i>	21
2.2.2 <i>Proof-of-work</i>	23
2.2.3 A oferta monetária na rede Bitcoin	23
2.3 O SETOR DE MINERAÇÃO DE BITCOIN	25
2.4 A TEORIA DA FIRMA	26
2.4.1 Fatores de produção	26
2.4.2 Minimização de custos	30
2.4.3 Maximização de lucros	31
• 3 ANÁLISE DOS FATORES DE IMPACTO NO LUCRO DOS MINERADORES DE BITCOIN	33
3.1 O SETOR DE MINERAÇÃO DE BITCOIN APLICADO A TEORIA DA FIRMA	37
3.1.1 Fatores de produção de uma mineradora de <i>bitcoin</i>	37
3.1.2 Os custos de uma mineradora de <i>bitcoin</i>	40
3.1.3 Lucro de uma mineradora de <i>bitcoin</i>	42

3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM UMA FIRMA HIPOTÉTICA	43
3.2.1 Análise de Sensibilidade – Pré- <i>Halving</i>	47
3.2.2 Análise de Sensibilidade – Pós- <i>Halving</i>	58
• 4 CONCLUSÃO	67
• REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Essa seção apresenta de maneira introdutória o tema e o problema pesquisados no trabalho; define seus objetivos geral e específicos; apresenta a justificativa; e expõe a metodologia utilizada no trabalho.

1.1 TEMA E PROBLEMA DE PESQUISA

Em 3 de janeiro de 2009, Satoshi Nakamoto, um pseudônimo para uma pessoa ou grupo de pessoas até hoje desconhecido, realizou a primeira transação na rede Bitcoin, concretizando o *paper* divulgado para uma lista de discussão online de criptografia poucos meses antes, onde explicava o funcionamento do protocolo como “dinheiro eletrônico totalmente descentralizado e *peer-to-peer*” (Nakamoto, 2008) . A ideia de Nakamoto (2008), apesar de não necessariamente disruptiva, trazia também o conceito da tecnologia *blockchain* e o suporte para efetivamente a construção de um sistema financeiro paralelo à conjuntura financeira centralizada da época, claramente alvo de Nakamoto em sua mensagem gravada no bloco gênese da rede.

Após mais de uma década de crescimento e estabelecimento da rede Bitcoin, o *bitcoin* não atingiu seu aparente objetivo de suplantar o papel da moeda fiduciária nas economias globais. Seus críticos apontam como um ativo que, apesar da tecnologia inovadora, possui baixa aderência na sociedade devido seus problemas de velocidade de transação e alto consumo energético para a manutenção da atividade do seu sistema. Seus apoiadores, por outro lado, afirmam que o potencial monetário existente na moeda já foi provado, dada sua utilização como meio de troca e seu potencial para servir como reservar de valor, dada sua oferta limitada. Sua adoção por ampla parte da população, para esses, ainda é questão de tempo.

No centro dessa discussão, os mineradores de *bitcoin* possuem um papel fundamental para a manutenção da segurança da rede Bitcoin. Através da execução do *proof-of-work*, mecanismo de consenso da rede, os mineradores conseguem adicionar cada vez mais blocos à *blockchain*, tornando-a mais e mais estável e segura contra possíveis ataques maliciosos. Além disso, os mineradores assumem nesse sistema um papel similar ao da autoridade monetária dos sistemas financeiros tradicionais, assim como também, ao validar as transações realizadas na rede, possuem uma figura de algum modo semelhante as câmaras de compensação e liquidação.

Entretanto, os mineradores de *bitcoin* não são representados por uma única empresa ou instituição, e sim por diversos agentes que optam livremente por utilizar seus maquinários para

validar a rede, em troca de uma recompensa em *bitcoin*. Esse ato, que levou a própria nomeação dos agentes como “mineradores”, constitui uma espécie de corrida ao ouro moderna, onde diversos agentes tornam-se cada vez mais especializados nessa tarefa e competem entre si para obter as recompensas pela adição de mais um bloco à *blockchain*.

Este trabalho busca explicar os principais fatores que influenciam na tomada de decisão dos mineradores de *bitcoin*, sob uma perspectiva microeconômica – a Teoria da Firma – e compreender o impacto das diversas variáveis específicas desse mercado sobre a decisão desses agentes. Em especial, é abordado a importância do próximo *halving*, que a cada quatro anos reduz a recompensa dos mineradores pela metade, afetando suas decisões de produção.

1.2 OBJETIVOS

Essa seção apresenta os objetivos do trabalho, tanto de maneira ampla (objetivo geral) quanto de forma mais restrita (objetivos específicos).

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar, frente a Teoria da Firma, os impactos das diversas variáveis na decisão de produção dos mineradores de *bitcoin*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Definir os principais fatores de produção dos mineradores de *bitcoin*, frente a Teoria da Firma.
- b) Determinar os principais custos e quais os impactos destes na decisão dos mineradores.
- c) Verificar como a variação dos fatores de produção, custos e fatores exógenos influenciam no lucro dos mineradores.
- d) Analisar as perspectivas de produção dos mineradores no momento atual e em um cenário posterior ao próximo *halving* do Bitcoin.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Bitcoin, como ecossistema, trouxe mudanças significativas em diferentes campos de conhecimento. A *blockchain*, talvez mais relevante que o *bitcoin* em si, foi uma contribuição para inúmeras áreas, já que a tecnologia permite um banco de dados distribuído de forma descentralizado e público, além de características importantes como transparência e

imutabilidade. O ativo *bitcoin*, que teve seu primeiro registro de câmbio valendo US\$0,05 em julho de 2010, já chegou a valer US\$69.000,00 em novembro de 2021 e é presença cada vez mais constante em carteiras de investimento.

O estudo realizado por este trabalho busca auxiliar a responder questões pertinentes para o uso futuro e atual do protocolo Bitcoin. As decisões de produção tomadas dentro do mercado dos mineradores influencia significativamente na segurança da rede, um dos pilares fundamentais sobre o qual se desenvolve o valor do ativo. Compreender as variáveis que influenciam a tomada de decisão dos mineradores, assim como seus custos, é importante para o entendimento do futuro desse mercado e do ativo *bitcoin*.

Entender também a estrutura de mercado operante no mercado de mineradores é relevante para melhor análise desse setor como um todo. Apesar de Nakamoto e de simpatizantes do protocolo como Ulrich (2014) entenderem o mercado dos mineradores como um sistema de mercado competitivo, existem contestações quanto ao verdadeiro grau de descentralização dos mineradores, o que afeta diretamente a segurança do protocolo.

Vale também ressaltar que o Bitcoin é a base para todo o contexto ainda nascente dos criptoativos, que já incluem inúmeras inovações não restritas apenas ao campo econômico. Diversos outros protocolos já foram escritos buscando modificar, corrigir ou aperfeiçoar características do Bitcoin, e o impacto econômico e social de cada um deles não está presente neste trabalho, mas devem sua origem à criação de Satoshi Nakamoto.

1.4 METODOLOGIA

Buscando atingir o objetivo do trabalho, a metodologia utilizada na primeira parte se baseia em uma revisão bibliográfica do tema, utilizando de métodos de pesquisa explicativa para buscar entender as funções da moeda e a inovação monetária possibilitada pelo protocolo Bitcoin, e como isso deu origem ao mercado dos mineradores de *bitcoin*. Segundo Gil (2010), a pesquisa explicativa “visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência do fenômeno” (GIL, 2010, p. 28).

Utilizou-se como referência amplo arcabouço teórico sobre microeconomia e o funcionamento do protocolo *bitcoin*, assim como outros trabalhos acadêmicos que discorrem sobre o tema e trazem o debate sobre o mercado da mineração de *bitcoin*. Para isso, busca-se utilizar o método da pesquisa bibliográfica, que nas palavras de Prodanov e Freitas (2013):

Quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos, jornais, boletins, monografias, dissertações, teses, material cartográfico, internet, com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com todo o material já escrito sobre o assunto da pesquisa (Prodanov e Freitas, 2013, p. 54).

Em sequência, uma explicação da evolução do mercado dos mineradores concomitantemente à evolução do Bitcoin não deixa de lado o caráter explicativo da pesquisa, mas a utilização de estatísticas dos anos posteriores ao surgimento do *bitcoin* trazem um viés quantitativo para esse segmento do trabalho, dando um caráter também descritivo para a pesquisa. Nesse mesmo viés quantitativo, o trabalho busca entender através de estatísticas os principais componentes do mercado dos mineradores, seus custos, sua produção e seu lucro.

A ideia da pesquisa quantitativa, segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 69), é “traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las”. Portanto, o objetivo de trazer esse caráter para esse segmento do trabalho é embasar, através de estatísticas, a análise da produção dos mineradores de *bitcoin*, baseando-se na Teoria da Firma previamente apresentada para explicar as suas ações e decisões dadas cada alteração em variáveis importantes do setor.

Dados como o preço do ativo *bitcoin* em dólares, *hashrate* total da rede Bitcoin, preço do quilowatt-hora, poder computacional, entre outros dados importantes para o setor da mineração de *bitcoin*, são utilizados nessa parte.

Por fim, uma análise de sensibilidade é realizada, buscando exemplificar como a alteração de cada uma das variáveis afeta a produção, o custo e o lucro dos mineradores. Esse tipo de análise serve para projetar diferentes cenários e compreender a decisão dos agentes em cada um deles, e reforça o caráter explicativo do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção busca apresentar os principais conceitos explorados no trabalho, referentes às inovações monetárias do sistema Bitcoin, as características deste protocolo e a Teoria da Firma.

2.1 FUNÇÕES DA MOEDA

Como apresentado por Carvalho *et al.* (2007), em economias monetárias, a moeda desempenha três funções: meio de pagamentos, unidade de conta e reserva de valor. A execução ou não dessas funções por um determinado ativo é categórica para a classificação desse como moeda. A categorização ou não do *bitcoin* como moeda é uma ampla discussão, que engloba trabalhos como Davidson e Block (2017), Pinheiro (2017) e Almeida (2016). O fato de o *bitcoin* ser ou não uma moeda não interfere diretamente no mercado dos mineradores, visto que o ativo pode ser encarado também como uma *commodity* (Almeida, 2016), mas conhecer as funções da moeda é de grande importância para compreender a valorização do ativo frente a outras moedas fiduciárias como o dólar, fato que afeta diretamente o mercado da mineração.

2.1.1 Meio de Pagamento

A função de meio de pagamento (também chamada de “intermediário de trocas”) é a função que permite a manutenção de um sistema de *trocas indiretas*, como expressado por Carvalho *et al.* (2007). Nas palavras dos autores:

A troca com intermediação monetária separa as transações comerciais em operações de compra e operações de venda, permitindo um sistema de *trocas indiretas*. É muito mais fácil vender mercadorias e/ou serviços por moeda e, posteriormente, comprar outras mercadorias e/ou serviços pagando em moeda do que trocar coisas diretamente por coisas diferentes (Carvalho *et al.*, 2007, p. 2).

Dessa forma, a função de meio de pagamento permite ao ativo, em uma economia monetária, ser um intermediário de transações entre indivíduos, permitindo que as trocas não sejam apenas diretas e restritas a *coincidência mútua e complementar de necessidades*. Essas trocas seriam eficientes apenas em economias primitivas, com indivíduos ou famílias autossuficientes. Nesse modelo, uma troca direta simboliza, *ao mesmo tempo*, uma compra de uma mercadoria e uma venda de uma mercadoria (Carvalho *et al.*, 2007).

Pelo contrário, nas economias monetárias modernas onde prevalece a divisão do trabalho, prevalecem os sistemas de *trocas indiretas*, em que se ganha a possibilidade de separar o ato da compra da mercadoria do ato da venda da mercadoria. Isso representa um ganho de liberdade para os indivíduos e famílias para comprarem a mercadoria desejada no momento mais oportuno, não existindo mais a restrição da *coincidência mútua*.

A função meio de pagamento foi utilizada no ativo *bitcoin* pela primeira vez registrada em maio de 2010, em uma troca de uma pizza por 10 mil *bitcoins* (Ulrich, 2014, p. 54). Apesar disso, não é um ativo ainda amplamente transacionado no mundo como moedas fiduciárias tradicionais, como o dólar, o euro ou o real (Pinheiro, 2017, p. 26).

2.1.2 Unidade de Conta

A função de unidade de conta é perceptível na medida que, nas economias monetárias, os agentes econômicos estabelecem contratos entre si para coordenar as decisões de produção. Nesses contratos, advindos do processo da divisão do trabalho, são estabelecidos os salários dos trabalhadores em determinado ativo, ou o valor dos pagamentos de mercadorias entre firmas é dado por determinado ativo, ou o limite de crédito e taxa de juros em determinado ativo dado por algum banco. O comum entre todos esses contratos, como explicado por Carvalho *et al.* (2007), é que é estabelecida a unidade de medida da economia.

Através dessa função, surge a noção da função *moeda-de-conta*, representação intangível da moeda, necessária para liquidar obrigações contratuais. Carvalho *et al.* (2007) expressa que a função moeda-de-troca deriva da função moeda-de-conta, pois “A existência da moeda-de-troca é requerida porque se atribuem a todas as mercadorias, serviços e ativos de uma economia valores na forma de moeda-de-conta” (Carvalho *et al.*, 2007, p. 3).

Por meio da unidade de conta, é estabelecido qual ativo, de fato, será utilizado como referência para os agentes daquela economia como moeda e exercerá as outras duas funções. A função unidade de conta implica, também, que os contratos serão liquidados nesse determinado ativo (moeda corrente).

Apesar de alguns protocolos de finanças descentralizadas (*decentralised finance* – DeFi) utilizarem o *bitcoin* como referência em seus contratos, como apontado por Wronka (2023), o ativo ainda não é utilizado como referência para contratos, como mencionado anteriormente. Nem mesmo o recente caso da adoção do *bitcoin* como moeda de curso forçado por El Salvador seria suficiente para afirmar a presença dessa função (Vasconcelos, 2022, p.15-16).

2.2.3 Reserva de Valor

A função reserva de valor simboliza o fato de o ativo poder liquidar os contratos no futuro com aproximadamente o mesmo poder de compra do presente. Ou seja, a unidade de conta deve ser estável ao longo do tempo.

Para essa função, se dá o nome de reserva de valor. Nas palavras dos supracitados autores:

No momento em que um agente econômico recebe recursos na forma monetária, ele ganha o direito de reter poder de compra, em tese, indefinidamente sem temer perdas. A função reserva de valor dá ao detentor de moeda a possibilidade de reter recursos por períodos longos sem que tal atitude lhe imponha qualquer custo (de carregamento). (Carvalho *et al.*, 2007, p. 4).

Dessa forma, observa-se que a função reserva de valor permite transferir o poder de compra através do tempo. Em uma economia com hiperinflação, essa função da moeda é perdida, e as implicações da perda da transferência do poder de compra através do tempo (reserva de valor) são sentidas pelos agentes que possuem o ativo por um determinado período.

O ativo *bitcoin*, segundo Baur e Dimpfl (2021), pode ser considerado uma reserva de valor, já que possui um caráter deflacionário e um comportamento de apreciação frente as outras moedas fiduciárias no longo-prazo. Os autores destacam que apesar da volatilidade, o *bitcoin* possui uma característica de escassez tal qual o ouro, ativo que, apesar das oscilações de preços, se valorizou perante as principais moedas fiduciárias nos últimos 40 anos, sendo considerado uma reserva de valor importante. Entretanto, Vasconcelos (2022) afirma que entidades como o Banco Central Europeu ainda compreendem que o *bitcoin* não possuem a propriedade de reserva de valor, o que dificultaria sua concepção como moeda.

2.2 O BITCOIN

A inovação proposta por Nakamoto (2008) em seu artigo é de dinheiro eletrônico descentralizado e *peer-to-peer*. A ideia de dinheiro eletrônico, à época, não era necessariamente uma novidade, como aponta Ulrich (2014). O problema resolvido pelo *bitcoin* foi o problema do gasto duplo: o dinheiro eletrônico era, naquele momento, visto como outro arquivo eletrônico qualquer, podendo ser anexado e enviado de um indivíduo para outro; entretanto, sem a remoção do arquivo original do computador originador. Sem a presença de um

intermediário de confiança, como uma instituição bancária ou de pagamento, o dinheiro eletrônico acabava facilmente multiplicando-se (Ulrich, 2014). A inovação de Nakamoto foi, portanto, eliminar o intermediário. Como cita o autor:

A invenção do Bitcoin é revolucionária porque, pela primeira vez, o problema do gasto duplo pode ser resolvido sem a necessidade de um terceiro; Bitcoin o faz distribuindo o imprescindível registro histórico a todos os usuários do sistema via uma rede *peer-to-peer*. Todas as transações que ocorrem na economia Bitcoin são registradas em uma espécie de livro-razão público e distribuído chamado de *blockchain* (corrente de blocos, ou simplesmente um registro público de transações), o que nada mais é do que um grande banco de dados público, contendo o histórico de todas as transações realizadas. Novas transações são verificadas contra o *blockchain* de modo a assegurar que os mesmos *bitcoins* não tenham sido previamente gastos, eliminando assim o problema do gasto duplo. A rede global *peer-to-peer*, composta por milhares de usuários, torna-se o próprio intermediário (Ulrich, 2014, p. 18).

