

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

CAIO IAHN

**ANÁLISE SOBRE O APROVEITAMENTO DA ELETRICIDADE
FRUSTRADA DO *CURTAILMENT* POR MEIO DE MINERAÇÃO DE
CRIPTOMOEDAS: um estudo de caso e modelagem por Dinâmica
de Sistemas**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

CAIO IAHN

**ANÁLISE SOBRE O APROVEITAMENTO DA ELETRICIDADE
FRUSTRADA DO *CURTAILMENT* POR MEIO DE MINERAÇÃO DE
CRIPTOMOEDAS: um estudo de caso e modelagem por Dinâmica
de Sistemas**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Iahn, Caio

ANÁLISE SOBRE O APROVEITAMENTO DA ELETRICIDADE FRUSTRADA DO CURTAILMENT POR MEIO DE MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS:

UM ESTUDO DE CASO E MODELAGEM POR DINÂMICA DE SISTEMAS:

um estudo de caso e modelagem por Dinâmica

de Sistemas / Caio Iahn; orientação de Everthon Taghori

Sica. - Florianópolis, SC, 2026.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal

de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado

em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico

de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Curtailment. 2. Energia frustrada. 3. Mineração de criptomoedas. 4. Transição energética. I. Sica, Everthon Taghori. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. ANÁLISE SOBRE O APROVEITAMENTO DA ELETRICIDADE FRUSTRADA DO CURTAILMENT POR MEIO DE MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS: UM ESTUDO DE CASO E MODELAGEM POR DINÂMICA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por estar presente em todos os momentos da minha caminhada e por nunca me permitir sentir sozinho, concedendo-me força, sabedoria e perseverança para superar as dificuldades encontradas ao longo desta trajetória.

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e compreensão. Sou grato por sempre demonstrarem a importância dos estudos para a minha vida e por contribuírem de maneira essencial para que eu pudesse chegar até esta etapa.

À minha namorada, Maria, que conheci durante a faculdade e que, desde então, esteve ao meu lado, apoiando-me e ajudando-me nos momentos mais difíceis. Agradeço por sua parceria, paciência, carinho e incentivo durante todo esse período.

Agradeço a todos os amigos que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação. A convivência, o companheirismo e os momentos compartilhados tornaram esse processo mais leve e agradável. São amizades que levarei comigo por toda a vida.

Agradeço aos professores que tive o prazer de conhecer no Instituto Federal de Santa Catarina, que sempre estiveram dispostos a ensinar, orientar e compartilhar seus conhecimentos nos mais diversos temas. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eng. Everthon Taghori Sica, pela disponibilidade, paciência e dedicação, bem como por todo o auxílio e direcionamento oferecidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Eng. Everthon Taghori Sica, Prof. M. Eng. Marco Aurélio Moreira Saran e o Eng. Otavio Maciel Vaz, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e por participarem desta etapa tão importante da minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço à empresa Araxá, pelas oportunidades, pelos conhecimentos compartilhados e pelos aprendizados proporcionados durante esse período. A experiência profissional representou uma extensão contínua da minha formação acadêmica, contribuindo de maneira significativa para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

**ANÁLISE SOBRE O APROVEITAMENTO DA ELETRICIDADE
FRUSTRADA DO *CURTAILMENT* POR MEIO DE MINERAÇÃO DE
CRIPTOMOEDAS: um estudo de caso e modelagem por Dinâmica
de Sistemas**

CAIO IAHN

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de julho 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.
IFSC

Prof. Marco Aurélio Moreira Saran, M. Eng.
IFSC

Eng. Otávio Maciel Vaz
Araxá Engenharia

RESUMO

Este trabalho insere-se no contexto da transição energética brasileira, marcada pela crescente participação de fontes renováveis variáveis, em especial eólica e solar fotovoltaica, cuja expansão tem intensificado episódios de *curtailment* e, consequentemente, a frustração do aproveitamento econômico e energético da geração renovável no Sistema Elétrico Brasileiro. Nesse cenário, discute-se o uso da eletricidade excedente, usualmente desperdiçada, como insumo para a mineração de criptomoedas, atividade eletrointensiva que pode, ao mesmo tempo, mitigar perdas econômicas e desviar a energia renovável de finalidades alinhadas à descarbonização. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar o aproveitamento da energia frustrada pelo *curtailment* por meio da mineração de criptomoedas, avaliando a dinâmica energética, econômica e suas implicações para a transição energética e para os sinais de preço da eletricidade. Para atingir esse objetivo, adota-se uma abordagem de natureza quantitativa, com caráter exploratório, fundamentada em pesquisa bibliográfica e um estudo de caso que consiste na modelagem, por dinâmica de sistemas, de um cenário representativo, com dados típicos e reais, tendo como base a geração e o *curtailment* de uma usina fotovoltaica real, por meio de dados públicos do ONS, e utilizando variáveis de estoque e fluxo para descrever a dinâmica da energia frustrada e dos processos de mineração ou validação de criptomoedas, de modo a permitir a análise integrada dos impactos econômicos e energéticos associados a essa forma de aproveitamento da eletricidade excedente. Os resultados obtidos indicam que, no cenário com mineração de Bitcoin sem sistema BESS, considerando os dados reais de *curtailment*, foi possível aproveitar aproximadamente 8,18 GWh da energia frustrada, reduzindo em 15,52% o montante de energia que permaneceria sem aproveitamento e resultando na produção estimada de 8,988 bitcoins durante o período simulado. Já no cenário com mineração de Bitcoin e sistema BESS, o aproveitamento aumentou para aproximadamente 13,65 GWh, reduzindo em 25,90% a energia frustrada não aproveitada e resultando na produção estimada de 14,998 bitcoins. Nesse cenário, a receita bruta adicional com a mineração foi estimada em R\$ 4,72 milhões, proporcionando um aumento de aproximadamente 10,36% na receita total em relação ao cenário de referência. Entretanto, os resultados também demonstram que o desempenho econômico depende da disponibilidade horária da energia frustrada, da capacidade dos equipamentos de mineração, do sistema de armazenamento e da variação do preço do Bitcoin.

Palavras-chave: *Curtailment*. Energia frustrada. Mineração de criptomoedas. Transição energética.

ABSTRACT

This study is situated in the context of the Brazilian energy transition, characterized by the growing share of variable renewable energy sources, particularly wind and solar photovoltaic power, whose expansion has intensified curtailment events and, consequently, hindered the economic and energy utilization of renewable generation within the Brazilian Electric Power System. In this context, the use of surplus electricity, which would otherwise be wasted, as an input for cryptocurrency mining is discussed. This energy-intensive activity may simultaneously mitigate economic losses and divert renewable energy from purposes aligned with decarbonization. Therefore, the objective of this study is to analyze the utilization of energy curtailed due to curtailment through cryptocurrency mining, assessing its energy and economic dynamics, as well as its implications for the energy transition and electricity price signals. To achieve this objective, a quantitative and exploratory approach is adopted, supported by a literature review and a case study consisting of the system dynamics modeling of a representative scenario using both typical and actual data. The model is based on the generation and curtailment data of an actual photovoltaic power plant, obtained from publicly available data provided by the Brazilian National System Operator (ONS), and uses stock-and-flow variables to describe the dynamics of curtailed energy and cryptocurrency mining or validation processes, thereby enabling an integrated analysis of the economic and energy impacts associated with this form of surplus electricity utilization. The results indicate that, in the scenario with Bitcoin mining without a BESS, considering the actual curtailment data, it was possible to utilize approximately 8.18 GWh of curtailed energy, reducing by 15.52% the amount of energy that would otherwise remain unused and resulting in an estimated production of 8.988 bitcoins during the simulated period. In the scenario with Bitcoin mining and a BESS, the amount of energy utilized increased to approximately 13.65 GWh, reducing the unused curtailed energy by 25.90% and resulting in an estimated production of 14.998 bitcoins. In this scenario, the additional gross revenue from mining was estimated at BRL 4.72 million, leading to an increase of approximately 10.36% in total revenue compared with the reference scenario. However, the results also demonstrate that economic performance depends on the hourly availability of curtailed energy, the capacity of the mining equipment, the energy storage system, and fluctuations in the price of Bitcoin.

Keywords: Curtailment. Curtailed energy. Cryptocurrency mining. Energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Capacidade Instalada Eolielétrica no Brasil.....	15
Figura 2 – Evolução da Capacidade Instalada Solar fotovoltaica no Brasil.....	15
Figura 3 – Curva característica da geração fotovoltaica do dia 27 de junho de 2026	17
Figura 4 – Balanço de Carga e Geração do dia 29/09/2024	19
Figura 5 – Restrições por Razão Energética para o dia 29/09/2024	20
Figura 6 – Evolução da capacidade instalada no período de 2022 a 2024	24
Figura 7 – Percentual de geração renovável variável potencial restrita ao longo dos anos citados e a restrição média anual	24
Figura 8 – Histórico de preço do Bitcoin em Dólares	31
Figura 9 – Diagrama de Laços Causais	36
Figura 10 – Estrutura geral do modelo desenvolvido	38
Figura 11 – Subsistema de geração solar e corte da geração	39
Figura 12 – Subsistema de armazenamento de energia.....	40
Figura 13 – Subsistema de operação dos equipamentos de mineração.....	42
Figura 14 – Subsistema de produção de Bitcoin.....	45
Figura 15 – Cenário 1 – Comportamento da energia	50
Figura 16 – Cenário 1 – Energia frustrada	50
Figura 17 – Cenário 1 – Energia frustrada acumulada no período.....	51
Figura 18 – Cenário 2 – Energia frustrada destinada à mineração	52
Figura 19 – Cenário 2 – Energia frustrada destinada à mineração	52
Figura 20 – Cenário 2 – Bitcoin minerado por dia	53
Figura 21 – Cenário 2 – Resumo de variáveis acumuladas	54
Figura 22 – Cenário 3 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS	55
Figura 23 – Cenário 3 – Consumo energético da mineração	56
Figura 24 – Cenário 3 – Energia da UFV e do BESS destinada à mineração.....	56
Figura 25 – Cenário 3 – Energia frustrada não aproveitada.....	57
Figura 26 – Cenário 3 – Bitcoin minerado por dia	58
Figura 27 – Cenário 3 – Resumo de variáveis acumuladas	59
Figura 28 – Cenário 4 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS	61
Figura 29 – Cenário 4 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS	61
Figura 30 – Cenário 4 – Consumo energético da mineração	62

Figura 31 – Cenário 4 – Energia da UFV e do BESS destinada à mineração.....	62
Figura 32 – Cenário 4 – Energia frustrada não aproveitada.....	63
Figura 33 – Cenário 4 – Bitcoin minerado por dia	63
Figura 34 – Cenário 4 – Resumo das variáveis acumuladas	64
Figura 35 – Cenário 5 – Energia frustrada e injetada no SIN.....	66
Figura 36 – Cenário 5 – Indicadores do subsistema de mineração.....	67
Figura 37 – Cenário 5 – Energia frustrada não aproveitada.....	68
Figura 38 – Cenário 5 – Bitcoin minerado por dia	68
Figura 39 – Cenário 5 – Resumo das variáveis acumuladas	69
Figura 40 – Comparação – Energia injetada no SIN	73
Figura 41 – Comparação – Energia frustrada não aproveitada.....	74
Figura 42 – Comparação – Energia consumida pela mineração.....	75
Figura 43 – Comparação – Balanço energético	76
Figura 44 – Comparação – Bitcoin total minerado	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade Instalada de Geração Elétrica [MW] - Brasil.....	16
Tabela 2 – Síntese dos cenários analisados.....	70
Tabela 3 – Distribuição da energia e produção de Bitcoin	70
Tabela 4 – Receitas operacionais	78
Tabela 5 – Investimentos estimados no BESS e no sistema de mineração.....	79
Tabela 6 – Receita total estimada	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i> (Circuito Integrado de Aplicação Específica)
BEN	Balanço Energético Nacional
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias)
BTC	Bitcoin
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMD	<i>Cryptocurrency Mining Device</i> (Equipamento de Mineração de Criptomoedas)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
DLC	<i>Diagrama de Laços Causais</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i> (Unidade de Processamento Gráfico)
H ₂ V	<i>Hidrogênio Verde</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Renovável)
MG	<i>Microgrid</i> (Microrrede)
MMGD	<i>Micro e Minigeração Distribuída</i>
NE	Nordeste
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> (Membrana de Troca de Prótons)
PLD	<i>Preço de Liquidação das Diferenças</i>
RED	<i>Recursos Energéticos Distribuídos</i>
SE/CO	Sudeste/Centro-Oeste
SEB	<i>Sistema Elétrico Brasileiro</i>

SIN	Sistema Interligado Nacional
UFV	Usina Fotovoltaica
UHR	Usina Hidrelétrica Reversível

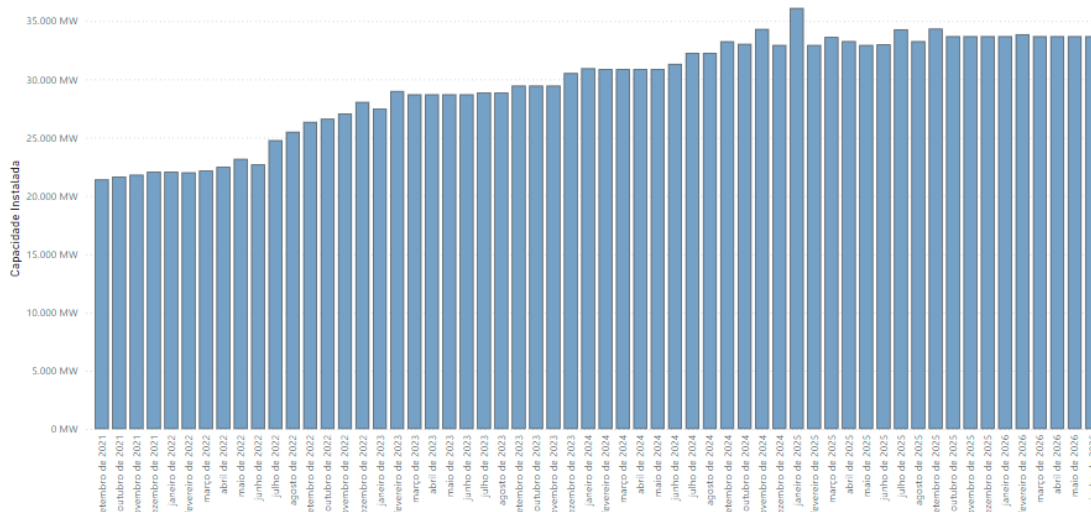
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	18
1.2	Definição do Problema	20
1.3	Objetivo Geral.....	21
1.4	Objetivos Específicos	21
1.5	Estrutura do Trabalho.....	22
2	<i>CURTAILMENT</i> E MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS.....	23
2.1	Impactos do <i>curtailment</i>.....	23
2.2	Aproveitamento da energia elétrica frustrada	26
2.3	Mineração de criptomoedas.....	29
2.4	Considerações	34
3	MODELAGEM POR DINÂMICA DE SISTEMAS.....	35
3.1	Estrutura geral do modelo proposto	38
3.2	Subsistema de geração solar e corte da geração	39
3.3	Subsistema de armazenamento de energia.....	40
3.4	Subsistema de operação dos equipamentos de mineração	42
3.5	Subsistema de produção de bitcoin.....	44
4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	48
4.1	Cenário 1.....	49
4.2	Cenário 2.....	51
4.3	Cenário 3.....	55
4.4	Cenário 4.....	60
4.5	Cenário 5.....	65
4.6	Comparação entre os cenários.....	70
4.6.1	Premissas econômicas da comparação.....	71
4.6.1.1	<i>Preço da energia elétrica</i>	71
4.6.1.2	<i>Preço do Bitcoin</i>	71
4.6.1.3	<i>Custo dos equipamentos de mineração</i>.....	71
4.6.1.4	<i>Custo do sistema BESS</i>.....	72
4.6.2	Comparação energética entre os cenários	73
4.6.2.1	<i>Energia injetada no SIN</i>	73
4.6.2.2	<i>Energia frustrada não aproveitada</i>.....	74
4.6.2.3	<i>Energia utilizada pela mineração</i>	75
4.6.2.4	<i>Balanco energético</i>	76
4.6.3	Comparação da produção de Bitcoin	76
4.6.4	Comparação das receitas operacionais	77
4.6.5	Investimentos necessários	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

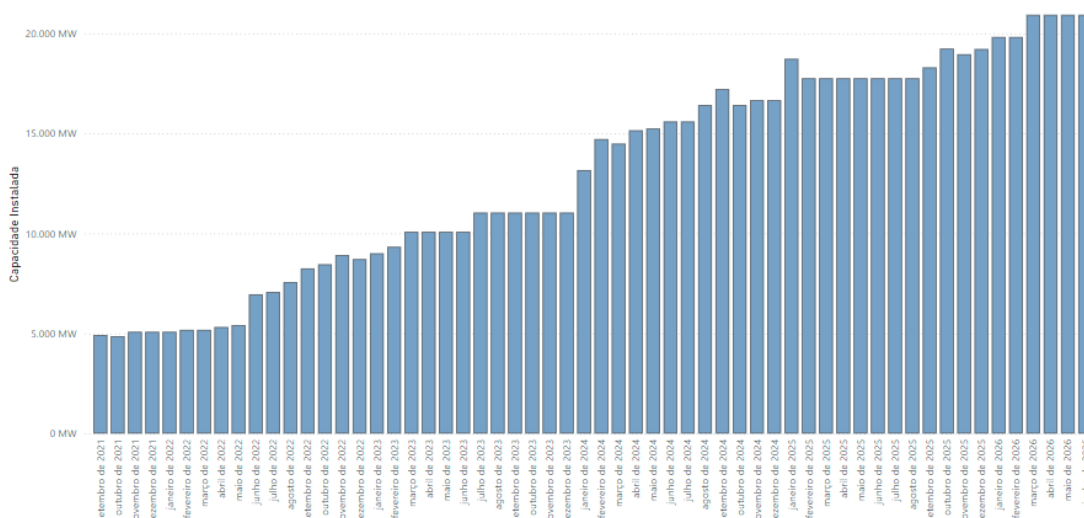
A transição energética tem reconfigurado o setor elétrico brasileiro ao ampliar a participação de fontes renováveis de baixo carbono, notadamente a geração centralizada eólicoelétrica e a solar fotovoltaica. Com o passar dos anos, o avanço da capacidade instalada dessas fontes foi muito expressivo, como é possível observar nas Figura 1 e Figura 2 que apresentam, respectivamente, a evolução da capacidade instalada da geração eólicoelétrica e da geração solar fotovoltaica no Brasil, entre setembro de 2021 e junho de 2026, com dados disponibilizados pelo ONS (2026c).

Figura 1 – Evolução da Capacidade Instalada Eólicoelétrica no Brasil



Fonte: ONS (2026c).

Figura 2 – Evolução da Capacidade Instalada Solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: ONS (2026c).

Nota-se, nas Figura 1 e Figura 2, um aumento da capacidade instalada de 57% entre setembro de 2021 e junho de 2026 para eólicoelétrica e de 325% no mesmo período para solar fotovoltaica. A maior aceleração do crescimento da eólicoelétrica foi entre julho de 2022 e março de 2023, perfazendo aproximadamente 28%. Enquanto que para a solar fotovoltaica foi entre dezembro de 2023 e fevereiro de 2025, totalizando em aproximadamente 61%.

O aumento da demanda e a mudança das condições climáticas intensificaram a necessidade de diversificação da matriz elétrica para assegurar a segurança energética. Assim, o foco na transição energética impulsionou a inserção de fontes renováveis intermitentes no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Ao longo dos anos, essa inserção alterou a configuração do SEB, que passou de uma matriz predominantemente hidrotérmica para um arranjo hidro-termo-eólico, como é possível observar na Tabela 1, disponibilizada no Balanço Energético Nacional (BEN) pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025, 2026a).

Tabela 1 – Capacidade Instalada de Geração Elétrica [MW] - Brasil

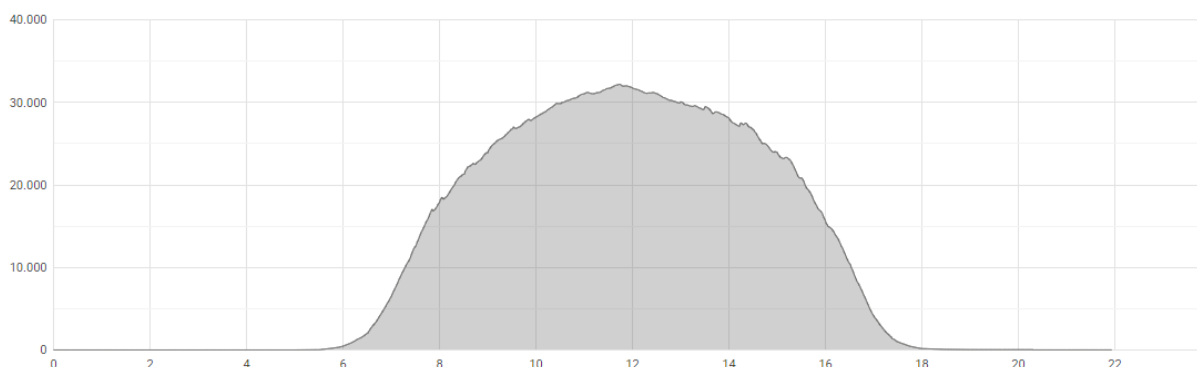
Ano	Hidro	Termo	Eólica	Solar	Nuclear	Total
2010	80.703	29.689	927	1	2.007	113.327
2011	82.459	31.243	1.425	1	2.007	117.135
2012	84.294	32.778	1.892	2	2.007	120.973
2013	86.018	36.528	2.202	5	1.990	126.743
2014	89.193	37.827	4.888	15	1.990	133.913
2015	91.650	39.563	7.633	21	1.990	140.858
2016	96.925	41.275	10.124	24	1.990	150.338
2017	100.275	41.628	12.283	935	1.990	157.112
2018	104.139	40.523	14.390	1.798	1.990	162.840
2019	109.058	41.219	15.378	2.473	1.990	170.118
2020	109.271	43.057	17.131	3.287	1.990	174.737
2021	109.350	44.866	20.771	4.632	1.990	181.610
2022	109.721	46.284	23.744	7.387	1.990	189.127
2023	109.857	47.336	28.664	11.477	1.990	199.325
2024	109.864	46.239	29.533	12.576	1.990	200.202
2025	110.237	49.252	34.707	20.051	1.990	216.237

Fonte: Adaptado do BEN (2025, 2026a).

Na Tabela 1, é possível observar o aumento expressivo das fontes de energia elétrica provenientes das usinas eólicoelétricas e solares fotovoltaicas. A

geração solar fotovoltaica apresenta uma curva característica, com geração significativa durante o dia e, ao final deste, em razão da redução e interrupção da irradiação solar, deixa de apresentar contribuição relevante para o SEB. Essa curva pode ser observada na Figura 3 disponibilizada pelo ONS (2026a), referente à geração fotovoltaica do dia 27 de junho de 2026.

Figura 3 – Curva característica da geração fotovoltaica do dia 27 de junho de 2026



Fonte: ONS (2026a).

A Figura 3 mostra a curva característica de geração de um sistema fotovoltaico ao longo do dia que, em geral, tem um perfil semelhante a um sino, com aumento gradual da potência no período da manhã, atingindo valores máximos nas proximidades do meio do dia e reduzindo-se no período da tarde. Entre 10 h e 13 h, a irradiância tende a atingir seus valores mais elevados, resultando em maior potencial de geração fotovoltaica (PEREIRA et al., 2017). Nos dados analisados, esse período também concentrou os maiores níveis de *curtailment*, condição que pode estar associada à necessidade de restringir a geração quando a produção supera a capacidade de transmissão ou a demanda do sistema elétrico (ONS, 2025c).

Usualmente, a partir das 16 h, observa-se um gradiente mais acentuado de redução da irradiância solar e, por consequência, da geração fotovoltaica, o que diminui rapidamente a contribuição dessa fonte no atendimento à demanda energética. Essa característica tende a intensificar a necessidade de maior participação de recursos energéticos primários firmes e despacháveis, a fim de assegurar a estabilidade operativa do sistema elétrico e manter a segurança energética.

