

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE**

Pedro Bellani Paladini

**Utilização das Cargas de Data Centers de Mineração de Bitcoin
para Ampliação da Flexibilidade Operacional de Sistemas
Elétricos**

FLORIANÓPOLIS

2025

Pedro Bellani Paladini

Utilização das Cargas de Data Centers de Mineração de Bitcoin
para Ampliação da Flexibilidade Operacional de Sistemas
Elétricos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Universidade Federal de Santa Catarina,
como requisito necessário para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Antonio Felipe da Cunha
de Aquino, Dr.

Coorientador: Eng. Eletricista Robson Ribas.

Florianópolis, dezembro de 2025

Bellani Paladini, Pedro

Utilização das Cargas de Data Centers de Mineração de Bitcoin para Ampliação da Flexibilidade Operacional de Sistemas Elétricos / Pedro Bellani Paladini ; orientador, Antonio Felipe da Cunha de Aquino, coorientador, Robson Ribas, 2025.

92 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Data Centers. 3. Resposta da demanda. 4. Curtailment energético. 5. Mineração de Bitcoin. I. Cunha de Aquino, Antonio Felipe da. II. Ribas, Robson . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Pedro Bellani Paladini

Utilização das Cargas de Data Centers de Mineração de Bitcoin para Ampliação da Flexibilidade Operacional de Sistemas Elétricos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 04 de Dezembro de 2025.



Documento assinado digitalmente

ROBERTO FRANCISCO COELHO

Data: 09/12/2025 15:31:27-0300

CPF: ***.034.249-**

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

Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

ANTONIO FELIPE DA CUNHA DE AQUINO

Data: 09/12/2025 15:04:27-0300

CPF: ***.652.117-**

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

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Erlon Cristian Finardi

Data: 09/12/2025 14:31:56-0300

CPF: ***.364.749-**

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

Prof. Erlon Cristian Finardi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Alexandre Akio Nohara, Me.
Operador Nacional do Sistema Elétrico

Este trabalho é dedicado à minha família.

Agradecimentos

Agradeço imensamente ao meu pai, Aurélio, que enfrentou inúmeras dificuldades para proporcionar a mim e aos meus irmãos as melhores oportunidades, e cuja postura diante da vida me ensinou o valor de ser um homem íntegro e resiliente. À minha mãe, Raquel, que jamais deixou de me amparar e cuidar, mesmo diante dos maiores desafios.

Aos meus irmãos e irmãs: Luciana, Mariana, Carolina, Antônio, Eduardo e Clovis, que me acompanharam nessa jornada de vida e de alguma forma contribuíram para a minha formação como profissional e ser humano. Da mesma forma, à minha sobrinha Isadora, que compartilha comigo a vida desde os nossos primeiros dias, e cujo apoio sempre foi fundamental.

Agradeço com todo meu coração ao meu avô Gentil, cuja força, valores e paixão pela engenharia sempre me motivaram. À minha avó materna, Maria de Lurdes, pelo carinho e amor incondicional e à minha avó paterna, Maria Otília, que já nos deixou, mas cujo carinho e memória continuam vivos em meu coração.

À minha tia Anna e ao meu tio Gentil, por sempre estarem por perto e me apoiarem ao longo do caminho.

Agradeço também ao Tony, por todos os ensinamentos e aprendizados que compartilhou comigo durante os anos em que convivemos.

Aos meus amigos de longa data, Gustavo e Rafael, por serem fonte diária de inspiração e os irmãos que a vida me permitiu escolher.

À minha namorada e melhor amiga, Isabela, por todos os momentos de parceria, apoio e inspiração.

Aos amigos e companheiros de faculdade, por caminharem comigo nessa jornada árdua, mas recompensadora, que é a engenharia.

Aos colegas dos projetos incríveis dos quais tive o privilégio de participar — na Magno, na WeCharge e na ArthurInc — por contribuírem, cada um à sua maneira, para moldar o profissional que sou hoje.

Ao meu coorientador e ex-colega de trabalho, Robson, por ter me ajudado imensamente na confecção deste trabalho e, por fim, ao meu professor e orientador, Antônio, pelas aulas memoráveis e pela excelência na condução deste trabalho.

Resumo

Este trabalho analisa o emprego de Data Centers dedicados à mineração de Bitcoin como solução de flexibilização de carga em sistemas elétricos de potência. Avaliou-se o perfil técnico-operacional desses centros, destacando sua alta densidade energética, capacidade de resposta rápida e habilidade de atuar como recurso despachável em programas de resposta à demanda. Foram comparados ambientes regulatórios do Brasil e dos Estados Unidos, com destaque para modelos do ERCOT/CAISO e iniciativas brasileiras recentes. Simulações ilustrativas demonstram que a inserção de data centers flexíveis podem contribuir para a mitigação da "curva do pato", com redução das variações da carga líquida. O estudo discute ainda desafios regulatórios, incentivos econômicos e oportunidades tecnológicas para adoção sistêmica dessa solução no contexto de sistemas elétricos.

Palavras-chave: Cargas flexíveis, Data Center, mineração de Bitcoin, sistema elétrico, resposta à demanda, serviços ancilares, fontes renováveis.

Abstract

This work analyzes the use of data centers dedicated to Bitcoin mining as a load-flexibility solution in electric power systems. The technical and operational profile of these facilities was evaluated, highlighting their high energy density, fast response capability, and ability to operate as a dispatchable resource within demand response programs. Regulatory environments in Brazil and the United States were compared, with emphasis on ERCOT/CAISO models and recent Brazilian initiatives. Illustrative simulations indicate that the integration of flexible data centers can help mitigate the “duck curve” by reducing net-load variability. The study also discusses regulatory challenges, economic incentives, and technological opportunities for the systemic adoption of this solution within power systems.

Keywords: Flexible loads, data center, Bitcoin mining, power system, demand response, ancillary services, renewable energy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo metodológico do trabalho.	31
Figura 2 – Esquemático da blockchain	34
Figura 3 – ASICs de um container de Data Center de mineração de Bitcoin	35
Figura 4 – Data Center da Arthur Mining	36
Figura 5 – ASIC do modelo S19j Pro [®]	39
Figura 6 – PSU utilizada em ASICs modernas	39
Figura 7 – Hashboard	40
Figura 8 – Exaustor da máquina	40
Figura 9 – Container de exaustão a ar da empresa GIGA [®]	44
Figura 10 – Diagrama unifilar de um projeto de Data Center para mineração de Bitcoin	47
Figura 11 – Configuração de Loop Feed	48
Figura 12 – Detalhamento da ligação de um dos containers	48
Figura 13 – Projeto Unifilar de Container de um Data Center	49
Figura 14 – Harmônicas de tensão. Elaboração própria a partir de dados medidos no local.	53
Figura 15 – Harmônicas de corrente. Elaboração própria a partir de dados medidos no local.	53
Figura 16 – Ângulos de fase de tensão e corrente - Data Center 01. Todos os ângulos têm a fase A como referência.	54
Figura 17 – Consumo de um container de um Data Center da empresa ArthurInc, nos Estados Unidos	56
Figura 18 – Consumo de um container de um Data Center da empresa ArthurInc, nos Estados Unidos	57
Figura 19 – Rampa de desligamento do Container em agosto	58
Figura 20 – Rampa de desligamento do Container em Julho. Fonte: Elaboração do Autor a partir de dados fornecidos pela ArthurInc.	59
Figura 21 – Interconexões dos Estados Unidos	61
Figura 22 – Operadores Independentes nos EUA	62
Figura 23 – A “curva do pato” no sistema da Califórnia (CAISO). Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) com base em dados do operador californiano.	74
Figura 24 – Desligamento de fontes solares e eólicas no grid da California ao longo dos anos. Fonte: Dados abertos da CAISO.	75
Figura 25 – Estimativas da curva do pato no SIN. Fonte: ONS	76

Figura 26 – Curvas de Carga e Carga líquida do operador da Califórnia. Fonte: Dados obtidos através do portal Grid Status.	78
Figura 27 – Fontes de Energia Elétrica do operador da Califórnia. Dados obtidos através do portal Grid Status.	78
Figura 28 – Geração Solar e o aumento de carga do Data Center.	79
Figura 29 – Curva de carga do sistema hipotético. Fonte: Autor	80
Figura 30 – Comparação da carga com a carga após a inserção de Data Centers. . .	80
Figura 31 – Carga líquida original e Carga líquida após inserção do Data Center. .	81
Figura 32 – Comparação da carga líquida original, hipotética e hipotética com Data Center.	82