Dessa forma, através da criação da *blockchain* na rede Bitcoin, Nakamoto possibilitou a existência de transações pela internet sem instituições intermediárias de confiança, possibilitando a existência de uma rede *peer-to-peer*. A exclusão desse fator intermediário, comum ao sistema de pagamentos centralizado, é descrito por Nakamoto (2008) com o objetivo de: 1) retirar o papel do intermediário de mediar conflitos; 2) reduzir os custos das transações; 3) extinguir a necessidade de obtenção de informações sobre as partes envolvidas na transação; e 4) acabar com a possibilidade de fraudes (Nakamoto, 2008).

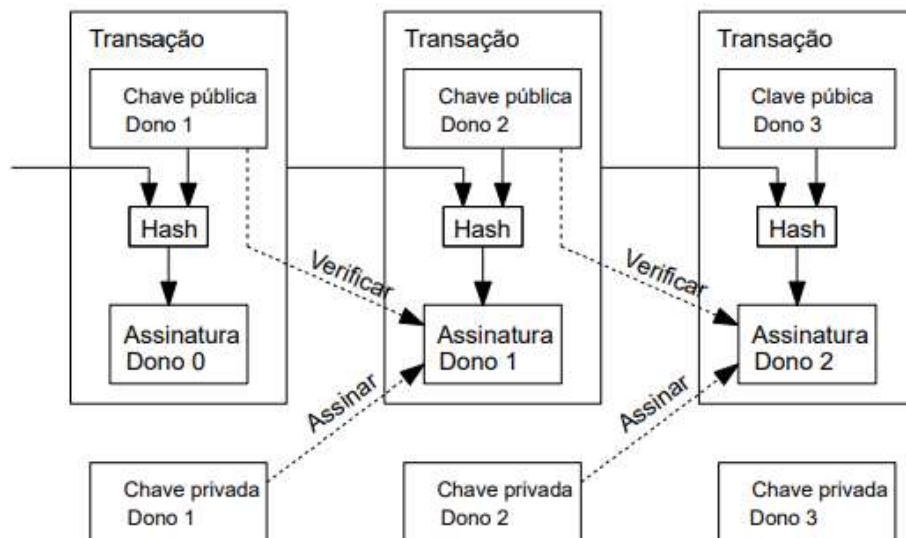
Assim, nota-se que o objetivo principal de Nakamoto, ao criar o Bitcoin, era substituir a necessidade de confiança em terceiros (instituições intermediárias, como bancos e instituições de pagamento) para a realização de transações na internet, como cita Nakamoto: “O que é necessário é um sistema de pagamento eletrônico baseado em prova criptográfica em vez de confiança, permitindo a quaisquer duas partes dispostas a transacionar diretamente uma com a outra sem a necessidade de um terceiro confiável.” (Nakamoto, 2008, tradução por Rodrigo Silva Pinto).

2.2.1 A *blockchain*

A eliminação de um terceiro confiável, segundo Nakamoto (2008), seria possível através da *blockchain*, uma espécie de livro-razão público em que todas as transações do sistema ficam armazenadas em um banco público de dados. As transações são validadas através do uso de dois mecanismos, as chaves públicas e as chaves privadas, que realizam uma prova criptográfica da transação. A transação indica uma transferência de propriedade dos *bitcoins* e

pode ser verificada com a existência de um bloco contendo uma chave pública e assinado por uma chave privada.

Figura 1- Validação de transações através de chave pública e chave privada



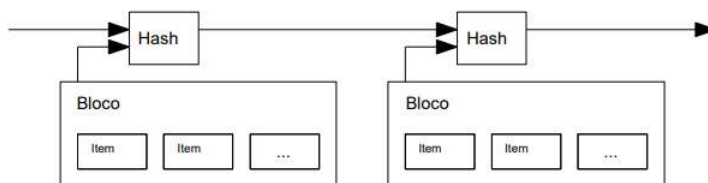
Fonte: Retirado de Nakamoto (2008). Tradução de Rodrigo Silva Pinto.

A transferência de *bitcoins* e o uso de suas chaves privadas é exemplificado por Ulrich (2014):

Quando a Maria decide transferir *bitcoins* ao João, ela cria uma mensagem, chamada de “transação”, que contém a chave pública de João, assinando com a sua chave privada. Olhando a chave pública da Maria, qualquer um pode verificar que a transação foi de fato assinada com a sua chave privada, sendo, assim, uma troca autêntica, e que João é o novo proprietário dos fundos. A transação – e portanto uma transferência de propriedade dos *bitcoins* – é registrada, carimbada com data e hora e exposta em um “bloco” do *blockchain* (o grande banco de dados, ou livro-razão da rede Bitcoin) (Ulrich, 2014, p. 19).

Após uma transferência ser realizada, ela será incluída em um bloco. Esse bloco, após validação pelos mineradores (através de poder computacional, explicado na próxima sessão), será adicionada à *blockchain*, formando uma verdadeira “corrente de blocos”, como ilustrado pela figura 2.

Figura 2 - Inclusão de blocos na *blockchain*



Fonte: Retirado de Nakamoto (2008). Tradução de Rodrigo Silva Pinto.

2.2.2 *Proof-of-work*

Para a validação dessas transações e a adição de novos blocos na *blockchain*, é necessária a verificação das transações por meio de força computacional utilizada para a resolução de problemas matemáticos complexos. Como descrito por Ulrich (2014), os mineradores são os usuários que proveem força computacional para a rede realizar esses registros. O termo “minerador” é utilizado pois esses usuários são recompensados através de *bitcoins* recém-criados.

A realização desses problemas matemáticos é feita através de um sistema de *proof-of-work*, como explicado por Almeida (2016): “O *proof-of-work* força que, para um bloco contendo transações ser incluído na *blockchain*, seja necessário o dispêndio de determinada quantidade de energia computacional” (Almeida, 2016, p. 69). O autor ainda elucida o processo técnico do *proof-of-work*:

Em termos técnicos, o *proof-of-work* é a realização de um *puzzle* (quebra-cabeças) matemático onde se tenta encontrar um determinado valor que quando criptografado utilizando, por exemplo, um *hash* SHA-256, o início do *hash* contém um exato número de zeros. A dificuldade do *puzzle* é exponencial de acordo com o número de zeros necessários. No sistema da *bitcoin*, um *nonce* é incorporado ao último bloco da corrente de transações para que o próximo bloco tenha um *hash* que satisfaça determinada condição. Em resumo, o *proof-of-work* força um processamento computacional através da realização de um *puzzle* e o *nonce* controla a sua dificuldade de solução (Almeida, 2016, p. 70).

Esse processo se dá de forma aleatória, com computadores competindo entre si buscando gerar o maior número de *hashes* para fechar o *nonce*. O autor ressalta que quanto maior a força computacional (maior número de *hashes* por segundo) maior a chance de resolver o problema e encontrar a solução para o bloco, ganhando a recompensa monetária em *bitcoins* decorrente dessa operação.

2.2.3 A oferta monetária na rede Bitcoin

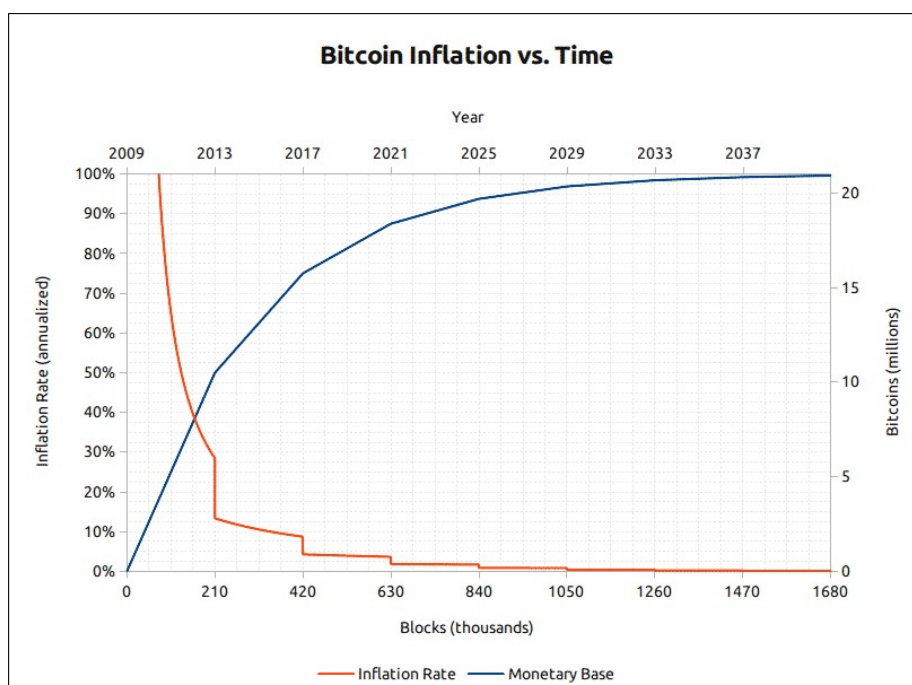
Dessa forma, nota-se que os mineradores são os responsáveis por substituir, no sistema criado por Nakamoto, a figura da autoridade monetária, tanto na emissão de novas unidades monetárias quanto na verificação das transações, exercendo o papel de intermediário de confiança. Entretanto, não há uma única empresa ou instituição responsável; o incentivo é que diversos usuários possam competir para validar transações e, dessa forma, assegurar a contínua oferta monetária e descentralização do sistema.

Porém, a oferta de *bitcoins* foi programada para ser propositalmente limitada. Projetado com a semelhança de um “ouro digital”, sua oferta final será de 21 milhões de *bitcoins* emitidos pelos mineradores. Após isso, o incentivo aos mineradores virá não da geração de novos *bitcoins*, mas sim das taxas de transação cobradas pela rede ao se efetuar uma transação. Como indicado por Ulrich (2014):

O Bitcoin foi projetado de modo a reproduzir a extração de ouro ou outro metal precioso da Terra – somente um número limitado e previamente conhecido de *bitcoins* poderá ser minerado. A quantidade arbitrária escolhida como limite foi de 21 milhões de *bitcoins*. Estima-se que os mineradores colherão o último “satoshi”, ou 0,00000001 de um *bitcoin*, no ano de 2140. Se a potência de mineração total escalar a um nível bastante elevado, a dificuldade de minerar *bitcoins* aumentará tanto que encontrar o último “satoshi” será uma empreitada digital consideravelmente desafiadora. Uma vez que o último “satoshi” tenha sido minerado, os mineradores que direcionarem sua potência de processamento ao ato de verificação das transações serão recompensados com taxas de serviço, em vez de novos *bitcoins* minerados (Ulrich, 2014, p. 20).

Assim, o aumento da base monetária é previsível, e portanto sua taxa de inflação. A taxa de recompensa por bloco é reduzida a cada 4 anos, reduzindo os níveis de emissão monetária. O gráfico 1 apresenta a relação entre o aumento contínuo, porém em níveis cada vez menores, de novas unidades de *bitcoins* e a taxa de inflação esperada.

Gráfico 1 - Projeção da oferta monetária e taxa de inflação do *bitcoin* no tempo e blocos adicionados na *blockchain*



Fonte: Disponível em <<https://coincentral.com/how-many-bitcoins-are-left/>>

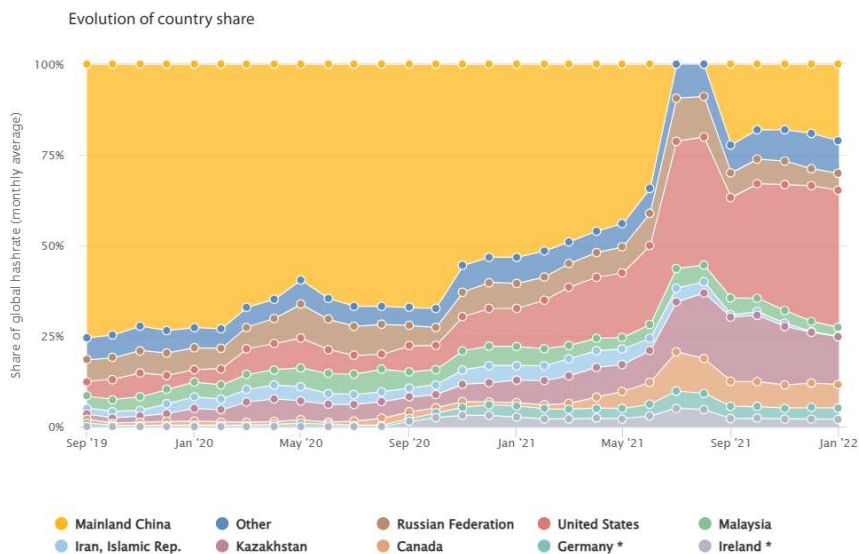
2.3 O SETOR DE MINERAÇÃO DE BITCOIN

Apesar de, teoricamente, qualquer computador (inclusive os computadores pessoais) poder ser um validador da rede Bitcoin através do *proof-of-work*, quanto maior o poder computacional disponível, maior a probabilidade de resolver o *puzzle* e validar o bloco, recebendo a recompensa. Isso incentiva, segundo Nascimento (2021), um aumento no número de agentes dedicados a aumentar seu poder computacional, ou seja, um aumento no número de mineradores. Ulrich (2014, p. 19) trouxe a ideia, à época: “Mineradores tendem a ser entusiastas da computação comuns, mas à medida que a mineração se torne mais difícil e cara, a atividade será, provavelmente, profissionalizada”.

A realidade, hoje é próxima da apontada pelo autor. De acordo com Notariya (2023), o mercado das mineradoras de *bitcoin* atualmente possui um valor de mercado de aproximadamente 1,8 bilhão de dólares, com a perspectiva de crescimento para 5 bilhões de dólares em 2032. Isso evidencia um mercado mais competitivo, com mais agentes envolvidos, e com um poder computacional constantemente maior direcionado a esse fim.

Como o Bitcoin é uma rede global e *peer-to-peer*, os mineradores também estão distribuídos mundialmente, em diferentes países. Como será explorado posteriormente, os mineradores buscam minimizar seus custos de produção, então sua distribuição global tende a refletir também esse fator. De acordo com Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2022), estudo realizado para mapear a distribuição geográfica dos mineradores desde 2019, é possível observar que, em janeiro de 2022, o país com maior concentração de mineradores são os Estados Unidos, representando 37,8% dos mineradores de *bitcoin* naquele período. Na sequência, encontrava-se a China (21,1%), Cazaquistão (13,2%), outros países (9%) e Canadá (6,5%). O gráfico 2 ilustra a evolução da distribuição global dos mineradores.

Gráfico 2 - Distribuição global dos mineradores (Setembro 2019-Janeiro 2022)



Fonte: Disponível em <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map>

2.4 A TEORIA DA FIRMA

Os mineradores, como já mencionado, buscam aumentar sua produção (minerar mais blocos – aumentar sua probabilidade de receber mais recompensas), ao mesmo tempo em que visam minimizar seus custos de produção. Esse tipo de comportamento pode ser analisado de um ponto de vista microeconômico, no que se convencionou a chamar de “Teoria da Firma”.

Criado por R. H. Coase no clássico artigo “*The Nature of Firm*”, Coase (1937) propôs a base da análise da produção das firmas através dos fatores de produção, a minimização dos seus custos e maximização dos lucros. Pode-se dividir a análise da Teoria da Firma nesses três aspectos.

2.4.1 Fatores de produção

Os fatores de produção são todos os elementos fundamentais para as firmas realizarem suas atividades, transformando matéria para a produção de bens ou serviços. Como apresentado em Pindyck e Rubinfeld (2013), “Esse processo produtivo, transformar insumos em produtos, é a essência do que uma empresa faz. Os insumos, que também são chamados fatores de produção, são tudo aquilo que a empresa utiliza no processo produtivo” (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 194).

Segundo os autores, podemos dividir os insumos nas categorias de *trabalho*, *matéria-prima* e *capital*. Nas palavras dos mesmos:

O trabalho abrange os trabalhadores especializados (carpinteiros, engenheiros) e os não especializados (trabalhadores agrícolas), bem como os esforços empreendedores dos administradores da empresa. As matérias-primas incluem o aço, o plástico, a eletricidade, a água e quaisquer outros materiais que a empresa adquira e transforme em um produto final. O capital inclui o terreno, as instalações, o maquinário e outros equipamentos, bem como os estoques (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 194).

Uma firma pode combinar esses insumos de diferentes maneiras, de forma que produzirá diferentes quantidades de produto. Essa relação entre os diferentes insumos de uma firma e seu produto pode ser representada por uma *função de produção*. Uma função de produção usualmente é representada dessa maneira

$$q = F(K, L)$$

onde q representa a quantidade produzida, K o capital empregado na produção e L o trabalho (*labor*) alocado pela firma na produção.

Essa função utiliza apenas dois insumos, mas existem funções de produção com inúmeros insumos, refletindo a realidade das diversas firmas. Em um exemplo hipotético em que a firma em questão fosse uma padaria, q poderia representar a quantidade de pães produzidos, K as máquinas utilizadas para produção de pães e L a quantidade de trabalhadores empregados na produção dessa padaria.

No curto prazo, usualmente alguns fatores são fixos, isto é, não se alteram rapidamente. Geralmente, esse fator fixo em análise é o capital, visto que a expansão de uma fábrica, por exemplo, não se dá de maneira rápida, sendo necessária. Nas palavras de Pindyck e Rubinfeld (2013):

Como as empresas têm de considerar se os insumos podem ser substituídos uns pelos outros, e, nos casos em que isso pode ocorrer, quanto tempo é necessário para a substituição, é importante distinguir entre curto e longo prazos quando analisamos a produção. Curto prazo refere-se ao período no qual a quantidade de um ou mais fatores de produção não pode ser modificada. Em outras palavras, no curto prazo há sempre pelo menos um fator que não pode ser modificado; esse fator é, por isso, denominado insumo fixo. O longo prazo corresponde ao período necessário para tornar variáveis todos os insumos (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 195).