1.1 Justificativa

O Setor Elétrico Brasileiro passa por uma transformação marcada pela maior participação de fontes renováveis variáveis, sobretudo eólica e solar. Embora esse movimento favoreça a descarbonização da matriz elétrica, ele traz desafios operativos, em especial o *curtailment*, que é a redução ou o corte da geração quando a produção excede a capacidade de escoamento da transmissão ou a demanda do sistema. Assim, a expansão renovável exige soluções de integração que minimizem perdas e preservem a segurança e a eficiência operativa do SEB (ONS, 2025c).

A rápida expansão dos Recursos Energéticos Distribuídos, sobretudo da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), adiciona complexidade à operação do sistema. A MMGD já supera 38 GW de capacidade instalada e pode alcançar 58 GW até 2029, porém opera fora da supervisão operacional do ONS. Em situações de sobreoferta, quando é necessário cortar geração para equilibrar carga e oferta, os recursos elétricos distribuídos (REDs) não participam do processo de restrição, concentrando os cortes nos geradores sob controle do ONS. Esse arranjo pressiona a estabilidade e a segurança do SIN e pode comprometer a equidade operativa entre os agentes (ONS, 2025c).

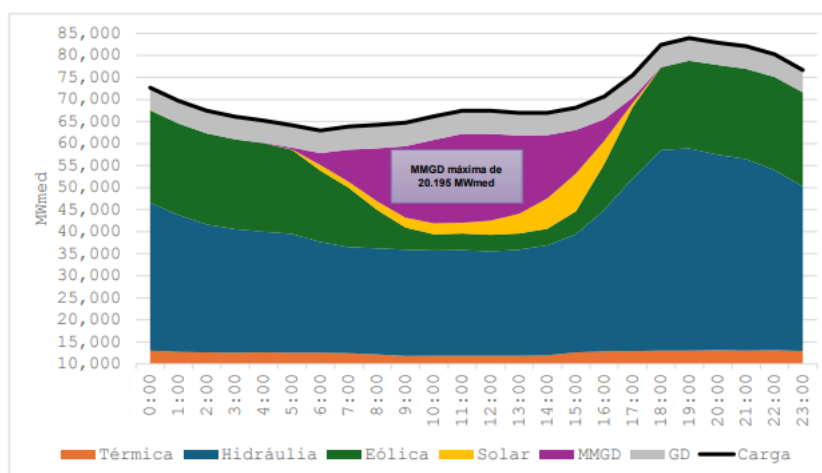
Essa situação evidencia um desequilíbrio estrutural, pois, enquanto as usinas de geração centralizada são moduladas com cortes e redespacho para preservar a estabilidade do sistema, os REDs permanecem fora do ciclo de restrição, deslocando desproporcionalmente o ônus econômico operativo para os agentes sob despacho centralizado (ONS, 2025c).

Além da expansão das usinas solares fotovoltaicas centralizadas, a micro e minigeração distribuída solar, especialmente aquela instalada em telhados e unidades consumidoras, também tem influenciado a operação do sistema elétrico. Essa modalidade de geração reduz a carga líquida observada pela rede durante os períodos de maior irradiação solar, uma vez que parte do consumo passa a ser atendida localmente. No entanto, ao final do dia, com a redução da geração fotovoltaica, a carga antes parcialmente suprida pela geração distribuída retorna de forma mais acentuada ao sistema, contribuindo para a formação de rampas de carga mais intensas. Esse comportamento evidencia que a expansão da MMGD, embora contribua para a diversificação da matriz elétrica, também impõe desafios

operacionais relacionados à previsibilidade da carga, à flexibilidade do sistema e à coordenação entre geração e consumo. Nesse contexto, a elevada inserção da geração solar distribuída pode intensificar condições de excesso de oferta renovável em determinados horários, ampliar a necessidade de restrições operativas e contribuir para a ocorrência de episódios de *curtailment* quando a energia disponível não pode ser integralmente absorvida ou escoada pelo sistema (TABORDA, 2025).

A seguir, a Figura 4 mostra o balanço de carga e geração do dia 29 de setembro de 2024, e a Figura 5 exemplifica os cortes gerados em usinas de geração centralizada.

Figura 4 – Balanço de Carga e Geração do dia 29/09/2024



Fonte: ONS (2025c).

Na Figura 4, observa-se que a MMGD (representada pela cor roxa) e a energia solar (na cor amarela) atuam durante o horário de incidência solar, suprindo grande parte da carga. Além disso, percebe-se que a MMGD apresenta um aumento expressivo na geração em comparação com a energia solar. Esse fenômeno ocorre porque a MMGD opera fora da supervisão do ONS, de modo que, em situações de necessidade de equilíbrio entre carga e oferta, os cortes de geração recaem prioritariamente sobre os geradores sob controle do ONS.

Figura 5 – Restrições por Razão Energética para o dia 29/09/2024



Fonte: ONS (2025c).

A Figura 5 ilustra esses cortes na geração eólica e solar centralizada, mostrando a restrição por razão energética (em laranja) e a geração da MMGD (em verde). As curvas das duas variáveis são semelhantes, mas uma representa a geração (em verde) e a outra, a restrição (em laranja), evidenciando, assim, um desequilíbrio entre os agentes do setor elétrico, e uma frustração econômica para os agentes despachados centralizadamente.

Uma tentativa de mitigar a frustração econômica associada ao *curtailment* seria por meio da mineração de criptomoedas utilizando a geração excedente referente aos cortes de geração. Porém, isto pode acarretar uma transformação orgânica perversa no uso da energia renovável, em uma direção distinta daquela requerida para a transição energética.

1.2 Definição do Problema

Embora as usinas eolioelétricas e solares fotovoltaicas ofereçam relevantes benefícios econômicos e ambientais, sua inserção no sistema elétrico exige planejamento operacional compatível com a intermitência e a limitada capacidade de controle dessas fontes. Atualmente, a ocorrência de sobreoferta em determinados

períodos provoca episódios de *curtailment*, reduzindo o aproveitamento do potencial energético disponível.

Uma tentativa de mitigar essa frustração econômica proveniente do *curtailment* é utilizar a energia excedente para a mineração de criptomoedas. Dessa forma, seriam evitados desperdícios de geração e prejuízos econômicos decorrentes dos cortes na geração de energia renovável.

Portanto, o problema deste trabalho é: a mineração de criptomoedas é viável para mitigar a frustração associada ao *curtailment* de usinas eólicas e solares fotovoltaicas? A mineração, por ser uma atividade intensiva em eletricidade, representa um desvio de rota na transição energética? O sinal de preço da eletricidade para plantas eolioelétricas e solares fotovoltaicas está adequado ou indica uma reorganização estrutural do planejamento da operação do SIN?

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o aproveitamento da energia frustrada pelo *curtailment* por meio da mineração de criptomoedas.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o impacto do *curtailment* nas fontes eolioelétricas e solares fotovoltaicas;
- b) analisar os impactos da utilização de energia excedente para mineração de criptomoedas;
- c) modelar a dinâmica da mineração de criptomoedas usando a energia frustrada proveniente de uma planta solar fotovoltaica; e
- d) implementar e simular o modelo por meio da Dinâmica de Sistemas.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro corresponde a este capítulo introdutório, no qual são apresentados os objetivos, as justificativas e a problemática da pesquisa. No segundo capítulo, desenvolve-se a fundamentação teórica, elucidando os impactos do *curtailment*, as formas de aproveitamento da energia frustrada e, em seguida, a mineração de criptomoedas. O terceiro capítulo apresenta as premissas e limitações do modelo; e a modelagem desenvolvida com base na Dinâmica de Sistemas, incluindo o Diagrama de Laços Causais, a estrutura geral do modelo e os subsistemas de geração solar e corte da geração, armazenamento de energia, operação dos equipamentos de mineração e produção de Bitcoin. O quarto capítulo descreve as premissas adotadas, os quatro cenários simulados no software AnyLogic e os resultados energéticos, operacionais e econômicos obtidos, além da comparação entre os cenários quanto à energia injetada no SIN, à energia frustrada não aproveitada, à energia destinada à mineração, à produção de Bitcoin, às receitas estimadas e aos investimentos estimados necessários. Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais, com os principais resultados da pesquisa, as contribuições da Dinâmica de Sistemas para a análise realizada e o atendimento aos objetivos previamente estabelecidos.

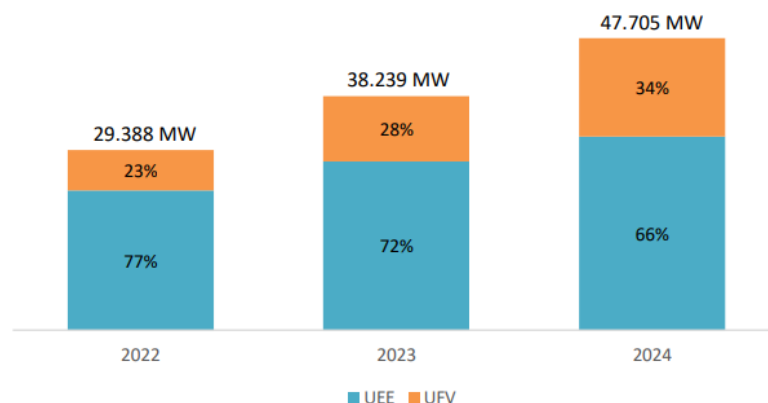
2 CURTAILMENT E MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS

Para possibilitar o desenvolvimento deste trabalho e a modelagem do problema proposto, é necessário um embasamento teórico sobre os temas que envolvem os impactos do *curtailment*, suas causas, as formas de aproveitamento da energia frustrada e um estudo aprofundado sobre os principais aspectos da mineração de criptomoedas. Este capítulo será dividido de maneira a apresentar, primeiramente, os impactos do *curtailment*, que resultam da sobreoferta de energia renovável e da incapacidade do sistema de absorver essa energia, levando ao desperdício de recursos “limpos”. Em seguida, serão apresentadas brevemente as soluções para o aproveitamento dessa energia, como sistemas de armazenamento em baterias, usinas hidrelétricas reversíveis e hidrogênio verde. Por fim, será detalhada a mineração de criptomoedas, analisando seu crescimento, seu elevado consumo energético e seu potencial de aproveitamento da energia frustrada como alternativa para mitigar o desperdício energético. Este tópico também discutirá como a mineração de criptomoedas pode impactar a estabilidade do sistema energético, podendo eventualmente contrariar os objetivos da transição energética, em vez de contribuir para uma matriz limpa e sustentável.

2.1 Impactos do *curtailment*

A transição energética busca substituir fontes de energia fósseis por fontes renováveis, como a solar e a eólica, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover o desenvolvimento sustentável. No entanto, o aumento da inserção dessas fontes intermitentes (Figura 6) traz desafios para o sistema elétrico, sendo o *curtailment* um dos principais problemas. O *curtailment* ocorre quando a geração de energia renovável excede a capacidade de transmissão ou a demanda do sistema, resultando em desperdício de energia limpa. Esse fenômeno pode impedir que o Brasil aproveite todo o seu potencial de geração renovável, afetando diretamente a eficácia da transição energética (ONS, 2025c).

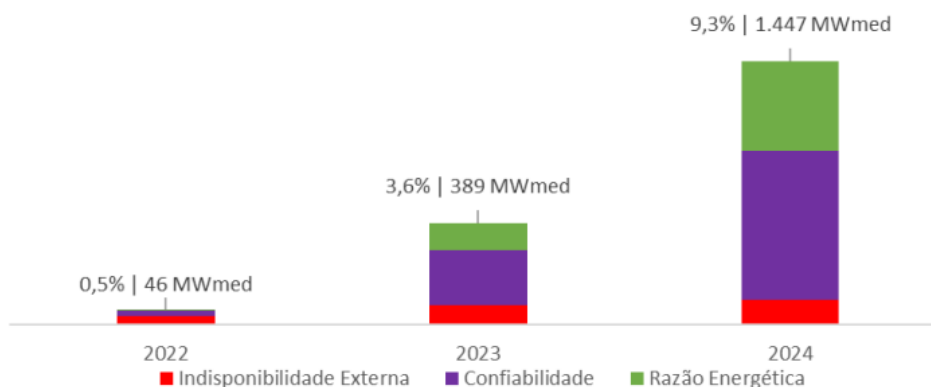
Figura 6 – Evolução da capacidade instalada no período de 2022 a 2024



Fonte: ONS (2025c).

A Figura 6 apresenta a evolução da capacidade instalada, entre os anos de 2022, 2023 e 2024, para usinas eólicas (UEE) e solares fotovoltaicas (UFV). Com o aumento da capacidade instalada dessas fontes energéticas, também houve o crescimento da restrição a essa energia. Os principais motivos dessas restrições são: indisponibilidade externa, confiabilidade e razão energética (Figura 7). A indisponibilidade externa está relacionada a restrições decorrentes de limitações operacionais externas às usinas; a confiabilidade refere-se a restrições operativas adotadas para atender aos requisitos de segurança do sistema, como os limites de carregamento das linhas de transmissão; e a razão energética corresponde aos cortes causados pela sobreoferta de energia, quando a geração excede a demanda (ONS, 2025c).

Figura 7 – Percentual de geração renovável variável potencial restrita ao longo dos anos citados e a restrição média anual



Fonte: ONS (2025c).

A partir da Figura 7, é possível observar o aumento, entre os anos de 2023 e 2024, da restrição na geração, sendo a confiabilidade (em roxo) o principal motivo. O *curtailment* tem impactos significativos na operação e na segurança energética do SIN. À medida que a participação de fontes renováveis, como a solar e a eólica, cresce, a operação do sistema se torna mais complexa devido à intermitência dessas fontes. Quando a geração renovável excede a capacidade de transmissão ou a demanda do sistema, o *curtailment* é utilizado para evitar sobrecarga nas linhas de transmissão e garantir a estabilidade do fornecimento. No entanto, essa prática implica perda de energia “limpa”, que poderia ser utilizada para reduzir a dependência de fontes fósseis ou armazenada para uso futuro. Além disso, o *curtailment* pode representar uma ineficiência econômica, uma vez que a energia renovável tende a ter um custo de geração mais baixo do que outras fontes, como as termelétricas (ONS, 2025c).

A segurança do SIN também é comprometida pelo crescimento das fontes renováveis, que exigem maior flexibilidade na operação do sistema. Para garantir a segurança energética e reduzir os impactos do *curtailment*, é essencial o desenvolvimento de infraestruturas de armazenamento de energia em larga escala e de redes inteligentes, além de uma expansão adequada da rede de transmissão. Sem essas soluções, a vulnerabilidade do sistema tende a aumentar, dificultando a adaptação do SIN às variações na geração e no consumo, especialmente em regiões com grande potencial renovável, como o Nordeste brasileiro (ONS, 2025c).

Embora seja tecnicamente necessário em determinadas situações, o *curtailment* acarreta perdas de receita para os geradores afetados, que deixam de transformar o recurso energético disponível em eletricidade, a qual seria injetada na rede e remunerada. De acordo com dados do ONS, há uma tendência crescente na aplicação dessas restrições, especialmente em regiões com alta concentração de usinas eólicas e fotovoltaicas, como o Nordeste (ONS, 2025d; ONS, 2025e).

A perspectiva de agravamento desse cenário é intensificada pelo descompasso entre o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) nos submercados do Nordeste (NE) e do Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), observado a partir do primeiro trimestre de 2025 (CCEE, 2025). Esse fenômeno, causado por limitações estruturais na capacidade de intercâmbio entre as regiões e pela sobreoferta de energia no

Nordeste, tende a aumentar a exposição financeira dos agentes de geração de energia. Agentes que possuem contratos de venda de energia referenciados ao PLD do Sudeste, mas cujos ativos de geração estão localizados no Nordeste, podem enfrentar descasamentos consideráveis entre o preço de sua energia contratada e o preço efetivamente liquidado no submercado de sua localização física, o que agrava ainda mais os impactos financeiros já provocados pelo *curtailment* (CCEE, 2025).

Para mitigar esses impactos, é essencial desenvolver soluções tecnológicas, como sistemas de armazenamento de energia, bem como políticas regulatórias que incentivem a redução do *curtailment* e aumentem a rentabilidade e a eficiência do setor de energias renováveis. Dessa forma, seria possível melhorar a competitividade e promover um modelo energético mais sustentável e financeiramente viável.

2.2 Aproveitamento da energia elétrica frustrada

Com o crescente objetivo de aproveitar a energia elétrica frustrada proveniente do *curtailment*, as soluções de armazenamento e de aproveitamento dessa energia têm ganhado cada vez mais destaque no mercado. No entanto, muitas dessas formas de aproveitamento acabam se distanciando do propósito central da transição energética, uma vez que nem todas as práticas contribuem diretamente para a descarbonização ou para a promoção de uma matriz energética “limpa”.

Uma dessas soluções é o armazenamento de energia elétrica em bancos de baterias, conhecidos como *Battery Energy Storage System* (BESS), que se configuram como uma alternativa estratégica e alinhada à transição energética. Esses sistemas permitem armazenar a energia gerada e disponibilizá-la em momentos em que não há sobreoferta de energia ou quando o sistema elétrico enfrenta restrições de confiabilidade. Além disso, um dos principais benefícios dos sistemas de armazenamento está relacionado à rede de transmissão: a energia elétrica armazenada ajuda a equilibrar desequilíbrios entre oferta e demanda, proporcionando maior estabilidade à rede e reduzindo significativamente os riscos de falhas ou apagões. Dessa forma, os BESS atuam como elementos de flexibilização operativa, reduzindo o desperdício de energia renovável, mitigando os impactos econômicos do

curtailment e contribuindo para o aumento da participação efetiva das fontes renováveis na matriz elétrica (ENEL, 2025).

Outra forma de armazenamento de energia é constituída pelas Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR), que assim como o BESS, desempenham um papel relevante no sistema elétrico, oferecendo flexibilidade e soluções de armazenamento para viabilizar a integração de fontes renováveis intermitentes. Essas usinas funcionam por meio de um processo de bombeamento de água para armazenamento durante períodos de baixa demanda e de geração de energia elétrica durante picos de consumo, cumprindo a função de nivelamento de carga, absorvendo energia em momentos de abundância e gerando energia quando a demanda é alta, tornando-se um componente benéfico para a estabilização do SIN (EPE, 2021).

Amadio (2025) analisou a integração entre uma UHR e uma usina eolielétrica, utilizando a energia frustrada pelo *curtailment* para o bombeamento de água ao reservatório superior. O estudo empregou a metodologia de Dinâmica de Sistemas, com a elaboração de Diagramas de Laços Causais e de estoque e fluxo, permitindo representar as relações entre a geração eólica, a energia frustrada, o bombeamento, o armazenamento nos reservatórios e a geração hidrelétrica. Os resultados indicaram que a integração entre as tecnologias possibilitou o aproveitamento de parte da energia frustrada e aumentou a energia total injetada na rede.

Além desses benefícios, as UHR são capazes de fornecer serviços ancilares, como o controle de frequência e a estabilidade da rede. Contudo, a inserção das UHR no Brasil enfrenta desafios, como a complexidade regulatória — uma vez que possuem características que as tornam ativos híbridos, tanto de geração quanto de transmissão — e o elevado custo de implantação, que exige grandes investimentos em infraestrutura e construção (EPE, 2021).

Outra forma de armazenamento de energia é por meio do hidrogênio, obtido a partir da eletrólise da água, processo eletroquímico que promove a separação da molécula de água em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de corrente elétrica. Quando a energia elétrica utilizada na eletrólise é proveniente de fontes renováveis, como a solar e a eólica, o produto é denominado hidrogênio verde (H₂V) (BRAHIM; JEMNI, 2025).

Os eletrolisadores podem ser instalados próximos às fontes de geração renovável, o que reduz a necessidade de linhas de transmissão de longa distância e, consequentemente, as perdas de energia no sistema. O processo de eletrólise consiste na passagem de corrente elétrica pela água, com o auxílio de eletrodos separados por um meio condutor iônico; as reações eletroquímicas que ocorrem nesses eletrodos resultam na produção de hidrogênio e oxigênio, sem geração de subprodutos nocivos (BRAHIM; JEMNI, 2025).

O hidrogênio produzido pode ser armazenado e transportado na forma gasosa, em cilindros pressurizados; na forma líquida, a baixas temperaturas; ou ainda convertido em amônia, por meio de sua combinação com nitrogênio obtido do ar atmosférico. Nessas formas, o hidrogênio pode ser utilizado como matéria-prima em setores como siderurgia, refino de petróleo e produção de fertilizantes, assim como empregado como combustível para navios, aviação e veículos, além de viabilizar a produção de aço verde e metanol verde (Neoenergia, 2023).

Do ponto de vista do planejamento energético, Vicente (2023) analisou o hidrogênio verde não apenas como uma forma de armazenamento, mas como um recurso que depende da avaliação conjunta entre a oferta de energia, a demanda dos setores produtivos e as transformações na estrutura econômica. O autor propôs a utilização de métodos de decomposição para identificar os efeitos associados às variações da intensidade energética, da atividade econômica e da participação dos diferentes setores consumidores. Essa abordagem permite compreender que o aproveitamento de excedentes renováveis para a produção de H₂V deve considerar, além da disponibilidade de eletricidade, a existência de demanda, infraestrutura e aplicações capazes de agregar valor ao hidrogênio produzido.

Complementarmente, Folganes (2023) caracteriza o hidrogênio como um vetor energético capaz de permitir a conversão, o armazenamento, o transporte e a utilização posterior da energia proveniente de uma fonte primária. Segundo o autor, a produção pode ocorrer próxima às unidades de geração solar e eólica, favorecendo sua integração aos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) e possibilitando que o hidrogênio armazenado seja utilizado como insumo industrial, combustível ou meio para posterior geração de eletricidade. Assim, a integração entre eletrolisadores e fontes renováveis pode aumentar a flexibilidade do sistema elétrico e oferecer uma

destinação para excedentes de geração decorrentes da variabilidade desses recursos.

Barbosa (2024) simulou uma planta de produção de hidrogênio com eletrolisadores do tipo PEM alimentados por geração solar fotovoltaica, eólioelétrica e por uma configuração híbrida associada a um banco de baterias. Os resultados demonstraram que a variabilidade das fontes renováveis influencia diretamente as condições de funcionamento do eletrolisador, tornando necessário respeitar seus limites mínimos de potência e evitar interrupções bruscas no fornecimento. No cenário híbrido analisado, a combinação das fontes e do armazenamento em baterias reduziu as lacunas de suprimento e resultou na produção estimada de 37,58 toneladas de hidrogênio, com consumo específico de 46,55 kWh/kg. Seus resultados demonstram o potencial técnico de converter energia renovável variável em hidrogênio e evidenciam a importância do correto dimensionamento e controle da planta.

Uma nova forma de aproveitamento dessa energia frustrada vem emergindo, com o intuito de atenuar a frustração econômica de usinas que sofrem com os cortes de geração. A mineração de criptomoedas tem se consolidado como uma atividade altamente eletrointensiva, com consumos de energia comparáveis aos de países inteiros, o que pode se contrapor aos objetivos da transição energética. A característica de demanda contínua e flexível da mineração é considerada como uma oportunidade para o aproveitamento de energia frustrada em sistemas com fontes renováveis intermitentes, como a eólica e a solar (N. Sapra, 2025).

Nesse contexto, a mineração de criptomoedas surge como um potencial uso para essa energia, podendo viabilizar economicamente as usinas impactadas pelos cortes provenientes do *curtailment*. A seção a seguir aprofunda a discussão sobre o funcionamento da mineração de criptomoedas.

2.3 Mineração de criptomoedas

As criptomoedas surgiram em resposta às limitações dos sistemas tradicionais de pagamento digital, que dependem integralmente de instituições financeiras como intermediárias para processar transações. Esse modelo, baseado

na confiança, apresenta fragilidades, como custos elevados, possibilidade de reversão de pagamentos, exposição a fraudes e inviabilização de microtransações.

Satoshi Nakamoto (2008) propôs a primeira criptomoeda, o Bitcoin, como um “dinheiro eletrônico *peer-to-peer*”, que permite que duas partes realizem pagamentos pela internet sem a necessidade de um terceiro. Sua criação inaugura uma nova arquitetura financeira baseada em criptografia e descentralização, com o objetivo principal de possibilitar transações seguras, irreversíveis, transparentes e independentes de autoridades centrais.