Lista de tabelas

Tabela 1 – Medição básica - Data Center 01	51
Tabela 2 – Potência e energia - Data Center 01	52
Tabela 3 – Distorção Harmônica Total (THD) - Data Center 01	52
Tabela 4 – Ângulos de fase de tensão e corrente - Data Center 01	54
Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de distorção harmônica total - Data Center 01	55
Tabela 6 – Demanda máxima - Data Center 01	55
Tabela 7 – Estatísticas gerais de demanda e fator de carga do Data Center DC05. Fonte: Elaboração própria.	57
Tabela 8 – Rampas de variação de potência do Data Center DC05 no mês de agosto. Elaboração do Autor a partir de dados fornecidos pela ArthurInc.	58
Tabela 9 – Rampas de variação de potência do Data Center DC05 — Julho. Ela- boração do Autor.	59
Tabela 10 – Comparativo das rampas de variação de potência do Data Center DC05 — Julho e Agosto. Elaboração do Autor.	59
Tabela 11 – Resumo dos principais programas de resposta da demanda no ERCOT.	66
Tabela 12 – Geração de energia elétrica no Brasil por fonte – 2023 e 2024. Elaboração própria a partir de dados do BEN 2025.	73
Tabela 13 – Estatísticas das Fontes de Energia	79
Tabela 14 – Estatísticas do Data Center	81
Tabela 15 – Estatísticas da Carga Recalculada e da Carga Líquida	82

Lista de abreviaturas e siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ADER	Aggregated Distributed Energy Resources (Recurso de Energia Distribuída Agregado)
adim.	Adimensional
AESO	Alberta Electric System Operator
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit (Circuito Integrado de Aplicação Específica)
BTC	Bitcoin
CAISO	California Independent System Operator
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CLR	Controllable Load Resource (Recurso de Carga Controlável)
CPU	Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)
CR	Competitive Retailer (Varejista Competitivo)
CRRAH	Congestion Revenue Rights Account Holder (Detentor de Direito de Receita de Congestionamento)
CRR	Congestion Revenue Right (Direito de Receita de Congestionamento)
DR	Demand Response (Resposta à Demanda)
EC	Electric Cooperative (Cooperativa de Eletrificação)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERCOT	Electric Reliability Council of Texas
ERS	Emergency Response Service (Serviço de Resposta a Emergências)
FERC	Federal Energy Regulatory Commission (Comissão Federal Reguladora de Energia)
FPGA	Field-Programmable Gate Array

GenAI	Generative Artificial Intelligence (Inteligência Artificial Generativa)
GPU	Graphics Processing Unit (Unidade de Processamento Gráfico)
IA	Inteligência Artificial
IESO	Independent Electric System Operator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO-NE	Independent Service Operator New England
ISO	Independent System Operator (Operador de Sistema Independente)
LFL	Large Flexible Load (Carga Flexível de Grande Porte)
LRCAP	Leilão de Reserva de Capacidade
LSE	Load Serving Entity (Entidade Fornecedora de Carga)
MISO	Midcontinent Independent System Operator
MME	Ministério de Minas e Energia
MOU	Municipally Owned Utility (Empresa de Serviço Público de Propriedade Municipal)
NOIE	Non-Opt-In Entity (Entidade Não Optante)
NYISO	New York Independent Service Operator
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PDU	Power Distribution Unit (Unidade de Distribuição de Energia)
PJM	PJM Interconnection
POW	Proof of Work (Prova de Trabalho)
PRVD	Programa de Resposta Voluntária da Demanda
PSU	Power Supply Unit (Unidade de Fonte de Alimentação)
PUCT	Public Utility Commission of Texas
PUE	Power Usage Effectiveness (Eficácia no Uso de Energia)
QSE	Qualified Scheduling Entity (Entidade de Agendamento Qualificada)
REP	Retail Electric Provider (Provedor de Eletricidade Varejista)

RE	Resource Entity (Entidade de Recurso)
RRS	Responsive Reserve Service (Serviço de Reserva Responsiva)
SCED	Security-Constrained Economic Dispatch (Despacho Econômico com Restrições de Segurança)
SHA-256	Secure Hash Algorithm 256
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPP	Southwest Power Pool
TDSP	Transmission and/or Distribution Service Provider (Provedor de Serviços de Transmissão e/ou Distribuição)
THD	Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)
USD	Dólar dos Estados Unidos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	26
1.2	Objetivos	28
1.2.1	Objetivo Geral	28
1.2.2	Objetivos secundários	28
1.3	Metodologia	29
1.3.1	Coleta e tratamento de dados de operação	29
1.3.2	Análise regulatória e contextual	29
1.3.3	Simulações computacionais	30
1.3.4	Interpretação dos resultados	30
1.4	Organização do Trabalho	31
2	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	33
2.1	Bitcoin e suas características	33
2.1.1	Blockchain e Mineração	34
2.1.2	Evolução da mineração e consumo energético	34
2.1.3	Parâmetros da Mineração	36
2.1.3.1	Hashrate	36
2.1.3.2	Dificuldade da Rede	37
2.1.3.3	Recompensas e Taxas de Transação	37
2.1.3.4	Hashprice	37
2.1.3.5	Consumo Energético	38
2.1.3.6	Outros Parâmetros Relevantes	38
2.1.4	O Hardware utilizado na mineração	38
2.1.5	Modalidades de Mineração e Resfriamento	41
2.2	Data Centers	41
2.2.1	Classificação de Data Centers quanto à sua tipologia	42
2.2.2	A estrutura de um Data Center para mineração de Bitcoin	44
2.2.2.1	Sistemas de resfriamento	44
2.2.2.2	Layout e sistemas auxiliares	46
2.3	Infraestrutura elétrica e dimensionamento	46
2.3.1	Quadro e dimensionamento	48
2.4	Carga, consumo e eficiência energética	49
2.4.1	Eficiência Energética	49
2.4.2	Densidade Energética da Carga	50

2.4.3	Característica de carga vista de um sistema de energia elétrica	51
2.4.4	Atributos operacionais e comportamento dinâmico da carga	55
2.4.5	Desligamento e tempo de resposta	57
2.4.6	Considerações finais	59
3	ARCABOUÇO REGULATÓRIO NOS EUA E NO BRASIL	61
3.1	Aspectos gerais da regulação de mercados de energia elétrica nos Estados Unidos da América	61
3.2	Inserção de Data Centers no âmbito da ERCOT	62
3.2.1	Participantes de Mercado - ERCOT	63
3.2.1.1	Qualified Scheduling Entity (QSE)	63
3.2.1.2	Load Serving Entity (LSE) - Entidade Fornecedora de Carga	64
3.2.1.3	Resource Entity	64
3.2.1.4	Transmission and/or Distribution Service Provider (TDSP)	64
3.2.1.5	Congestion Revenue Rights Account Holder (CRRAH)	64
3.2.2	Programas de resposta da demanda no ambiente regulatório do ERCOT	65
3.2.2.1	Estrutura e Funcionamento Geral	65
3.2.2.2	Participação e Elegibilidade	66
3.2.2.3	Mecanismos de Compensação e Incentivos	67
3.2.2.4	Aspectos Regulatórios e Conformidade	67
3.2.2.5	Impacto e Desafios	68
3.3	O ambiente regulatório no Brasil	68
3.3.1	Programas de resposta da demandano Brasil	68
3.3.2	Evolução do marco regulatório brasileiro	68
3.3.3	Projetos-piloto e experiências práticas	69
3.3.4	Programa de Resposta Voluntária à Demanda (2022)	69
3.3.5	Avanços recentes dos programas de resposta da demanda no Brasil (2024–2025)	70
3.3.6	Desafios e perspectivas	71
4	AVALIAÇÃO DE POTENCIAIS EFEITOS DE CARGAS FLEXÍVEIS NO SIN	73
4.1	O perfil de carga no SIN	73
4.2	A Curva do Pato	74
4.3	O uso de cargas flexíveis em períodos de excedentes energéticos	76
4.4	Descrição do Cenário de Simulação	77
4.5	Análise dos resultados	81
4.6	Limitações do modelo e riscos operativos associados à desconexão de múltiplos Data Centers	83

5	CONCLUSÃO	85
5.1	Resultados	85
5.2	Limitações do Estudo e Recomendações Futuras	85
5.2.1	Síntese Final	87
	REFERÊNCIAS	89

1 Introdução

O perfil dos sistemas elétricos modernos mudou consideravelmente nas últimas décadas. Atualmente, a atenção está voltada não apenas para novas formas de geração de energia, mas também para o quão sustentáveis e flexíveis essas soluções podem ser do ponto de vista da operação do sistema. No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) tem presenciado um crescimento significativo da participação de fontes renováveis e intermitentes, como a fonte solar fotovoltaica e a eólica. Embora esses recursos tragam benefícios ambientais e econômicos, sua expansão intensiva também introduz desafios técnicos, como a dificuldade de coordenação entre geração e consumo em tempo real.