À medida que se aumenta a produção de uma firma, pode-se calcular o produto médio, dividindo a quantidade total de q por um dos insumos, por exemplo L . Esse fator é, por vezes,

chamado de produtividade. Essa medida representa quantos produtos cada unidade de insumo (trabalho, capital) produz em média (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 197). Por exemplo, o produto médio do insumo trabalho é dado pela seguinte equação:

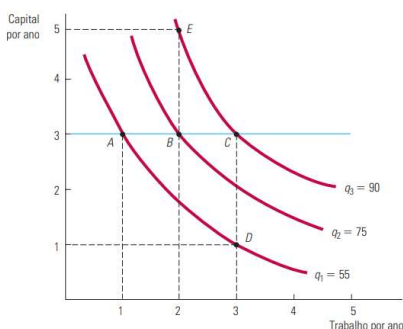
$$PM_L = \frac{q}{L}$$

É possível também calcular o produto marginal de uma firma. O produto marginal é a variação que se tem no produto ao se adicionar uma unidade de insumo, como exposto. Por exemplo, se uma padaria com 5 trabalhadores e uma produção de 500 pães por dia contrata um trabalhador adicional, mantendo fixo seu nível de capital, e constata no período seguinte que a produção aumentou para 580 pães por dia, o produto marginal do trabalho foi de 80 unidades de pães. De acordo com Pindyck e Rubinfeld (2013), o produto marginal do trabalho, por exemplo, pode ser escrito da seguinte forma:

$$PMg_L = \frac{\Delta q}{\Delta L}$$

Assim, é possível combinar dois ou mais insumos (a depender da função de produção) de forma a se obter o mesmo nível de produção. O conjunto de pontos onde a combinação de dois insumos resultam em uma mesma quantidade de produto é chamado de *isoquanta*. Nas palavras dos supracitados Pindyck e Rubinfeld (2013) “Uma isoquanta é uma curva que representa todas as possíveis combinações de insumos que resultam no mesmo volume de produção” (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 206). Um mapa de isoquantas, representando três diferentes níveis de produção, é representado pela figura 3.

Figura 3 - Mapa de isoquantas



Fonte: Retirado de (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 207).

No longo prazo, a firma não necessita aumentar o produto fazendo a substituição de um insumo pelo outro. Como todos os insumos são variáveis, a firma escolhe a melhor maneira de aumentar a produção. Uma maneira é aumentando proporcionalmente os insumos utilizados, mudando a *escala* da operação. A esse tipo de situação se dá o nome de rendimentos de escalas, referindo-se à proporção do aumento do produto na medida que se aumentam os insumos proporcionalmente, e é subdividido em três casos, conforme Pindyck e Rubinfeld (2013): rendimentos crescentes de escala, rendimentos constantes de escala e rendimentos decrescentes de escala.

Os rendimentos crescentes de escalas ocorrem quando a produção cresce numa proporção maior que o crescimento dos insumos. Nas palavras dos autores:

Se a produção cresce mais que o dobro quando se dobram os insumos, então há rendimentos crescentes de escala. Isso pode ocorrer pelo fato de a operação em maior escala permitir que administradores e funcionários se especializem em suas tarefas e façam uso de instalações e equipamentos mais especializados e em grande escala. A linha de montagem na indústria automobilística é um famoso exemplo de rendimentos crescentes (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 213).

Os rendimentos constantes de escala, por outro lado, explicitam que a produção cresce na mesma proporção que os insumos. Por exemplo, se uma firma triplicar seus insumos e sua produção triplicar, existem rendimentos constantes de escala.

Os rendimentos decrescentes de escala indicam, pelo contrário, que o produto cresce em uma proporção menor do que a expansão dos insumos. Se os insumos triplicarem, por exemplo, e a produção dobrar, existem rendimentos decrescentes de escala.

Os autores ressaltam que os rendimentos de escala não são necessariamente uniformes ao longo da produção de uma mesma firma. A firma pode possuir, ao longo de sua produção, um comportamento de rendimentos constantes de escala, por exemplo, e em dado momento, com níveis mais altos de produção, rendimentos crescentes de escala. Os autores ainda apontam:

Os rendimentos de escala variam de modo substancial entre as empresas e entre os setores. Mantido tudo o mais constante, quanto mais substanciais forem os rendimentos de escala, maiores tendem a ser as empresas de determinado setor. Em geral, a indústria de transformação tem maior probabilidade de apresentar rendimentos crescentes de escala do que as empresas do setor de serviços, pois a atividade de transformação exige substanciais investimentos em equipamentos de capital. As empresas do setor de serviços são mais intensivas em trabalho, e podem ser igualmente eficientes operando em pequena ou grande escala (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 215).

2.4.2 Minimização de custos

Todos os insumos geram custos para as firmas. De forma simultânea, a firma busca aumentar seu nível de produção ao máximo possível e reduzir seus custos de forma ótima. A segregação da análise dos custos é um fundamental para a firma maximizar de forma eficiente seus lucros.

Podemos dividir os custos de uma firma em *custos fixos* e *custos variáveis*. Os custos fixos são aqueles que não se alteram dados os níveis de produção e só são eliminados com o encerramento da atividade da firma. Os custos variáveis, por outro lado, estão intimamente ligados aos insumos e variam a cada nível de produção. A soma dos custos fixos e dos custos variáveis, conforme Pindyck e Rubinfeld (2013), é igual ao *custo total* da firma. Portanto, teremos que

$$CT = CF + CV$$

onde CT representa o custo total, CF representa o custo fixo e CV representa o custo variável.

De forma semelhante ao produto, podemos calcular também os custos médios e marginais. O custo médio (pode-se calcular o *custo total médio*, o *custo fixo médio* e o *custo variável médio*) é dado pelo correspondente custo dividido pela quantidade produzida q . Assim, podemos escrever o custo total médio como

$$CTMe = \frac{CT}{q}$$

Já o *custo marginal* é descrito como o aumento no custo implicado pelo aumento de uma unidade de produto. Pindyck e Rubinfeld (2013) também se referem a esse custo como custo incremental. Como o custo fixo não varia ao longo da produção, a relação desse custo se dá somente pelo aumento do custo variável, que é equivalente ao aumento no custo total. Logo, pode-se escrever uma equação para o custo marginal da seguinte forma:

$$CMg = \frac{\Delta CV}{q} = \frac{\Delta CT}{q}$$

Esses são os custos que uma firma analisa quando busca aumentar seu lucro. A busca mútua entre aumento da produção (na verdade, receita) e minimização dos custos levará a maximização dos lucros pela firma.

2.4.3 Maximização de lucros

Como mencionado anteriormente, uma firma busca maximizar seus lucros minimizando seus custos e aumentando suas receitas. Segundo Pindyck e Rubinfeld (2013), o *lucro* é representado pela diferença entre *receita* (total) e *custo* (total). A receita, por sua vez, pode ser descrita através da seguinte relação

$$R = p \cdot q$$

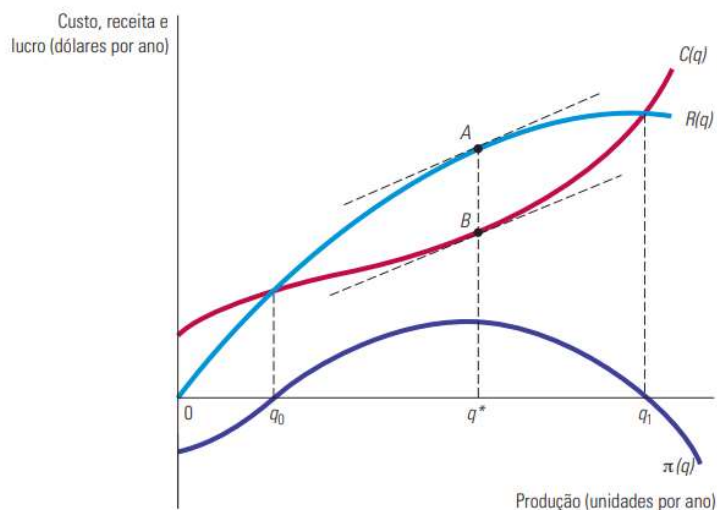
onde R representa a receita, p o preço de venda do produto e q o número de unidades vendidas.

Como visto anteriormente, os custos totais também dependem do nível de produção q . Portanto, pode-se escrever o lucro π da firma da seguinte maneira:

$$\pi(q) = R(q) - C(q)$$

Para maximizar os lucros, a empresa deve buscar a produção onde a diferença entre receita e custos seja máxima. A partir de dado momento, a empresa só conseguirá vender mais unidades reduzindo o preço de venda, prejudicando a inclinação da curva de receita. A curva de custos, por outro lado, é crescente. Portanto, acima de um ponto ótimo q^* , a receita crescerá em uma proporção menor que os custos, portanto o lucro não será máximo. A figura 4 ilustra essa situação graficamente.

Figura 4 - Maximização dos lucros no curto prazo



Fonte: Retirado de (Pindyck, Rubinfeld, 2013, p. 277).

É importante salientar que, no ponto q^* , o custo marginal – inclinação da curva $C(q)$ – e a receita marginal – inclinação da curva $R(q)$ – são iguais. Isso ocorre pois, nesse ponto, o *lucro marginal* é igual a zero, já que um aumento de uma unidade de produto reduziria o lucro. Isso pode ser algebricamente deduzido da seguinte forma

$$\frac{\Delta\pi}{\Delta q} = \frac{\Delta R}{\Delta q} - \frac{\Delta C}{\Delta q} = 0$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta q} = \frac{\Delta C}{\Delta q}$$

onde $\frac{\Delta\pi}{\Delta q}$ representa o lucro marginal, $\frac{\Delta R}{\Delta q}$ representa a receita marginal e $\frac{\Delta C}{\Delta q}$ representa o custo marginal. Assim, concluímos que o lucro é maximizado no ponto onde:

$$RMg(q) = CMg(q)$$

3 ANÁLISE DOS FATORES DE IMPACTO NO LUCRO DOS MINERADORES DE BITCOIN

Pode-se traçar um paralelo da evolução do mercado de mineração de *bitcoin* com a evolução da própria rede e com a evolução do preço do ativo. Nos primeiros anos de sua existência, o *bitcoin* não possuía cotação com o dólar americano ou qualquer outra moeda fiduciária e, apesar de possuir suas características apresentadas anteriormente, era utilizado com muito menos frequência do que veio a ser nos anos posteriores. O gráfico 3 ilustra o número de transações da rede Bitcoin do período de 2009 a 2012.

Gráfico 3 - Número de transações da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do *bitcoin* em dólares americanos (2009–2012)



Fonte: Disponível em <studio.glassnode.com>

O subsequente aumento da utilização da rede Bitcoin fez com que mais mineradores participassem do processo de validação das transações. Segundo Konstantinidis (2021), o aumento do uso do *bitcoin* e sua valorização perante o dólar fez com que existisse um incentivo para: 1) a entrada de um número cada vez maior de mineradores no mercado; e 2) o aumento do poder computacional dos mineradores, que buscavam aumentar a probabilidade de ganhar a recompensa enviando o maior número de *hashes* possíveis. Isso seria possível com computadores mais eficientes, que emitissem mais *hashes* por segundo, ou simplesmente utilizando mais computadores.

O aumento no número de validadores da rede desde a criação do Bitcoin pode ser observado através de duas métricas: a dificuldade de mineração e o *hashrate* da rede. A dificuldade de mineração é definida, de acordo com o CoinMarketCap (2023a), como “uma indicação de quão difícil (e também demorado) é encontrar o *hash* certo para cada um dos blocos” (CoinMarketCap, 2023a, tradução do autor). Ou seja, a dificuldade de mineração indica o número estimado de *hashes* necessários para minerar um bloco. O gráfico 4 ilustra o aumento da dificuldade de mineração de 2009 a 2023.

Gráfico 4 - Dificuldade de mineração da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do *bitcoin* em dólares americanos (2009–2023)



Fonte: Disponível em <studio.glassnode.com>

Já o *hashrate* é uma métrica que indica “o poder computacional combinado de toda uma rede de criptomoedas ou de uma plataforma de mineração específica na rede” (CoinMarketCap, 2023b, tradução do autor). Ainda segundo o autor, a métrica pode ser explicada da seguinte forma:

O *hashrate* de uma plataforma de mineração é o número de *hashes* que ela pode calcular por segundo. O *hashrate* combinado de uma rede de criptomoeda é a soma dos *hashrate* de todas as plataformas de mineração que estão em operação em um determinado período.

Diferentes dispositivos, como CPUs, GPUs e ASICs, possuem *hashrate* diferentes, dependendo de seu poder computacional, bem como de quão bem otimizados eles são para a tarefa específica de processamento de uma determinada função de *hash* (CoinMarketCap, 2023b, tradução do autor).

A evolução do *hashrate* total da rede Bitcoin pode ser observada através do gráfico 5.

Gráfico 5 - Evolução do *hashrate* total da rede Bitcoin em comparação a evolução do preço do *bitcoin* em dólares americanos (2009–2023)



Fonte: Disponível em <studio.glassnode.com>

Para este trabalho, será utilizado “*hashrate* da firma” quando for referida a quantidade de *hashes* por segundo totais emitida por determinada mineradora. Como explicado posteriormente, o *hashrate* da firma será dado em função do poder computacional disponível para aquela firma e a quantidade de máquinas utilizadas pela mineradora. Já quando for referenciado o total de *hashes* por segundo emitidos por toda rede Bitcoin, será utilizado o termo “*hashrate* da rede”.

Com o aumento do número de participantes no mercado de mineração, buscaram-se formas de maximizar os ganhos por parte dos mineradores, aumentando a certeza quanto ao ganho da recompensa. Afinal, apesar de a recompensa possuir elementos de “aleatoriedade”, devido a busca pela solução do *puzzle* via emissão de *hashes*, um aumento no poder computacional aumenta a probabilidade de sair vencedor da “rodada de validação”, como são chamados os períodos de mais ou menos 10 minutos de mineração de um bloco.

Esse aumento de poder computacional poderia ser feito via própria firma, o que possivelmente levaria a uma centralização do mercado de mineração em grandes empresas especializadas e com grandes fatias do mercado. Entretanto, essa forma requereria um investimento em máquinas (computadores) muito maior do que de fato foi realizado; mais que

isso, essa opção continuava a manter o elemento da incerteza quanto ao recebimento da recompensa.

A solução encontrada foi aumentar o poder computacional “compartilhando” o mesmo entre diversos mineradores, a fim de elevar as chances de todos receberem a recompensa e serem proporcionalmente remunerados de acordo com o poder computacional cedido previamente. Esse tipo de estrutura organizacional ficou conhecida como *pool* de mineração, com os maiores *pools* agregando milhares de mineradores. De acordo com Lewenberg *et al.* (2015):

Essa atribuição de recompensas, que proporciona o incentivo para a participação dos mineradores, é um processo aleatório com uma grande variância. Os mineradores que desejam um rendimento estável participam frequentemente de *pools* de mineração que dividem entre seus membros a recompensa, reduzindo a variância. *Pools* de mineração são ligeiramente melhores na coordenação de seus participantes devido à comunicação de menor latência, fato que implica conseguirem recolher recompensas ligeiramente superiores. (LEWENBERG *et al.*, 2015, p. 919, tradução do autor)

Através das *pools* de mineração, os mineradores de *bitcoin* conseguiram diminuir o seu risco de não receber a recompensa ao mesmo tempo que não necessitam aumentar o poder computacional próprio da firma. Ao participar de uma *pool* de mineração, mantendo o *hashrate* da firma e o *hashrate* da rede constante, a probabilidade de a firma receber a recompensa pela mineração do bloco aumenta, já que estará possuindo “virtualmente” um poder de mineração maior, somado ao das outras firmas participantes da *pool*. Caso a *pool* consiga validar o bloco, a recompensa é dividida proporcionalmente entre os participantes. Como a *pool* possui um poder computacional muito maior que a firma isoladamente, a probabilidade de se obter mais recompensas é maior dentro de uma *pool* do que fora, apesar de o componente estocástico ainda existir dentro da mineração de *bitcoin*.

As *pools*, para manter seu funcionamento, requerem um pequeno percentual das recompensas obtidas pelos mineradores. De acordo com Konstantinidis (2021), as *pools* cobram em média taxas entre 1% e 3% dos rendimentos obtidos. De acordo com o agregador de dados *on-chain* BTC.com (2023), no período outubro de 2022 a outubro de 2023 a taxa média cobrada pelas *pools* foi de 3,83%. Mesmo assim, os mineradores aparentemente preferem a segurança das *pools* a minerar isoladamente, com um poder computacional comparativamente muito menor ao das *pools*. A tabela 1 apresenta as *pools* com maior participação na rede (maior poder computacional; consequentemente mais blocos minerados).