O funcionamento dessas criptomoedas baseia-se em um conjunto de tecnologias que garantem a segurança e o consenso entre os participantes da rede. No caso do Bitcoin, cada transação é registrada em uma cadeia pública de blocos, conhecida como *blockchain*, em que cada bloco contém um conjunto de transações e o “hash” criptográfico do bloco anterior, formando um registro imutável. A integridade desse sistema é sustentada pelo mecanismo de *Proof-of-Work* (prova de trabalho), no qual mineradores competem para resolver problemas matemáticos complexos e validar novos blocos, sendo recompensados com novas unidades da criptomoeda. Essa estrutura elimina a necessidade de um intermediário central, impede o gasto duplo e assegura que apenas a cadeia com maior quantidade de trabalho computacional acumulado seja considerada legítima. Assim, as criptomoedas combinam criptografia, redes distribuídas e incentivos econômicos para operar como sistemas financeiros descentralizados, transparentes e resilientes a fraudes (Nakamoto, 2008).

Na rede Bitcoin, os mineradores competem pela recompensa de adicionar novos blocos à blockchain, composta pela emissão de bitcoins por bloco e pelas taxas das transações incluídas. A geração de blocos ocorre, em média, a cada 10 minutos, e a dificuldade de mineração é reajustada periodicamente (a cada 2.016 blocos) para manter essa estabilidade. Dessa forma, o aumento do poder computacional total da rede não amplia o volume total de recompensas, mas redistribui os ganhos: como a probabilidade de encontrar um bloco é proporcional à participação de cada minerador no hash rate global, a entrada de novos equipamentos reduz marginalmente a renda esperada dos demais, fazendo com que a produção diária estimada por máquina tenda a diminuir à medida que a rede cresce (Kirchner *et al.*, 2019).

O preço das criptomoedas tem apresentado grande volatilidade, em especial o do Bitcoin, desde o seu lançamento. Inicialmente, o preço de um Bitcoin era de apenas alguns centavos de dólar americano, mas, com o aumento do interesse e da adoção dessa moeda, seus valores passaram a se elevar, principalmente a partir de 2013. Em 2017, o preço atingiu cerca de US\$ 20.000, em 2025 alcançou o patamar de US\$ 120.000 e em 2026 voltou a ter uma queda para a faixa dos US\$ 60.000 (Figura 8).

Figura 8 – Histórico de preço do Bitcoin em Dólares



Fonte: Investidor10 (2026a).

A partir de 2023, observa-se uma retomada acentuada na valorização do Bitcoin. Em 1º de janeiro de 2023, a criptomoeda encerrou o dia cotada em aproximadamente US\$ 16.500, enquanto, em 31 de dezembro do mesmo ano, seu valor alcançou cerca de US\$ 42.000, uma valorização de aproximadamente 154,00% em um ano. Em 2024, o movimento de alta permaneceu, e o Bitcoin encerrou o ano próximo de US\$ 93.000, representando um crescimento de aproximadamente 121,00% em relação ao ano de 2023. Em outubro de 2025, a criptomoeda atingiu uma nova máxima histórica, próxima de US\$ 126.000. Esse valor corresponde a um aumento de aproximadamente 35,10% em relação ao encerramento de 2024 e de 659,23% quando comparado ao início de 2023. Entretanto, após atingir esse valor, o preço sofreu uma queda, retornando à faixa dos US\$ 60 mil em junho de 2026, o que representa uma redução de aproximadamente 52,00% em relação à máxima observada em 2025.

A Figura 8 mostra que o preço do Bitcoin é acompanhado por períodos de fortes oscilações e correções. Essa volatilidade é relevante para a análise econômica

da mineração, já que a receita bruta obtida com a atividade depende diretamente da cotação do Bitcoin.

A tecnologia empregada na mineração de Bitcoin evoluiu rapidamente ao longo dos últimos anos. Inicialmente, a atividade podia ser realizada por meio de unidades centrais de processamento (CPUs) convencionais. Com o aumento da dificuldade computacional e da competição entre os mineradores, passaram a ser utilizadas unidades de processamento gráfico (GPUs) e, posteriormente, dispositivos mais especializados. Atualmente, a mineração profissional de Bitcoin é predominantemente realizada por ASICs (*Application-Specific Integrated Circuits*), circuitos integrados desenvolvidos especificamente para executar o algoritmo SHA-256 com elevada capacidade de processamento e maior eficiência energética em relação às tecnologias anteriores (TOMATSU; HAN, 2023; CCAF, 2025). Apesar da maior eficiência por unidade de processamento, esses equipamentos apresentam elevada potência elétrica e são normalmente empregados em grande escala, fazendo com que as operações de mineração demandem quantidades significativas de energia elétrica.

Niaz, Liu e You (2022) investigaram se o uso da mineração de Bitcoin poderia contribuir para mitigar os cortes de energia elétrica provenientes de fontes eólica e solar fotovoltaica no estado do Texas, em razão do aumento da capacidade de geração de energia renovável. O estudo analisou os cortes em plantas eolioelétricas e fotovoltaicas no sistema texano durante os anos de 2020 e 2021 e propôs o uso dessa energia excedente para a mineração de Bitcoin, visando otimizar tanto o uso da energia renovável quanto a rentabilidade da mineração. Foram comparados três cenários: minimização de custos; maximização de lucros sem penalização por cortes; e maximização de lucros com penalização pela energia não utilizada. A pesquisa mostrou que, apesar da volatilidade do preço do Bitcoin, a mineração pode ser lucrativa no Texas, desde que o preço da criptomoeda se mantenha acima de US\$ 6.800. Ademais, o estudo apresentou análises de sensibilidade e simulações de Monte Carlo para avaliar o impacto de incertezas de mercado na viabilidade da mineração de Bitcoin com uso de energia renovável excedente. Os resultados sugerem que a mineração de Bitcoin possui grande potencial para reduzir o desperdício de energia renovável no Texas, transformando o excedente energético em lucro (NIAZ; LIU; YOU, 2022).

Embora a mineração tenha grande potencial para aproveitar a energia desperdiçada, essa prática pode se distanciar do objetivo da transição energética. À medida que se torna economicamente atrativa, ativos de geração de energia podem adotar essa prática em larga escala, o que pode levar ao sobrecarregamento do sistema elétrico. Esse cenário não apenas comprometeria a eficiência da rede, como também dificultaria o cumprimento das metas de sustentabilidade e a integração de fontes renováveis, impactando negativamente a estabilidade do sistema elétrico.

Vries (2020) demonstrou que o consumo de energia elétrica da rede Bitcoin tem sido subestimado, propondo uma abordagem fundamentada na análise de mercado, considerando fatores como a disponibilidade de equipamentos de diferentes gerações, as variações geográficas e sazonais dos preços da eletricidade e as decisões estratégicas tomadas pelos participantes da indústria em função da lucratividade da mineração. O autor realiza uma análise baseada em dados de vendas de mineradores ASIC, complementada por simulações que incorporam o impacto das condições de mercado sobre a eficiência energética da rede. O estudo mostrou que, em períodos de elevada lucratividade, os mineradores tendem a optar por equipamentos de gerações anteriores, mais acessíveis em termos de aquisição, embora menos eficientes energeticamente, evidenciando que o crescimento da mineração não está necessariamente vinculado à utilização de tecnologias mais avançadas. Os resultados indicaram que, em setembro de 2019, a rede Bitcoin consumia aproximadamente 87,1 TWh de energia elétrica por ano, superando as estimativas divulgadas para o mesmo período, que variavam entre 73,1 e 78,3 TWh anuais (Vries, 2020).

Hajipour *et al.* (2022) desenvolveram uma formulação de gestão de energia para modelar as cargas de mineração de criptomoedas em *microgrids* (MGs). O estudo combina uma formulação de gestão de energia com simulação de Monte Carlo, a fim de obter a rentabilidade da mineração frente às incertezas inerentes, como variações no preço da eletricidade, no preço do BTC, na demanda energética e nas condições de geração renovável. Além disso, são utilizados indicadores financeiros, como retorno sobre o investimento, valor condicional em risco, probabilidade de perda e lucro absoluto, para determinar o tipo de *cryptocurrency mining devices* (CMD) mais vantajoso e a quantidade ótima a ser instalada. Os resultados evidenciam que, em países com tarifas de eletricidade relativamente baixas, na ordem de 10 centavos de

dólar americano por kWh, a mineração de criptomoedas pode representar um negócio altamente lucrativo para proprietários de MGs, oferecendo retornos de até 27,5% ao ano nos cenários analisados. Essa atratividade, entretanto, gera uma consequência crítica: em vez de contribuírem de forma ativa para a geração e o equilíbrio da rede, as MGs tendem a se tornar cargas passivas e intensivas em energia, priorizando o consumo para fins de mineração em detrimento da venda de excedentes ao mercado local. Essa transformação pode comprometer o papel estratégico das MGs na transição energética e na descentralização da geração (Hajipour *et al.*, 2022).

2.4 Considerações

Este capítulo apresentou uma revisão sobre o *curtailment*, suas causas e seus impactos energéticos e econômicos sobre as usinas de fontes renováveis. Também foram discutidas alternativas para o aproveitamento da energia frustrada, como os sistemas BESS, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis e a produção de hidrogênio verde. Por fim, foi analisada a mineração de Bitcoin como uma possível carga, capaz de utilizar parte da energia que não pode ser injetada no SIN e convertê-la em retorno econômico.

Diante disso, um modelo de Dinâmica de Sistemas pode ser utilizado para investigar o aproveitamento da energia frustrada pela mineração de Bitcoin. A modelagem permite representar as relações entre a geração fotovoltaica, o *curtailment*, o armazenamento no BESS, a energia destinada aos equipamentos de mineração e a quantidade de Bitcoin produzida ao longo do tempo. Dessa forma, torna-se possível analisar o comportamento do sistema diante de diferentes condições de disponibilidade e destinação da energia, conforme apresentado no capítulo seguinte.

3 MODELAGEM POR DINÂMICA DE SISTEMAS

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem desenvolvida para representar o aproveitamento da energia elétrica frustrada pelo *curtailment* de uma planta solar fotovoltaica por meio da mineração de Bitcoin. O modelo foi construído com base na Dinâmica de Sistemas, utilizando variáveis de estoque, fluxos e variáveis auxiliares para descrever o comportamento energético e operacional do sistema ao longo do tempo. A simulação foi estruturada com passo de tempo de uma hora e horizonte temporal de um mês, utilizando dados horários de geração de uma planta típica fotovoltaica e de *curtailment*, por meio de dados públicos do ONS (2026b). A modelagem integra a energia frustrada pelo *curtailment*, seu aproveitamento direto pela mineração, o armazenamento de parte dessa energia em um sistema BESS, a operação dos equipamentos de mineração e a estimativa da quantidade de Bitcoin produzida. Dessa forma, o modelo permite avaliar, hora a hora, a disponibilidade de energia frustrada, sua distribuição entre consumo direto e armazenamento, a quantidade de mineradores em operação e a produção estimada de Bitcoin durante o mês analisado.

As premissas para modelagem e simulação consideram os seguintes pontos relevantes:

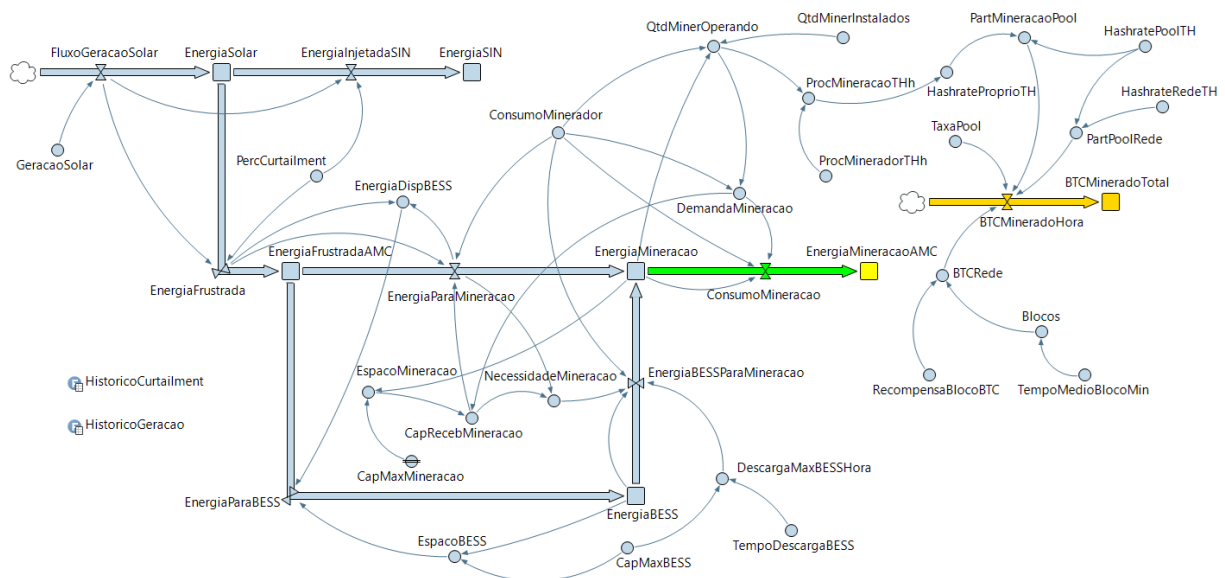
- Nos cenários com BESS, o sistema de armazenamento foi modelado de forma simplificada, considerando sua capacidade nominal de potência e energia. Não foi considerado o tempo de carregamento do BESS, sendo aplicada apenas a limitação associada ao seu descarregamento;
- não foram consideradas a depreciação dos equipamentos de mineração, dos contêineres e do sistema BESS;
- não foram consideradas perdas adicionais associadas aos sistemas de resfriamento, ventilação, climatização dos contêineres, inversores, cabeamento ou demais equipamentos auxiliares da infraestrutura de mineração;
- não foram considerados custos operacionais recorrentes, como manutenção, mão de obra, conectividade, seguros, substituição de componentes e eventuais taxas administrativas;
- foram considerados constantes os parâmetros técnicos dos mineradores, como potência elétrica e capacidade de processamento, desconsiderando perdas de desempenho, paradas para manutenção, falhas operacionais ou redução de eficiência ao longo do tempo;

Inicialmente, o aumento da geração solar provoca o aumento do fluxo de geração e da quantidade de energia disponível. O percentual de *curtailment* atua de maneiras opostas sobre a destinação dessa geração: quanto maior o percentual de restrição, menor será a energia injetada no SIN e maior será a energia frustrada. A energia frustrada apresenta uma relação positiva com a energia direcionada à mineração, uma vez que o aumento da sua disponibilidade possibilita o acionamento de mais unidades de mineração. E, o aumento da energia destinada à mineração reduz a energia frustrada acumulada sem aproveitamento, caracterizando uma relação de equilíbrio. A energia frustrada que excede a capacidade de consumo dos mineradores é direcionada ao carregamento do BESS. Já, a energia fornecida pelo BESS aumenta a energia disponível para a mineração, mas seu descarregamento reduz o estoque de energia armazenada, representando outra relação de equilíbrio. Um dos laços do modelo ocorre entre a energia disponível para mineração, a quantidade de mineradores em operação, a demanda e o consumo energético. O aumento da energia disponível permite o acionamento de mais unidades de mineração; uma quantidade maior de equipamentos eleva a demanda e o consumo da instalação; e o aumento do consumo reduz a energia disponível no subsistema. Esse sistema limita a operação dos equipamentos à energia efetivamente disponível, evitando que o consumo ultrapasse os recursos fornecidos pela usina ou pelo BESS. No subsistema de produção de Bitcoin, o aumento da quantidade de mineradores em operação e do processamento individual de cada equipamento eleva o poder computacional da instalação e sua participação no *pool* de mineração, aumentando a produção estimada de Bitcoin. O crescimento do poder computacional total da rede reduz a participação relativa do *pool* e, conseqüentemente, a parcela de Bitcoin gerada a partir da instalação. Da mesma forma, o aumento da taxa cobrada pelo *pool* reduz a quantidade de Bitcoin recebida. Assim, o Diagrama de Laços Causais mostra que o comportamento do modelo resulta da interação entre relações de reforço e de equilíbrio, em que o aumento da disponibilidade energética pode ampliar a mineração, enquanto o consumo, os limites de armazenamento, a competição computacional da rede e a taxa do *pool* restringem os resultados obtidos ao longo do tempo.

3.1 Estrutura geral do modelo proposto

O modelo geral foi estruturado em quatro sistemas interligados: geração e restrição de energia solar, armazenamento em baterias, operação dos equipamentos de mineração e produção de Bitcoin. A estrutura completa do modelo (Figura 10) evidencia as relações entre os estoques, fluxos e variáveis auxiliares utilizadas na simulação.

Figura 10 – Estrutura geral do modelo desenvolvido



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Como é possível observar na Figura 10, a modelagem inicia com a representação da geração solar fotovoltaica e da parcela de energia submetida ao *curtailment*. A energia que não pode ser injetada no Sistema Interligado Nacional é chamada de energia frustrada, podendo ser direcionada diretamente aos equipamentos de mineração ou armazenada no sistema BESS para utilização posterior.

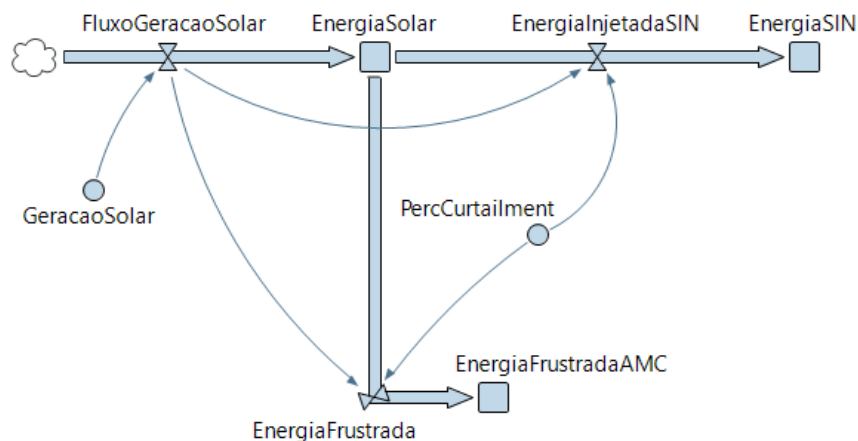
A quantidade de energia disponibilizada para a mineração determina o número de equipamentos operantes em cada intervalo da simulação. A capacidade computacional resultante da operação dos mineradores é relacionada ao *hash rate* total da rede Bitcoin e às condições de participação em um *pool* de mineração, permitindo estimar a quantidade de Bitcoin produzida ao longo do período analisado.

Para facilitar a compreensão da estrutura e das relações utilizadas, o modelo foi dividido em subsistemas. Cada subsistema é apresentado separadamente nas seções seguintes, por meio de uma representação aproximada da respectiva parte do modelo, seguida da descrição de suas variáveis, estoques, fluxos e equações.

3.2 Subsistema de geração solar e corte da geração

O primeiro subsistema representa a geração de energia elétrica da planta solar fotovoltaica (Figura 11), a energia injetada no Sistema Interligado Nacional e a parcela de geração submetida ao *curtailment*.

Figura 11 – Subsistema de geração solar e corte da geração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A variável *GeracaoSolar* representa o valor da geração fotovoltaica disponível em cada intervalo da simulação. Esses valores são obtidos a partir do histórico de geração retirado do site do ONS (2026b) e utilizado como dado de entrada da simulação. O fluxo *FluxoGeracaoSolar* alimenta o estoque *EnergiaSolar*, que representa a quantidade de energia solar disponível no intervalo considerado.

A variável *PercCurtailment* representa o percentual de restrição aplicado à geração fotovoltaica. Esse percentual é obtido a partir do histórico de *curtailment* do site do ONS (2026b) e determina a parcela da energia gerada que não pode ser injetada no SIN. A energia injetada no SIN e a energia frustrada em cada intervalo são calculadas conforme as Equações (1) e (2), respectivamente:

$$E_{Inj}^{SIN} = F_{Ger}^{Sol} \times (1 - Curt_{perc}) \quad (1)$$

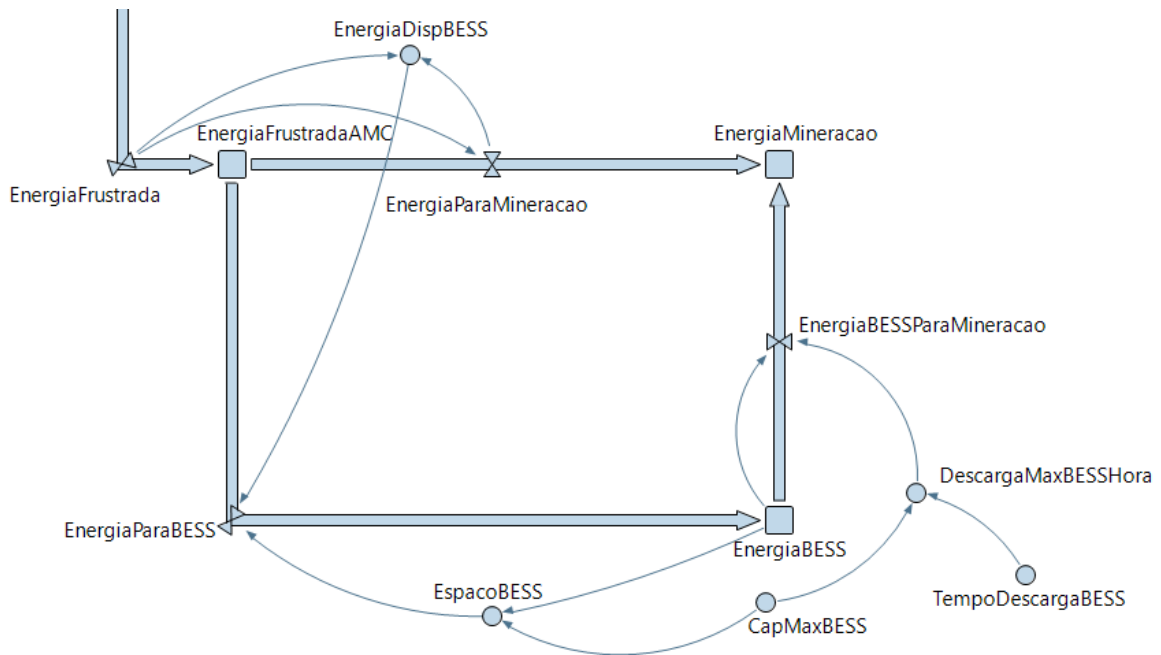
$$E_{Frustr} = F_{Ger}^{Sol} \times Curt_{perc} \quad (2)$$

em que, E_{Inj}^{SIN} é a energia da geração fotovoltaica injetada no SIN; F_{Ger}^{Sol} é o fluxo de geração fotovoltaica, obtido do banco de dados do ONS (2026b), a cada hora; $Curt_{perc}$ é o percentual de *curtailment*, obtido do banco de dados do ONS (2026b), a cada hora; e E_{Frustr} é a energia frustrada.

3.3 Subsistema de armazenamento de energia

O subsistema de armazenamento de energia (Figura 12) representa os processos de carregamento e descarregamento do sistema BESS, utilizado para armazenar a parcela da energia frustrada que não é consumida diretamente pelos equipamentos de mineração. A energia acumulada permanece disponível para utilização posterior e é direcionada aos mineradores nos períodos em que a energia frustrada não é suficiente para atender à demanda dos equipamentos. Dessa forma, o BESS atua como um elemento de compensação entre a disponibilidade variável de energia e o consumo da mineração, contribuindo para maior continuidade da operação.

Figura 12 – Subsistema de armazenamento de energia



Fonte: Elaboração Própria (2026).

O estoque *EnergiaBESS* representa a quantidade de energia armazenada no sistema de baterias. O carregamento ocorre por meio do fluxo *EnergiaParaBESS*, que depende da energia frustrada disponível, da demanda da mineração e do espaço disponível no sistema de armazenamento.

$$Esp_{Disp}^{BESS} = Cap_{Max}^{BESS} - E^{BESS} \quad (3)$$

$$E_{Disp}^{BESS} = \max(0, E_{Frustr} - E^{Miner}) \quad (4)$$

$$Desc_{Hora}^{BESS} = \frac{Cap_{Max}^{BESS}}{t_{Desc}^{BESS}} \quad (5)$$

$$E_{Carga}^{BESS} = \min(E_{Disp}^{BESS}, Esp_{Disp}^{BESS}) \quad (6)$$

em que, Esp_{Disp}^{BESS} é o espaço disponível para carregamento do BESS; Cap_{Max}^{BESS} é a capacidade máxima de armazenamento do BESS; E^{BESS} é a energia armazenada no BESS; E_{Disp}^{BESS} é a energia disponível para carregamento do BESS; E_{Carga}^{BESS} é a energia efetivamente direcionada ao carregamento do BESS; E_{Frustr} é a energia frustrada; E^{Miner} é a energia consumida para mineração; $Desc_{Hora}^{BESS}$ é o quanto o BESS pode descarregar de energia dentro de uma hora e t_{Desc}^{BESS} é o tempo de descarregamento completo do BESS.