Esses desafios se manifestam principalmente nos momentos em que há desequilíbrio entre a geração renovável e a carga, devido à natureza intermitente dessas fontes. Como sua produção não pode ser controlada da mesma forma que em usinas despacháveis, ocorrem situações em que há geração excedente e demanda insuficiente para absorvê-la. Esse descompasso pode levar à sobrecarga de linhas de transmissão e à necessidade de ações corretivas, como o desligamento compulsório de unidades geradoras (*curtailment*), o que implica perdas econômicas significativas para os agentes do setor (MENATI; LEE; XIE, 2022; GINZBURG-GANZ; MENATI; XIE, 2024).

Esse cenário abre espaço para soluções que promovam flexibilidade no consumo de energia elétrica. Uma proposta promissora consiste na utilização de *data centers* — especialmente aqueles voltados à mineração de criptoativos — como cargas ajustáveis durante a operação em tempo real. Esses centros possuem elevada densidade energética e, diferentemente de muitas cargas industriais tradicionais, como siderúrgicas ou fábricas de cimento, apresentam grande capacidade de modulação e interrupção sem prejuízos técnicos significativos (MAJUMDER; XIE; ARAVENA, 2024). Estudos indicam que tais unidades podem ser ativadas em períodos de excedente de geração e desligadas rapidamente em momentos de escassez, comportando-se como recursos despacháveis altamente eficazes (GINZBURG-GANZ; MENATI; XIE, 2024; CARTER et al., 2023).

Essa flexibilidade oferece benefícios relevantes à operação do sistema. Durante momentos de sobra de energia, os *data centers* podem absorver o excedente, evitando o desperdício e aliviando pressões sobre a rede. Em contrapartida, quando há escassez de geração ou aumento da demanda, sua rápida redução de carga contribui para a estabilidade da frequência e evita o despacho de usinas de custo elevado. Dessa forma, operam como uma espécie de amortecedor dinâmico, suavizando as oscilações entre oferta e demanda (RHODES, DEETJEN e SMITH (2021)).

No entanto, para que essa proposta se concretize de forma efetiva, é necessário

considerar dois aspectos fundamentais. Primeiramente, é preciso verificar o grau de interesse do operador do sistema em utilizar essas cargas como recursos despacháveis, incorporando-as aos programas de resposta à demanda e serviços ancilares. Em segundo lugar, é indispensável avaliar se há incentivos econômicos suficientes para que investidores operem esses centros em regiões com disponibilidade de energia excedente, mesmo diante da possibilidade de desligamentos frequentes (MENATI, LEE e XIE (2022), MAJUMDER, XIE e ARAVENA (2024)).

Esses dois vetores — o controle operacional pelo sistema e a viabilidade econômica para os investidores — precisam estar alinhados. Caso contrário, a proposta perde sua aplicabilidade prática. É fundamental, portanto, analisar não apenas a viabilidade técnica da operação, mas também aspectos como modelos de remuneração, políticas públicas e coordenação com o operador do sistema (GINZBURG-GANZ; MENATI; XIE, 2024).

Em essência, a mineração de criptoativos pode funcionar como um vetor de valorização energética, ao transformar energia elétrica ociosa em ativos digitais com valor de mercado. Ao mesmo tempo, oferece uma solução inovadora para apoiar a estabilidade e a eficiência dos sistemas elétricos em contextos de alta penetração renovável (FRUMKIN, 2023).

1.1 Motivação

Nos últimos anos, a crescente demanda por eletricidade, impulsionada pela digitalização da economia e pela expansão dos Data Centers, tem imposto novos desafios — mas também criado oportunidades — para os sistemas elétricos. Entre esses centros, destacam-se aqueles dedicados à mineração de criptomoedas, que vêm se consolidando como agentes relevantes no setor devido ao seu elevado consumo de energia e às suas características operacionais particulares. Esses Data Centers especializados apresentam um alto grau de flexibilidade e são capazes de ajustar seu consumo elétrico quase instantaneamente. Essa característica os qualifica como cargas altamente despacháveis, conhecidas na literatura como Large Flexible Loads (LFLs).

É importante distinguir os Data Centers de mineração dos Data Centers convencionais voltados ao armazenamento de dados, serviços em nuvem ou aplicações de inteligência artificial. Enquanto os Data Centers tradicionais lidam com cargas sensíveis à latência, à continuidade de operação e à qualidade do serviço — tornando inviável a interrupção abrupta ou frequente das operações —, os Data Centers de mineração operam tarefas altamente paralelizáveis e não críticas, como o *proof-of-work*. Esse mecanismo, utilizado por diversas criptomoedas como o Bitcoin, consiste na resolução de problemas matemáticos complexos com o objetivo de validar transações e manter a segurança da rede blockchain. Por sua natureza repetitiva e intensiva em processamento, o *proof-of-work*

pode ser interrompido e retomado sem grandes prejuízos à operação global.

O perfil de consumo de um Data Center voltado à mineração de criptomoedas é composto por duas principais fontes: o processo de mineração em si, realizado por circuitos integrados específicos para aplicações (Application-Specific Integrated Circuits — ASICs), e o sistema de refrigeração necessário ao funcionamento contínuo dos equipamentos. A maior parte do consumo energético — aproximadamente 95% — é atribuída ao poder computacional das máquinas, enquanto a refrigeração representa uma parcela significativamente menor, geralmente entre 3% e 5% do total. Segundo Menati, Lee e Xie (2022) e Carter et al. (2023), a operação de mineração pode ser considerada uma das cargas mais responsivas para fins de controle de demanda. Por não depender de requisitos rígidos de latência ou continuidade, como ocorre em data centers voltados a aplicações de inteligência artificial ou comunicação, os mineradores podem ser temporariamente desligados ou modulados sem comprometer a integridade do serviço prestado. Essa característica permite sua participação em programas de resposta à demanda e sua contribuição para serviços ancilares, como controle de frequência, contenção de rampas de geração e suporte ao balanceamento do sistema elétrico.

O sistema elétrico do Texas, operado pela ERCOT (Electric Reliability Council of Texas), tem se tornado referência no estudo e aplicação dessas cargas flexíveis. De acordo com o estudo *Impacts of Large, Flexible Data Center Operations on the Future of ERCOT* (Lancium, 2022), Data Centers de mineração, quando bem localizados e integrados à rede, podem reduzir a necessidade de despacho de geração térmica em momentos de pico, mitigar sobrecargas e contribuir para a estabilidade do sistema. Ainda, o estudo *Modeling and Analysis of Utilizing Cryptocurrency Mining for Demand Flexibility in Electric Energy Systems: A Synthetic Texas Grid Case Study*, publicado no IEEE (MENATI; LEE; XIE, 2022) destaca que, embora essas cargas possam gerar flutuações locais nos preços da energia e alterar padrões de consumo, elas também apresentam significativo potencial de agregar valor ao sistema por meio de sua capacidade de resposta rápida e previsível.

Embora a maioria das análises esteja focada no contexto dos Estados Unidos, particularmente no ERCOT, diversos autores apontam que os benefícios observados podem ser adaptados a outros sistemas, como o Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil. O SIN já lida com desafios relacionados à variabilidade da geração renovável, especialmente na região Nordeste e no Estado de Minas Gerais (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025). Nesse sentido, a introdução de cargas flexíveis como a mineração de criptomoedas poderia oferecer benefícios operacionais relevantes, tais como o aumento da confiabilidade do sistema, a redução do uso de fontes fósseis e a maior integração de energia solar e eólica.