Tabela 1 - *Pools* com maior participação de mercado e blocos minerados (10/out/2023)

Posição	Pool	Participação no hashrate da rede	Poder computacional	Blocos minerados
1	Foundry USA	28,92%	126.92 EH/s	129
2	AntPool	27,35%	120.03 EH/s	122
3	ViaBTC	8,74%	38.37 EH/s	39
4	F2Pool	8,52%	37.39 EH/s	38
5	Binance Pool	7,40%	32.47 EH/s	33
6	Luxor	5,16%	22.63 EH/s	23
7	MARA Pool	4,93%	21.64 EH/s	22
8	BTC.com	2,24%	9.84 EH/s	10
9	Poolin	2,24%	9.84 EH/s	10
10	unknown	2,24%	9.84 EH/s	10
11	SBI Crypto	1,35%	5.90 EH/s	6
12	Braians Pool	0,67%	2.95 EH/s	3
13	ULTIMUS POOL	0,22%	983.84 PH/s	1
	Total	100,00%	438.79 EH/s	446

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em informações de BTC.com (2023)

3.1 O SETOR DE MINERAÇÃO DE BITCOIN APLICADO A TEORIA DA FIRMA

Pode-se observar que uma mineradora de *bitcoin* se comporta de uma maneira muito similar a uma firma descrita anteriormente pela Teoria da Firma: possui fatores de produção, busca combiná-los de forma a minimizar seus custos e aumentar seus lucros. Assim, é possível analisar seus processos frente essa teoria e buscar referencial nesta para compreender a tomada de decisão produtiva de uma firma mineradora de *bitcoin*.

3.1.1 Fatores de produção de uma mineradora de *bitcoin*

O produto obtido pela firma é um determinado número de *bitcoins* minerados em determinado período. Esses *bitcoins* serão vendidos por seu preço de mercado, gerando uma receita aos mineradores. Para determinar o número de *bitcoins* minerados em certo período, é necessário descobrir a função de produção da firma. A equação 1 representa uma função de produção de uma firma mineradora de *bitcoin*

$$q = (B + F) \cdot \left(\frac{H_f}{H_r}\right) \quad (1)$$

onde q representa a quantidade de *bitcoins* minerados pela firma, B representa o número total de *bitcoins* minerados pela rede, F representa o valor total das taxas (*fees*) pagos pela rede aos mineradores, H_f representa o *hashrate* da firma e H_r representa o *hashrate* da rede.

O número de *bitcoins* minerados pela rede, como explicado anteriormente, é previsível, dado a proposta original de Nakamoto (2008). Porém, como a função de produção é dada em um determinado período, por exemplo, em um dia, a quantidade de blocos minerados nem sempre será igual para todos os períodos. Um novo bloco é adicionado à *blockchain* em um período de cerca de dez minutos, o que resultaria em 144 blocos novos todos os dias. Entretanto, essa dificuldade é ajustada a cada 2.016 blocos minerados (CoinMarketCap, 2023a), ajustando-se de acordo com a quantidade de mineradores existentes na rede. Assim, nem todo dia serão minerados exatamente 144 blocos, e portanto esse valor não pode ser uma constante na função, necessitando, em seu lugar, de uma variável representando o produto entre o total de blocos minerados pela rede naquele período e a recompensa atual paga pela rede.

As taxas pagas pela rede aos mineradores possuem, também, um fator aleatório. As taxas servem, como indica Almeida (2016), como um incentivo para que os mineradores insiram determinadas transações nos blocos. Essas taxas são facultativas e possuem o objetivo de descongestionar a rede em momentos de grande demanda por transações, colocando preferências nas transações e incentivando a participação de mais mineradores. Dessa maneira, o valor pago nessas taxas depende da quantidade de transações e do volume transacionado na rede Bitcoin, possuindo uma grande amplitude. De acordo com o agregador de dados *on-chain* Glassnode (2023), as taxas totais pagas aos mineradores em um dia variaram desde 0,01 *bitcoins*, em dezembro de 2010, até 1.495,94 *bitcoins*, em dezembro de 2017. De acordo com o mesmo, a taxa média paga aos mineradores em setembro de 2023 foi de 33,42 *bitcoins* por dia.

A razão $\left(\frac{H_f}{H_r}\right)$, por sua vez, expressa o percentual de poder computacional que a firma possui em relação ao total da rede. De certo modo, pode ser analisado como o percentual de participação de mercado daquela firma. Essa razão, decomposta em H_f e H_r , indica que a firma deve maximizar seu poder computacional próprio em relação ao poder computacional total da rede, de modo a conseguir aumentar suas probabilidades de receber as recompensas e as taxas pagas pela rede.

O *hashrate* da rede, como visto anteriormente, representa o poder computacional total da rede, e é um elemento exógeno a firma. Em momentos de valorização do preço do *bitcoin*, o mercado de mineração tende a ficar mais rentável, como será demonstrado, e portanto, uma

entrada de mineradores é incentivada, aumentando o *hashrate* da rede. Uma queda na razão $\left(\frac{H_f}{H_r}\right)$ implica em uma diminuição do produto e conseqüentemente do lucro. Já um movimento contrário, de queda do preço do *bitcoin*, os lucros tendem a diminuir, e portanto, a saída de mineradores será incentivada, reduzindo o *hashrate* da rede e aumentando a razão $\left(\frac{H_f}{H_r}\right)$, afetando os lucros de maneira positiva novamente.

O *hashrate* da firma é, portanto, o único elemento que está sob controle da firma. O objetivo da firma será sempre aumentar o seu próprio *hashrate*, tendo em vista que isso lhe dará mais participação no mercado e aumentará suas chances de receber recompensas maiores. O aumento do *hashrate* da firma pode-se dar de duas maneiras: 1) pelo aumento individual do poder computacional de cada máquina (ASICs – computadores específicos para mineração de criptomoedas), gerando mais *hashes* por segundo e aumentando o *hashrate* da firma; ou 2) pelo aumento do número de computadores utilizados pela firma para mineração.

Dentre essas duas opções, claramente a segunda opção é a mais favorecida. Ainda que exista um mercado em constante evolução de máquinas especializadas e com capacidade de gerar cada vez mais *hashes* por segundo, como evidenciado por Nascimento (2021), o processo de substituição do maquinário atual por um novo é custoso, sendo que a compra de novas máquinas pode ser utilizada para se adicionar uma nova unidade a produção. Apesar de o mercado estar em constante evolução, a escalada tecnológica não é tão rápida a ponto de máquinas ficarem obsoletas em prazos curtos, como um ou dois anos, e a sua substituição possivelmente será feita por uma máquina de capacidade superior quando sua qualidade não estiver mais condizente com o restante das máquinas.

Assim, percebe-se que a principal variável observada pela firma para aumentar seu produto é a quantidade de computadores utilizados para mineração de *bitcoin*. Konstantinidis (2021) compreende que as ASICs (máquinas) são o insumo determinante da função de produção, e atuam em papel semelhante ao do insumo trabalho em uma função de produção clássica, pois a firma necessita expandir suas unidades desse insumo para aumentar sua produção. Nas palavras do autor:

A questão indicada acima demonstrando a importância das ASICs na mineração, levanta o seguinte questionamento: se as máquinas neste mercado são mais efetivas para uma operação produtiva e escalável que a mão-de-obra e há uma constante necessidade de adicionar mais unidades de máquinas para escalar o negócio, não deveriam ser tratadas como os “trabalhadores” da produção?

No ponto de vista de um processo produtivo descrito na Teoria da Produção e dos Retornos de Escala, as máquinas poderiam ser consideradas como “os trabalhadores” na mineração do Bitcoin. Numa produção comum seguindo a teoria, é rentável

adicionar mais trabalhadores ao processo produtivo até o ponto de maximização dos lucros. Da mesma forma, é essencial que um empreendedor, atuando no mercado de mineração de criptomoedas, empregue frequentemente mais máquinas na sua operação para garantir maior faturamento e lucros (Konstantinidis, 2021, p. 27).

É possível reescrever, então, a função de produção descrita na equação 1 da seguinte maneira

$$q = (B + F) \cdot \left(\frac{a \cdot c}{H_r} \right) \quad (2)$$

onde a indica a quantidade de ASICs disponíveis pela firma e c o *hashrate* médio das ASICs da firma. Note que $H_f = a \cdot c$.

Como temos que a receita dos mineradores será dada pelo produto entre a quantidade de *bitcoins* pelo seu preço de mercado, podemos descrever então a receita dos mineradores dessa maneira

$$R = p \cdot q \quad (3)$$

onde R indica a receita dos mineradores, p o preço de mercado do *bitcoin* e q a quantidade de *bitcoins* minerados pela firma. Aplicando (2) em (3), podemos escrever uma função receita dos mineradores através da equação 4:

$$R = p \cdot (B + F) \cdot \left(\frac{a \cdot c}{H_r} \right) \quad (4)$$

3.1.2 Os custos de uma mineradora de *bitcoin*

Autores como Hayes (2015), Rocha Filho (2019) e Konstantinidis (2021) apontam os principais custos dos mineradores como: os custos de energia elétrica para alimentação das ASICs, custo de aluguel de espaço físico para armazenamento do maquinário, custo com pagamento de serviço de internet e taxa da *pool* que a firma pertencer. Ainda é possível enumerar outros custos que possivelmente uma mineradora possuiria, como a aquisição de equipamento para complementar o funcionamento das ASICs (cabos de energia, fontes de alimentação, cabos de *ethernet*). Entretanto, Konstantinidis (2021) ressalta que esses artigos

costumam ser fornecido em conjunto com as ASICs, portanto se tornariam gastos muito ocasionais, apenas a fins de reposição (Konstantinidis, 2021, p. 33-34). Poderiam somar-se a esses custos gastos com equipamento de refrigeração (Rocha Filho, 2019, p. 34), custos de trabalhadores e custos de manutenção, porém esses custos não são comuns a todas as firmas, podendo mudar em intensidade ou nem existir, dependendo da firma.

Desse modo, uma função de custos de uma mineradora de *bitcoin* pode ser escrita da seguinte maneira

$$CT = A + I + E + f + d \quad (5)$$

onde CT representa o custo total da firma, A indica o custo despendido com aluguel, I o custo da firma com serviço de internet, E representa os gastos com energia elétrica, f indica os gastos com a taxa (*fee*) da *pool* e d a depreciação das máquinas. Como a taxa é um percentual da receita da firma, a função de custos da firma pode ser reescrita dessa maneira:

$$CT = A + I + E + m \cdot R + d \quad (6)$$

com m representando o percentual da taxa paga ao *pool*. Nota-se que $f = m \cdot R$.

É importante notar que os fatores A e I são custos fixos da firma. Afinal, os aluguéis e serviços de internet são pagos mensalmente e só serão necessários expandir quando a produção atinge proporções muito maiores. Esses custos não variam com a adição de mais unidades de insumo, sendo, portanto, custos fixos.

Já os custos de energia elétrica e a taxa da *pool* são fatores variáveis, já que se alteram de acordo com os diferentes níveis de produção. Isso é visível quando percebemos que um aumento em a implicará em um aumento em R , e portanto, um aumento em f . O custo de energia será dado em função da potência média das ASICs (dada em watts – W – ou kilowatts – kW), as horas trabalhadas pelas ASICs, preço da tarifa de energia por kWh – quilowatt-hora (dado usualmente em dólares) e da quantidade de ASICs em operação na firma. Assim, pode-se descrever o fator E através da equação 7:

$$E = P_m \cdot h \cdot k \cdot a \quad (7)$$

onde P_m representa a potência média das ASICs da firma, h as horas trabalhadas pelas ASICs e k o preço da tarifa de energia elétrica. Usualmente, assume-se que as firmas coloquem as ASICs para trabalhar durante todo o período, ou seja, 24 horas, como proposto por Hayes (2015). Portanto, pode-se considerar h uma constante e $h = 24$.

O fator d representa a depreciação dos equipamentos utilizados pela firma, isto é, as ASICs. A depreciação implica que as máquinas perdem valor de acordo com o tempo, e devem ser substituídas após esse período. Desse modo, de acordo com CFI (2018), a depreciação é uma razão entre o valor pago no equipamento e o tempo de vida estimado. Assim, temos um fator depreciação do equipamento dado por

$$d = \frac{C_e}{t_e} \quad (8)$$

Onde d representa a depreciação do equipamento, C_e representa o valor pago nas ASICs t_e o tempo esperado de funcionamento desse equipamento

Aplicando (7) e (8) em (6), é possível reescrever a função de custos de tal modo que

$$CT = A + I + P_m \cdot h \cdot k \cdot a + m \cdot R + \frac{C_e}{t_e} \quad (9)$$

3.1.3 Lucro de uma mineradora de *bitcoin*

O lucro de uma firma mineradora de *bitcoin* pode ser definido como o de qualquer outra firma, em completo acordo com a Teoria da Firma. Assim, pode-se escrever uma função de lucro π :

$$\pi = R - CT \quad (10)$$

Aplicando (6) em (9):

$$\pi = R - (A + I + E + m \cdot R + d)$$

Aplicando (4), (7) e (8), considerando o fator h como 24 e realizando simplificações em (10):

$$\begin{aligned}
\pi &= R - m \cdot R - (A + I + E + \frac{C_e}{t_e}) \\
\pi &= R(1 - m) - (A + I + E + \frac{C_e}{t_e}) \\
\pi &= p \cdot (B + F) \cdot \left(\frac{a \cdot c}{H_r}\right) (1 - m) - (A + I + P_m \cdot 24 \cdot k \cdot a + \frac{C_e}{t_e}) \quad (11)
\end{aligned}$$

Através desta função de lucro, é possível observar os fatores que influenciam no lucro dos mineradores de *bitcoin*.

3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM UMA FIRMA HIPOTÉTICA

Uma análise de sensibilidade busca compreender o impacto de cada variável sobre outra em cenários hipotéticos de alteração dessas variáveis. Para isso, serão realizados alguns cálculos visando basear a situação da firma hipotética no atual cenário.

Uma firma hipotética deve optar por escolher seu equipamento de mineração (suas ASICs) dentre inúmeras opções disponíveis no mercado. De acordo com Nascimento (2020), existem empresas especializadas na produção de ASICs em uma constante evolução de seus computadores. A autora cita, como exemplos, a Bitmain e a MicroBT, ambas chinesas.

Para a melhor escolha da firma, algumas variáveis devem ser analisadas nas ASICs disponíveis no mercado, como aponta Konstantinidis (2021). A primeira variável que deve ser observada ao se escolher uma máquina de mineração é a eficiência energética da ASIC, traduzida na relação $\frac{c}{P_m}$, ou seja, a razão entre o *hashrate* da ASIC e sua potência. Essa razão expressa tanto o poder computacional da máquina quanto seu custo com energia; quanto menor essa relação, mais lucrativa é a ASIC para a firma, já que gerará mais *hashes* por segundo (mais produto) a um menor custo de energia. Quando deparado com uma situação de escolha entre ASICs com a mesma eficiência energética, o minerador deve olhar também para o preço por Th/s. Essa relação, que se dá pela razão entre o preço da ASIC e seu *hashrate*, expressa o valor gasto pela firma por cada Th/s ao adquirir esse equipamento.

A tabela 2 apresenta as dez principais ASICs disponíveis no mercado em outubro de 2023, seus *hashrates*, potências, eficiências energéticas, preço de mercado e preço do Th/s. Vale apontar que os preços apresentados na tabela são aproximações, dada a ainda recente

escassez de *chips* (Konstantinidis, 2021) e outros fatores geradores de diferenças de preços entre diferentes lojas, comum a diversos setores de varejo.

Tabela 2 - Principais ASICs disponíveis no mercado e suas características (outubro de 2023)

Fabricante	Modelo	Hashrate individual (em Th/s)	Potência (em W)	Eficiência energética (em W/Th)	Preço de mercado (US\$)	Preço por Th/s
Bitmain	Antminer S19 XP Hyd (257 Th)	257	5.346	20,80	7.500,00	\$ 29,18
Bitmain	Antminer S19 XP Hyd	250	5.200	20,80	7.700,00	\$ 30,80
Bitmain	Antminer S19 Pro+ Hyd. (191Th)	191	5.253	27,50	4.400,00	\$ 23,04
Bitmain	Antminer S19 XP (140Th)	140	3.010	21,50	3.700,00	\$ 26,43
MicroBT	Whatsminer M50S	126	3.276	26,00	1.750,00	\$ 13,89
Bitmain	Antminer S19j Pro+	122	3.355	27,50	2.000,00	\$ 16,39
Bitmain	S19k Pro	120	2.760	23,00	1.700,00	\$ 14,17
MicroBT	Whatsminer M50	114	3.306	29,00	1.675,00	\$ 14,69
Bitmain	Antminer S19 Pro (110Th)	110	3.250	29,55	1.750,00	\$ 15,91
Bitmain	Antminer S19j Pro (104Th)	104	3.068	29,50	1.600,00	\$ 15,38

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em informações de minetheasic.com (2023)

Portanto, uma firma hipotética buscaria adquirir ASICs modelo “Antminer S19 XP Hyd (257 Th)”, pois possui a menor eficiência energética dentre as opções apresentadas. Ademais, possui um preço por Th/s menor que o modelo “Antminer S19 XP Hyd”, que possui a mesma eficiência energética de 20,80 W/Th. Os dados referentes aos fatores c e P_m serão baseados nessa escolha da firma.