O espaço disponível no BESS é calculado pela diferença entre sua capacidade máxima e a energia já armazenada, conforme apresentado na Equação (3). A Equação (4), por sua vez, representa a parcela da energia frustrada disponível para armazenamento, obtida após o atendimento da demanda energética dos equipamentos de mineração. Dessa forma, quando o consumo da mineração for igual ou superior à energia frustrada disponível, não haverá energia excedente para carregar o BESS. Por fim, a Equação (5) estabelece a quantidade máxima de energia que o sistema pode descarregar no intervalo de uma hora, considerando sua capacidade máxima e o tempo necessário para a descarga completa. A energia efetivamente descarregada, entretanto, permanece limitada à quantidade armazenada no BESS e à demanda não atendida pela energia frustrada no respectivo intervalo.

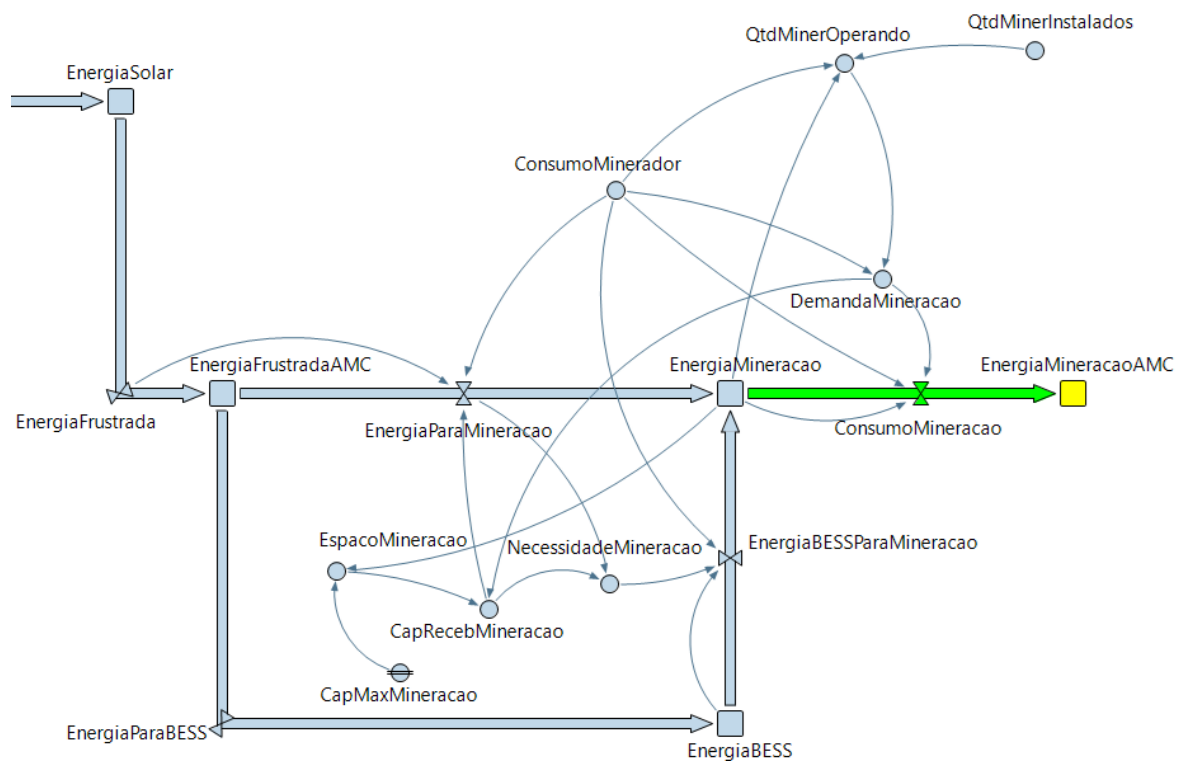
Dessa forma, o sistema BESS atua como elemento intermediário entre a ocorrência do *curtailment* e o consumo da mineração, permitindo armazenar energia

em períodos de maior disponibilidade e utilizá-la quando a energia frustrada instantânea não for suficiente para atender à demanda dos equipamentos.

3.4 Subsistema de operação dos equipamentos de mineração

O subsistema de operação dos equipamentos de mineração (Figura 13) representa a quantidade de mineradores acionados, sua demanda energética e o consumo total de energia associado à sua atividade.

Figura 13 – Subsistema de operação dos equipamentos de mineração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A variável $QtdMinerInstalados$ representa a quantidade total de equipamentos disponíveis na instalação. Entretanto, a quantidade efetivamente acionada em cada intervalo, representada por $QtdMinerOperando$, depende da energia disponível para mineração e do consumo individual de cada equipamento. A demanda energética da mineração é calculada com base na quantidade de equipamentos em operação e no consumo de cada minerador, conforme a Equação (8).

$$Qtd_{Oper}^{Miner} = \begin{cases} \min(Qtd_{Inst}^{Miner}, \lfloor \frac{E^{Miner}}{Cons^{Miner}} \rfloor), & \text{se } E^{Miner} \geq Cons^{Miner} \\ 0, & \text{se } E^{Miner} < Cons^{Miner} \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{Cons}^{Miner} = Qtd_{Inst}^{Miner} \times Cons^{Miner} \quad (8)$$

$$Cap_{Rec}^{Miner} = Esp^{Miner} + E_{Cons}^{Miner} \quad (9)$$

$$Esp^{Miner} = \max(0, Cap_{max}^{Miner} - E^{Miner}) \quad (10)$$

$$Nec^{Miner} = \max(0, Cap_{Rec}^{Miner} - E_{Carga}^{Miner}) \quad (11)$$

$$E_{Carga}^{Miner} = \begin{cases} \min(E_{Frustr}, Cap_{Rec}^{Miner}), & \text{se } E_{Frustr} e Cap_{Rec}^{Miner} \geq Cons^{Miner} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

Em que, Qtd_{Oper}^{Miner} é a quantidade de equipamentos de mineração em operação; Qtd_{Inst}^{Miner} é a quantidade de equipamentos de mineração instalados; E^{Miner} é a energia disponível no subsistema de mineração [kWh]; $Cons^{Miner}$ é o consumo de energia de um equipamento de mineração [kWh]; E_{Cons}^{Miner} é a energia total consumida pelos equipamentos de mineração em operação [kWh]; Cap_{Rec}^{Miner} é a capacidade do subsistema de mineração para receber energia [kWh]; Esp^{Miner} é o espaço disponível no subsistema de mineração para o recebimento de energia [kWh]; Cap_{max}^{Miner} é a capacidade energética máxima do subsistema de mineração [kWh]; Nec^{Miner} é a quantidade de energia necessária para suprir a capacidade energética do subsistema de mineração [kWh]; E_{Carga}^{Miner} é a energia frustrada efetivamente direcionada ao subsistema de mineração [kWh]; e, por fim, E_{Frustr} é a energia frustrada.

A Equação (7) determina a quantidade de mineradores que estão em operação no subsistema. Inicialmente, verifica-se se a energia disponível no subsistema é suficiente para alimentar pelo menos um equipamento. Quando essa condição é atendida, a quantidade de mineradores em operação é obtida pela divisão entre a energia disponível e o consumo individual de cada equipamento, com arredondamento para o menor número inteiro. O resultado também é limitado à quantidade total de mineradores instalados. Caso a energia disponível seja inferior ao consumo de um equipamento, nenhum minerador é acionado.

A Equação (8) calcula a energia total consumida pela mineração, por meio do produto entre a quantidade de equipamentos em operação e o consumo individual de cada minerador. Na Equação (9), a capacidade de recebimento de energia do

subsistema é determinada pela soma entre o espaço disponível e a energia consumida no mesmo intervalo, uma vez que o consumo libera capacidade para a entrada de nova energia.

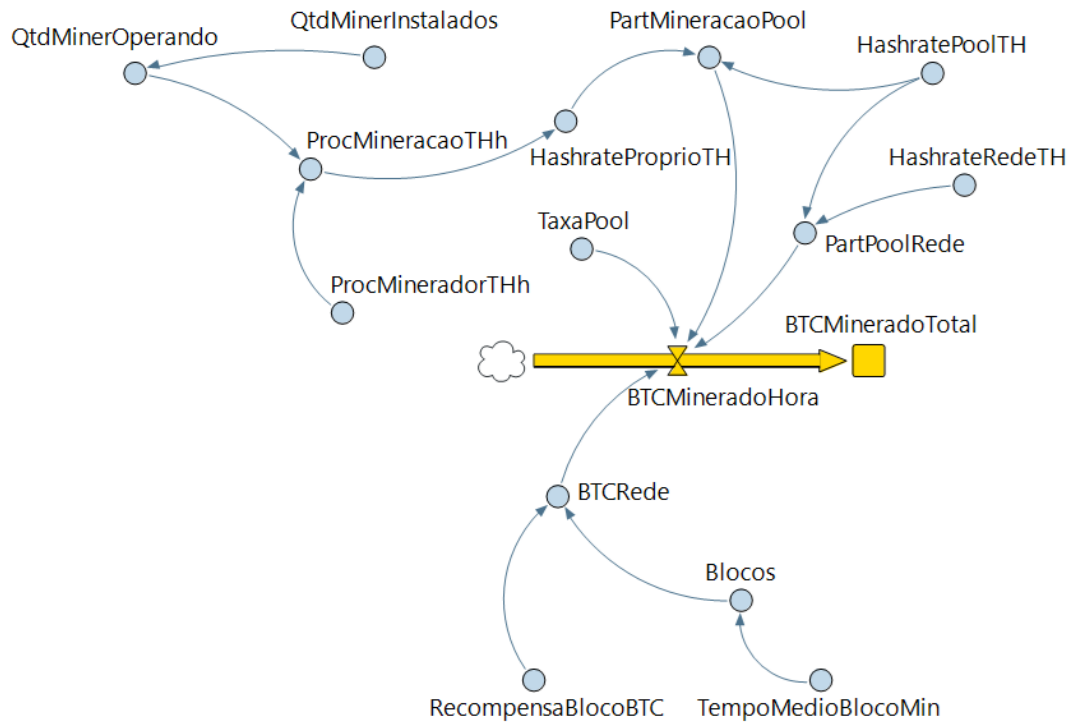
A Equação (10) calcula o espaço disponível no subsistema de mineração pela diferença entre sua capacidade máxima e a energia existente no instante analisado, adotando-se zero como limite inferior. A Equação (11) representa a necessidade energética do subsistema, correspondente à quantidade de energia requerida para atingir sua capacidade máxima. Por fim, a Equação (12) determina a energia frustrada efetivamente direcionada à mineração. Esse fornecimento ocorre apenas quando tanto a energia frustrada quanto a capacidade de recebimento são suficientes para comportar o consumo de pelo menos um minerador. Quando essa condição é atendida, a energia transferida corresponde ao menor valor entre a energia frustrada disponível e a capacidade de recebimento do subsistema.

O fluxo *EnergiaParaMineracao* representa a parcela de energia frustrada direcionada diretamente à atividade de mineração, enquanto *EnergiaBESSParaMineracao* representa a energia complementar proveniente do sistema de armazenamento. A soma dessas duas parcelas alimenta o estoque *EnergiaMineracao*. O consumo efetivo dos equipamentos é representado pelo fluxo *ConsumoMineracao* e armazenado em uma variável de estoque *EnergiaMineracaoAMC*, que representa o montante de energia frustrada aproveitada para a atividade de mineração.

3.5 Subsistema de produção de bitcoin

O subsistema de produção de Bitcoin (Figura 14) relaciona a quantidade de equipamentos em operação à capacidade computacional da instalação e à participação relativa desta na rede Bitcoin.

Figura 14 – Subsistema de produção de Bitcoin



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A capacidade computacional total dos equipamentos é calculada a partir da quantidade de mineradores em operação e do processamento individual de cada equipamento, representada pela variável *ProcMineradorTHh*.

$$Proc^{Mineracao} = Qtd_{oper}^{Miner} \times Proc^{Miner} \quad (13)$$

em que *Proc^{Mineracao}* é o poder de processamento dos mineradores em operação [Hash/h]; *Proc^{Miner}* é o poder de processamento de um minerador operante [Hash/h].

A variável *HashrateProprioTH* funciona como uma validação da variável *Proc^{Mineracao}*. Inicialmente, verifica-se se o valor calculado não é indefinido e se é superior a zero. Quando essas condições são atendidas, o próprio valor de processamento é utilizado. Caso o resultado seja inválido, indefinido, igual a zero ou negativo, a variável assume valor nulo. Essa condição foi imposta para evitar a propagação de erros dentro da simulação do modelo.

Neste subsistema, inicialmente, determina-se a participação relativa da instalação de mineração no *pool* e a participação do próprio *pool* na rede Bitcoin. Essas relações são obtidas pela divisão do processamento fornecido pelos

mineradores em operação, pelo processamento total do *pool* e pela divisão do processamento do *pool* pelo processamento total da rede, respectivamente. Dessa forma, o modelo identifica qual parcela da capacidade computacional global corresponde à instalação do modelo.

$$Part_{Pool} = \frac{Hash_{Próprio}}{Hash_{Pool}} \quad (14)$$

$$Part_{\frac{Pool}{Rede}} = \frac{Hash_{Pool}}{Hash_{Rede}} \quad (15)$$

$$BTC_{Rede} = Rec_{Bloco}^{BTC} \times N_{Blocos} \quad (16)$$

$$BTC_{Miner} = BTC_{Rede} \times Part_{\frac{Pool}{Rede}} \times Part_{Pool} \times (1 - Taxa_{Pool}) \quad (17)$$

Em que BTC_{Miner} é a quantidade estimada de Bitcoin gerada [BTC/h]; BTC_{Rede} é a quantidade total de Bitcoin distribuída pela rede [BTC/h]; $Part_{\frac{Pool}{Rede}}$ é a participação do processamento do *pool* no processamento total da rede [%]; $Part_{Pool}$ é a participação do processamento da instalação no processamento total do *pool* [%]; $Taxa_{Pool}$ é o percentual retido pelo *pool* de mineração para poder participar do mesmo [%]; N_{Blocos} é a quantidade de blocos considerada no intervalo da simulação [blocos/hora]; Rec_{Bloco}^{BTC} é a recompensa concedida pela rede Bitcoin para cada bloco validado [BTC/bloco]; $Hash_{Próprio}$ é o processamento fornecido pelos mineradores em operação [TH/h]; $Hash_{Pool}$ é o processamento total do *pool* de mineração [TH/h] e o $Hash_{Rede}$ é o processamento total da rede Bitcoin [TH/h].

Em seguida, calcula-se a quantidade total de Bitcoin distribuída pela rede a cada hora, a partir do produto entre o número médio de blocos validados e a recompensa concedida por bloco. A quantidade atribuída à instalação é obtida mediante a aplicação das participações do *pool* na rede e da instalação no *pool*, com o posterior desconto da taxa cobrada pelo serviço de mineração compartilhada. Assim, o resultado representa a quantidade estimada de Bitcoin gerada pela instalação em cada hora de simulação.

Por fim, a variável de estoque $BTCMineradoTotal$ acumula, ao longo da simulação, a quantidade estimada de Bitcoin gerada a cada hora. Esse estoque é alimentado pelo fluxo $BTCMineradoHora$ e representa, ao término do período

analisado, o total de Bitcoin produzido pela instalação de mineração durante o mês simulado.

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir da simulação do modelo desenvolvido no software AnyLogic. A ferramenta foi utilizada para implementar as relações definidas no modelo de Dinâmica de Sistemas e acompanhar, durante o período de um mês, o comportamento horário das variáveis relacionadas à geração fotovoltaica, à energia frustrada pelo *curtailment*, ao armazenamento no sistema BESS, à operação dos equipamentos de mineração e à quantidade estimada de Bitcoin produzida. Ressalta-se que as limitações e as premissas do modelo estão elencadas no capítulo 3, sendo imprescindíveis para análises e interpretação dos resultados.

Para este estudo, foram utilizados os registros de geração e de restrição de operação de uma usina solar fotovoltaica típica, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), referentes ao mês de maio de 2026. Durante o processamento, os dados foram organizados em intervalos de hora em hora, sendo mantidos apenas os registros válidos e consistentes necessários para a determinação da geração solar e da parcela submetida ao *curtailment*. Nos períodos em que não houve restrição da geração, o percentual de *curtailment* foi considerado igual a zero. Após o tratamento, a base resultante foi utilizada como dado de entrada no AnyLogic, permitindo representar, hora a hora, a energia injetada no SIN e a energia frustrada disponível para a mineração e para o armazenamento no sistema BESS.

Para a análise dos resultados, foram definidos cinco cenários de simulação. O Cenário 1 corresponde ao modelo de referência, representando a operação atual da usina solar fotovoltaica, sem a instalação de equipamentos de mineração e sem sistema de armazenamento, de modo que a energia frustrada pelo *curtailment* permanece sem aproveitamento. O Cenário 3 considera a introdução dos equipamentos de mineração, utilizando diretamente a energia frustrada decorrente dos percentuais horários de *curtailment* observados na base de dados, porém sem a utilização do sistema BESS. O Cenário 4 contempla a operação conjunta dos equipamentos de mineração e do sistema BESS, mantendo-se os percentuais reais de *curtailment*, permitindo avaliar o ganho adicional proporcionado pelo armazenamento da parcela excedente da energia frustrada. O Cenário 5 representa uma condição extrema de *curtailment* de 100%, na qual toda a energia produzida pela

usina deixa de ser injetada no SIN e é disponibilizada para a mineração e para o carregamento do BESS. Por fim, o Cenário 5 considera a condição oposta, com *curtailment* igual a zero, de modo que toda a energia gerada pela planta fotovoltaica é injetada no SIN, não havendo energia frustrada disponível para mineração ou armazenamento. A comparação entre esses cenários permite avaliar o comportamento do sistema em sua condição de referência, com o aproveitamento da energia frustrada e sob condições extremas de restrição e de injeção integral da geração.

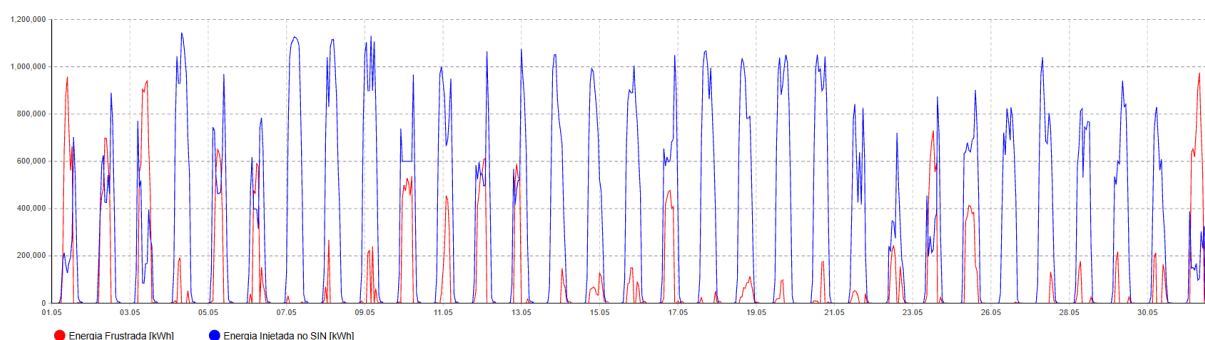
Para as simulações que contemplam a mineração de Bitcoin, foram adotadas premissas técnicas e operacionais comuns, a fim de manter a comparabilidade entre os cenários analisados. Considerou-se a instalação de 40 contêineres de mineração, totalizando 12.240 unidades de mineração, do modelo ASIC S21+, cada unidade com consumo elétrico de 3,878 kW e processamento de 846000 TH/h (ASIC MINER VALUE, 2026). Também foi considerado um sistema BESS com capacidade máxima de armazenamento de 200 MWh, utilizado para armazenar a parcela excedente da energia frustrada e fornecê-la aos equipamentos nos períodos em que a energia disponível diretamente pelo *curtailment* não for suficiente. Os parâmetros referentes ao poder computacional, à participação relativa do *pool* de mineração e à taxa do *pool* foram obtidos na plataforma Hashrate Index (HASHRATE INDEX, 2026), considerando os valores disponíveis na data da consulta. Já, o parâmetro relacionado ao *hashrate* total da rede foi obtido em Mempool.space (MEMPOOL.SPACE, 2026), considerando o valor disponível na data da consulta. Para a estimativa da produção de Bitcoin, foi considerado o valor de 3,125 BTC por bloco. Também foi adotado o intervalo médio de dez minutos para a geração de um novo bloco na rede Bitcoin, correspondendo a seis blocos por hora (RIVER FINANCIAL, 2026).

4.1 Cenário 1

O Cenário 1 representa a condição de referência da usina solar fotovoltaica, considerando sua operação sem os equipamentos de mineração e sem o aproveitamento da energia frustrada pelo *curtailment* (Figura 15).

Nesse cenário, a energia produzida pela usina é dividida entre a energia injetada no SIN e a energia frustrada ao longo do período analisado. Assim, os resultados permitem caracterizar o comportamento atual da usina e estabelecer uma base de comparação para os demais cenários de simulação.

Figura 15 – Cenário 1 – Comportamento da energia

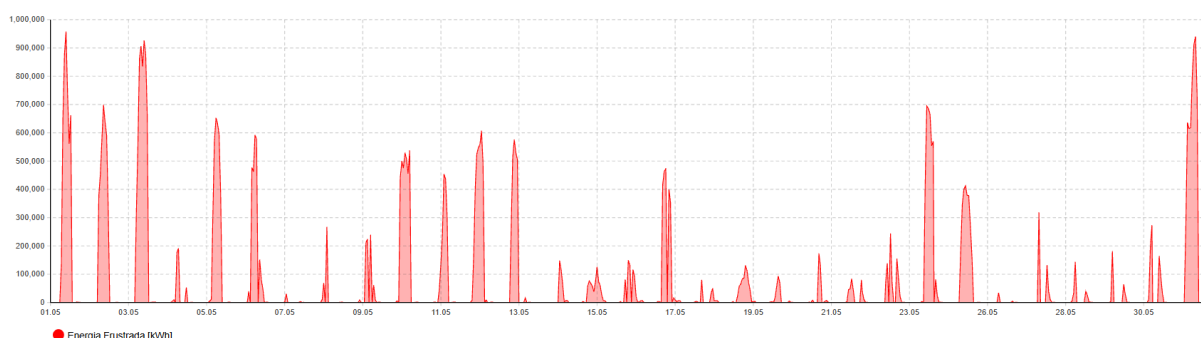


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Na Figura 15, a linha em azul representa a energia efetivamente injetada no SIN, enquanto a linha em vermelho é referente à energia frustrada por conta do *curtailment*. Observa-se que, em diversos períodos, houve um aumento significativo da linha vermelha, indicando a ocorrência de cortes expressivos, reduzindo a parcela de energia aproveitada pelo sistema elétrico.

A Figura 16 apresenta o comportamento horário da energia frustrada separado da energia injetada no SIN, para facilitar a comparação entre os cenários.

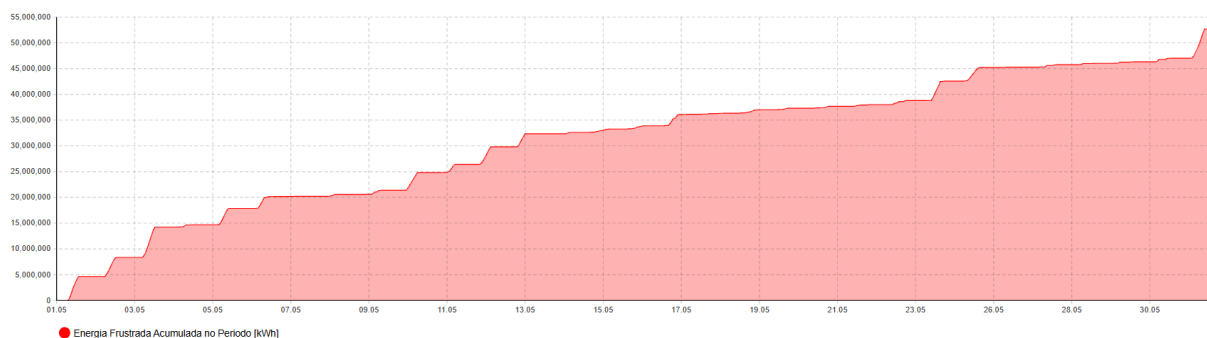
Figura 16 – Cenário 1 – Energia frustrada



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 17 demonstra seu valor acumulado ao longo da simulação. Por se tratar do cenário de referência, esses resultados serão utilizados como base para a comparação com os cenários seguintes, permitindo avaliar as alterações provocadas pela introdução da mineração e pelas diferentes condições dos cenários propostos.