No Brasil, embora ainda não existam mecanismos formais consolidados para participação de mineradores em programas de resposta à demanda, já se observam iniciativas

que caminham nessa direção. Um exemplo é a operação da empresa *Arthur Mining*[®], que iniciou atividades no estado do Tocantins utilizando energia ociosa proveniente de fontes renováveis, com capacidade inicial de 1 MW e planos de expansão para até 30 MW. O modelo adotado permite ajustar o consumo conforme a disponibilidade da rede, caracterizando uma prática de flexibilidade da demanda, mesmo que fora de um mercado estruturado.

Outro exemplo relevante é o projeto piloto lançado pela Petrobras em 2025, que utiliza gás natural excedente — normalmente queimado sem aproveitamento — para alimentar operações de mineração de Bitcoin. Essa abordagem transforma um passivo ambiental em um ativo energético, e pode atuar como recurso de modulação da carga elétrica, especialmente em regiões isoladas ou com geração distribuída. Tais experiências indicam que, mesmo sem incentivos diretos, o setor de mineração no Brasil já demonstra alinhamento prático com os princípios da resposta à demanda.

Entretanto, para que esses benefícios se concretizem no contexto brasileiro, é necessário que o setor elétrico avance na formulação de mecanismos regulatórios e de mercado que incentivem a flexibilidade do lado da demanda. Isso inclui, por exemplo, o desenvolvimento de sinais de preço mais dinâmicos, o aprimoramento dos programas de resposta à demanda e a definição de estruturas de remuneração para cargas que prestam serviços sistêmicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa evidenciar o uso de Data Centers de mineração de Bitcoin, e sua característica de carga elevada e flexível, como um instrumento de mitigação no que diz respeito a problemática de desligamentos em plantas de geração de energia devido a alta penetração de energias renováveis e intermitentes no SIN.

1.2.2 Objetivos secundários

- Comparar o funcionamento de diferentes tipos de Data Centers, principalmente aqueles ligados a Inteligência Artificial e serviços de nuvem.
- Esclarecer concepções equivocadas sobre o consumo energético da rede do Bitcoin, assim como evidenciar a sua importância.
- Comparar a iniciativa programas de resposta a demanda e serviços ancilares entre os atuantes nos Estados Unidos e no Brasil.

- Fornecer insumos para ajustes de natureza regulatória no Brasil, baseando-se em práticas conhecidas dos operadores dos EUA.
- Calcular parâmetros chave de operação dos Data Centers, com o fim de demonstrar práticas utilizadas no mercado.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em três etapas principais: **coleta e tratamento de dados reais de data centers**, **análise técnico-regulatória** e **simulações computacionais de comportamento sistêmico**. Essa organização buscou garantir uma compreensão prática e fundamentada sobre o papel dos *data centers* de mineração de Bitcoin como cargas flexíveis capazes de contribuir com a *resposta da demanda* no Sistema Interligado Nacional (SIN).

1.3.1 Coleta e tratamento de dados de operação

Nesta etapa, foram utilizados dados reais de medição provenientes de *data centers* de mineração de Bitcoin. As informações foram obtidas por meio de medidores instalados em campo, abrangendo parâmetros como potência ativa, energia consumida e fator de carga. Os dados foram inicialmente armazenados em planilhas Excel e, em seguida, importados para o ambiente Python, permitindo uma manipulação mais eficiente e visualização detalhada dos resultados.

As principais bibliotecas utilizadas foram:

- **pandas**: para leitura, organização e tratamento dos dados;
- **numpy**: para cálculos numéricos e análise estatística;
- **matplotlib**: para geração de gráficos e visualização de tendências operacionais.

Essa etapa teve como objetivo compreender o comportamento dinâmico dos *data centers*, caracterizando seus padrões de consumo, variação de carga e potencial de modulação.

1.3.2 Análise regulatória e contextual

Paralelamente, foi conduzida uma análise qualitativa e comparativa do ambiente regulatório brasileiro e internacional relacionado à resposta da demanda. Foram estudados os modelos aplicados pelos operadores **ERCOT** (Texas) e **CAISO** (Califórnia), comparando-os com as diretrizes e projetos-piloto desenvolvidos pela **ANEEL** e pelo **ONS** no Brasil.

Essa análise permitiu contextualizar o enquadramento técnico e regulatório dos *data centers* como *Large Flexible Loads* (LFLs), destacando as oportunidades de participação dessas cargas como agentes de flexibilidade no sistema elétrico nacional.

1.3.3 Simulações computacionais

Na etapa final, foi realizada uma simulação computacional baseada em dados reais do sistema do operador da Califórnia (CAISO), com o objetivo de reproduzir a *curva do pato* e demonstrar o impacto da inserção de cargas flexíveis de *data centers* na sua mitigação.

Foi primeiramente considerado o cenário original com os dados brutos do sistema do CAISO, conhecido por ter alta penetração de geração solar e eólica. A partir disso, foi criado um sistema hipotético, com as gerações hidrelétricas e a gás, que originalmente sofreriam cortes, transformadas em gerações constantes. A importação/exportação de energia de outros sistemas vizinhos a Califórnia foi zerada, para demonstrar um sistema em que não há excesso abundante de geração, no qual a demanda dos *data centers* foi modelada como variável despachável, ajustando-se de acordo com a disponibilidade de geração renovável.

As simulações também foram desenvolvidas em **Python**, utilizando o seguinte conjunto de ferramentas:

- **pandas**: leitura dos arquivos `.csv` de geração e consumo do CAISO;
- **numpy**: cálculos de médias e variâncias de rampas e cargas líquidas;
- **matplotlib**: plotagem das curvas de carga total, carga líquida e perfis de operação do *data center*.

O código implementado calculou as variâncias da carga líquida antes e depois da inserção dos *data centers*, permitindo avaliar quantitativamente o efeito da flexibilidade de carga na suavização da *curva do pato*.

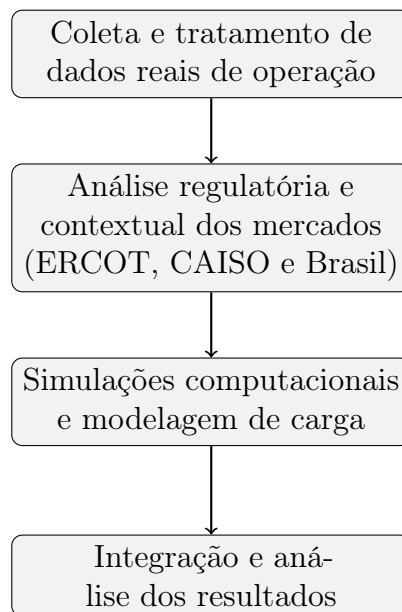
1.3.4 Interpretação dos resultados

Por fim, os resultados das etapas foram consolidados e analisados sob duas dimensões principais:

- **Local**: comportamento dinâmico e capacidade de resposta dos *data centers*;
- **Sistêmica**: impactos sobre o despacho de geração e integração de fontes renováveis.

Essa metodologia integrada — que combina dados reais, ferramentas computacionais e análise regulatória — proporcionou uma visão abrangente sobre a viabilidade técnica e energética dos Data Centers de mineração como instrumentos de resposta da demanda no contexto do SIN.

Figura 1 – Fluxo metodológico do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 1, apresenta-se a motivação, os objetivos e a metodologia adotada no estudo, bem como os conceitos introdutórios necessários para contextualizar a utilização de data centers de mineração de Bitcoin como cargas flexíveis no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Em sequência, no capítulo 2, realiza-se uma revisão do estado da arte, incluindo a caracterização técnica da rede Bitcoin, dos dispositivos de mineração (ASICs), dos sistemas de resfriamento, da infraestrutura elétrica dos data centers e do comportamento dinâmico dessas cargas, destacando aspectos de eficiência energética, densidade de potência e capacidade de resposta rápida. Também são discutidos seus atributos como Large Flexible Loads (LFLs) e implicações para o sistema elétrico.