Como mencionado anteriormente, o custo de energia elétrica é um dos principais custos para os mineradores de *bitcoin*. A tabela 3 apresenta os países com as tarifas de energia elétrica para empresas mais baratas do mundo em março de 2023:

Tabela 3 - Preço das tarifas elétricas para empresas mais baratas em março de 2023

Posição	País	Preço do kWh (US\$)
1	Líbia	0.009
2	Angola	0.012
3	Síria	0.015
4	Butão	0.020
5	Lesoto	0.020
6	Etiópia	0.022
7	Quirguistão	0.032
8	Argélia	0.034
9	Catar	0.036
10	Egito	0.037
11	Zâmbia	0.040
12	Argentina	0.040
13	Sudão	0.044
14	Paraguai	0.045
15	Iraque	0.046
16	Nigéria	0.047
17	Uzbequistão	0.049
18	Kuwait	0.049
19	Trinidade e Tobago	0.053
20	Venezuela	0.053

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Global Petrol Prices (2023)

O preço médio do kWh para as empresas no mundo foi, segundo Global Petrol Prices (2023), de US\$ 0,162. Esse estudo ainda fornece dados sobre as tarifas de países que concentram a atividade de mineração de *bitcoin*, evidenciando como de fato as firmas buscam minimizar esse custo através de sua posição geográfica. Utilizando o gráfico 2 como referência, a tabela 4 apresenta uma relação entre esses países e suas tarifas de energia:

Tabela 4 - Preço das tarifas de energia dos principais mineradores de *bitcoin* em 2023

País	Preço do kWh (US\$)
Irã	-
Irlanda	-
Cazaquistão	0.061
Rússia	0.079
China	0.087
Canadá	0.104
Malásia	0.128
Estados Unidos	0.142
Alemanha	0.441

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Global Petrol Prices (2023) e Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2023)

Percebe-se que, apesar de não existirem dados disponíveis sobre dois países mineradores de *bitcoin*, todos os outros países (com exceção da Alemanha) possuem tarifas abaixo da média mundial. Além disso, certas regiões possuem tarifas de energia mais baratas do que outras. É possível verificar que a Dakota do Norte é o estado com a menor tarifa de energia elétrica dos Estados Unidos, com um preço de US\$ 0,0802 por kWh em julho de 2023 (EIA, 2023). Assim, desconhecendo a localização geográfica da firma, será considerado um tarifa de energia elétrica no valor de US\$ 0,07 por kWh.

Em linha com o proposto por Konstantinidis (2021), os fatores A e I serão considerados como US\$ 500,00 e US\$ 50,00, respectivamente. O autor destaca que esses são os valores médios utilizados para o aluguel de galpões industriais em áreas de baixo custo energético nos Estados Unidos, assim como o valor médio do preço de internet a cabo, o que é reforçado por Sior (2023) e McNally (2023). O fator m será considerado como 3,85%, baseado na média de 3,83% do período de outubro de 2022 a outubro de 2023. O *hashrate* da rede, de acordo com com o agregador *on-chain* Glassnode (2023), variou de $3,92 \cdot 10^8$ Th/s e $4,90 \cdot 10^8$ Th/s em outubro de 2023. Portanto, para o fim dessa análise, o fator H_r será considerado como $4,50 \cdot 10^8$ Th/s.

O fator t_e , em acordo com Konstantinidis (2021), será dado no valor de 4 anos. Isso vai em linha com a duração média das ASICs do mercado apresentadas pelo autor, entre 3 e 5 anos. O fator a será arbitrariamente escolhido como 5, para melhor elucidação da análise de sensibilidade.

O preço de mercado do *bitcoin* é uma variável muito volátil e, num recorte de maio de 2021, um ano após o último *halving*, e outubro de 2023, o preço variou desde US\$ 69.000,00 (valor máximo da série histórica), e pouco abaixo de US\$ 16.000,00. Para os fins dessa análise, será considerado um valor de US\$ 50.000,00.

O componente $(B + F)$ possui impacto significativo no lucro final da firma. Esse componente, apesar de não ser fixo devido a variação da quantidade de blocos minerados a cada período e principalmente devido a variação das taxas da rede, pode ser suposto dada a mineração dos blocos ocorrer, em média, a cada dez minutos. Dessa forma, o fator B , em um dia, é dado pelo produto entre os 144 blocos minerados no dia e a recompensa paga em *bitcoins* por cada bloco minerado.

A recompensa por bloco, como proposto originalmente por Nakamoto, segue um padrão fixo de redução da oferta monetária da rede Bitcoin. Hajric (2023) explica que as recompensas pagas aos mineradores começaram a ser pagas em 2009 no valor de 50 *bitcoins* por bloco

minerado. O *halving* é o momento em que a recompensa paga aos mineradores é cortada pela metade, ocorrendo periodicamente após 210.000 blocos minerados. O primeiro *halving* ocorreu em 28 de dezembro de 2012, reduzindo a recompensa de 50 para 25 *bitcoins* por bloco. Em 9 de julho de 2016, data do segundo *halving*, a recompensa foi novamente cortada para 12,5 *bitcoins* por bloco. O terceiro corte nas recompensas ocorreu em 11 de maio de 2020, com a recompensa sendo agora de 6,25 *bitcoins* por bloco. Um quarto *halving* ocorrerá em 2024, possivelmente entre março e abril, reduzindo a recompensa para 3,125 *bitcoins* por bloco.

Esse fenômeno impacta diretamente o fator B , já que um *halving* gera um corte pela metade no valor desse fator, dado o corte nas recompensas. Como o fator B é um dos fatores de impacto no lucro dos mineradores, o *halving* impacta diretamente no lucro π .

Portanto, para compreender a tomada de decisão dos mineradores, é importante considerar em que momento do tempo se situam as condições de mineração. Para esse fim, foram construídos dois cenários, de modo a realizar uma análise de sensibilidade específica para cada nível de recompensa emitida e compreender o impacto das diversas variáveis da função π sobre o lucro da firma. No primeiro cenário, chamado de “Pré-*Halving*” é considerado um momento anterior ao *halving* previsto para 2024, ou seja, um momento em que a recompensa paga por bloco é de 6,25 *bitcoins*. O segundo cenário, nomeado “Pós-*Halving*”, é considerada uma recompensa de 3,125 *bitcoins* por bloco minerado, ou seja, em um momento posterior ao *halving* de 2024.

Em ambos os cenários, o fator F será considerado fixo no valor de 23,68. Esse valor foi a média da soma das taxas pagas aos mineradores da rede Bitcoin diariamente no mês de outubro de 2023, segundo o Glassnode (2023). O fator B , por sua vez, será dado como 900 no cenário “Pré-*Halving*” e como 450 no cenário “Pós-*Halving*”. Esse número é o produto de 144 blocos pelas suas respectivas recompensas, 6,25 e 3,125 *bitcoins* por bloco.

3.2.1 Análise de Sensibilidade – Pré-*Halving*

Com a firma hipotética no cenário “Pré-*Halving*”, o lucro da firma será dado de acordo com a equação 11. Entretanto, antes de aplicar os fatores na função, é necessário definir o período de análise e converter as diferentes unidades de tempo para o mesmo período. Para essa análise, usaremos o lucro diário. Então, dividiremos o fator d por 365, resultando em uma depreciação diária no valor de US\$ 25,68. Da mesma maneira, os fatores A e I , pagos mensalmente, devem ser divididos por 30, resultando respectivamente em US\$ 16,67 e US\$

1,67. A potência P_m deve ser aplicada na equação com seu valor em kW. Portanto, teremos um π_1 tal que:

$$\pi = p \cdot (B + F) \cdot \left(\frac{a \cdot c}{H_r} \right) (1 - m) - \left(A + I + P_m \cdot 24 \cdot k \cdot a + \frac{C_e}{t_e} \right)$$

$$\pi_1 = 50.000 \cdot (900 + 23,68) \cdot \left(\frac{5 \cdot 257}{4,50 \cdot 10^8} \right) (1 - 3,85\%) - (16,67 + 1,67 + 5,346 \cdot 24 \cdot 0,07 \cdot 5 + 25,68)$$

$$\pi_1 = 37,88$$

Portanto, o lucro diário da firma, dados os fatores apresentados, será de US\$ 37,88. A partir desse valor, é possível verificar o tempo de *payback*, métrica comumente utilizada em análises de viabilidade de investimentos. O tempo de *payback* indica quantos dias o investidor leva para retornar o investimento inicial, dada determinada taxa de lucro. Usualmente, investidores buscam investimentos com os menores tempos de *payback* possíveis, comparando as suas diferentes possibilidades. O tempo de *payback* P_b da firma pode ser calculado dividindo o custo total do equipamento pelo seu lucro diário, resultando na seguinte fórmula:

$$P_b = \frac{a \cdot C_e}{\pi}$$

$$P_{b1} = \frac{5 \cdot 7.500}{37,88}$$

$$P_{b1} = 989,96$$

O tempo de *payback* será dado em dias, portanto, serão necessários 989,96 dias, ou 2,75 anos, para que a firma obtenha o retorno do investimento original nas ASICs.

Caso a firma opte por adicionar mais ASICs ao seu portfólio, aumentando o fator a , o tempo de *payback* tenderá a diminuir, assim como o lucro da firma tenderá a aumentar. A redução do tempo de *payback* ocorre porque o lucro aumenta em uma proporção maior que o numerador de P_b . A tabela 5 apresenta o impacto do acréscimo de ASICs na atividade da firma sobre o lucro total, lucro médio e tempo de *payback*, este último fornecido em anos.

Tabela 5 - Impacto do aumento da quantidade de ASICs sobre lucro e tempo de *payback* em um cenário “Pré-*Halving*”

Quantidade de ASICs	Lucro total	Lucro médio	Payback
1	\$ -7,09	\$ -7,09	-2,94
2	\$ 4,15	\$ 2,08	10,04
3	\$ 15,39	\$ 5,13	4,06
4	\$ 26,64	\$ 6,66	3,13
5	\$ 37,88	\$ 7,58	2,75
6	\$ 49,12	\$ 8,19	2,54
7	\$ 60,36	\$ 8,62	2,42
8	\$ 71,61	\$ 8,95	2,33
9	\$ 82,85	\$ 9,21	2,26
10	\$ 94,09	\$ 9,41	2,21
11	\$ 105,33	\$ 9,58	2,18
12	\$ 116,58	\$ 9,71	2,14
13	\$ 127,82	\$ 9,83	2,12
14	\$ 139,06	\$ 9,93	2,10
15	\$ 150,30	\$ 10,02	2,08
16	\$ 161,55	\$ 10,10	2,06
17	\$ 172,79	\$ 10,16	2,05
18	\$ 184,03	\$ 10,22	2,04
19	\$ 195,27	\$ 10,28	2,03
20	\$ 206,52	\$ 10,33	2,02
21	\$ 217,76	\$ 10,37	2,01
22	\$ 229,00	\$ 10,41	2,00
23	\$ 240,24	\$ 10,45	1,99
24	\$ 251,49	\$ 10,48	1,99
25	\$ 262,73	\$ 10,51	1,98
26	\$ 273,97	\$ 10,54	1,98
27	\$ 285,21	\$ 10,56	1,97
28	\$ 296,46	\$ 10,59	1,97
29	\$ 307,70	\$ 10,61	1,96
30	\$ 318,94	\$ 10,63	1,96

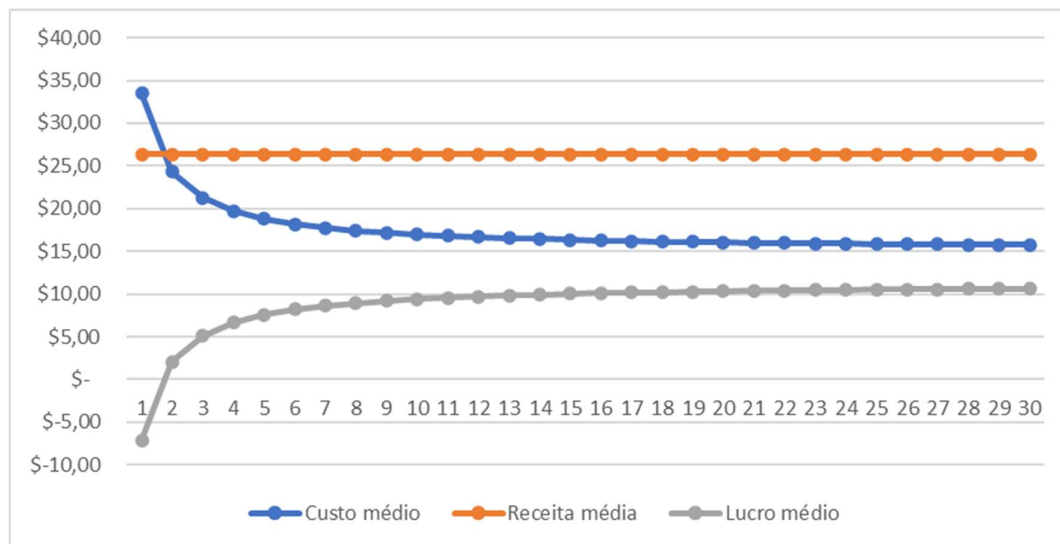
Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 5 evidencia que, com apenas uma ASIC, o minerador possui uma situação de inviabilidade da operação, já que operaria em prejuízo. Com duas máquinas, apesar de já operar em uma situação de lucro, seu tempo de *payback* ainda é muito elevado, com 10,04 anos para pagar pelo investimento. A partir da terceira ASIC em operação é possível notar um tempo de *payback* inferior a cinco anos, similar ao encontrado em outros investimentos. Nota-se que, quanto mais aumentam-se a quantidade de ASICs adicionadas, tanto o lucro médio cresce quanto o tempo de *payback* decresce em ritmo mais lento.

Isso se deve ao fato de a curva de custo médio da firma $CTMe = \frac{CT}{a}$ possuir uma inclinação decrescente, ou seja, o custo médio da firma tende a se reduzir com o tempo. Isso ocorre pois a firma possui custos fixos que são “diluídos” ao se aumentar o nível de produção, reduzindo o custo médio. Já a curva de receita média da firma é dada por $RMe = \frac{R}{a}$, onde essa será uma constante e dado que $R = 131,88$ e, portanto, $RMe = 26,38$ em todos os níveis de

produção. Isso se verifica devido ao fato de não existirem fatores fixos na receita, e o fato do acréscimo de cada ASIC adicionar exatamente o mesmo *hashrate* individual c a firma. O gráfico 6 apresenta as curvas de custo médio, receita média e sua resultante, a curva de lucro médio:

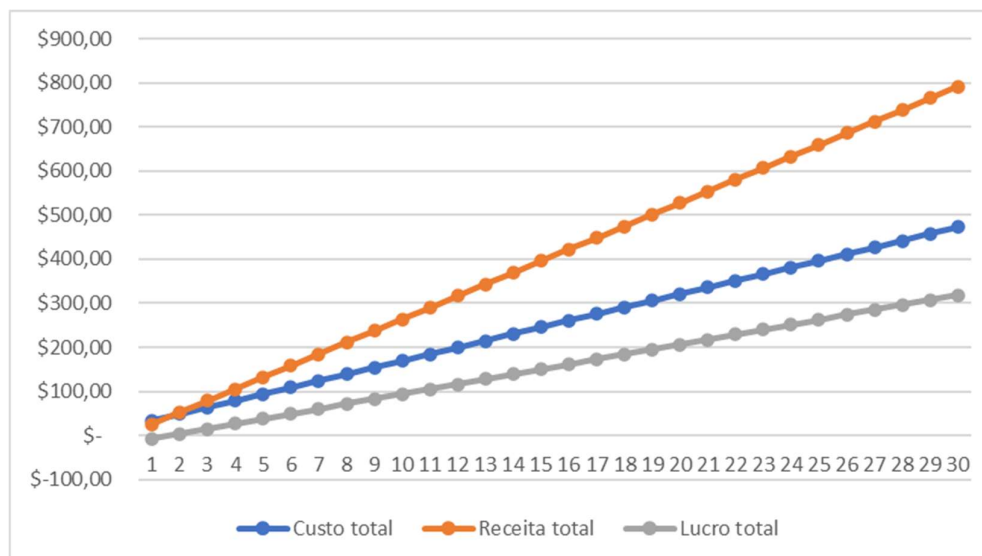
Gráfico 6 - Curvas de custo, receita e lucro médios de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”



Fonte: Elaborado pelo autor

Através do gráfico 6, percebe-se que a curva de lucro médio da firma é crescente, resultado da diferença entre as curvas de receita média constante e custo médio decrescente. É possível também analisar a evolução das curvas de custos, receita e lucro totais, para cada nível de produção. Essas curvas indicam o quanto a firma produz sem a razão a , contribuindo para uma análise da evolução da produção da firma. O gráfico 7 explicita essas curvas:

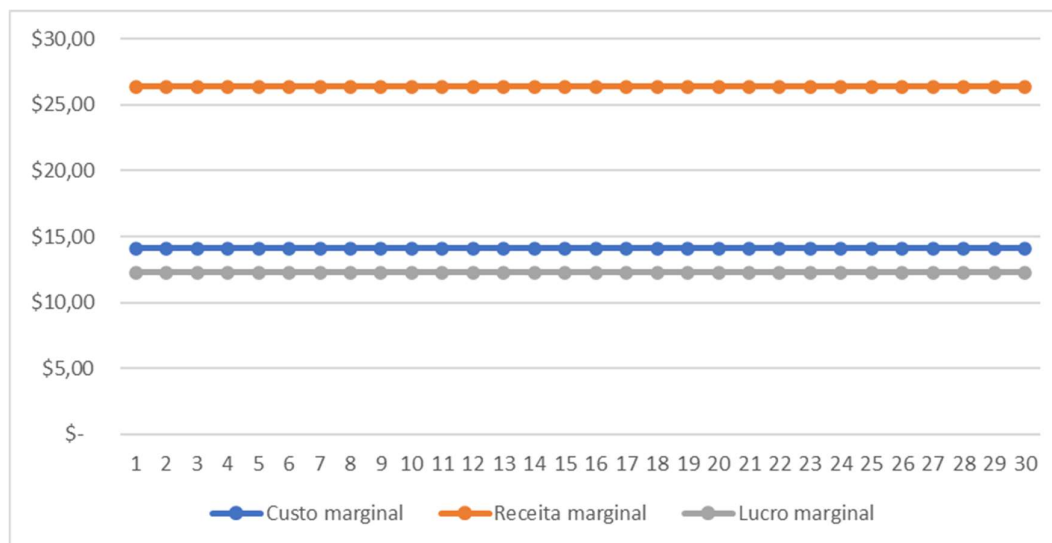
Gráfico 7 - Curvas de custo, receita e lucro totais de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se, através do gráfico 7, que a receita aumenta mais rapidamente que os custos, resultando em lucros cada vez maiores. Apesar de todas serem positivamente inclinadas, percebe-se que a curva de receita total possui maior coeficiente angular, resultando numa inclinação maior e com a receita tendendo a crescer mais rapidamente que os custos, com inclinação menos acentuada. A curva de lucro total, resultante da diferença entre as curvas anteriores, está em um nível abaixo, com uma inclinação menor que ambas. A Teoria da Firma explica que a inclinação das curvas de custo, receita e lucro total se dá de acordo com seus respectivos custos, receita e lucro marginal, ou seja, o impacto nesses aspectos ao se adicionar uma unidade extra de insumo. O gráfico 8 apresenta as curvas de custo marginal, receita marginal e lucro marginal da firma hipotética:

Gráfico 8 - Curvas de custo, receita e lucro marginais de uma firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”

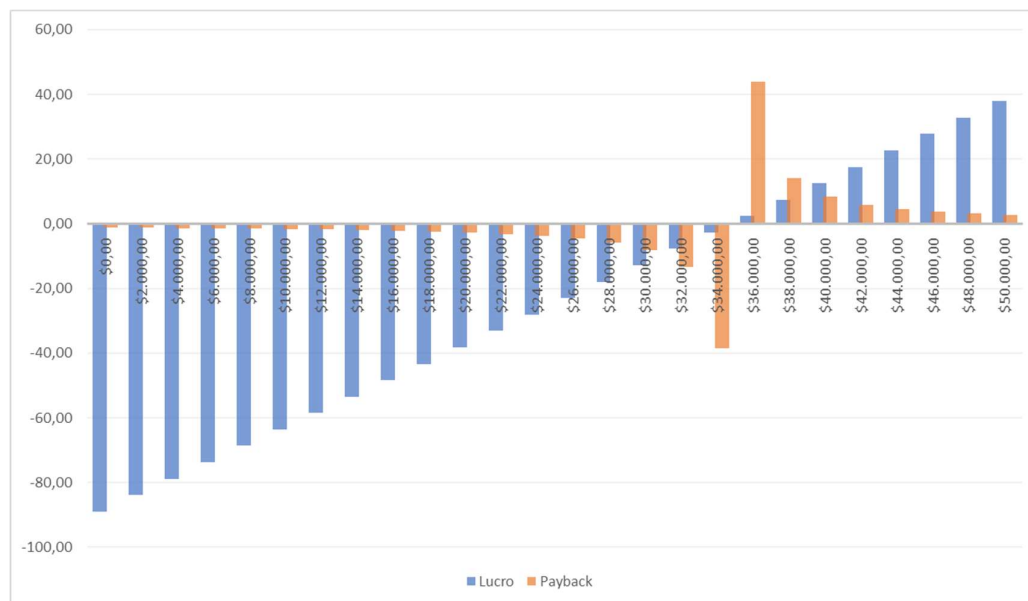


Fonte: Elaborado pelo autor

Através do gráfico 8, nota-se que a receita marginal e o custo marginal são constantes, assim como sua resultante, o lucro marginal. Isso explica a inclinação linear das funções de custo, receita e lucro totais do gráfico 7. Esse gráfico também evidencia que a condição de maximização de lucros no curto prazo, onde $RMg = CMg$, não é possível para essa firma, já que sua receita marginal e seu custo marginal são constante ao longo de toda produção. Como o lucro marginal é positivo, a firma buscará maximizar seus ganhos aumentando sua produção indefinidamente.

Além da quantidade de ASICs operantes (fator a), o impacto de outro fator sobre o lucro da firma que deve ser analisado é o preço de mercado do *bitcoin* (fator p). A variação do preço do *bitcoin* afeta diretamente o lucro da firma via receita, já que parte da relação original da Teoria da Firma de $R = p \cdot q$. Como o lucro impacta diretamente no tempo de *payback*, a alteração nessa (e em todas as variáveis que afetam o lucro) impactará também no tempo de *payback*. Assim, o gráfico 9 analisa o impacto da variação do preço do *bitcoin* sobre o lucro da firma mineradora, tudo o mais constante:

Gráfico 9 - Efeito do preço do *bitcoin* sobre o lucro e tempo de *payback* de uma firma hipotética em um cenário “Pré-*Halving*”

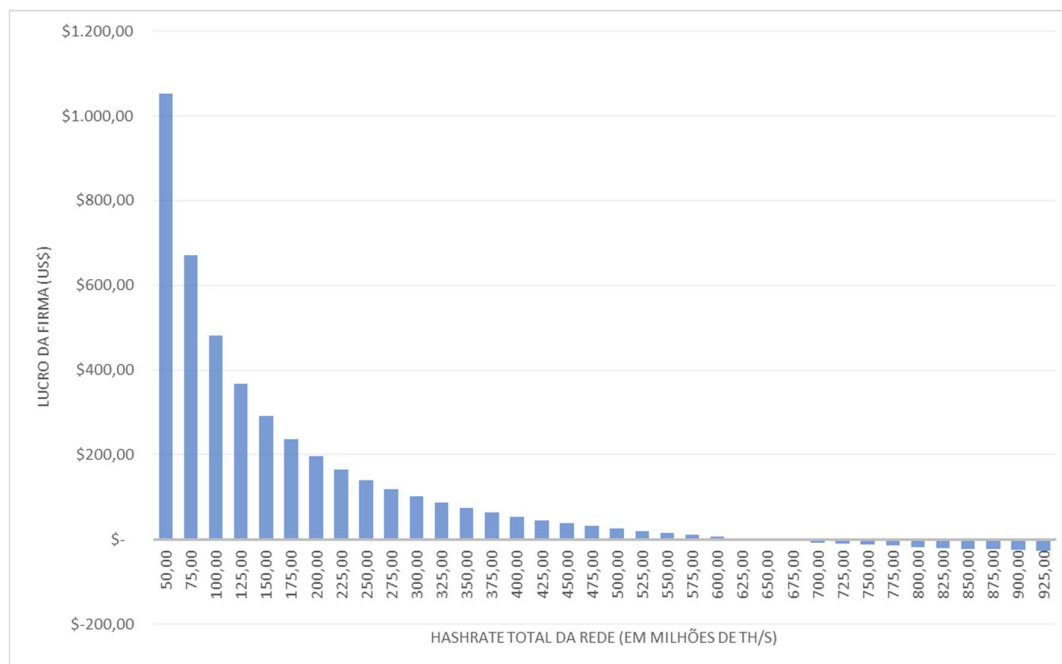


Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 9 evidencia a importância dessa variável para o lucro da firma. Em cenários onde o preço do *bitcoin* caísse consideravelmente ou até chegasse a zero, o prejuízo dos mineradores, com os custos mantidos, seria próximo de US\$ 80,00 por dia. Esse prejuízo se reduz em cenários com preços cada vez mais elevados do *bitcoin*, até que localizamos o preço de equilíbrio da operação da firma hipotética, onde o preço do *bitcoin* é de US\$ 35.063,95. Após isso, a firma começa a ter lucros, que crescem indefinidamente. O tempo de *payback* da operação é muito elevado nos cenários imediatamente após o ponto de equilíbrio da operação, como em US\$ 36.000,00, onde o tempo de *payback* é de 43,88 anos. O tempo de *payback* reduz com o aumento do lucro e entra em níveis considerados compatíveis com outros empreendimentos próximo dos US\$ 44.000,00, onde seu valor é de 4,60 anos.

Outro fator importante para a análise do lucro da firma mineradora é a variação no *hashrate* da rede. O *hashrate* da rede costuma variar todos os dias, mas a firma pode tomar decisões de produção baseada no *hashrate* da rede médio que espera encontrar. Assim, o gráfico 10 apresenta o impacto que a variação do *hashrate* da rede possui sobre o lucro da firma hipotética:

Gráfico 10 - Efeito do *hashrate* da rede sobre o lucro da firma hipotética em um cenário “Pré-Halving”

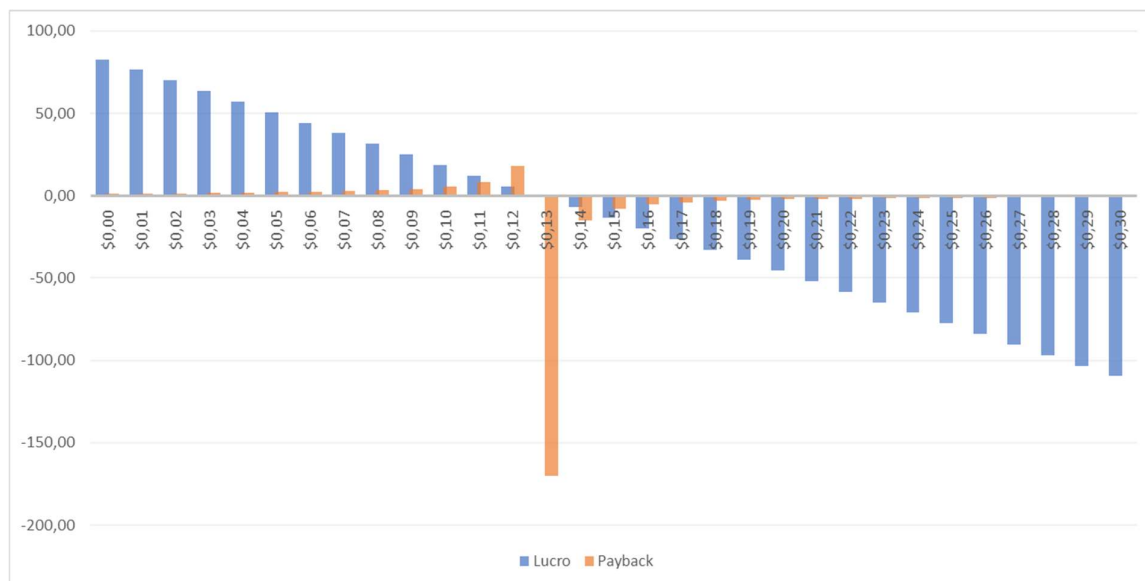


Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 10 aponta que o *hashrate* da rede é, de fato, uma variável de muito impacto sobre o lucro dos mineradores. No caso da firma hipotética, em um nível de *hashrate* da rede de $5 \cdot 10^7$ Th/s, o lucro diário seria de US\$ 1.052,31. Com um aumento de 50% de *hashrate*, em $7,5 \cdot 10^7$ Th/s, o lucro cairá para US\$ 671,90. Desse modo, a operação encontra seu ponto de equilíbrio onde o *hashrate* da rede for próximo a $6,41 \cdot 10^8$ Th/s. Após esse ponto, o crescimento do *hashrate* da rede implica em prejuízos para as firmas.

Além do preço de mercado do *bitcoin* e do *hashrate* da rede, outra variável que impacta diretamente o lucro dos mineradores é o preço da tarifa de energia elétrica (o fator k). O preço da tarifa de energia impacta diretamente sobre os custos variáveis e consequentemente os custos totais da firma, reduzindo o lucro. O gráfico 11 demonstra o efeito da variação da tarifa de energia elétrica sobre o lucro das firmas e seu tempo de *payback*:

Gráfico 11 - Efeito do preço da tarifa de energia elétrica sobre o lucro e tempo de *payback* de uma firma hipotética em um cenário “Pré-*Halving*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se, pelo gráfico 11, que níveis mais reduzidos do fator k permitem maiores lucros e menores tempos de *payback*. No limite, com uma tarifa de energia elétrica com custo zero, o lucro da firma seria de US\$ 82,79 por dia e o tempo de *payback* seria de apenas 1,26 ano. Com uma tarifa de US\$ 0,04, equivalente à tarifa média da Argentina e pouca abaixo de países como o Paraguai, o lucro diário seria de US\$ 57,12 e um tempo de *payback* de 1,82 ano. O ponto de equilíbrio se daria com uma tarifa de energia próxima ao valor de US\$ 0,129 por kWh. A partir desse ponto, uma tarifa de energia mais elevada, tudo o mais constante, implicaria em prejuízos para a firma.

Importante notar que, entre os fatores k , p e H_r , o primeiro é o fator que está mais sob controle da firma. Os fatores p e H_r dependem de outras variáveis como demanda pela moeda *bitcoin*, atividade da rede, quantidade de firmas operantes na rede, entre outros fatores, nenhum dos quais aparentemente sob controle da firma. O fator k , por outro lado, é de mais fácil controle pela firma: apesar de a variação nas tarifas de energia elétrica não dependerem da firma, a firma poderia buscar meios para reduzi-la, como buscar países com tarifas mais baratas, ou buscar minimizar esse custo através do uso de painéis fotovoltaicos, por exemplo. De fato, é o que a mudança global da localização dos mineradores de *bitcoin*, expressa no gráfico 2, parece indicar.

Outra questão importante de se analisar é de que, como uma queda em p implica em redução no lucro dos mineradores, é esperado que o *hashrate* da rede acompanhe a queda do preço do *bitcoin*. Isso ocorreria porque, mesmo que uma firma em específico não incorra em prejuízo com a queda do preço de mercado do *bitcoin*, as firmas não são homogêneas em suas condições de operação, possuindo ampla diferença em seus custos de energia, escala de operação (quantidade de ASICs), tecnologia utilizada (poder computacional de suas ASICs), dentre outros fatores já mencionados que impactam no lucro de cada firma. Assim, dada uma variação em p , é esperada uma variação no mesmo sentido de H_r .

O lucro da firma hipotética pode ser afetado dependendo da magnitude da variação dos fatores p e H_r . A tabela 6 evidencia o comportamento do lucro da firma hipotética em um cenário com uma variação positiva do preço do *bitcoin* de 10% por semana, acompanhada de uma variação no mesmo sentido de 15% do *hashrate* no mesmo período. O lucro da firma, nesse cenário, tende a reduzir conforme essas condições são mantidas.

Tabela 6 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 10% no preço do *bitcoin* e 15% no *hashrate* da rede em um cenário “Pré-Halving”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 37,88
2	517.500.000,00	R\$ 55.000,00	R\$ 32,37
3	595.125.000,00	R\$ 60.500,00	R\$ 27,09
4	684.393.750,00	R\$ 66.550,00	R\$ 22,05
5	787.052.812,50	R\$ 73.205,00	R\$ 17,22
6	905.110.734,38	R\$ 80.525,50	R\$ 12,61
7	1.040.877.344,53	R\$ 88.578,05	R\$ 8,19
8	1.197.008.946,21	R\$ 97.435,86	R\$ 3,97
9	1.376.560.288,14	R\$ 107.179,44	-R\$ 0,07
10	1.583.044.331,36	R\$ 117.897,38	-R\$ 3,93

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 7, por outro lado, analisa o impacto da variação semanal de 15% do preço do *bitcoin* e 10% do *hashrate* da rede. Nesse cenário, o lucro diário da firma acaba aumentando, já que o preço cresce numa proporção maior que o *hashrate*.

Tabela 7 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 15% no preço do *bitcoin* e 10% no *hashrate* da rede em um cenário “Pré-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 37,88
2	495.000.000,00	R\$ 57.500,00	R\$ 43,64
3	544.500.000,00	R\$ 66.125,00	R\$ 49,67
4	598.950.000,00	R\$ 76.043,75	R\$ 55,97
5	658.845.000,00	R\$ 87.450,31	R\$ 62,55
6	724.729.500,00	R\$ 100.567,86	R\$ 69,44
7	797.202.450,00	R\$ 115.653,04	R\$ 76,64
8	876.922.695,00	R\$ 133.000,99	R\$ 84,16
9	964.614.964,50	R\$ 152.951,14	R\$ 92,03
10	1.061.076.460,95	R\$ 175.893,81	R\$ 100,26

Fonte: Elaborado pelo autor

Em um cenário de queda do preço do *bitcoin*, o lucro da firma também dependerá da tamanho da variação do *hashrate* da rede. Explorando esse aspecto, a tabela 8 aborda um cenário onde existe uma queda semanal de 10% do preço do *bitcoin*, juntamente de uma queda de 15% do *hashrate* da rede. Nesse cenário, o lucro da firma tende a aumentar, já que o preço do *bitcoin* cai em uma intensidade menor que o *hashrate* da rede.

Tabela 8 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 10% no preço do *bitcoin* e 15% no *hashrate* da rede em um cenário “Pré-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 37,88
2	382.500.000,00	R\$ 45.000,00	R\$ 45,34
3	325.125.000,00	R\$ 40.500,00	R\$ 53,24
4	276.356.250,00	R\$ 36.450,00	R\$ 61,60
5	234.902.812,50	R\$ 32.805,00	R\$ 70,45
6	199.667.390,63	R\$ 29.524,50	R\$ 79,83
7	169.717.282,03	R\$ 26.572,05	R\$ 89,75
8	144.259.689,73	R\$ 23.914,85	R\$ 100,26
9	122.620.736,27	R\$ 21.523,36	R\$ 111,39
10	104.227.625,83	R\$ 19.371,02	R\$ 123,18

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, a tabela 9 indica um cenário onde a queda do *hashrate* da rede é superior a queda do preço de mercado do *bitcoin*. Nesse cenário, o lucro da firma diminui com o impacto

de uma queda semanal de 15% no preço do *bitcoin* e uma variação negativa de 10% do *hashrate* da rede, no mesmo período.