Figura 17 – Cenário 1 – Energia frustrada acumulada no período

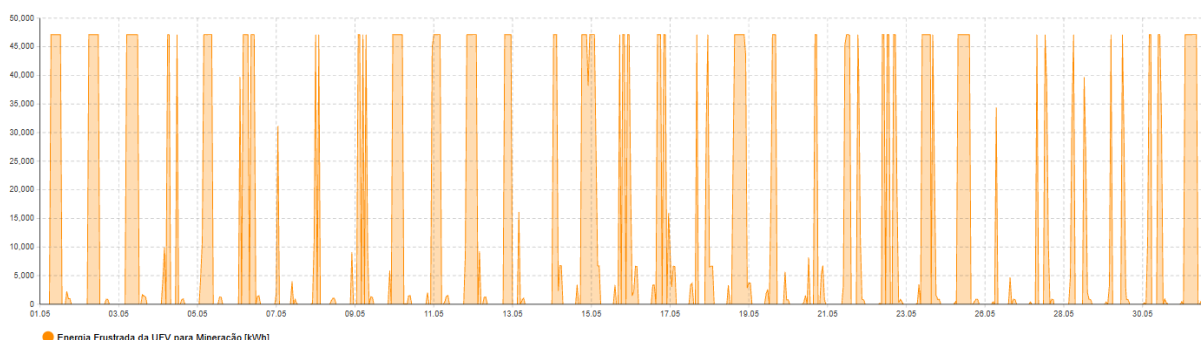


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Ao final do período analisado, foram injetados no SIN 207.286.465,769 kWh, enquanto 52.706.882,731 kWh permaneceram frustrados e sem aproveitamento no Cenário 1. Considerando a geração total de 259.993.348,500 kWh, a energia frustrada corresponde a aproximadamente 20,27% de toda a energia produzida pela usina durante o mês.

4.2 Cenário 2

No Cenário 2, são introduzidos os equipamentos de mineração para avaliar o aproveitamento direto da energia frustrada pelo *curtailment*. Nesse cenário, a energia que não pode ser injetada no SIN é direcionada aos mineradores em cada intervalo horário, respeitando a disponibilidade instantânea de energia e a capacidade de consumo dos equipamentos. Assim, a operação da mineração varia ao longo da simulação, aumentando nos períodos de maior energia frustrada e reduzindo-se quando essa disponibilidade é menor (Figura 18). Como não há armazenamento, o cenário permite analisar isoladamente a mineração como carga flexível para o aproveitamento imediato da energia frustrada.

Figura 18 – Cenário 2 – Energia frustrada destinada à mineração

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 18 apresenta a energia frustrada da usina fotovoltaica destinada diretamente à mineração. Observa-se que o aproveitamento da energia ocorre de forma intermitente ao longo do mês, acompanhando a disponibilidade da energia frustrada pelo *curtailment*. Em diversos momentos, a energia direcionada à mineração atinge a atender ao consumo dos equipamentos instalados, indicando períodos em que a disponibilidade energética foi suficiente para acionar uma parcela significativa da estrutura de mineração. Por outro lado, também são observados intervalos com baixa ou nenhuma energia destinada aos mineradores, evidenciando que a operação da mineração depende diretamente da ocorrência e da intensidade dos cortes de geração.

Após a introdução da mineração, parte da energia frustrada permaneceu sem aproveitamento em determinados intervalos (Figura 23). Isso ocorre quando a energia frustrada ultrapassa a capacidade de consumo dos mineradores.

Figura 19 – Cenário 2 – Energia frustrada destinada à mineração

Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 19 apresenta a energia frustrada que permaneceu sem aproveitamento após a inserção dos equipamentos de mineração. Observa-se que

ainda ocorrem picos de energia não aproveitada ao longo do período analisado, indicando que, em determinados intervalos, a energia frustrada disponível foi superior à capacidade de consumo da instalação de mineração. Por outro lado, também há períodos em que esse valor foi reduzido, evidenciando momentos em que os mineradores foram capazes de absorver grande parte da energia frustrada disponível.

A produção diária de Bitcoin (Figura 20) resulta da disponibilidade energética para as unidades de mineração, da quantidade de mineradores em operação e dos parâmetros relacionados ao poder computacional da instalação, do *pool* e da rede Bitcoin.

Figura 20 – Cenário 2 – Bitcoin minerado por dia

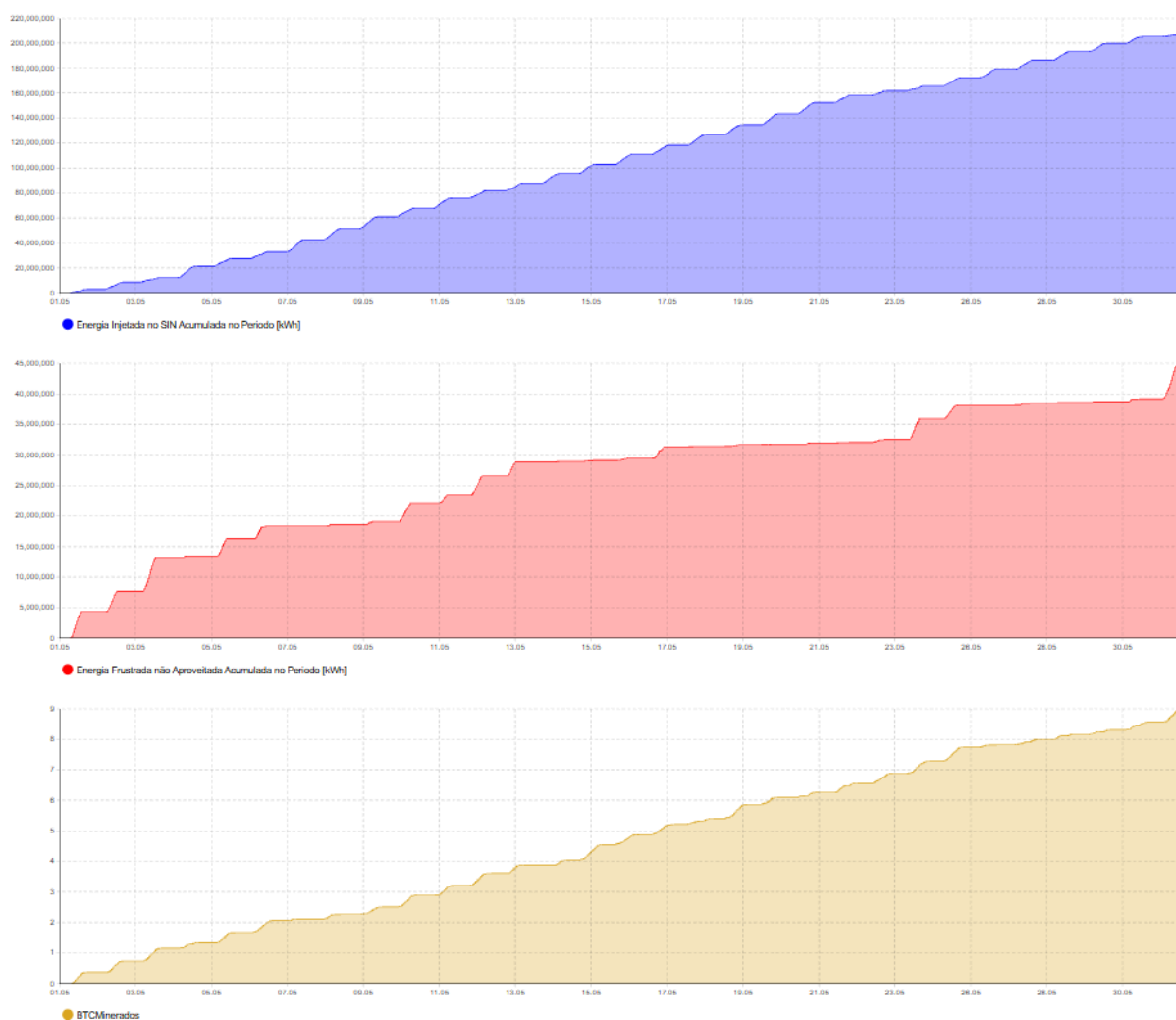


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que a produção de BTC acompanha diretamente a disponibilidade de energia frustrada destinada à mineração, apresentando picos nos dias em que há maior volume de energia disponível e valores reduzidos ou nulos nos períodos de menor ocorrência de *curtailment*.

Após a análise do comportamento horário e diário das variáveis, são apresentados os resultados acumulados durante o mês. A Figura 21 mostra, respectivamente, a energia total injetada no SIN, a energia frustrada não aproveitada e a quantidade de bitcoins minerados ao longo do mês.

Figura 21 – Cenário 2 – Resumo de variáveis acumuladas



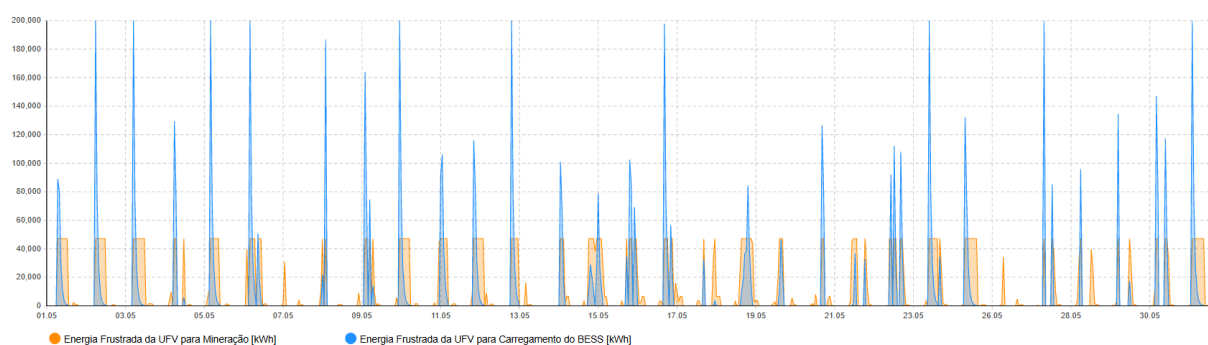
Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 21 apresenta o comportamento acumulado das principais variáveis ao longo do período analisado. Observa-se que a energia injetada no SIN se manteve igual à verificada no Cenário 1, uma vez que os dados de geração e os percentuais de *curtailment* utilizados na simulação não foram alterados, sendo a mineração alimentada apenas pela parcela de energia frustrada. Por outro lado, a energia frustrada não aproveitada acumulada apresentou redução ao final do mês em relação ao Cenário 1, indicando que parte da energia que antes permaneceria sem aproveitamento foi direcionada aos equipamentos de mineração. Como consequência desse aproveitamento, houve produção acumulada de Bitcoin ao longo do período simulado, demonstrando que a mineração foi capaz de converter parte da energia frustrada em retorno econômico.

4.3 Cenário 3

No Cenário 3, são introduzidos os equipamentos de mineração e o sistema BESS, com o objetivo de aproveitar parte da energia frustrada decorrente do *curtailment*. A análise dos resultados é apresentada seguindo o fluxo energético do modelo, desde a destinação inicial da energia frustrada até sua conversão em produção estimada de Bitcoin (Figura 22). Inicialmente, avalia-se a distribuição da energia entre o consumo direto da mineração e o carregamento do BESS. Em seguida, a participação do sistema de armazenamento no atendimento aos mineradores, o consumo energético da atividade, a parcela de energia que permanece sem aproveitamento e, por fim, a produção de Bitcoin ao longo do período.

Figura 22 – Cenário 3 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A comparação entre essas duas variáveis permite observar a lógica de prioridade adotada no modelo, segundo a qual a energia frustrada atende inicialmente à demanda dos mineradores (em laranja) em evidência na Figura 23. Apenas o excedente que não pode ser consumido diretamente é armazenado no BESS (em azul). Só há o carregamento do BESS nos momentos em que a energia para mineração já está saturada, permitindo assim o carregamento do BESS posterior ao atendimento da mineração. Ainda, é possível observar que houve dias em que a energia frustrada não foi suficiente para atender à carga da mineração e ao carregamento do BESS. Nesses dias houve apenas a mineração a partir da energia frustrada diretamente, sem o atendimento do BESS.

Figura 23 – Cenário 3 – Consumo energético da mineração

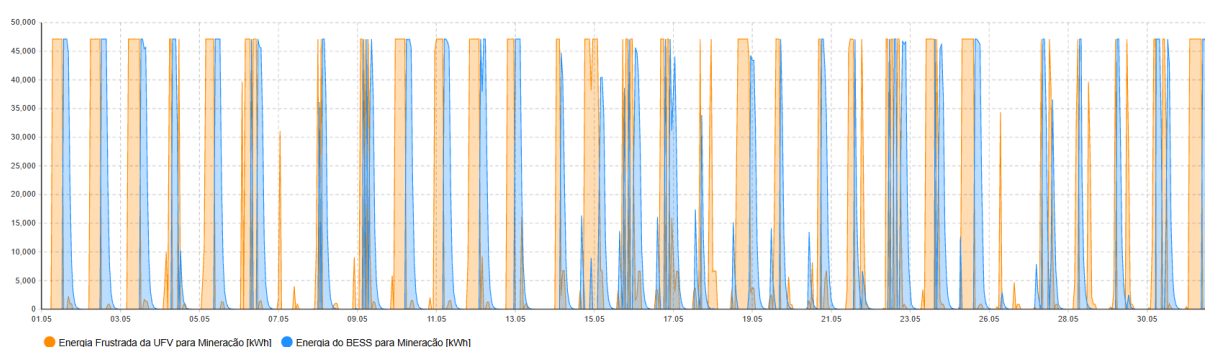


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Verifica-se que, em diversos momentos, as unidades de mineração não operaram em sua capacidade total, principalmente em razão da variabilidade da energia frustrada disponível. Como os cortes de geração não ocorrem de forma uniforme e contínua, há dias com elevados volumes de energia submetida ao *curtailment* e outros com restrições reduzidas ou inexistentes. Essa irregularidade limita o acionamento simultâneo de todos os mineradores, condicionando diretamente o nível de utilização dos equipamentos.

A Figura 24 apresenta o atendimento à demanda energética da mineração, distinguindo a parcela fornecida diretamente pela energia frustrada da usina fotovoltaica e a parcela complementar disponibilizada pelo sistema BESS.

Figura 24 – Cenário 3 – Energia da UFV e do BESS destinada à mineração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que a usina fotovoltaica (UFV) constitui a fonte prioritária de suprimento dos mineradores, enquanto o BESS atua nos períodos em que a energia frustrada da UFV não é suficiente para atender à demanda dos equipamentos. Dessa forma, a comparação entre as duas parcelas permite avaliar a contribuição do sistema

de armazenamento para aumentar o aproveitamento da energia frustrada para a mineração.

Mesmo com a introdução da mineração e do sistema de armazenamento, parte da energia frustrada permaneceu sem aproveitamento em determinados intervalos (Figura 25). Isso ocorre quando a energia frustrada ultrapassa simultaneamente a capacidade de consumo dos mineradores e a capacidade de carregamento do BESS.

Figura 25 – Cenário 3 – Energia frustrada não aproveitada

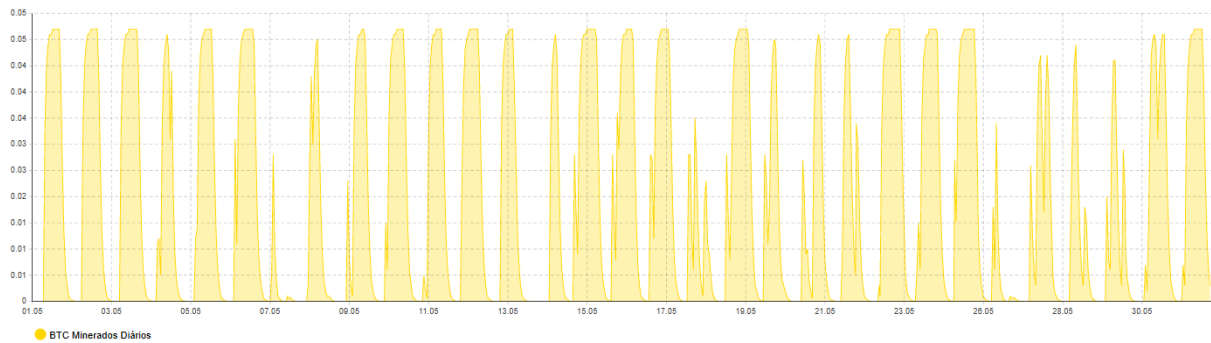


Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 25 permite observar a redução da energia frustrada após a introdução da mineração e do sistema BESS em relação ao Cenário 1. Diversos eventos de energia frustrada deixam de aparecer ou são reduzidos, indicando que a mineração e o sistema de armazenamento foram capazes de absorver parte relevante da energia frustrada.

A produção diária de Bitcoin (Figura 26) resulta da disponibilidade energética para as unidades de mineração, da quantidade de mineradores em operação e dos parâmetros relacionados ao poder computacional da instalação, do *pool* e da rede Bitcoin.

Figura 26 – Cenário 3 – Bitcoin minerado por dia

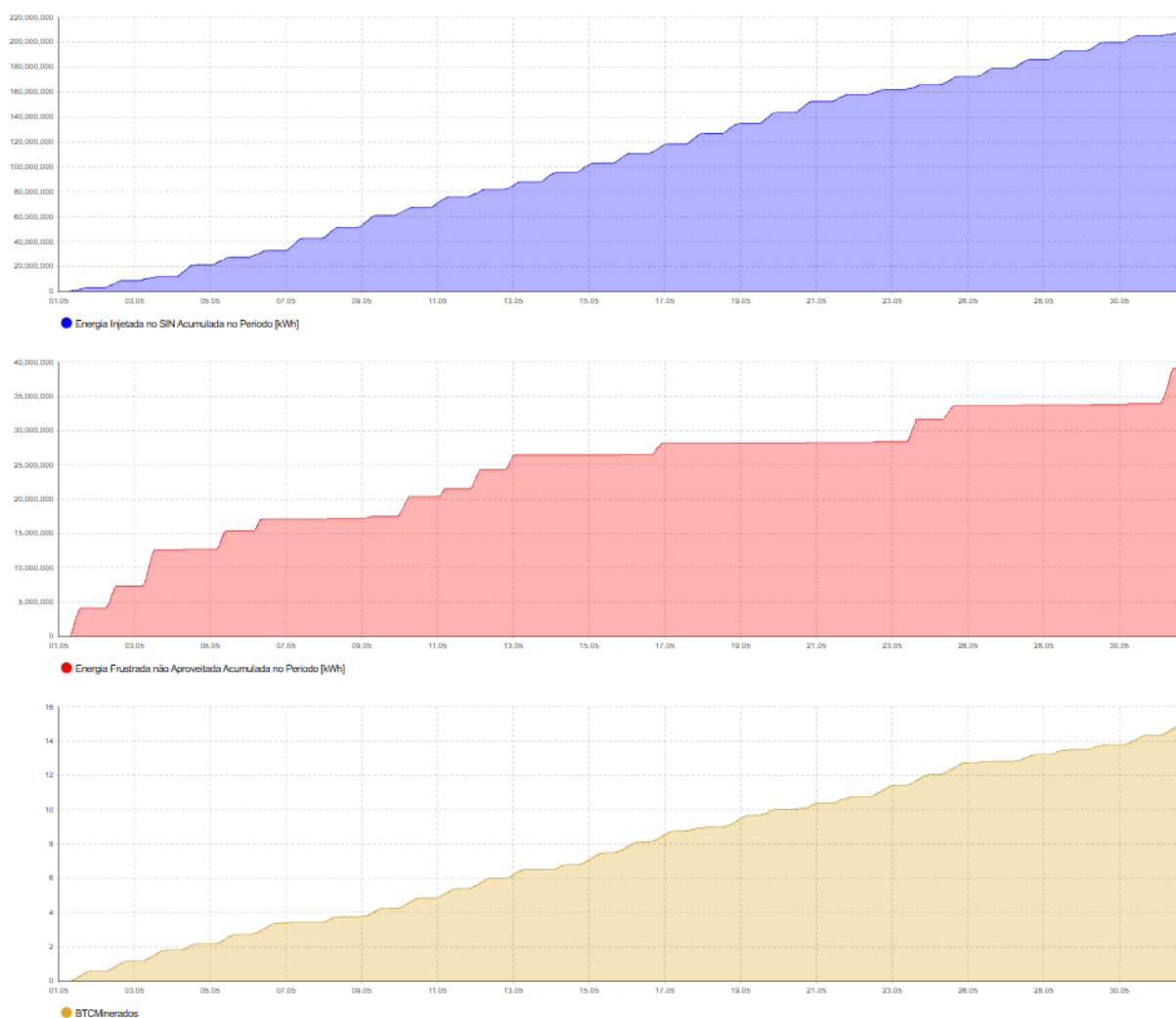


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Os dias de maior produção de Bitcoin correspondem aos períodos de maior consumo energético, pois a quantidade produzida depende do número de mineradores em operação. Quanto maior a energia disponível, maior o processamento da instalação e, conseqüentemente, a produção de Bitcoin.

Após a análise do comportamento horário e diário das variáveis, são apresentados os resultados acumulados durante o mês. A Figura 27 mostra, respectivamente, a energia total injetada no SIN, a energia frustrada não aproveitada e a quantidade de bitcoins minerados ao longo do mês.

Figura 27 – Cenário 3 – Resumo de variáveis acumuladas



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 27 apresenta, de forma acumulada, os principais resultados do Cenário 3. No primeiro gráfico, em azul, observa-se a energia total injetada no SIN ao longo do mês. Esse valor permaneceu igual ao obtido no Cenário 1, como já esperado, pois a mineração foi alimentada apenas pela energia frustrada decorrente do *curtailment*, sem interferir na parcela de energia destinada ao sistema elétrico.

No segundo gráfico, em vermelho, é apresentada a energia frustrada não aproveitada acumulada. Diferentemente do Cenário 1, a curva apresenta períodos em que permanece praticamente constante, indicando que, nesses intervalos, não houve aumento da energia desperdiçada. Isso ocorre porque parte da energia frustrada foi absorvida pelos equipamentos de mineração ou direcionada ao carregamento do BESS. Os trechos de crescimento da curva representam os períodos em que a energia

disponível superou a capacidade de consumo dos mineradores e de armazenamento do sistema.

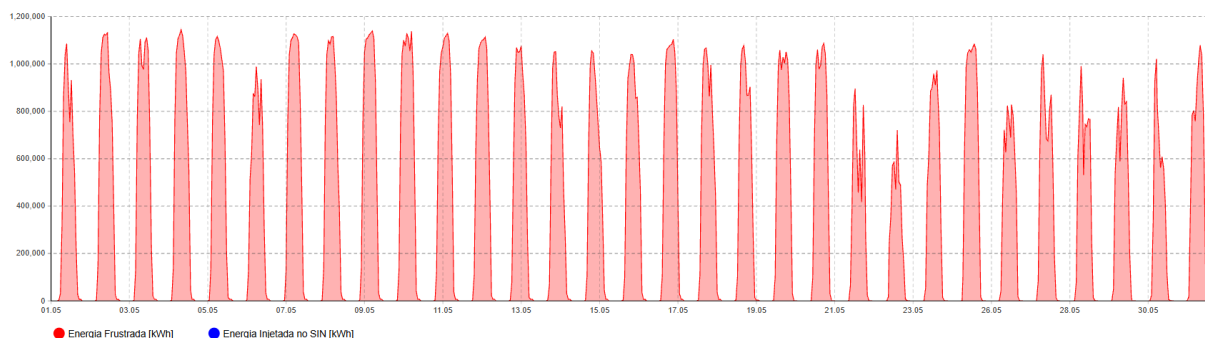
Por fim, o terceiro gráfico apresenta a quantidade acumulada de Bitcoin produzida durante o mês. A curva cresce à medida que os mineradores entram em operação, com variações em sua inclinação conforme a disponibilidade de energia para a mineração. Assim, os períodos de crescimento mais acentuado correspondem aos momentos de maior utilização dos equipamentos, enquanto os trechos de menor crescimento indicam redução ou interrupção parcial da atividade.