No Capítulo 3, apresenta-se a revisão do ambiente regulatório, abordando primeiro o contexto dos Estados Unidos, com ênfase nos modelos do ERCOT e seus programas de resposta à demanda, e posteriormente o ambiente regulatório brasileiro, incluindo iniciativas da ANEEL, projetos-piloto, e desafios para a inserção de cargas flexíveis no SIN.

No Capítulo 4, são descritos os cenários de simulação utilizados e analisados os resultados obtidos, com foco nos impactos da operação de data centers flexíveis sobre a curva de carga, na mitigação da curva do pato e na absorção de geração renovável.

Por fim, as conclusões gerais do trabalho, bem como as limitações do estudo e recomendações para pesquisas futuras, são apresentadas no Capítulo 5.

2 Revisão do estado da arte

Nesta seção apresenta-se uma revisão do estado da arte no que se diz respeito a infraestrutura e equipamento de Data Centers dedicados a mineração de Bitcoin.

2.1 Bitcoin e suas características

Para compreender o funcionamento dos Data Centers voltados à mineração, é essencial entender como opera o processo de mineração de Bitcoin. Este trabalho focará especificamente nos efeitos da modulação do consumo de energia elétrica desse tipo de operação.

O Bitcoin é uma moeda digital criada em 2009 por um indivíduo ou grupo de pessoas sob o pseudônimo de *Satoshi Nakamoto*. A proposta do Bitcoin consiste em um protocolo aberto e descentralizado que permite transações financeiras entre partes sem a necessidade de intermediários, como instituições bancárias. Isso significa que qualquer computador ao redor do mundo pode se conectar a essa rede -se tornando um *nó*- e realizar transações financeiras.

Essas transações são validadas pelos mineradores, que competem para resolver problemas matemáticos complexos, sendo recompensados com novos bitcoins e taxas de transação. As transações validadas são registradas de forma pública e permanente na *Blockchain*, uma espécie de livro-razão digital.

Desde a sua criação, a rede do Bitcoin já alcançou mais de 150 milhões de usuários. Recentemente, há uma grande corrida pela adoção institucional, em que governos e empresas estão enxergando o Bitcoin como um ativo de reserva de valor. No dia 08/12/2025, a cotação atualizada do do Bitcoin em dólares é de USD 91.433,36.

O Bitcoin é regido por alguns princípios fundamentais:

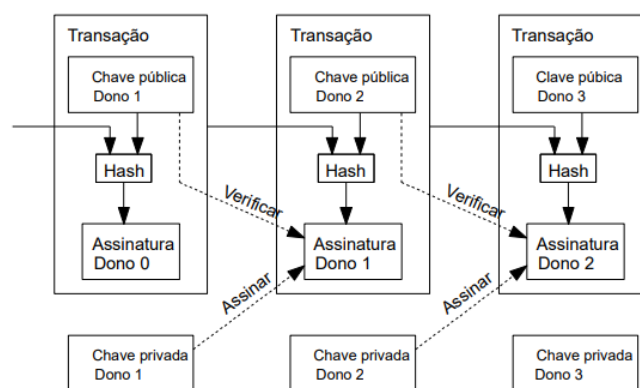
- Oferta finita de moedas: Apenas 21 milhões de moedas poderão existir.
- Nenhuma entidade tem controle sobre a moeda: todas as alterações em seus princípios e características de funcionamento devem ser aceitas por mais de 51% da rede.
- As transações são criptografadas e anônimas, baseadas no algoritmo SHA-256.
- As transações são auditáveis e públicas, registradas em um livro-razão chamado *blockchain*.
- Os mineradores validam as transações e as propagam pela rede.

2.1.1 Blockchain e Mineração

A rede do Bitcoin permite transações sem intermediários, dispensando a confiança em instituições monetárias. Essa autonomia é garantida pelo algoritmo de consenso *Proof of Work* (PoW), no qual mineradores competem para resolver um desafio criptográfico: encontrar um *nonce* — um número aleatório utilizado apenas uma vez para compor a entrada do algoritmo — que, quando combinado ao conteúdo do bloco e processado pelo SHA-256, gere um *hash*, isto é, uma impressão digital criptográfica que identifica de forma única aquele conjunto de dados. O primeiro a encontrar esse valor adiciona um novo bloco à *blockchain* e recebe a recompensa correspondente.

Cada bloco contém um conjunto de transações validadas, um registro de tempo (*timestamp*) e o hash do bloco anterior, formando uma cadeia cronológica resistente a modificações. Alterar qualquer elemento exigiria recomputar todos os hashes subsequentes, o que inviabiliza tentativas de fraude sem grande poder computacional. A validação descentralizada via PoW impede gasto duplo e manipulação de registros, mantendo a integridade do sistema mesmo sem autoridade central. Embora um *ataque de 51%* pudesse, teoricamente, permitir a reorganização de blocos recentes, o enorme poder computacional distribuído globalmente torna esse cenário economicamente impraticável. A mineração, portanto, assegura a integridade da rede e regula a emissão monetária. Essa emissão diminui ao longo do tempo por meio do *halving*, evento que reduz pela metade a recompensa por bloco a cada 210.000 blocos, mantendo o fornecimento de novos bitcoins previsível e limitado. A Figura 2 apresenta uma representação simplificada dessa estrutura.

Figura 2 – Esquemático da blockchain



Fonte: Nakamoto, 2008.

2.1.2 Evolução da mineração e consumo energético

A mineração, apesar de essencial para a segurança da rede Bitcoin, exige um alto custo computacional e, conseqüentemente, um grande consumo de energia elétrica. Esse consumo está diretamente relacionado ao modelo de consenso *Proof of Work* (PoW).

Nos primeiros anos da rede, por volta de 2009 e 2010, era possível minerar usando apenas computadores pessoais. O próprio criador do Bitcoin, Satoshi Nakamoto, minerava blocos utilizando um processador comum (CPU). Com o aumento do interesse na rede e da dificuldade de mineração, os usuários passaram a utilizar *placas de vídeo* (GPUs), que oferecem desempenho muito superior para esse tipo de tarefa paralela (ROSENFELD, 2011).

Logo em seguida, surgiram os FPGAs (*Field-Programmable Gate Arrays*), circuitos integrados programáveis que oferecem eficiência energética bem maior do que as GPUs. No entanto, a mineração deu um salto definitivo com a chegada dos ASICs (*Application-Specific Integrated Circuits*) — chips desenvolvidos exclusivamente para minerar Bitcoin (TAYLOR, 2017).

Hoje, a mineração é dominada por fazendas industriais que utilizam milhares de máquinas ASIC conectadas em paralelo, operando 24 horas por dia em galpões refrigerados, geralmente localizados em regiões com energia elétrica barata. Os modelos mais populares atualmente são os da linha *Antminer*[®] (da Bitmain[®]) e *WhatsMiner*[®] (da MicroBT[®]), que podem realizar trilhões de hashes por segundo (*terahashes per second*, ou TH/s). Nas Figuras 3 e 4, é mostrado, respectivamente, uma seção de um container de ASICs para mineração de Bitcoin e um *site* de mineração, onde ficam alocados os containers.

Figura 3 – ASICs de um container de Data Center de mineração de Bitcoin



Fonte: Arthur Mining.

Figura 4 – Data Center da Arthur Mining



Fonte: Website da Arthur Mining.

Como consequência, o consumo energético da rede Bitcoin como um todo se tornou um tema recorrente de debate. Estimativas recentes colocam o gasto anual da rede em dezenas de terawatts-hora (TWh), comparável ao consumo de países inteiros, como a Argentina ou a Suécia (DIGICONOMIST, 2024). Embora isso levante preocupações ambientais, muitos mineradores estão migrando para fontes renováveis, como hidrelétricas, usinas solares e eólicas, para reduzir o impacto ambiental e melhorar a eficiência do negócio (COINSHARES RESEARCH, 2019).

Apesar do alto consumo energético, esse gasto representa o custo de garantir a segurança e a imutabilidade da *blockchain*. Quanto mais energia e poder computacional são dedicados à rede, mais difícil se torna para um agente malicioso realizar ataques — especialmente o chamado ataque de 51%, que exigiria controlar mais da metade de todo o poder de mineração global.