Tabela 9 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 15% no preço do *bitcoin* e 10% no *hashrate* da rede em um cenário “Pré-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	R\$ 37,88
2	405.000.000,00	R\$ 42.500,00	R\$ 30,83
3	364.500.000,00	R\$ 36.125,00	R\$ 24,18
4	328.050.000,00	R\$ 30.706,25	R\$ 17,90
5	295.245.000,00	R\$ 26.100,31	R\$ 11,96
6	265.720.500,00	R\$ 22.185,27	R\$ 6,36
7	239.148.450,00	R\$ 18.857,48	R\$ 1,06
8	215.233.605,00	R\$ 16.028,85	-R\$ 3,93
9	193.710.244,50	R\$ 13.624,53	-R\$ 8,66
10	174.339.220,05	R\$ 11.580,85	-R\$ 13,12

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa maneira, em acordo com o apresentado por Konstantinidis (2021), as melhores estratégias de uma firma para maximizar seu lucro são: busca pela minimização dos custos de energia elétrica e procura por um aumento do número de ASICs em operação na firma, aumentando sua receita e seu lucro, além de reduzir seu custo médio dado seus custos fixos.

3.2.2 Análise de Sensibilidade – Pós-*Halving*

Da mesma maneira que no cenário “Pré-*Halving*”, o cenário “Pós-*Halving*” possui o lucro da firma dado pela equação 11. Diferente do cenário anterior, entretanto, o fator B será a metade do valor do cenário “Pré-*Halving*”, com um valor igual a 450 *bitcoins*. Como definido anteriormente, o lucro será dado no período de um dia e portanto as unidades devem ser, conforme apresentado, convertidas para seus valores diários. Assim, teremos uma função π_2 igual a:

$$\pi = p \cdot (B + F) \cdot \left(\frac{a \cdot c}{H_r} \right) (1 - m) - \left(A + I + P_m \cdot 24 \cdot k \cdot a + \frac{C_e}{t_e} \right)$$

$$\pi_2 = 50.000 \cdot (450 + 23,68) \cdot \left(\frac{5 \cdot 257}{4,50 \cdot 10^8} \right) (1 - 3,85\%) - (16,67 + 1,67 + 5,346 \cdot 24 \cdot 0,07 \cdot 5 + 25,68)$$

$$\pi_2 = -23,90$$

Percebe-se que o lucro π_2 resultante é não só inferior ao lucro π_1 do cenário anterior, como também é um prejuízo diário de US\$ 23,90 para a firma. A redução no fator B reduz drasticamente o ganho dos mineradores e, tudo o mais constante, implica na mudança de uma condição de lucro diário para uma condição de prejuízo. Alterando-se a quantidade de ASICs (fator a), *ceteris paribus*, nota-se que a firma não conseguirá operar com lucro, independente da escala da operação. A tabela 10 deixa evidente essa situação, ao comparar o lucro total e médio da firma com cada nível de produção.

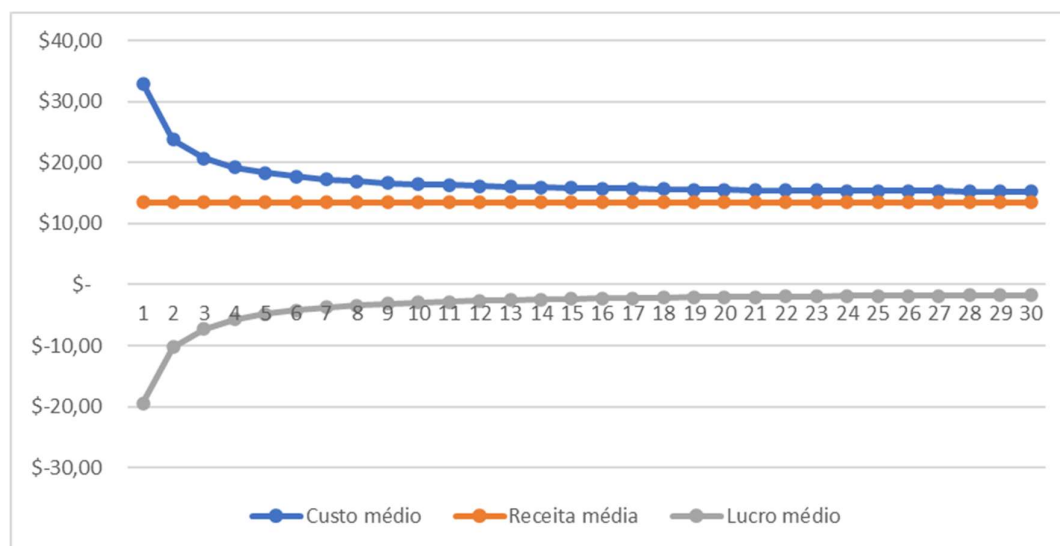
Tabela 10 - Impacto do aumento da quantidade de ASICs sobre o lucro em um cenário “Pós-Halving”

Quantidade de ASICs	Lucro	Lucro médio
1	\$ -19,45	\$ -19,45
2	\$ -20,56	\$ -10,28
3	\$ -21,67	\$ -7,22
4	\$ -22,78	\$ -5,70
5	\$ -23,90	\$ -4,78
6	\$ -25,01	\$ -4,17
7	\$ -26,12	\$ -3,73
8	\$ -27,24	\$ -3,40
9	\$ -28,35	\$ -3,15
10	\$ -29,46	\$ -2,95
11	\$ -30,57	\$ -2,78
12	\$ -31,69	\$ -2,64
13	\$ -32,80	\$ -2,52
14	\$ -33,91	\$ -2,42
15	\$ -35,03	\$ -2,34
16	\$ -36,14	\$ -2,26
17	\$ -37,25	\$ -2,19
18	\$ -38,36	\$ -2,13
19	\$ -39,48	\$ -2,08
20	\$ -40,59	\$ -2,03
21	\$ -41,70	\$ -1,99
22	\$ -42,82	\$ -1,95
23	\$ -43,93	\$ -1,91
24	\$ -45,04	\$ -1,88
25	\$ -46,15	\$ -1,85
26	\$ -47,27	\$ -1,82
27	\$ -48,38	\$ -1,79
28	\$ -49,49	\$ -1,77
29	\$ -50,61	\$ -1,75
30	\$ -51,72	\$ -1,72

Fonte: Elaborado pelo autor

A mudança no fator B faz com que as curvas de receita, custos e lucro médios sofram deslocamento em relação a sua posição no cenário “Pré-*Halving*”. A receita média, em decorrência da queda de B , é de longe a curva mais afeta, sendo constante e tal qual o cenário anterior, é constante em todos os níveis de produção, com $R = 67,63$ e logo $RMe = 13,53$. A curva de custo médio possui uma leve queda, implicando em uma queda nos seus custos nesse cenário. Isso é explicado devido a curva de custo total possuir o fator $f = m \cdot R$, portanto uma queda na receita implica também numa queda dos custos, mesmo que em pequena magnitude. Além disso, a curva de custo médio continua decrescente como no cenário anterior. A diferença entre essas duas curvas será a curva de lucro médio, crescente, porém em campo negativo, implicando em prejuízos para o minerador em cada nível de produção. O gráfico 12 apresenta as curvas de custo, receita e lucro médios.

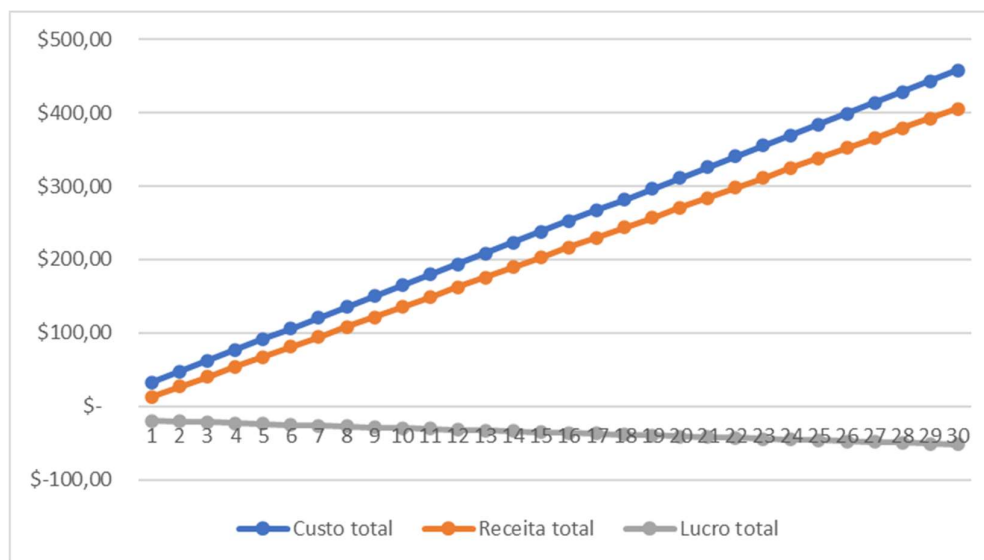
Gráfico 12 - Curvas de custo, receita e lucro médios de uma firma hipotética em um cenário “Pós-*Halving*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação as curvas de custo, receita e lucro totais, percebe-se uma mudança no comportamento em relação ao cenário “Pré-*Halving*”. A curva de custo total é menor que a anterior, com uma inclinação suavemente menor. A curva de receita total, além do deslocamento para níveis inferior, cresce em uma velocidade inferior do que no cenário anterior. A curva de lucro total sofre a maior alteração: não só está em campo negativo como é agora negativamente inclinada. O gráfico 13 apresenta as curvas de custo, receita e lucro totais para cada nível de produto nesse cenário.

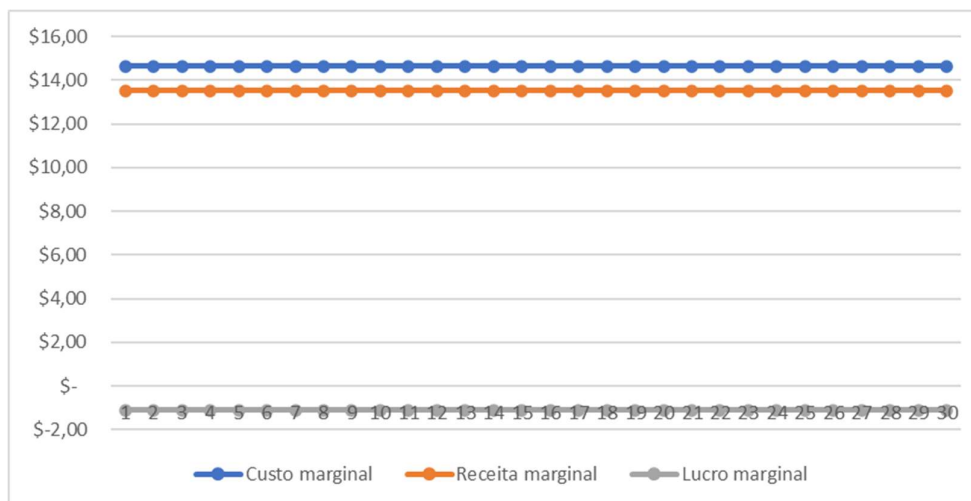
Gráfico 13 - Curvas de custo, receita e lucro totais de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”



Fonte: Elaborado pelo autor

Como a curva de custo total possui uma inclinação menor que a curva do cenário “Pré-Halving”, a curva de custo marginal do cenário “Pós-Halving” será levemente deslocada para baixo, mas ainda constante em todos os níveis de produção. A receita marginal desse cenário é deslocada para baixo, sendo agora inferior a curva de custo marginal, e novamente constante em todos os níveis de produto. A resultante destas curvas, a curva de lucro marginal, também será uma curva constante, porém em campo negativo, diferente do cenário “Pré-Halving”. Isso explica a inclinação negativa da curva de lucro total apresentada no gráfico 13. O gráfico 14 apresenta as curvas de custo, receita e lucro marginais para cada nível de produção do cenário “Pós-Halving”.

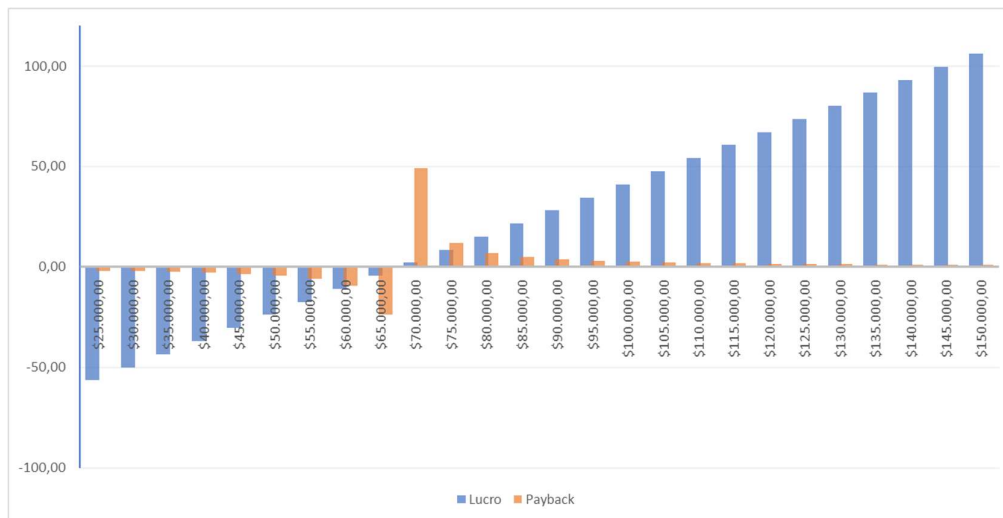
Gráfico 14 - Curvas de custo, receita e lucro marginais de uma firma hipotética em um cenário “Pós-Halving”



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o impacto do fator p sobre o lucro da firma, percebe-se que a firma incidirá em prejuízo em faixas mais amplas de preço do *bitcoin* do que no cenário anterior. A redução no fator B faz com que seja necessária uma compensação maior no fator p para que o lucro se mantenha na proporção que o cenário “Pré-Halving”. Assim, o ponto de equilíbrio da firma passará a ser agora US\$ 68.374,99, muito próximo ao topo histórico do preço de mercado do *bitcoin*. Abaixo desse valor, a firma operará em prejuízos, e acima, obterá lucros. Próximo do valor de US\$ 85.000,00, o tempo de *payback* estará próximo do considerado normal em outros empreendimentos, como evidencia o gráfico 15.

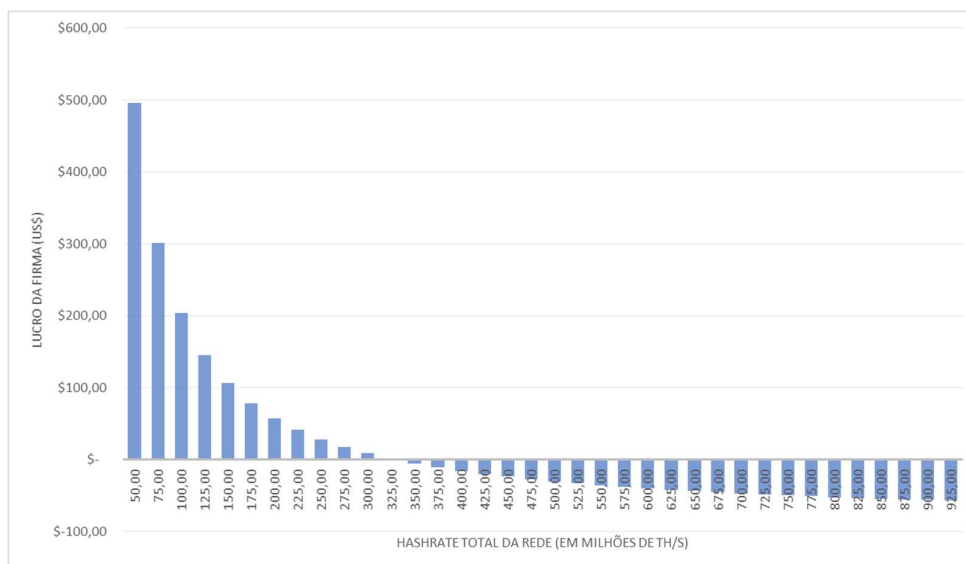
Gráfico 15 - Efeito do preço do *bitcoin* sobre o lucro e tempo de *payback* de uma firma hipotética em um cenário “Pós-*Halving*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Os efeitos da variação do *hashrate* da rede sobre o lucro da firma vão na mesma direção. Com a redução de B , é necessário uma queda maior de H_r para compensar a queda nos lucros. Assim, o ponto de equilíbrio da operação é reduzido e passa ser agora próximo a $3,29 \cdot 10^8$. Com um *hashrate* abaixo desse valor, tudo o mais constante, a firma possuirá lucros. Com valores de H_r acima desse valor, a firma incidirá em prejuízos diários. O gráfico 16 apresenta o impacto do *hashrate* da rede sobre o lucro nesse cenário.