Ao final do período analisado, foram injetados no SIN 207.286.465,769 kWh, o mesmo que no Cenário 1, enquanto 39.056.178,78 kWh permaneceram frustrados e sem aproveitamento no Cenário 3 e 13.647.931,565 kWh foram aproveitados na mineração, resultando na produção de 14,998 bitcoins. Considerando a geração total de 259.993.348,500 kWh, a energia frustrada corresponde a aproximadamente 15,02% de toda a energia produzida pela usina durante o mês, com uma queda de aproximadamente 5,25% em comparação com o Cenário 1.

4.4 Cenário 4

O Cenário 4 considera uma condição extrema de operação, na qual 100% da energia produzida pela usina solar fotovoltaica é submetida ao *curtailment*. Dessa forma, não ocorre injeção de energia no SIN (Figura 28), e toda a geração da usina fica disponível para o atendimento dos equipamentos de mineração e para o carregamento do sistema BESS. Entretanto, a disponibilidade integral da geração não significa que toda a energia será necessariamente aproveitada, pois seu consumo permanece limitado pela quantidade de mineradores instalados, pela demanda energética dos equipamentos e pela capacidade de armazenamento do BESS. Esse cenário permite avaliar o desempenho máximo da estrutura modelada diante da maior disponibilidade possível de energia frustrada.

Figura 28 – Cenário 4 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS

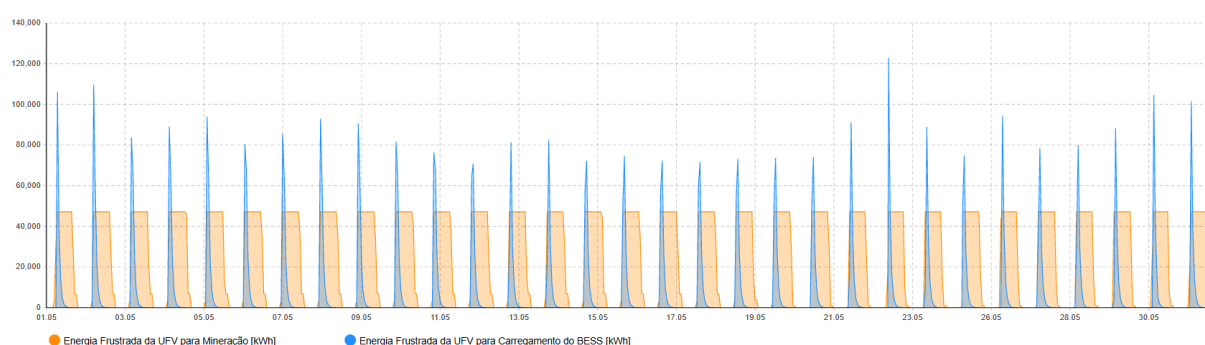


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Foram mantidas as mesmas premissas do Cenário 3, incluindo a quantidade e o modelo dos equipamentos de mineração, a capacidade máxima do BESS e a lógica de prioridade do fluxo energético. Assim, a energia frustrada atende inicialmente à demanda dos mineradores, enquanto o excedente é direcionado ao carregamento do sistema de armazenamento. A análise dos resultados segue a mesma sequência utilizada no Cenário 3.

A Figura 29 apresenta a distribuição da energia frustrada entre o consumo direto dos equipamentos de mineração e o carregamento do sistema BESS. Como o *curtailment* foi considerado igual a 100%, toda a geração produzida pela usina ficou disponível para essas duas finalidades.

Figura 29 – Cenário 4 – Energia frustrada destinada à mineração e ao carregamento do BESS



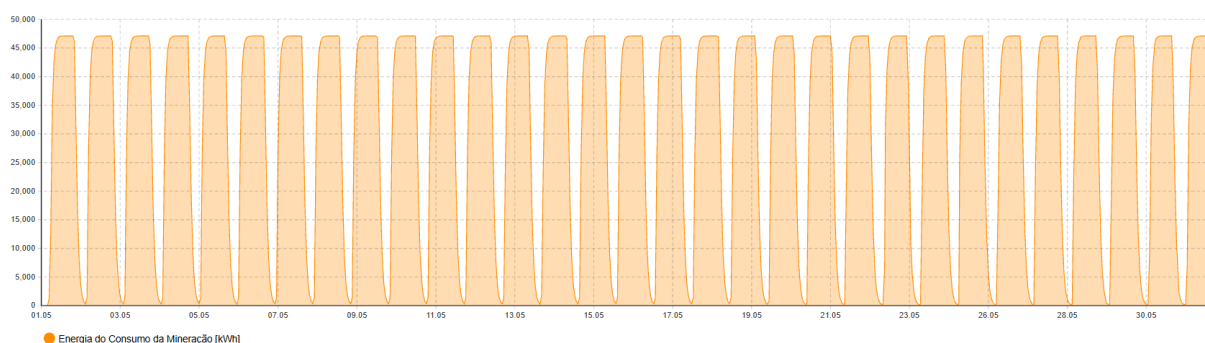
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que tanto o atendimento da demanda energética dos equipamentos de mineração quanto o carregamento do BESS passaram a apresentar um comportamento mais uniforme e padronizado ao longo dos dias analisados. Isso ocorreu porque, com a adoção de 100% de *curtailment*, há uma elevada

disponibilidade de energia frustrada diariamente, suficiente para atender de forma recorrente à demanda da mineração e carregar o sistema de armazenamento.

A Figura 30 apresenta o comportamento do consumo energético da mineração ao longo do período analisado. Em razão da maior disponibilidade da energia frustrada, verifica-se que os equipamentos operam com maior frequência em sua capacidade máxima.

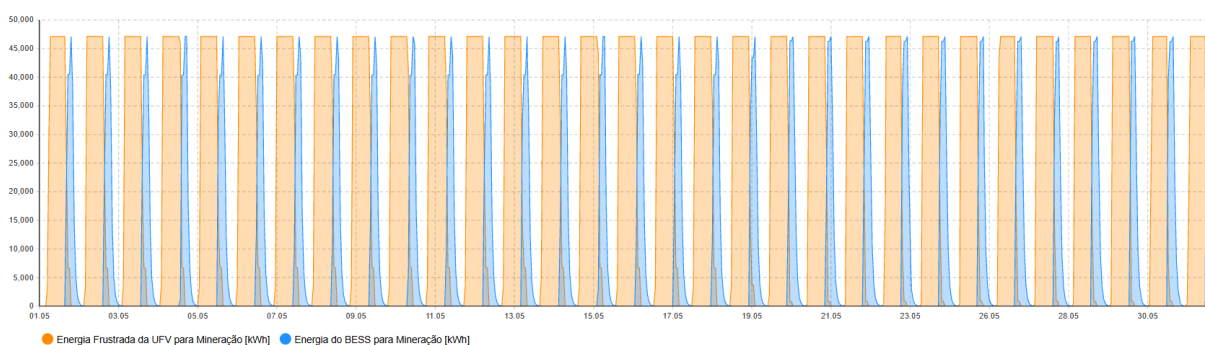
Figura 30 – Cenário 4 – Consumo energético da mineração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 31 apresenta o atendimento à demanda energética da mineração, distinguindo a parcela fornecida diretamente pela energia frustrada da usina solar fotovoltaica e a parcela complementar disponibilizada pelo BESS.

Figura 31 – Cenário 4 – Energia da UFV e do BESS destinada à mineração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A energia proveniente diretamente da usina permanece como fonte prioritária de atendimento aos mineradores. O BESS atua nos períodos em que a geração da usina não é suficiente para atender à demanda dos equipamentos, especialmente durante a redução da geração no final do dia.

Mesmo com a utilização dos equipamentos de mineração e do sistema BESS, a maior parte da energia frustrada permanece sem aproveitamento (Figura 32). Essa condição ocorre quando a geração da usina supera simultaneamente a capacidade máxima de consumo dos mineradores e a capacidade disponível para carregamento do BESS.

Figura 32 – Cenário 4 – Energia frustrada não aproveitada

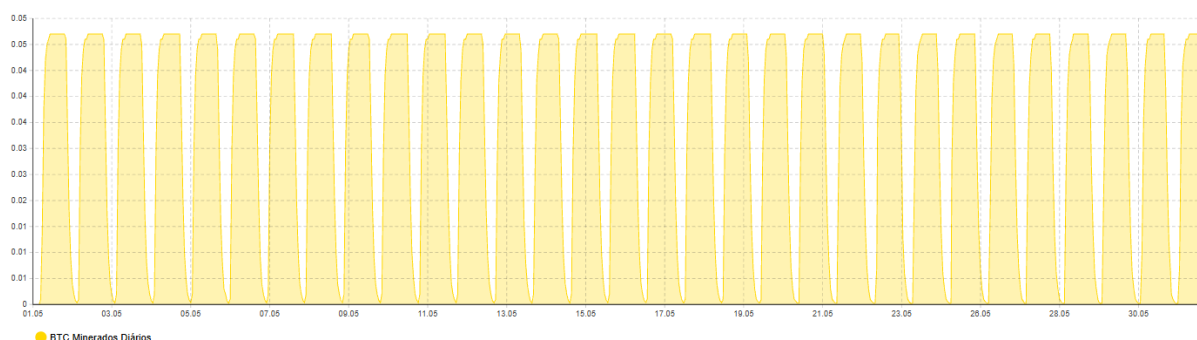


Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 32 apresenta a energia frustrada que permaneceu sem aproveitamento após o atendimento da mineração e o carregamento do BESS. Nos períodos de geração, a energia disponível supera a capacidade de consumo dos mineradores e de armazenamento do sistema. Assim, neste cenário de 100% de *curtailment*, a principal limitação passa a ser a capacidade de absorção da instalação, indicando a possibilidade de ampliar a mineração e o BESS.

A Figura 33 apresenta a quantidade estimada de Bitcoin produzida em cada dia da simulação. A produção diária depende da disponibilidade energética, da quantidade de equipamentos em operação e dos parâmetros relacionados ao poder computacional da instalação, do *pool* de mineração e da rede Bitcoin.

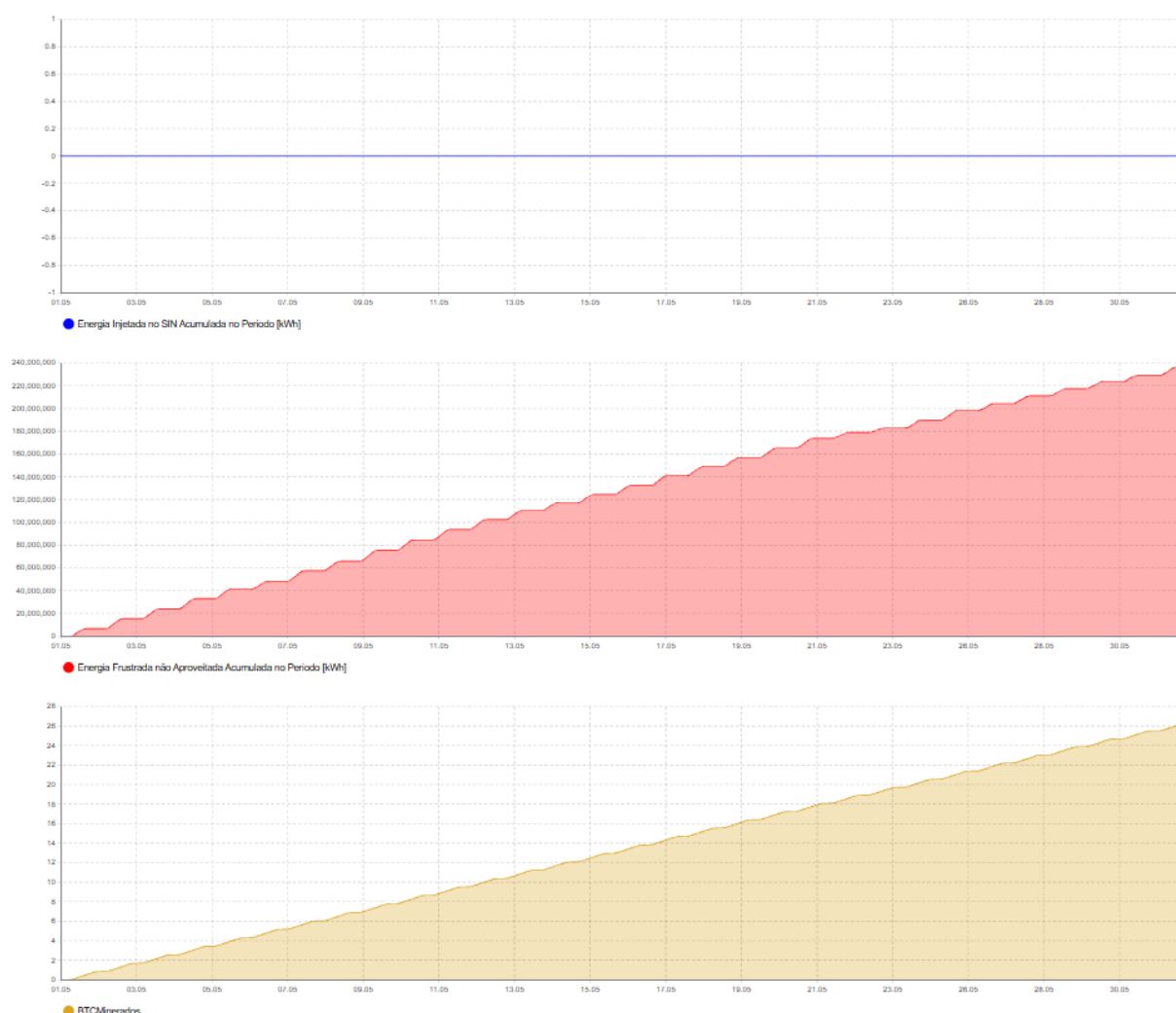
Figura 33 – Cenário 4 – Bitcoin minerado por dia



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 33 apresenta um comportamento semelhante ao longo de todos os dias analisados. Essa repetição diária ocorre porque, neste cenário, há energia frustrada suficiente para manter os equipamentos operando de forma mais uniforme, resultando em uma curva de produção praticamente padronizada ao longo do mês. Após a análise do comportamento horário e diário das variáveis, são apresentados os resultados acumulados durante o mês (Figura 34).

Figura 34 – Cenário 4 – Resumo das variáveis acumuladas



Fonte: Elaboração Própria (2026).

No primeiro gráfico, referente à energia injetada no SIN, o valor permaneceu igual a zero durante todo o período. Esse comportamento decorreu da premissa de *curtailment* igual a 100%, com toda a geração produzida pela usina sendo impedida de ser injetada no sistema elétrico. No segundo gráfico, é apresentada a energia frustrada não aproveitada acumulada. Os trechos de crescimento da curva

representam os períodos em que a energia produzida superou a capacidade de consumo dos mineradores e de armazenamento do BESS. Nota-se um comportamento de acúmulo durante todo o período analisado. Por fim, o terceiro gráfico apresenta a quantidade acumulada de Bitcoin produzida durante o mês. Como houve excedente de energia para a mineração em todos os dias da simulação, a curva permaneceu crescente durante todo o período.

Ao final do período analisado, não houve energia injetada no SIN, diferentemente dos Cenários 1 e 2, enquanto 236.056.900,883 kWh permaneceram frustrados e sem aproveitamento no Cenário 4 e 23.921.126,105 kWh foram aproveitados na mineração, resultando na produção de 26,287 bitcoins.

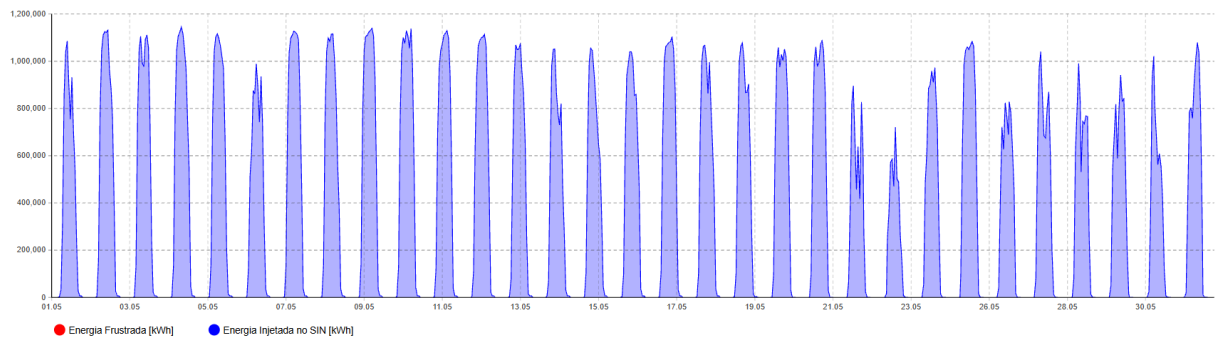
4.5 Cenário 5

O Cenário 5 representa uma condição hipotética de operação sem ocorrência de *curtailment*. Nesse caso, considera-se que toda a energia produzida pela usina solar fotovoltaica pode ser absorvida pelo SIN, não havendo cortes de geração nem acúmulo de energia frustrada ao longo do período analisado. Foram mantidos os mesmos dados de geração utilizados nos demais cenários, alterando-se apenas o percentual de *curtailment* para 0%. Consequentemente, não há energia disponível para o atendimento dos equipamentos de mineração ou para o carregamento do BESS. Dessa forma, a mineração permanece inativa, o sistema de armazenamento não realiza ciclos de carga e descarga e a produção de Bitcoin é igual a zero.

O objetivo deste cenário é estabelecer uma condição ideal de aproveitamento da geração pela rede elétrica, permitindo comparar os resultados econômicos e energéticos dos demais cenários com uma situação em que não há perda de energia por *curtailment*.

A Figura 35 apresenta a energia frustrada e a energia injetada no SIN ao longo do período analisado. Como o percentual de *curtailment* foi definido como 0%, a curva da energia frustrada não existe e se mantém em 0, demonstrando que toda a geração produzida pela usina foi aproveitada pelo sistema elétrico.

Figura 35 – Cenário 5 – Energia frustrada e injetada no SIN

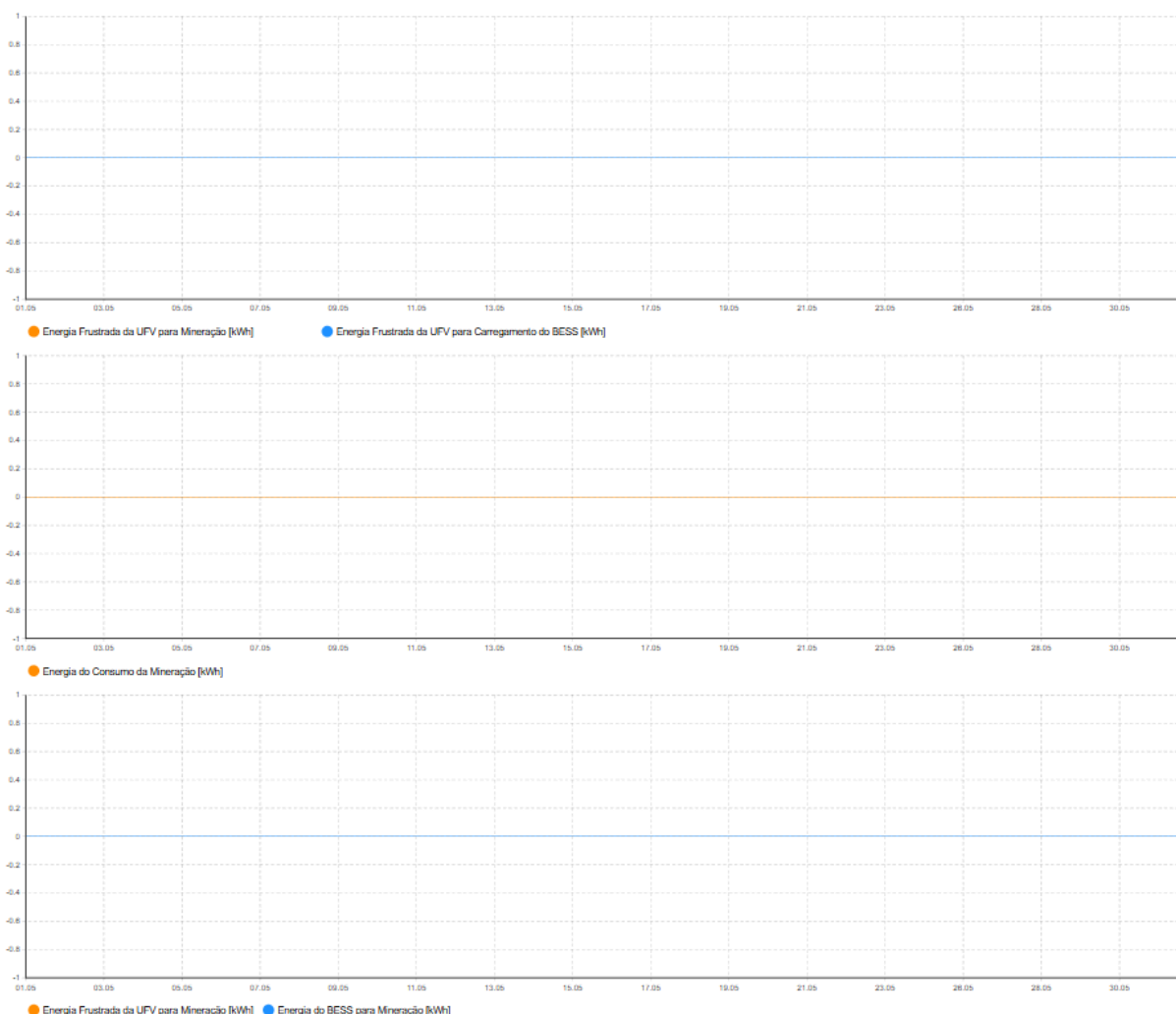


Fonte: Elaboração Própria (2026).

Nesse cenário, toda a energia produzida pela usina é direcionada ao SIN, impossibilitando o funcionamento dos equipamentos de mineração pelo modelo adotado. Da mesma forma, o BESS não recebe energia para seu carregamento.

A Figura 36 confirma o não funcionamento dos equipamentos de mineração e de carregamento do BESS.

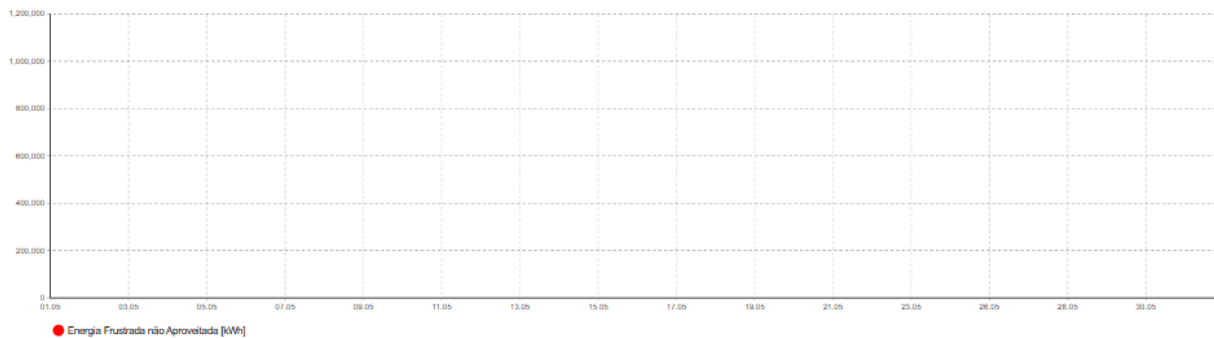
Figura 36 – Cenário 5 – Indicadores do subsistema de mineração



Fonte: Elaboração Própria (2026).

A Figura 36 mostra que todos os indicadores do subsistema de mineração permanecem nulos durante o período analisado. Como não há ocorrência de *curtailment*, toda a energia gerada pela usina é direcionada ao SIN, não existindo energia frustrada disponível para a operação dos mineradores ou para o carregamento do BESS. Consequentemente, também não ocorre fornecimento de energia pelo BESS à mineração. A energia frustrada não aproveitada (Figura 37) permanece igualmente nula durante toda a simulação.