2.1.3 Parâmetros da Mineração

A operação de mineração de Bitcoin é definida por um conjunto de parâmetros técnicos e econômicos, os quais contemplam não apenas o funcionamento da rede em si, mas também alguns modos de operação do Sistema de Energia Elétrica em questão.

2.1.3.1 Hashrate

O **hashrate** representa a capacidade da ASIC de processar as operações de *hashing* do algoritmo SHA-256 por segundo. O hashrate é medido em terahashes por segundo (TH/s). Equipamentos como o Antminer S21 Pro[®], por exemplo, operam na faixa de $234TH/s$, enquanto fazendas industriais podem atingir centenas de *petahashes* ou até

exahashes agregados. A taxa de hashrate influencia diretamente a chance de um minerador encontrar blocos e receber recompensas. No entanto, quanto maior o hashrate global da rede, mais difícil se torna minerar individualmente um bloco — o que leva ao próximo parâmetro.

2.1.3.2 Dificuldade da Rede

A dificuldade da rede é um parâmetro ajustado a cada 2.016 blocos (cerca de quatorze dias) e tem como objetivo manter o tempo médio entre cada bloco em 10 minutos. Se há muitos blocos sendo minerados rapidamente, a dificuldade da rede aumenta de forma que exija um maior esforço computacional das máquinas em achar o *nonce* para o bloco em questão.

2.1.3.3 Recompensas e Taxas de Transação

O incentivo econômico da mineração é composto por dois componentes:

- **Recompensa por bloco (block subsidy)**: atualmente fixada em **3,125 BTC por bloco**, após o halving ocorrido em abril de 2024. Esse valor é reduzido pela metade a cada aproximadamente quatro anos, conforme definido pelo protocolo do Bitcoin (NAKAMOTO, 2008).
- **Taxas de transação (fees)**: representam os valores pagos voluntariamente pelos usuários para que suas transações sejam incluídas em blocos. Em períodos de alta demanda e congestionamento da rede, essas taxas podem ultrapassar **1 BTC por bloco**, tornando-se uma parcela significativa da remuneração dos mineradores.

A soma entre recompensa por bloco e taxas de transação, convertida em dólar, e dividida pela dificuldade e pelo hashrate, dá origem a um parâmetro-chave para avaliação econômica: o **hashprice** (BRAIINS, 2024b).

2.1.3.4 Hashprice

O *hashprice*, geralmente expresso em dólares por terahash por segundo por dia (US\$/TH/s/dia), representa quanto um minerador ganha por unidade de hashrate em um dado período. Ele é diretamente influenciado por três fatores principais:

- A cotação do Bitcoin (BTC);
- A dificuldade da rede;
- O volume e o valor agregado das taxas de transação.

Quando o *hashprice* cai abaixo de um determinado limiar econômico (*break-even*), operadores com equipamentos menos eficientes ou com custos elevados de energia tendem a desligar suas máquinas. Esse comportamento torna a mineração de Bitcoin um sistema naturalmente responsivo a sinais de preço — uma característica altamente compatível com mecanismos de resposta da demanda (MAJUMDER; XIE; ARAVENA, 2024).

2.1.3.5 Consumo Energético

A mineração de Bitcoin é uma atividade altamente intensiva em energia elétrica. Cada unidade de ASIC de última geração apresenta uma potência **2 kW e 3,5 kW**, dependendo do modelo. Em operações industriais, é comum atingir densidades superiores a **1,5 MW por contêiner de 40 pés**, com fatores de carga próximos a 100% (FRUMKIN, 2023).

A eficiência energética é medida em **Joules por terahash (J/TH)**. Por exemplo, o modelo Antminer S19J Pro apresenta eficiência em torno de **21,5 J/TH** (BRAIINS, 2024a). Máquinas mais novas contam com maiores eficiências, como o modelo Antminer S21 Pro, com eficiência de **15J/TH**, de acordo com o fabricante.

Essa alta densidade e previsibilidade de consumo tornam os Data Centers de mineração candidatos ideais para integração em programas de resposta da demanda ou serviços ancilares (MENATI; LEE; XIE, 2022).

2.1.3.6 Outros Parâmetros Relevantes

- **Disponibilidade (Uptime):** a mineração opera de forma contínua (24/7), porém com capacidade de desligamento instantâneo sem prejuízo funcional, o que favorece sua atuação como carga controlável (MAJUMDER; XIE; ARAVENA, 2024).
- **Latência de desligamento e religamento:** com sistemas automatizados, é possível interromper ou restabelecer a operação de milhares de ASICs em poucos segundos ou minutos (GINZBURG-GANZ; MENATI; XIE, 2024).
- **Vida útil dos equipamentos:** os ASICs geralmente têm uma durabilidade entre 3 e 5 anos, mas sua longevidade depende fortemente das condições de temperatura e umidade, o que justifica investimentos em sistemas eficientes de resfriamento (FRUMKIN, 2023).

2.1.4 O Hardware utilizado na mineração

As ASICs (Application-Specific Integrated Circuits) usadas para mineração podem ser vistas como computadores especializados. Seus componentes funcionam de forma

semelhante aos de um computador convencional, mas com funções otimizadas para o processo de mineração. Um exemplo desse hardware está evidenciado na Figura 5.

Figura 5 – ASIC do modelo S19j Pro[®]



Fonte: Bitmain

Os componentes que compõem uma ASIC são:

PSU - Power Supply Unit

É a parte que contempla os circuitos de alimentação. É composta por retificadores e conversores para converter a alimentação em tensão alternada da rede para alimentação em tensão contínua, necessária para alimentação dos componentes eletrônicos internos. A Figura 6 trás um exemplo de PSU utilizada em ASICs modernas.

Figura 6 – PSU utilizada em ASICs modernas



Fonte: Bitmain

Control Board

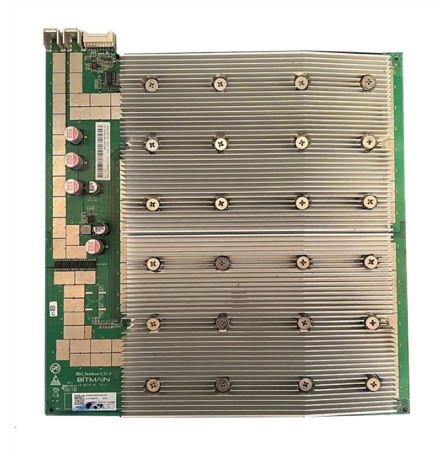
É considerado o cérebro da máquina. Na Control Board são feitas as relações de controle do ASIC e conexão a dispositivos externos, assim como a comunicação com a rede

Bitcoin.

HashBoard

A Hashboard é a placa que contém os chips ASIC. É ela quem realiza o trabalho bruto da mineração. Em uma ASIC, é comum ter três Hashboards, cada uma com 1/3 da capacidade de Hashrate total. Uma hashboard está apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Hashboard



Fonte: Bitmain

Exaustores

Os exaustores, ou em inglês *Fan*, são responsáveis por resfriar as Hashboards interiores da máquina. Em ASICs que utilizam outras modalidades de resfriamento, ela pode ser substituída. Um modelo comum de exaustor é evidenciado na Figura 8.

Figura 8 – Exaustor da máquina



Fonte: Bitmain

2.1.5 Modalidades de Mineração e Resfriamento

Um dos parâmetros mais importantes em termos de projetos para um site de mineração de Bitcoin é o resfriamento. As máquinas, por conta de sua característica de funcionamento, chegam a temperaturas elevadas e se mantêm nesse estado por bastante tempo. Logo, ao longo dos anos foram desenvolvidos inúmeros sistemas de resfriamento, para garantir o melhor funcionamento das máquinas e operação dos Data Centers. Dentro desses métodos, cita-se três principais:

- Exaustão forçada;
- Imersão;
- Hydro Cooling;

Posteriormente, será explicado de maneira mais detalhada como funcionam os tipos de refrigerações. De maneira geral, é necessário um bom planejamento para que a operação seja a mais otimizada possível.

2.2 Data Centers

No atual cenário de inovação tecnológica, os data centers têm adquirido crescente relevância estratégica. Grandes corporações globais vêm direcionando investimentos expressivos em tecnologias como inteligência artificial (IA) e serviços de computação em nuvem, os quais oferecem suporte a processos de digitalização em diferentes setores, além de possibilitar a expansão de aplicações emergentes, como a rede Bitcoin, já anteriormente mencionada. Entre 2024 e 2030, estima-se que o setor receberá aproximadamente US\$ 1,8 trilhão em investimentos para atender à demanda projetada (BOSTON CONSULTING GROUP, 2025).