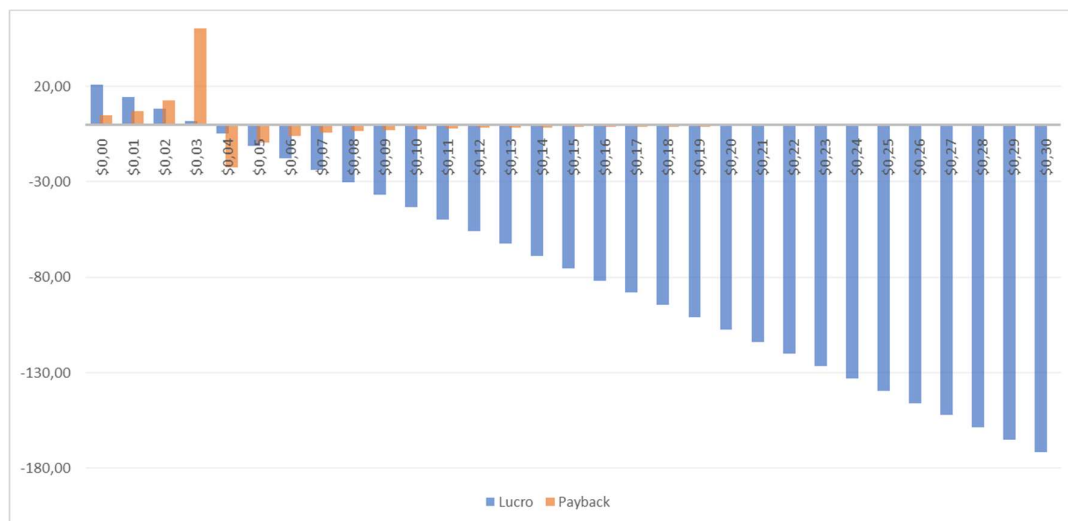
Gráfico 16 - Efeito do *hashrate* da rede sobre o lucro da firma hipotética em um cenário “Pós-*Halving*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao fator k , novamente existe uma diminuição das possibilidades de lucro da firma. Enquanto no cenário “Pré-*Halving*” o ponto de equilíbrio era com uma tarifa de energia elétrica próxima a US\$ 0,129; no cenário “Pós-*Halving*”, o ponto de equilíbrio da operação passa a ser uma tarifa próxima de apenas US\$0,03. Portanto, mantidas constantes outras variáveis, a alteração do fator B para um cenário posterior ao *halving* implicaria em diversas firmas operando em prejuízo, inclusive as que operam nos países com tarifas mais baratas do mundo. O gráfico 17 apresenta o efeito do fator k sobre o lucro e o tempo de *payback* das firmas no cenário “Pós-*Halving*”.

Gráfico 17 - Efeito do preço da tarifa de energia elétrica sobre o lucro e tempo de *payback* de uma firma hipotética em um cenário “Pós-*Halving*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente, os aumentos ou quedas simultâneas do preço do *bitcoin* e do *hashrate* da rede impactarão no lucro dos mineradores. Nesse caso, possivelmente existiria uma tendência a queda imediata do *hashrate* da rede após o *halving*, estabelecendo novos níveis de equilíbrio. Entretanto, partindo do valor estabelecido de $4,50 \cdot 10^8$ Th/s para H_r , percebe-se que apenas três cenários possíveis levariam a um retorno dos lucros dos mineradores. O primeiro cenário, demonstrado pela tabela 11, corresponde a um aumento no preço do *bitcoin* maior que o aumento do *hashrate*. Isso faria, após algum período (a depender do grau da valorização e da diferença entre as valorizações), com que os lucros voltassem a ser positivos.

Tabela 11 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 15% no preço do *bitcoin* e 10% no *hashrate* da rede em um cenário “Pós-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	-R\$ 23,90
2	495.000.000,00	R\$ 57.500,00	-R\$ 20,94
3	544.500.000,00	R\$ 66.125,00	-R\$ 17,85
4	598.950.000,00	R\$ 76.043,75	-R\$ 14,62
5	658.845.000,00	R\$ 87.450,31	-R\$ 11,24
6	724.729.500,00	R\$ 100.567,86	-R\$ 7,71
7	797.202.450,00	R\$ 115.653,04	-R\$ 4,02
8	876.922.695,00	R\$ 133.000,99	-R\$ 0,16
9	964.614.964,50	R\$ 152.951,14	R\$ 3,87
10	1.061.076.460,95	R\$ 175.893,81	R\$ 8,09

Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda opção para o retorno do lucro dos mineradores seria um cenário onde existisse uma queda no *hashrate* da rede superior ao valor da queda do preço do *bitcoin*. Nesse cenário, mesmo com queda no valor do ativo, a compensação obtida por maior participação na rede faz com que os lucros da firma aumentem. A tabela 12 apresenta o cenário com a queda semanal de 10% no preço do *bitcoin*, porém com uma queda do *hashrate* da rede em 15%.

Tabela 12 - Lucro de uma firma hipotética com uma queda semanal de 10% no preço do *bitcoin* e 15% no *hashrate* da rede em um cenário “Pós-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	-R\$ 23,90
2	382.500.000,00	R\$ 45.000,00	-R\$ 20,07
3	325.125.000,00	R\$ 40.500,00	-R\$ 16,02
4	276.356.250,00	R\$ 36.450,00	-R\$ 11,73
5	234.902.812,50	R\$ 32.805,00	-R\$ 7,19
6	199.667.390,63	R\$ 29.524,50	-R\$ 2,39
7	169.717.282,03	R\$ 26.572,05	R\$ 2,71
8	144.259.689,73	R\$ 23.914,85	R\$ 8,10
9	122.620.736,27	R\$ 21.523,36	R\$ 13,80
10	104.227.625,83	R\$ 19.371,02	R\$ 19,84

Fonte: Elaborado pelo autor

O terceiro cenário possível seria uma queda no *hashrate* acompanhada por um aumento do preço do *bitcoin*. Apesar de improvável, dado a aparente correlação entre p e H_r , esse cenário traduziria o maior retorno de lucros para a firma mineradora. A tabela 13 apresenta os efeitos

sobre os lucros da firma hipotética com a valorização semanal de 10% do preço do *bitcoin* e a queda de 10% do *hashrate*, no mesmo período.

Tabela 13 - Lucro de uma firma hipotética com uma valorização semanal de 10% no preço do *bitcoin* e queda semanal de 15% no *hashrate* da rede em um cenário “Pós-*Halving*”

Semana	Hashrate	Preço	Lucro
1	450.000.000,00	R\$ 50.000,00	-R\$ 23,90
2	405.000.000,00	R\$ 55.000,00	-R\$ 9,45
3	364.500.000,00	R\$ 60.500,00	R\$ 8,21
4	328.050.000,00	R\$ 66.550,00	R\$ 29,80
5	295.245.000,00	R\$ 73.205,00	R\$ 56,18
6	265.720.500,00	R\$ 80.525,50	R\$ 88,43
7	239.148.450,00	R\$ 88.578,05	R\$ 127,84
8	215.233.605,00	R\$ 97.435,86	R\$ 176,01
9	193.710.244,50	R\$ 107.179,44	R\$ 234,89
10	174.339.220,05	R\$ 117.897,38	R\$ 306,85

Fonte: Elaborado pelo autor

Como no cenário “Pré-*Halving*”, a firma mineradora não possui controle sobre as principais variáveis que afetam seu lucro. Ao contrário do cenário anterior, nem mesmo a expansão de escala da produção modificará as condições da operação, caso nenhuma outra variável se altere. No cenário “Pós-*Halving*”, a principal decisão das firmas seria a busca pela minimização de seus custos através da redução do fator k .

4 CONCLUSÃO

Apesar de uma ainda recente história como setor, a mineração de *bitcoin* parece não possuir muitas diferenças significativas de outros setores econômicos no que tange seu funcionamento microeconômico frente a Teoria da Firma. Em linha com o apresentado por Konstantinidis (2021), percebe-se que, através de uma firma hipotética, as firmas mineradoras possuem tendência a aumentar a escala de sua produção, aumentando seu lucro total e médio e reduzindo seu custo médio. Em linha com a ideia de minimização de custos, explorado por autores como Hayes (2015) e Rocha Filho (2019), o principal custo que a firma mineradora de *bitcoin* busca reduzir é o de energia elétrica, que usualmente o faz utilizando de localização geográfica privilegiada nesse quesito, optando por países onde o preço do kWh seja o mais barato possível, como apontado por Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2022); outros métodos de minimização desse recurso, como construção de células fotovoltaicas, também são utilizados para buscar aumentar a rentabilidade das firmas.

A análise de sensibilidade realizada evidencia a situação volátil encontrada sobre o lucro da firma hipotética. Alterações no preço de mercado do *bitcoin* e no *hashrate* da rede afetam diretamente o lucro das firmas, e essas variações são constantes. Esse fato impossibilita ou ao menos dificulta a existência de um planejamento de longo prazo para a construção de firmas mineradoras, e como aponta Silva (2022) diversas mineradoras enfrentam problemas devido a atual condição de baixo preço de mercado e alto *hashrate* da rede do Bitcoin.

Essas condições para a firma mineradora podem ficar ainda mais difíceis em um momento relativamente breve, já que o corte da oferta monetária de 6,25 *bitcoins* por bloco para 3,125 *bitcoins* por bloco deve ocorrer entre março e abril de 2024. Buscando acrescentar aos trabalhos de Konstantinidis (2021), Rocha Filho (2019) e Hayes (2015), o trabalho considera o impacto do próximo *halving* sobre as firmas mineradoras. O impacto projetado pela análise de sensibilidade posterior ao *halving* aponta um ponto de equilíbrio da firma hipotética com um preço de mercado do *bitcoin* próximo ao seu topo histórico, US\$ 69.000,00. Essa análise é feita mediante a manutenção do nível de *hashrate* da rede atual, considerado por autores como Silva (2022) como elevado. Caso não haja uma resposta por parte do preço do *bitcoin*, a possibilidade maior é que os mineradores desliguem as máquinas, reduzindo o *hashrate* da rede e reconduzindo o sistema a um novo ponto de equilíbrio.

Ademais, a busca constante por minimização dos custos de energia leva a constantes debates quanto ao impacto da mineração de *bitcoin* (e de criptomoedas no geral) no meio-

ambiente e em uma busca contínua por mais sustentabilidade. De acordo com Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (2022), apesar de um aumento no uso de fontes renováveis, essas ainda representavam apenas 37,58% do consumo total de energia elétrica na mineração de *bitcoin*, enquanto o restante era utilizado por fontes não-renováveis, em especial o carvão. Os autores ainda apontam problemas decorrentes da mineração como a emissão de gases danosos a atmosfera. Em cenários onde as variáveis sob mais controle das firmas são a quantidade de máquinas em operação e o custo da tarifa de energia elétrica, esse debate tende a se aprofundar nos próximos anos.

Para trabalhos futuros, é sugerido construção de um modelo econométrico para melhor análise das variáveis que afetam o lucro da firma mineradora. Além disso, o foco do estudo desse trabalho foi o quarto *halving*, que ocorrerá em 2024. Entretanto, a aplicação da Teoria da Firma pode se dar em qualquer momento do tempo; é sugerido a construção de um modelo microeconômico baseado na Teoria da Firma de modo a explorar os próximos *halvings* e seus impactos sobre o mercado de mineração de *bitcoin*. A interação do mercado de mineração de *bitcoin* (Teoria da Firma) com o mercado monetário do *bitcoin* (Teoria do Consumidor) e possivelmente uma situação de competição monetária são outras sugestões para pesquisas posteriores.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. B. de. **O futuro da competição monetária**: O comportamento da moeda bitcoin e o seu impacto sobre políticas de bancos centrais. Dissertação (Mestre em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
- BAUR, D. G.; DIMPFL, T. **The volatility of bitcoin and its role as a medium of exchange and a store of value**. *Empirical Economics*, 61, p. 2663-2683. Jan. 2021.
- BTC.COM. **Stats**. 2023. Disponível em <https://btc.com/stats/pool>. Acesso em 11 out. 2023.
- BUCHKO, Steven. **How Many Bitcoins Are Left?** Coin Central, 16 jul. 2023. Disponível em: <https://coincentral.com/how-many-bitcoins-are-left/>. Acesso em 17 set. 2023.
- CAMBRIDGE BITCOIN ELECTRICITY CONSUMPTION INDEX, **Bitcoin Mining Index**, 2023. Disponível em: https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map. Acesso em 19 set. 2023
- CARVALHO, Fernando J. Cardim. *et al.* Economia Monetária e Financeira – Teoria e Política. 2ª ed. São Paulo. Campus, 2007.
- CFI. **Straight Line Depreciation** – Uniform depreciation of an asset’s value. Corporate Finance Institute. 2018. Disponível em: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/accounting/straight-line-depreciation/>. Acesso em 25 out. 2023.
- COASE, R. H. **The Nature of Firm**. *Economica*, v. 4, n. 16, p. 386-405. Nov. 1937.
- COINMARKETCAP. **Mining Difficult**. 2023a. Disponível em <https://coinmarketcap.com/academy/glossary/mining-difficulty>. Acesso em 08 out. 2023.
- COINMARKETCAP. **Hash Power Hash Rate**. 2023b. Disponível em <https://coinmarketcap.com/academy/glossary/hash-power-hash-rate>. Acesso em 08 out. 2023.
- DAVIDSON, L.; E. BLOCK, W. **Bitcoin, o teorema da regressão e a emergência de um novo meio de troca**. *MISES: Revista Interdisciplinar de Filosofia, Direito e Economia*, v. 5, n. 1, p. 83–98. Jun. 2017.
- EIA. **U.S. Energy Information Administration**. 2023. Disponível em: <https://www.eia.gov/>. Acesso em 16 out. 2023.
- FAGUNDES, Pedro Ivan Ferreira. **Características e funções monetárias do bitcoin (2016-2018)**. Dissertação (Mestre em Desenvolvimento Econômico e Estratégia Empresarial) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico e Estratégia Empresarial – PPGDEE – da Universidade Estadual de Montes Claros. Montes Claros, 2019.
- GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6ª ed. São Paulo. Atlas, 2008.
- GLASSNODE. **Charts**. 2023. Disponível em studio.glassnode.com. Acesso em 12 out. 2023.

HAJRIC, Vladimir. **O que é ‘halving’ de bitcoin e por que ele impacta o preço da cripto?** 5 maio 2023. Disponível em: <https://investidor.estadao.com.br/criptomoedas/o-que-e-halving-bitcoin/>. Acesso em 19 set. 2023.

HAYES, Adam S. **A Cost of Production Model for Bitcoin**. SSRN, [S. l.], 21 mar. 2015. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=2580904>. Acesso em 25 out. 2023.

KONSTANTINIDIS, M. F. **As decisões de mineração de bitcoin aplicadas à Teoria da Firma em 2021**. Monografia (Bacharel em Ciência Econômicas) – Departamento de Economia e Relações Internacionais, Universidade Federal do Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

LEWENBERG, Yoad *et al.* **Bitcoin Mining Pools: A Cooperative Game Theoretic Analysis**. Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Istanbul, 4-8 maio de 2015.

PINHEIRO, R. M. A. **O Bitcoin pode ser considerado uma moeda?** Monografia (Bacharel em Ciência Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

MCNALLY, Catherine. **How Much Do Internet and Wi-Fi Cost?** Reviews.org, 27 set. 2023. Disponível em: <https://www.reviews.org/internet-service/how-much-do-internet-and-wi-fi-cost/>. Acesso em 31 out. 2023.

NAKAMOTO, Satoshi. **Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System**. 2008. Tradução de Rodrigo Silva Pinto. Disponível em: https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_pt_br.pdf. Acesso em 04 dez. 2022.

NASCIMENTO, D. P. **A guerra das fabricantes de máquinas para mineração de bitcoin**. Money Times. Dez, 2020. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/a-guerra-das-fabricantes-de-maquinas-para-a-mineracao-de-bitcoin/>. Acesso em 10 out. 2023.

NASCIMENTO, D. P. **O que é mineração de criptomoedas?** Money Times. Fev, 2021. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/be-a-ba-cripto-mineracao/>. Acesso em 15 set. 2023.

NOTARIYA, Harsh. **Mercado de mineração de criptomoedas deve saltar para 5 bilhões de dólares em 2032**. Be in Crypto. Set, 2023. Tradução de Thiago Barboza. Disponível em: <https://br.beincrypto.com/mercado-de-mineracao-de-criptomoedas-deve-saltar-para-5-bilhoes-de-dolares-ate-2032-relatorio/>. Acesso em 20 set. 2023.

PINDYCK, Robert; RUBINFELD, Daniel. Microeconomia. 8ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.

PRODANOV, C. C; FREITAS, E. C. de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2ª ed. Novo Hamburgo. Feevale, 2013.

ROCHA FILHO, Hugo de C. **Análise de investimento de mineração de Bitcoin sob condições de incerteza**. Dissertação (Mestre em Administração de Empresas) – Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, Mariana M. **Maior mineradora de bitcoin do mundo pede falência e pretende renegociar dívidas**. Future of Money, 21 dez. 2022. Disponível em: <https://exame.com/future-of-money/maior-mineradora-de-bitcoin-do-mundo-pede-falencia-e-pretende-renegociar-dividas/>. Acesso em 18 out. 2023.

SIOR, Leight Elis. **How Much Does It Cost to Lease Industrial Space in Austin, Texas? (Rental Rates)**. Aquila, 31 out. 2023. Disponível em: <https://aquilacommercial.com/learning-center/cost-to-lease-industrial-space-austin-texas/>. Acesso em 31 out. 2023.

ULRICH, Fernando. Bitcoin: A moeda na era digital. 1ª ed. São Paulo. Instituto Ludwig von Mises, 2014.

VASCONCELOS. Angelina. I. G. de. **Bitcoin, (des)regulação e barreiras estaduais à internacionalização: O caso de El Salvador**. Dissertação (Mestre em Economia e Gestão Internacional) – Faculdade de Economia, Universidade do Porto. Porto, 2022.

WRONKA, C. **Financial crime in the decentralized finance ecosystem: new challenges for compliance**. Journal of Financial Crime, v. 30, n. 1, p. 97–113. 2023. Disponível em <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JFC-09-2021-0218/full/html>. Acesso em 19 set. 2023.