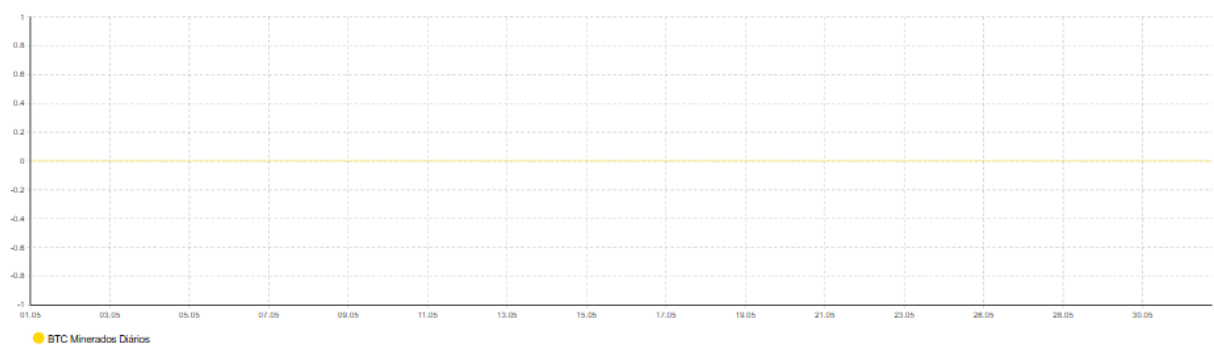
Figura 37 – Cenário 5 – Energia frustrada não aproveitada



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Do mesmo modo, a produção de Bitcoin por dia (Figura 38) permanece nula, resultado já esperado por não haver energia frustrada para a mineração.

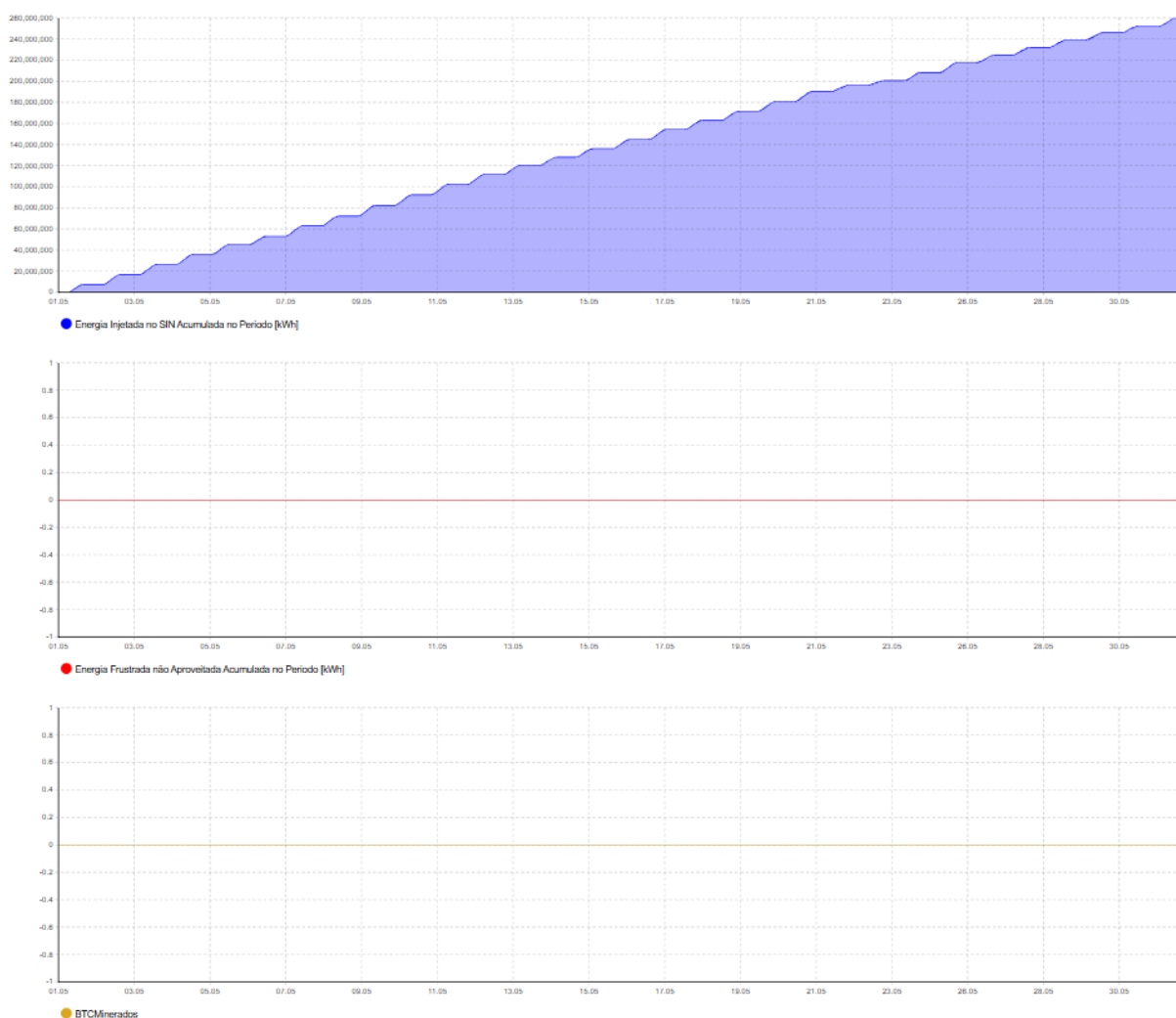
Figura 38 – Cenário 5 – Bitcoin minerado por dia



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Após a análise das variáveis horárias e diárias, são apresentados os resultados acumulados durante o mês (Figura 39).

Figura 39 – Cenário 5 – Resumo das variáveis acumuladas



Fonte: Elaboração Própria (2026).

No primeiro gráfico, a energia injetada no SIN apresenta crescimento contínuo ao longo do período, acumulando toda a geração produzida pela usina. No segundo gráfico, a energia frustrada não aproveitada permanece igual a zero, pois não ocorreram cortes de geração. No terceiro gráfico, a quantidade acumulada de Bitcoin também permanece igual a zero, em razão da ausência de energia disponível para a mineração.

Ao final do período analisado, a geração total da usina foi de 259.993.348,500 kWh. Como o percentual de *curtailment* adotado foi igual a zero, toda essa energia foi injetada no SIN.

4.6 Comparação entre os cenários

Nesta seção, são comparados os resultados obtidos nos quatro cenários simulados, considerando indicadores energéticos, operacionais e econômicos. A análise considera a energia injetada no SIN, a energia frustrada não aproveitada, a energia destinada à mineração, a quantidade de Bitcoin produzida e as receitas associadas à venda de energia e à mineração. Também são apresentadas as premissas econômicas utilizadas, incluindo o valor da energia elétrica, o preço do Bitcoin e os custos estimados dos equipamentos de mineração e do sistema BESS. A Tabela 2 apresenta a síntese dos cenários analisados.

Tabela 2 – Síntese dos cenários analisados

Cenário	<i>Curtailment</i>	Mineração	BESS	Destinação da Geração
Cenário 1	Dados reais	Não	Não	SIN e energia frustrada não aproveitada
Cenário 2	Dados reais	Sim	Não	SIN, Mineração e energia frustrada não aproveitada
Cenário 3	Dados reais	Sim	Sim	SIN, Mineração, BESS e energia frustrada não aproveitada
Cenário 4	100%	Sim	Sim	Mineração, BESS e energia frustrada não aproveitada
Cenário 5	0%	Não	Não	SIN

Fonte: Elaboração Própria (2026).

O comportamento energético de cada cenário (Tabela 3) reúne os valores de energia injetada no SIN, energia submetida ao *curtailment*, energia frustrada que permaneceu sem aproveitamento, a energia destinada à mineração e a produção de Bitcoin.

Tabela 3 – Distribuição da energia e produção de Bitcoin

Cenário	Energia Injetada no SIN [MWh]	Energia Frustrada [MWh]	Energia Frustrada sem aproveitamento [MWh]	Energia aproveitada [MWh]	Produção de Bitcoin
Cenário 1	207286,466	52706,883	52706,883	-	-
Cenário 2	207286,466	52706,883	44527,959	8178,924	8,988
Cenário 3	207286,466	52706,883	39056,179	13650,704	14,998
Cenário 4	-	259993,349	236056,901	23936,448	26,287
Cenário 5	259993,349	-	-	-	-

Fonte: Elaboração Própria (2026).

4.6.1 Premissas econômicas da comparação

Para viabilizar a comparação econômica entre os cenários simulados, foram definidas premissas relacionadas à precificação da energia elétrica, à cotação do Bitcoin e aos custos de implantação dos equipamentos considerados no modelo. Essas premissas foram mantidas constantes entre os cenários, de modo que as diferenças observadas nos resultados decorressem principalmente das condições de *curtailment* e da operação dos equipamentos de mineração e do sistema BESS.

4.6.1.1 Preço da energia elétrica

Para estimar a receita associada à energia injetada no SIN e o valor potencial da energia frustrada pelo *curtailment*, foram utilizados os dados do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) disponibilizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica no Painel de Preços (CCEE, 2026). Adotou-se o valor mensal de maio de 2026 referente ao período dos dados simulados, que é igual a R\$ 220,05/MWh. Assim, as diferenças entre as receitas estimadas decorrem exclusivamente das quantidades de energia injetada no SIN, aproveitada pela mineração ou não utilizada em razão do *curtailment*.

4.6.1.2 Preço do Bitcoin

Para estimar a receita obtida com a mineração, a cotação do Bitcoin em reais verificada no dia 25 de junho de 2026 no valor de R\$ 315.000,00 por BTC (INVESTING.COM, 2026) foi adotada como referência para converter a quantidade total de Bitcoin produzida em cada cenário em receita monetária. A receita bruta estimada com a mineração foi calculada pelo produto entre a quantidade acumulada de Bitcoin ao final da simulação e a cotação adotada.

4.6.1.3 Custo dos equipamentos de mineração

Para estimar o investimento necessário à implantação da estrutura de mineração, foi considerado o equipamento Bitmain Antminer S21+, utilizado nas

simulações desenvolvidas. Foi considerada a instalação de 12.240 unidades, com custo unitário de US\$ 1.749,00 (ASIC MARKETPLACE, 2026).

Para estimar os custos complementares da implantação das unidades de mineração, foi utilizada como referência a relação entre o custo dos equipamentos e o custo total do sistema BESS. O custo médio global de um sistema de armazenamento com quatro horas de duração foi de aproximadamente US\$ 148.000/MWh e, para um sistema completamente instalado e comissionado, o custo médio foi de US\$ 192.000/MWh, com um acréscimo de aproximadamente 29,73% sobre os custos dos equipamentos (IRENA, 2025). Esse valor será adotado para considerar os custos e encargos envolvidos para o sistema de mineração.

O investimento total nos equipamentos foi obtido pelo produto entre a quantidade de mineradores, o custo unitário e o índice apresentado acima, conforme a Equação (18):

$$Invest^{Miners} = Preço^{Miner} \times Qtd_{Inst}^{Miner} \times Perc^{inst} \quad (18)$$

em que $Invest^{Miners}$ é o valor do investimento das unidades mineradoras em dólar; $Preço^{Miner}$ é o preço de venda de cada unidade mineradora em dólar, Qtd_{Inst}^{Miner} é a quantidade de unidades mineradoras instaladas e $Perc^{inst}$ é o percentual referente ao custo de implantação, então:

$$Invest^{Miners} = 1749 \times 12240 \times 129,73\%$$

$$Invest^{Miners} = 27.772.287,05\$$$

4.6.1.4 Custo do sistema BESS

Para estimar o investimento necessário à implantação do sistema BESS, adotou-se como referência o custo médio global apresentado pela IRENA e citado pela EPE. Segundo essas fontes, o custo total instalado de sistemas de armazenamento por baterias alcançou aproximadamente US\$ 192/kWh em 2024, valor equivalente a US\$ 192.000 por MWh de capacidade instalada (EPE, 2026b; IRENA, 2025).

O sistema considerado na modelagem possui potência nominal de 50 MW e capacidade de armazenamento de 200 MWh, com duração nominal de descarga de

quatro horas. O investimento foi estimado pelo produto entre a capacidade energética do BESS e o custo de referência por MWh instalado, conforme a Equação (19):

$$Invest^{BESS} = Preço^{BESS} \times Cap^{BESS} \quad (19)$$

em que $Invest^{BESS}$ é o valor de investimento do sistema BESS em dólar; $Preço^{BESS}$ é o preço estimado por MWh do BESS e Cap^{BESS} é a capacidade de armazenamento do BESS [MWh].

$$Invest^{BESS} = 192000 \times 200$$

$$Invest^{BESS} = 38.400.000,00\$$$

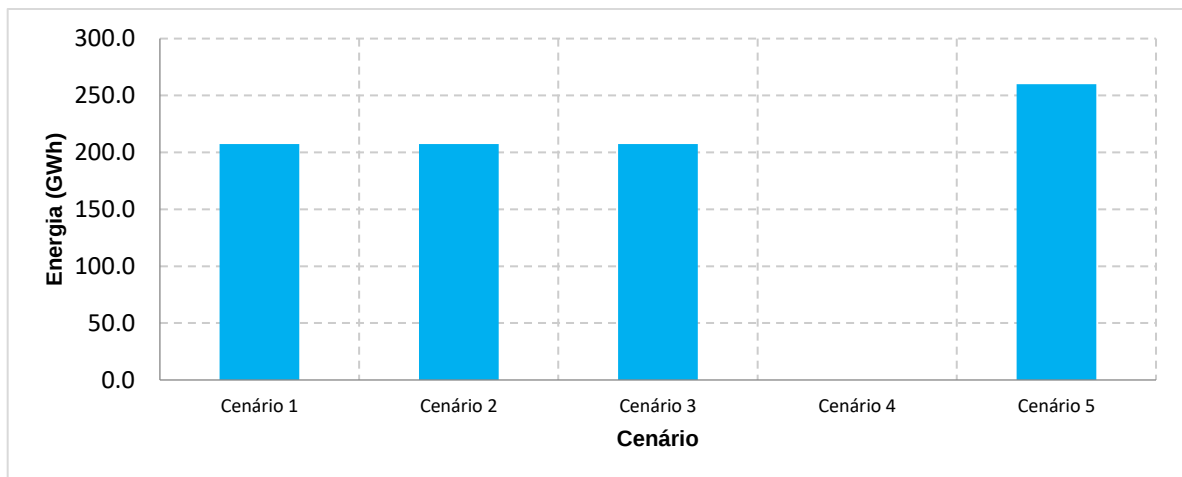
4.6.2 Comparação energética entre os cenários

A comparação energética entre os cenários foi realizada com base na destinação da energia produzida pela usina solar fotovoltaica ao longo do período analisado. Para isso, foram considerados os montantes de energia injetada no SIN, energia utilizada pelos equipamentos de mineração e energia frustrada que permaneceu sem aproveitamento.

4.6.2.1 Energia injetada no SIN

A Figura 40 apresenta a comparação da energia total injetada no SIN nos quatro cenários simulados.

Figura 40 – Comparação – Energia injetada no SIN



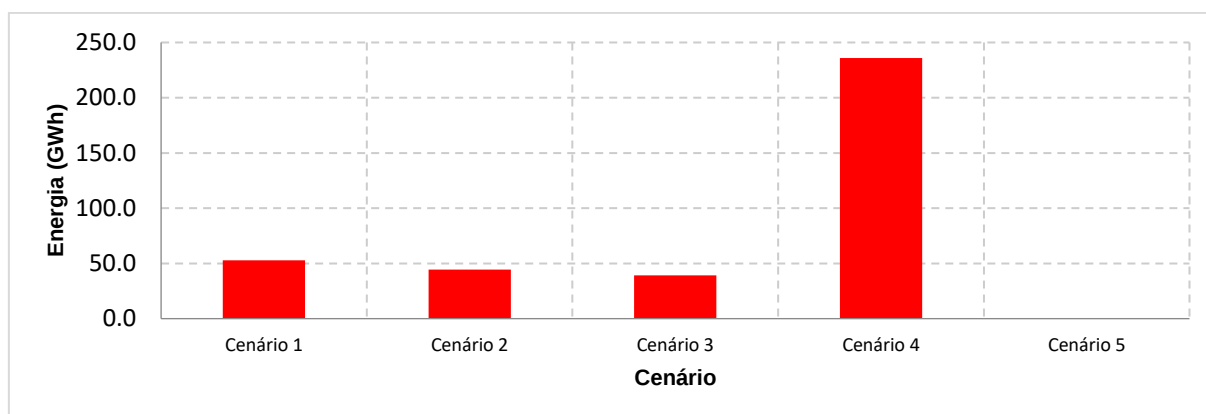
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que os Cenários 1, 2 e 3 apresentam o mesmo resultado, com aproximadamente 207 GWh injetados no SIN durante o mês. Isso porque, nos Cenário 2 e 3, a mineração utiliza somente a energia frustrada pelo *curtailment*. No Cenário 4, a energia injetada no SIN é nula, pois apresenta 100% de *curtailment*. Já o Cenário 5 apresenta o maior valor, com aproximadamente 260 GWh, uma vez que toda a energia gerada pela usina é injetada no SIN. A diferença de cerca de 53 GWh entre o Cenário 5 e os Cenários 1, 2 e 3 corresponde à parcela da energia frustrada no cenário de referência.

4.6.2.2 Energia frustrada não aproveitada

A Figura 41 apresenta a comparação da energia frustrada que permaneceu sem aproveitamento ao final da simulação em cada cenário.

Figura 41 – Comparação – Energia frustrada não aproveitada



Fonte: Elaboração Própria (2026).

No Cenário 1, a energia frustrada não aproveitada foi de aproximadamente 53 GWh. Com a introdução da mineração, o Cenário 2 apresentou redução desse montante para 45 GWh, diminuindo aproximadamente 8 GWh equivalente a 15,52% em relação ao cenário de referência e o Cenário 3 apresentou redução desse montante para 39 GWh, diminuindo aproximadamente 14 GWh, equivalente a 25,90% em relação ao cenário de referência.

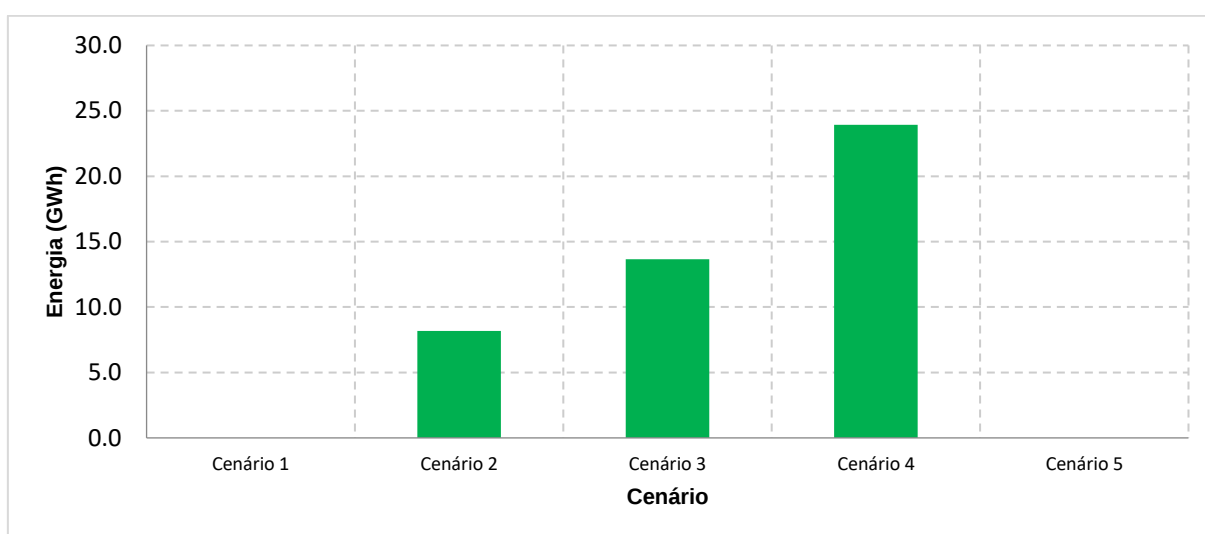
No Cenário 4, foram registrados aproximadamente 236 GWh de energia frustrada não aproveitada. Embora toda a geração estivesse disponível para mineração, a capacidade de consumo dos equipamentos e de armazenamento do

BESS não foi suficiente para absorver o elevado volume de energia decorrente de um *curtailment* de 100%. Por fim, no Cenário 5, não houve energia frustrada e toda a geração foi injetada no SIN.

4.6.2.3 Energia utilizada pela mineração

A Figura 42 apresenta a comparação da energia total utilizada pelos equipamentos de mineração em cada cenário.

Figura 42 – Comparação – Energia consumida pela mineração



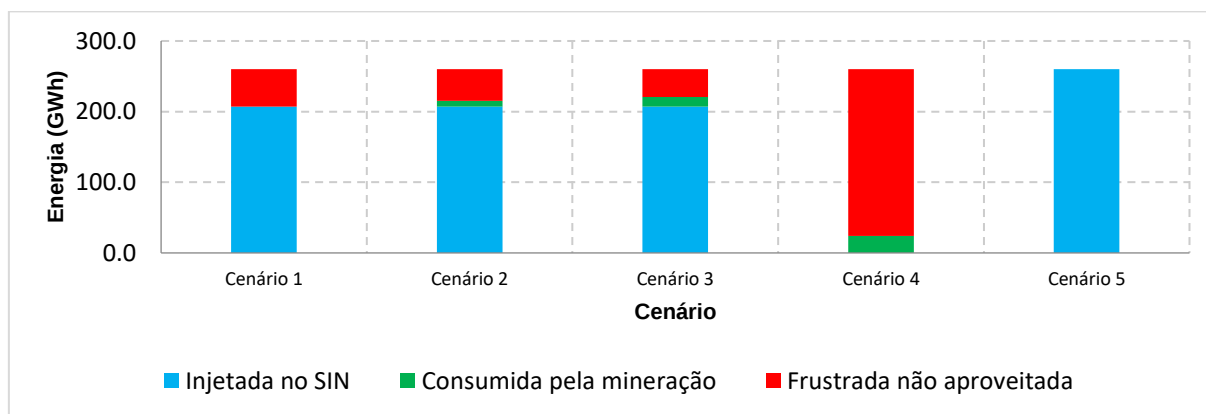
Fonte: Elaboração Própria (2026).

Nos Cenários 1 e 5, não houve consumo de energia pela mineração. No Cenário 2, foram utilizados aproximadamente 8,179 GWh, e no Cenário 3, foram utilizados aproximadamente 13,650 GWh, correspondentes à parcela da energia frustrada absorvida pelos equipamentos de mineração. Já no Cenário 4, o consumo aumentou para aproximadamente 23,936 GWh, representando um acréscimo de 10,286 GWh, cerca de 75,35% em relação ao Cenário 3. Esse aumento ocorre pela condição de 100% de *curtailment*, que ampliou a disponibilidade de energia para a mineração.

4.6.2.4 Balanço energético

A Figura 43 apresenta o balanço energético dos quatro cenários, discriminando a parcela da energia gerada que foi injetada no SIN, utilizada pela mineração e mantida sem aproveitamento em decorrência do *curtailment*.

Figura 43 – Comparação – Balanço energético



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Observa-se que a geração total permaneceu igual nos quatro cenários, correspondendo a aproximadamente 260 GWh. No Cenário 1, cerca de 79,73% da energia foi injetada no SIN, enquanto 20,27% permaneceu frustrada e sem aproveitamento. No Cenário 2 e no Cenário 3, a energia injetada no SIN permaneceu igual à do Cenário 1, porém aproximadamente 8,179 e 13,650 GWh, equivalentes a 3,15% e 5,25% da geração total, foram utilizados pela mineração, reduzindo a energia frustrada não aproveitada para cerca de 44,5 GWh e 39 GWh, respectivamente.