Em escala global, a maior parcela da demanda energética de data centers ainda é associada a cargas de trabalho tradicionais, como armazenamento e compartilhamento de arquivos, processamento de transações e aplicações corporativas convencionais. Projeções indicam que tais usos continuarão predominantes, representando cerca de 55% do consumo total em 2028, com taxa de crescimento anual composta de 7% no período de 2023 a 2028, impulsionada pelo aumento do volume de dados corporativos e pela intensificação da digitalização dos negócios. Paralelamente, observa-se um rápido avanço da demanda computacional voltada à IA generativa (GenAI), estimada para responder por aproximadamente 60% do crescimento total no consumo energético de data centers entre 2023 e 2028, com taxas anuais de 30% para o treinamento de grandes modelos e 122% para tarefas de inferência (BOSTON CONSULTING GROUP, 2025).

Logo, para que toda essa infraestrutura consiga suprir essa demanda crescente, é necessário um exímio trabalho de engenharia no que diz respeito ao projeto desses Data Centers. Na seção a seguir, será abordado o funcionamento de uma unidade de dados, assim como suas especificações de projeto, característica de carga e know-how de funcionamento e operação. Será abordado o caso de uma operação de data centers para mineração de Bitcoin.

2.2.1 Classificação de Data Centers quanto à sua tipologia

A tipologia de Data Centers é definida pelo *Tier Standard: Topology*, elaborado pelo Uptime Institute, que estabelece quatro níveis (Tier I a Tier IV) de desempenho e disponibilidade de acordo com a topologia da infraestrutura crítica. Cada Tier define requisitos mínimos referentes à redundância, caminhos de distribuição, manutenção e tolerância a falhas, compondo uma progressão de confiabilidade (UPTIME, 2018). A seguir, apresentam-se as principais características de cada nível.

- **Tier I – Infraestrutura Básica**

Um Data Center Tier I apresenta:

- Caminho único de distribuição para energia e refrigeração;
- Ausência de componentes redundantes;
- Espaço dedicado para TI;
- Sistema UPS para filtragem de distúrbios elétricos;
- Resfriamento dedicado;
- Geração local para contingências, acompanhada de autonomia mínima de 12 horas de combustível para operação em caso de falha da rede.

É a infraestrutura mais suscetível a interrupções, exigindo desligamentos para manutenção.

- **Tier II – Componentes de Capacidade Redundante**

O Tier II mantém o caminho único de distribuição, mas adiciona redundância de capacidade (N+1). Inclui:

- Módulos UPS redundantes;
- Chillers, bombas e equipamentos de rejeição de calor adicionais;
- Sistemas de resfriamento suplementares;
- Geração local com 12 horas de autonomia de combustível.

A redundância reduz riscos operacionais, mas falhas inesperadas ainda podem afetar a carga crítica.

- **Tier III – Infraestrutura Concomitantemente Mantível**

O Tier III introduz a *Concurrent Maintainability*, permitindo que qualquer componente da infraestrutura seja mantido sem impacto nas operações de TI. Seus requisitos incluem:

- Redundância de capacidade (N+1);
- Múltiplos caminhos independentes de distribuição, com um ativo por vez;
- Equipamentos de TI com dupla alimentação ou uso de dispositivos apropriados;
- Geração local com 12 horas de autonomia, garantindo continuidade mesmo durante manutenções programadas.

Esse nível elimina a necessidade de desligamentos programados da carga crítica.

- **Tier IV – Infraestrutura Tolerante a Falhas**

O Tier IV estende o Tier III ao introduzir tolerância a falhas (*Fault Tolerance*). Requer:

- Sistemas independentes e fisicamente isolados (compartimentalização);
- Múltiplos caminhos ativos simultâneos para energia e refrigeração;
- Capacidade de operar mesmo com falha inesperada de qualquer componente;
- Resfriamento contínuo conforme diretrizes da ASHRAE;
- Geração local com 12 horas de autonomia, assegurando operação sustentada mesmo sob condições extremas.

Trata-se do nível mais elevado de resiliência e disponibilidade entre os Tiers.

No contexto da mineração de Bitcoin, Data Centers especializados normalmente não adotam as topologias Tier III ou Tier IV, pois suas operações são paralelizáveis e tolerantes a interrupções. Como o processo de mineração pode ser retomado sem perda de estado, esses Data Centers tendem a utilizar arquiteturas equivalentes aos Tiers I e II — geralmente sem UPS e com infraestrutura simplificada. Essa característica, aliada à robustez e modularidade das máquinas ASICs, torna tais instalações particularmente adequadas para operar como cargas flexíveis em programas de resposta à demanda.

2.2.2 A estrutura de um Data Center para mineração de Bitcoin

Em suma, um data center é um container que abriga uma quantidade de máquinas que realizam operações matemáticas complexas, como a criptografia SHA-256. Para que as máquinas tenham um bom funcionamento, é necessário que o data center tenha um eficiente sistema de refrigeração que consiga ser comportado no confinado espaço de um container. As dimensões podem variar de fabricante, tamanho da aplicação e personalização do cliente, mas de maneira geral os containers podem utilizar de modulações de 3m de comprimento, que podem chegar até 18m, com altura padrão de até 3,2m. A Figura 9 representa um container para Data Center disponível no mercado.

Figura 9 – Container de exaustão a ar da empresa GIGA®



Fonte: Site do fabricante.

2.2.2.1 Sistemas de resfriamento

O principal fator para o tamanho do data center é o sistema de refrigeração. Dentro dos já citados métodos de resfriamento, citam-se três principais:

Resfriamento a ar

Nessa modalidade, é usado conjuntos de exaustores no Data Center, para fazer com que o fluxo de ar frio passe por dentro das máquinas, e que o ar quente seja expelido do outro lado. Desse jeito, o container é separado em câmara quente e câmara fria.

As vantagens dessa modalidade incluem:

- Fácil manutenção das máquinas;
- Menor custo de instalação;
- Fácil manipulação e manutenção do equipamento de resfriamento;

Porém, há certas desvantagens que devem ser levadas em conta:

- Menor eficiência de resfriamento, principalmente em locais sujeitos a temperaturas médias mais elevadas;

- Em alguns locais é necessário o uso de filtros, pois as máquinas ficam sujeitas a agentes do clima e poeira;
- Exige manutenção mecânica nos motores dos exaustores;
- O projeto de ventilação do container deve ser meticulosamente feito, caso contrário pode ocorrer muita recirculação de ar quente, atingindo de forma significativa a operação;

Imersão

Assim como é feito em inúmeras máquinas de processamento de dados, e até em computadores pessoais, o processo de imersão consiste em mergulhar o ASIC dentro de um tanque que contém um fluido dielétrico, que seja capaz de dissipar o calor de forma mais eficiente que o ar.

As vantagens desse tipo de resfriamento são:

- Maior eficiência para a operação;
- Possibilidade de realizar um *Overclocking* nas máquinas. Isto é: elevar as suas condições de funcionamento para utilizar mais potência da máquinas, sem que isso danifique o equipamento;
- Operação mais silenciosa, oferecendo mais conforto ao ambiente de trabalho;

As desvantagens da imersão podem ser resumidas em:

- Maior custo de implementação;
- Necessita de uma infraestrutura externa e espaçosa de resfriamento do fluido. Normalmente, são utilizados Dry-Coolers para essa tarefa.
- Utiliza maior consumo de água;
- Alguns ASICs mais antigos podem não ser compatíveis com essa modalidade. Isso acontece pois algumas máquinas necessitam que haja uma ventoinha conectada, o que não pode acontecer na imersão. Alguns *firmwares* podem ser implementados para simular a ventoinha;

Hydro-Cooling

A modalidade chamada de *Hydro-Cooling* utiliza máquinas especificamente projetadas para suportarem pequenos dutos de água na sua estrutura interna, fornecendo

uma melhor dispersão do calor da *Hashboard*. Essa é a modalidade mais recente a ser implementada no mercado.