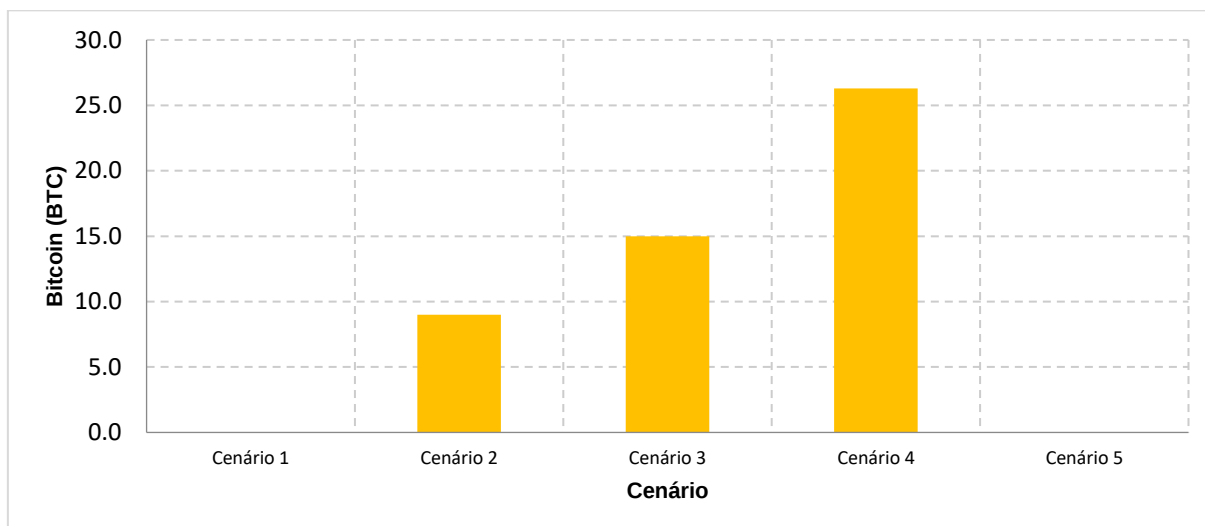
No Cenário 4, como toda a geração foi submetida ao *curtailment*, não houve injeção no SIN. Nesse caso, aproximadamente 24 GWh foram consumidos pela mineração, enquanto 236 GWh permaneceram sem aproveitamento, mostrando que nesse cenário poderia haver expansão da mineração. Por fim, no Cenário 5, toda a energia produzida foi injetada no SIN.

4.6.3 Comparação da produção de Bitcoin

A comparação da produção de Bitcoin entre os cenários permite avaliar de que forma a disponibilidade de energia frustrada influencia o desempenho da

mineração. A Figura 44 apresenta a comparação da quantidade total de Bitcoin produzida ao final da simulação em cada cenário.

Figura 44 – Comparação – Bitcoin total minerado



Fonte: Elaboração Própria (2026).

Nos Cenários 1 e 5, não houve produção de Bitcoin, pois não foi considerada a operação dos equipamentos de mineração. No Cenário 2 e 3, foram produzidos 8,988 e 14,998 BTC, respectivamente, com o aproveitamento da energia frustrada na condição real de *curtailment*. Já no Cenário 4, a produção aumentou para cerca de 26,287 BTC, representando um acréscimo de 11,289 BTC, totalizando um aumento de 75,27% em relação ao Cenário 3.

4.6.4 Comparação das receitas operacionais

A comparação econômica entre os cenários foi realizada com base nos resultados apresentados anteriormente, considerando a receita estimada com a energia injetada no SIN, a receita potencial não realizada em razão do *curtailment* e a receita obtida com a mineração de Bitcoin (Tabela 4).

Tabela 4 – Receitas operacionais

Cenário	Receita com energia no SIN (R\$ mi) ¹	Receita com Bitcoin (R\$ mi) ²	Receita potencial não realizada (R\$ mi) ¹	Receita total estimada (R\$ mi)
Cenário 1	45,613	-	11,598	45,613
Cenário 2	45,613	2,831	9,789	48,445
Cenário 3	45,613	4,724	8,594	50,338
Cenário 4	-	8,280	51,944	8,280
Cenário 5	57,212	-	-	57,212

¹ Receita obtida com referência no PLD médio mensal de maio de 2026, adotado neste trabalho, no valor de R\$ 220,05/MWh.

² Receita obtida com referência na cotação do Bitcoin adotada neste trabalho para o mês de maio de 2026, no valor de R\$ 315.000.00/BTC.

Fonte: Elaboração própria (2026).

A Tabela 4 mostra que, no Cenário 1, a usina obteve receita estimada de R\$ 45,613 milhões com a energia injetada no SIN, enquanto R\$ 11,598 milhões permaneceram associados à energia frustrada não aproveitada. No Cenário 2, com a inserção da mineração de Bitcoin sem o sistema BESS, a receita com energia no SIN manteve-se igual à do Cenário 1, uma vez que os dados de geração e os percentuais de *curtailment* não foram alterados. Entretanto, a mineração proporcionou receita adicional de R\$ 2,831 milhões, elevando a receita total para R\$ 48,445 milhões e reduzindo a receita potencial não realizada para R\$ 9,789 milhões.

No Cenário 3, com a operação da mineração de Bitcoin e do sistema BESS, observou-se novo incremento no resultado econômico. A receita com energia injetada no SIN permaneceu em R\$ 45,613 milhões, enquanto a receita com Bitcoin alcançou R\$ 4,724 milhões, resultando em receita total estimada de R\$ 50,338 milhões. Esse valor representa um aumento de aproximadamente 10,36% em relação ao Cenário 1. Além disso, a receita potencial não realizada foi reduzida para R\$ 8,594 milhões, indicando que a associação entre mineração e armazenamento permitiu maior aproveitamento econômico da energia frustrada. Caso o mesmo montante energético fosse valorado diretamente pelo PLD adotado, seu valor corresponderia a aproximadamente R\$ 3,004 milhões. Assim, a conversão da energia frustrada em Bitcoin proporcionou uma receita bruta cerca de R\$ 1,720 milhão superior à valoração equivalente dessa energia pelo PLD. Esse resultado indica que a mineração pode agregar maior valor econômico à energia frustrada, embora essa análise corresponda à receita bruta e não considere os custos de operação, manutenção, refrigeração, tributos, depreciação dos equipamentos e degradação do sistema BESS.

Nos cenários extremos, o Cenário 5 apresentou o maior resultado econômico, com receita estimada de R\$ 57,212 milhões, devido à injeção integral da geração no SIN. Já, no Cenário 4, a mineração gerou aproximadamente R\$ 8,280 milhões. Esse valor não foi suficiente para compensar a ausência de receita com a venda de energia e a elevada receita potencial não realizada decorrente do *curtailment* de 100%.

4.6.5 Investimentos necessários

Neste momento é apresentada a estimativa dos investimentos necessários para a implantação do sistema de armazenamento de energia e da unidade de mineração de Bitcoin (Tabela 5).

Para avaliar o retorno econômico do sistema de mineração nos Cenários 2 e 3, foram considerados os investimentos necessários para a implantação do BESS e do sistema de mineração de Bitcoin. Os custos desses sistemas foram originalmente estimados em dólares. Foi realizada a conversão para reais por meio da cotação de venda do dólar de R\$ 5,17, referente ao fechamento de 25 de junho de 2026 (INVESTIDOR10, 2026b).

Tabela 5 – Investimentos estimados no BESS e no sistema de mineração

Sistema	Investimento em US\$	Cotação utilizada R\$/US\$	Investimento em R\$	Participação ¹
BESS	38.400.000,00	5,17	198.528.000,00	58,03%
Mineração	27.772.287,05	5,17	143.582.724,05	41,97%
Investimento Total	66.172.287,05	-	342.110.724,05	100,00%

¹ Não sendo considerado o CAPEX e OPEX da UFV, e o OPEX do sistema de mineração e BESS.

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os resultados demonstram que o investimento total estimado para a implantação do BESS e do sistema de mineração corresponde a aproximadamente R\$ 342,110 milhões. Desse valor, o BESS representa 58,03% do investimento, enquanto o sistema de mineração corresponde aos 41,97% restantes (Tabela 6).

Tabela 6 – Receita total estimada

Cenário	Remuneração da energia para o SIN (R\$/MWh) ¹	Remuneração da energia para o BITCOIN (R\$/MWh) ²	Energia Frustrada sem aproveitamento [MWh]	Receita total estimada (R\$ mi)
Cenário 1	220,05	-	52706,883	45,613
Cenário 2	220,05	346,06	44527,959	48,445
Cenário 3	220,05	346,06	39056,179	50,338
Cenário 4	220,05	346,06	236056,901	8,280
Cenário 5	220,05	-	-	57,212

¹ Receita obtida com referência no PLD médio mensal de maio de 2026, adotado neste trabalho, no valor de R\$ 220,05/MWh.

² Receita obtida com referência na cotação do Bitcoin adotada neste trabalho para o mês de maio de 2026, no valor de R\$ 315.000.00/BTC.

Fonte: Elaboração própria (2026).

No Cenário 2, a remuneração obtida com a mineração de Bitcoin correspondeu a R\$ 346,06/MWh, valor aproximadamente 57,27% superior à remuneração considerada para a energia entregue ao SIN, de R\$ 220,05/MWh. Apesar dessa maior remuneração unitária, a receita total estimada no Cenário 2 foi de R\$ 48,445 milhões, valor cerca de 15,32% inferior ao observado no Cenário 5, em que toda a energia gerada é entregue ao SIN e a receita total atinge R\$ 57,212 milhões.

Entretanto, observa-se que, mesmo com a inserção da mineração, ainda permaneceram 44.527,959 MWh de energia frustrada sem aproveitamento no Cenário 2. Essa parcela indica a existência de energia disponível em determinados intervalos que não foi absorvida pela estrutura de mineração adotada. Contudo, esse montante não pode ser tratado integralmente como receita diretamente realizável, pois sua utilização depende da disponibilidade horária da energia frustrada, da capacidade de consumo dos mineradores, da participação no *pool* de mineração e do dimensionamento da infraestrutura instalada.

Assim, os resultados indicam a existência de um potencial de otimização do sistema, especialmente quanto à quantidade de mineradores, à capacidade de processamento instalada e ao aproveitamento da energia frustrada. Assim, a otimização do sistema poderia aumentar a absorção da energia disponível e elevar a receita total estimada, embora esse ganho esteja limitado pela característica intermitente do *curtailment* e pela distribuição horária da energia frustrada ao longo do período analisado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o aproveitamento da energia elétrica frustrada pelo *curtailment* por meio da mineração de criptomoedas, considerando seus efeitos energéticos em uma usina solar fotovoltaica típica. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido, no software AnyLogic, um modelo baseado na metodologia de Dinâmica de Sistemas, estruturado a partir das relações identificadas no Diagrama de Laços Causais. Dessa forma, as relações qualitativas de causa e efeito representadas no diagrama foram transformadas em um sistema quantitativo de simulação, composto por variáveis de estoque, fluxos e variáveis auxiliares. O modelo permitiu representar, em intervalos horários, a geração fotovoltaica, a parcela de energia submetida ao *curtailment*, a energia injetada no Sistema Interligado Nacional, o armazenamento no sistema BESS, o consumo dos equipamentos de mineração e a produção estimada de Bitcoin.

A modelagem foi aplicada a cinco cenários de operação. O Cenário 1 representou a condição de referência, sem mineração e sem armazenamento, no qual aproximadamente 207,286 GWh foram injetados no SIN e 52,707 GWh permaneceram frustrados e sem aproveitamento, correspondendo a 20,27% da geração total. No Cenário 2, foi inserida a mineração de Bitcoin sem o sistema BESS, mantendo-se os dados reais de *curtailment*. Nesse caso, a energia injetada no SIN permaneceu igual à do cenário de referência, enquanto 8,179 GWh foram aproveitados pela mineração, resultando na produção estimada de 8,988 BTC e na redução da energia frustrada não aproveitada para 44,528 GWh. No Cenário 3, com mineração e BESS, também foram mantidos os percentuais reais de *curtailment*, porém o armazenamento permitiu ampliar o aproveitamento da energia frustrada para 13,651 GWh, com produção estimada de 14,998 BTC e redução da energia frustrada não aproveitada para 39,056 GWh. O Cenário 4 considerou uma condição extrema de *curtailment* de 100%, na qual não houve injeção de energia no SIN. Apesar da maior disponibilidade energética, apenas cerca de 23,936 GWh foram consumidos pela mineração, com produção estimada de 26,287 BTC, enquanto aproximadamente 236,057 GWh permaneceram sem aproveitamento. Por fim, o Cenário 5 representou a ausência de *curtailment*, com toda a geração, aproximadamente 259,993 GWh, sendo injetada no SIN e sem operação da mineração. A comparação mostrou que o

aproveitamento da energia frustrada pode reduzir as perdas associadas ao *curtailment*, porém não substitui integralmente a injeção da energia no sistema elétrico, que apresentou o melhor resultado energético e econômico no cenário sem restrições.

Os resultados obtidos demonstraram que a mineração de Bitcoin pode atuar como uma alternativa complementar para o aproveitamento da energia frustrada. No Cenário 2, a mineração reduziu a energia frustrada não aproveitada em aproximadamente 15,52% em relação ao cenário de referência, sem alterar a quantidade de energia destinada ao SIN. Já no Cenário 3, a associação entre mineração e BESS ampliou essa redução para aproximadamente 25,90%, mostrando que o armazenamento contribui para aumentar a absorção da energia frustrada, especialmente nos períodos em que a disponibilidade de energia não coincide com a capacidade de consumo dos mineradores. Do ponto de vista econômico, o Cenário 2 gerou receita bruta adicional de R\$ 2,831 milhões com Bitcoin, elevando a receita total para R\$ 48,445 milhões, enquanto o Cenário 3 gerou R\$ 4,724 milhões com a mineração, elevando a receita total para aproximadamente R\$ 50,338 milhões. Apesar disso, o Cenário 5 apresentou a maior receita total estimada, de R\$ 57,212 milhões, demonstrando que, sob as premissas adotadas, a injeção integral da energia no SIN ainda representa o melhor resultado econômico. Além disso, o Cenário 4 mostrou que o simples aumento da disponibilidade de energia frustrada não garante seu aproveitamento integral, pois a operação permanece condicionada à capacidade instalada dos mineradores, ao sistema de armazenamento e à distribuição horária do *curtailment*.

Em relação à remuneração da energia, observou-se que a mineração apresentou valor médio de R\$ 346,06/MWh, superior ao PLD médio mensal de maio de 2026, de R\$ 220,05/MWh. Esse resultado indica que, em determinados contextos, a conversão da energia frustrada em Bitcoin pode agregar maior valor econômico por unidade de energia consumida. Contudo, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois corresponde a uma análise de receita bruta, sem considerar custos operacionais, refrigeração, manutenção, tributos, depreciação dos equipamentos, degradação do BESS e variações do preço do Bitcoin. Além disso, a energia frustrada remanescente nos Cenários 2, 3 e 4 não pode ser tratada integralmente como receita realizável, pois seu aproveitamento depende da disponibilidade horária da energia, da

capacidade de consumo instantânea dos mineradores e do dimensionamento da infraestrutura instalada. Nesse sentido, os resultados indicam a existência de um potencial de otimização do sistema, especialmente quanto à quantidade de mineradores, à capacidade de processamento e à capacidade do BESS.

Nesse sentido, a Dinâmica de Sistemas contribuiu para a análise ao permitir a integração das variáveis energéticas e operacionais em um único modelo, representando a evolução temporal dos estoques e fluxos e possibilitando a comparação de diferentes condições de operação. A metodologia também permitiu identificar limitações, relações de dependência e consequências decorrentes da alteração das condições de *curtailment*, constituindo uma ferramenta de apoio à análise e ao planejamento de sistemas energéticos complexos.

Em relação aos objetivos previamente estabelecidos, considera-se que todos foram alcançados. O primeiro objetivo específico, de analisar o impacto do *curtailment* nas fontes eólicas e solares fotovoltaicas, foi atendido por meio da revisão bibliográfica e da análise dos dados de geração e restrição disponibilizados pelo ONS, que demonstraram os efeitos energéticos e econômicos dos cortes de geração. O segundo objetivo, de analisar os impactos da utilização de energia excedente para a mineração de criptomoedas, foi alcançado mediante a comparação dos indicadores de energia aproveitada, produção de Bitcoin, receitas estimadas e energia frustrada remanescente nos diferentes cenários. O terceiro objetivo, de modelar a dinâmica da mineração de criptomoedas utilizando a energia frustrada proveniente de uma planta solar fotovoltaica, foi cumprido com a construção dos subsistemas de geração e *curtailment*, armazenamento no BESS, operação dos equipamentos de mineração e produção de Bitcoin. Por fim, o quarto objetivo, de implementar o modelo por meio da Dinâmica de Sistemas, foi concretizado com o desenvolvimento da simulação no AnyLogic, permitindo representar quantitativamente as relações causais identificadas e avaliar o comportamento do sistema ao longo do período analisado. Assim, o trabalho atingiu seu objetivo geral ao demonstrar, dentro das premissas adotadas, as possibilidades e limitações do aproveitamento da energia frustrada pelo *curtailment* por meio da mineração de Bitcoin.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Como continuidade deste trabalho, sugere-se ampliar o horizonte temporal da simulação para períodos anuais, de modo a representar com maior precisão a sazonalidade da geração solar fotovoltaica, a variação dos eventos de *curtailment* e as alterações nas condições operativas do SIN. Também se recomenda aplicar o modelo a outras usinas, fontes de geração e regiões do país, além de realizar análises de sensibilidade considerando variáveis como o preço do Bitcoin, o PLD, o *hashrate* da rede, a taxa do *pool*, a quantidade de mineradores e a capacidade do sistema BESS.

REFERÊNCIAS

- AMADIO, K. **Estudo sobre o planejamento integrado entre usinas hidrelétricas reversíveis e eólioelétricas em momentos de sobreoferta ou de curtailment de energia elétrica**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, Florianópolis, 2025.
- ASIC MARKETPLACE. **Bitmain Antminer S21+ Bitcoin Miner**. 2026. Disponível em: <https://asicmarketplace.com/product/bitmain-antminer-s21-plus-bitcoin-miner/>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- ASIC MINER VALUE. **Bitmain Antminer S21+ (235Th/s)**. [2026]. Disponível em: <https://www.asicminervalue.com/pt/miners/bitmain/antminer-s21-plus-235th>. Acesso em: 23 mai. 2026.
- BARBOSA, S. S. **Simulação de uma planta típica de produção de hidrogênio com eletrolisador PEM suprida por geração solar fotovoltaica, eólioelétrica e híbrida**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, Florianópolis, 2024.
- BRAHIM, T.; JEMNI, A. Green hydrogen production: A review of technologies, challenges, and hybrid system optimization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2025;225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116194>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. **SSRN**, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3440802>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- CAMBRIDGE CENTRE FOR ALTERNATIVE FINANCE – CCAF. **Cambridge Digital Mining Industry Report: global operations, sentiment, and energy use**. Cambridge: University of Cambridge, 2025. Disponível em: <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/methodology>. Acesso em: 27 jun. 2026.
- CCEE. **Painel de Preços**. São Paulo: CCEE, 2025. Painel interativo. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/painel-precos>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- CCEE. **PLD media mensal**. São Paulo: CCEE, 2026. Disponível em: https://dadosabertos.ccee.org.br/dataset/pld_media_mensal. Acesso em: 25 jun. 2026.
- ENEL. **BESS: sistemas de armazenamento de energia em bateria (Battery Energy Storage System)**, 2025. Disponível em: <https://www.enel.com/pt/learning-hub/armazenamento/bess>. Acesso em: 14 nov. 2025.
- EPE. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2025**. Ano base 2024, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf. Acesso em: 27 jun. 2026.

EPE. **Balanço Energético Nacional (BEN)** 2026a. Ano base 2025, 2026. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-975/topico-847/BEN_S%C3%ADntese_2026_PT.pdf. Acesso em: 27 jun. 2026.

EPE. **ROADMAP Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)**, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-870/Roadmap%20hidrel%C3%A9tricas%20Revers%C3%ADveis%202025_V09.pdf. Acesso em: 14 nov. 2025.

EPE. **Microrredes em sistemas isolados: panorama tecnológico, econômico e regulatório**, 2026. Rio de Janeiro: EPE, 2026b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-957/RT%20-%20Microrredes%20-%20FINAL.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2026.

FOLGANES, V. N.; SICA, E. T. A competitividade do hidrogênio como vetor energético para sistemas econômicos produtivos frente aos recursos energéticos distribuídos (REDs). SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023, Brasília: **SNPTEE**, 2023. Informe Técnico GES-025.

HAJIPOUR, E. *et al.* An economic evaluation framework for cryptocurrency mining operation in microgrids. **International journal of electrical Power and Energy Systems**, 2022;142. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108329>. Acesso em: 12 nov. 2025.

HASHRATE INDEX. *Bitcoin mining pools comparison*. [2026]: Luxor Technology Corporation, 2026. Disponível em: <https://hashrateindex.com/hashrate/pools>. Acesso em: 23 mai. 2026.

IRENA. **Renewable power generation costs in 2024**. Abu Dhabi: IRENA, 2025. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf. Acesso em: 25 jun. 2026.

INVESTIDOR10. Bitcoin. **Cotação do Bitcoin**, 2026a. Disponível em: <https://investidor10.com.br/criptomoedas/bitcoin/>. Acesso em: 27 jun. 2026.

INVESTIDOR10. Dólar. **Cotação do dólar**, 2026b. Disponível em: <https://investidor10.com.br/moedas/usd/>. Acesso em: 26 jun. 2026.

INVESTING.COM. Bitcoin. BTC/BRL – Bitcoin Real Brasileiro, 2026. Disponível em: <https://br.investing.com/crypto/bitcoin/btc-brl>. Acesso em: 25 jun. 2026.

KIRCHNER, M.; SCHMIDT, J.; WEHRLE, S. Exploiting Synergy of Carbon Pricing and Other Policy Instruments for Deep Decarbonization. **Joule**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.03.006>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MEMPOOL.SPACE. *Hashrate and difficulty*, [2026]. Disponível em: <https://mempool.space/graphs/mining/hashrate-difficulty>. Acesso em: 23 mai. 2026.

NEOENERGIA. **Conheça o Hidrogênio Verde, o combustível do futuro**, 2023. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/conheca-o-hidrogenio-verde-o-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 15 nov. 2025.

NIJAZ, H.; LIU, J.J.; YOU, F. Can Texas mitigate wind and solar curtailments by leveraging bitcoin mining? **Journal of Cleaner Production**, 2022; 364. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132700>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ONS. **Carga e Geração**, 2026a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>. Acesso em: 27 jun. 2026.

ONS. **Critérios para gestão de excedentes energéticos**. Nota Técnica NT-ONS DOP 0022/2025. Rio de Janeiro: ONS, 2025a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT-ONS%20DOP%200022.2025%20-%20Crit%C3%A9rios%20para%20Gest%C3%A3o%20de%20Excedentes%20Energ%C3%A9ticos.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2026.

ONS. **DADOS DE RESTRIÇÃO DE OPERAÇÃO POR CONSTRAINED-OFF DE USINAS FOTOVOLTAICAS - DETALHAMENTO POR USINAS**, 2026b. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_fotovoltica_detail. Acesso em: 23 mai. 2026.

ONS. **DIAGNÓSTICO E PERSPECTIVA DA EVOLUÇÃO DOS CORTES DE GERAÇÃO NO BRASIL**, 2025b. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RT%20DGL-ONS%200189-2025%20-%20GT%20Curtailment%20rev1.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

ONS. **Evolução da Capacidade Instalada**, 2026c. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 27 mai. 2026.

ONS. **Restrição de Operação por Constrained-off de Usinas Eólicas**. Brasília, DF: ONS, 2025c. Dados. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_eolica_usi. Acesso em: 12 nov. 2025.

ONS. **Restrição de Operação por Constrained-off de Usinas Fotovoltaicas**. Brasília, DF: ONS, 2025d. Dados. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_fotovoltica. Acesso em: 12 nov. 2025.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 27 jun. 2026.

RIVER FINANCIAL. *Who creates new Bitcoin?* [2026]. Disponível em: <https://river.com/learn/who-creates-new-bitcoin/>. Acesso em: 23 mai. 2026.

SAPRA, N. Powering profits, draining the planet: Demystifying the asymmetric impact of Bitcoin price on its electricity consumption. **Energy**, 2025;333. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137413>. Acesso em: 15 nov. 2025.

TABORDA, Pâmella. **Análise da injeção massiva de geração solar fotovoltaica no sistema elétrico de potência: um estudo de caso sobre os efeitos da rampa de carga.** 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

TOMATSU, Yusuke; HAN, Wenlin. **Bitcoin and renewable energy mining: a survey.** *Blockchains*, v. 1, n. 2, p. 90–110, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/blockchains1020007>. Acesso em: 27 jun. 2026.

VICENTE, V. H.; SICA, E. T. Análise de métodos de decomposição estrutural energético-econômica para promover a economia do hidrogênio verde e incorporação ao planejamento integrado de recursos energéticos. In: ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE, 2023, **CIGRE** Foz do Iguaçu. Disponível em:

VRIES, de A. Bitcoin's energy consumption is underestimated: A market dynamics approach. **Energy Research and Social Science**, 2020; 70. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101721>. Acesso em: 15 nov. 2025.