Algumas vantagens dessa modalidade são:

- Assim como na imersão, permite a operação plena em maior eficiência;
- As máquinas dessa modalidade, de modo geral, são mais potentes que as outras modalidades. Por exemplo, uma ASIC modelo S21+ Hydro tem o hashrate nominal de 358 *TH/s*, com uma potência de 5370W;
- Há a possibilidade de *Overclocking*, assim como na imersão;

Porém, há também desvantagens:

- Maior custo das três modalidades;
- As máquinas tem que ser específicas para *Hydro-Cooling*. Caso contrário, deve haver uma adaptação substancial do hardware do ASIC;
- Maior consumo de água entre as três modalidades citadas;

2.2.2.2 Layout e sistemas auxiliares

Escolhido o tipo de refrigeração, é necessário um bom trabalho de layout para otimizar o espaço. Dentro do container, além das máquinas, deve-se conter também:

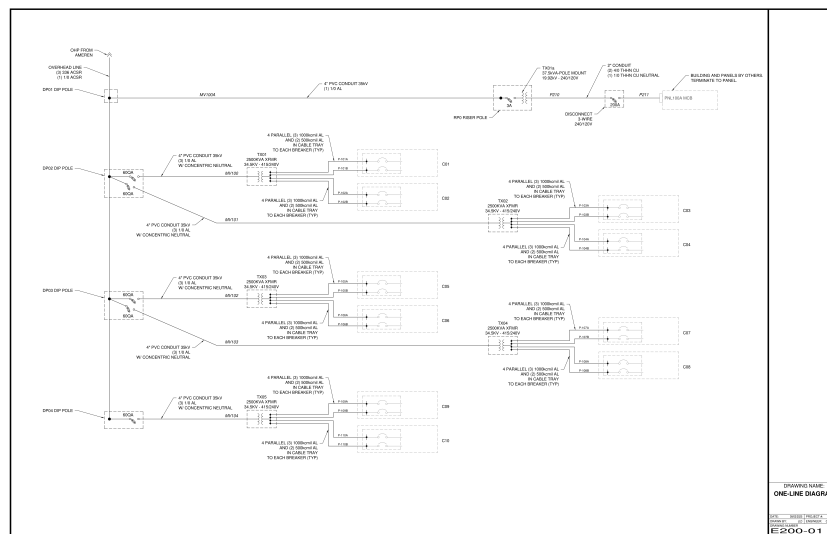
- Quadro de disjuntores e proteção elétrica;
- Sistema de rede e conexão a internet;
- Sistema de iluminação;
- Para o caso de imersão e *Hydro-Cooling*, espaço para encanamento de água;
- Para o caso de exaustão forçada, um espaço de câmara fria e câmara quente de forma que não haja recirculação de ar. Além disso, é necessário adicionar espaço para os inversores, utilizados nos motores dos exaustores;

2.3 Infraestrutura elétrica e dimensionamento

Há inúmeras maneiras de se montar um sistema de alimentação para um Data Center. Essa especificação irá depender do tipo de projeto e projeção econômica. Para efeitos de exemplo, será considerado um sistema em que o Data Center está diretamente ligado a uma fonte geradora.

Esse caso se assemelha àqueles em que o Data Center está posto para operar de maneira intermitente em um programa de resposta a demanda. O unifilar do projeto, mostrado na Figura 10, se baseia em: uma fonte geradora e/ou uma linha de transmissão, ligada em série com um transformador isolador/abaixador, o qual é ligado ao quadro.

Figura 10 – Diagrama unifilar de um projeto de Data Center para mineração de Bitcoin

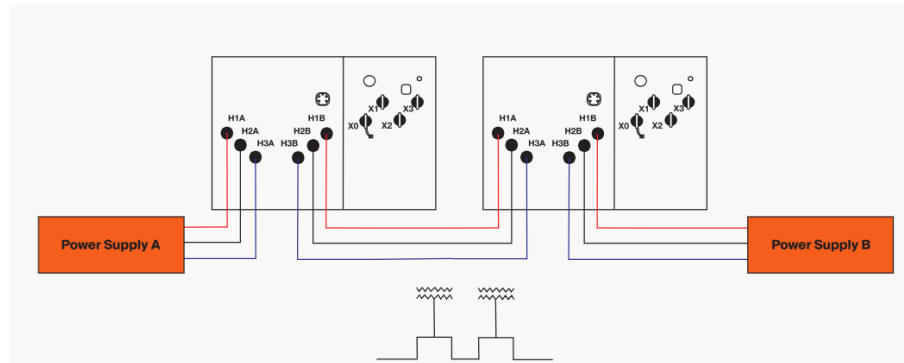


Fonte: Arthur Mining

Há casos em que o Data Center é conectado em um transformador em configuração *Loop Feed*. Nesta configuração, ilustrada na Figura 11, o lado de alta tensão dos transformadores é conectado em paralelo por meio de um circuito em anel alimentado por duas fontes independentes. Essa topologia permite que a energia chegue aos transformadores por ambos os sentidos do loop. Assim, caso uma das alimentações apresente falha — por exemplo, devido à perda da Power Supply A — o suprimento elétrico é automaticamente mantido pela outra extremidade do circuito. Em outras palavras, uma interrupção em um ponto do anel não compromete o fornecimento total, garantindo continuidade operacional.

Esse nível de redundância é particularmente relevante para instalações críticas, como data centers, hospitais, aeroportos e grandes complexos industriais, onde a indisponibilidade de energia representa risco operacional significativo. Por essa razão, arquiteturas em *Loop Feed* são amplamente adotadas em projetos que exigem elevada confiabilidade e tolerância a falhas.

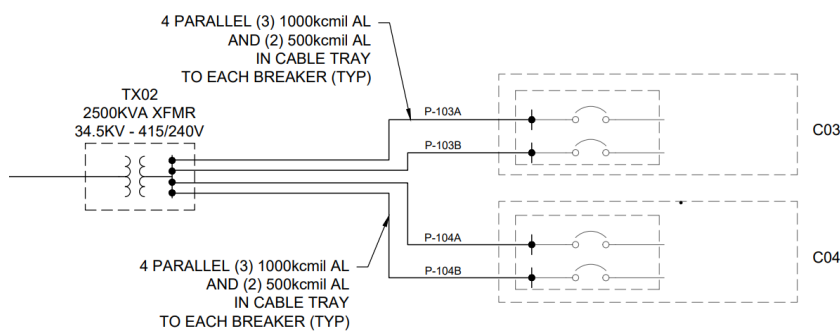
Figura 11 – Configuração de Loop Feed



Fonte: Site da Maddox Transformers.

A transformação de tensão através de transformadores pode ser em vários níveis diferentes. O projeto da Figura 12 mostra uma transformação de 34,5 kV para 415V. De maneira geral, para evitar perdas, é utilizada uma transformação Delta - Estrela aterrado. Isso se justifica pois nesta configuração não há a propagação da terceira harmônica para o lado de baixa tensão.

Figura 12 – Detalhamento da ligação de um dos containers

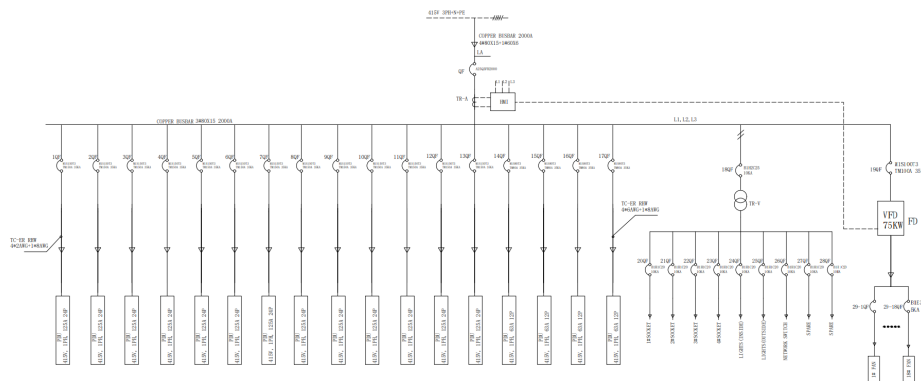


Fonte: Arthur Mining

2.3.1 Quadro e dimensionamento

Diferente de projetos de quadro tradicionais, os desenvolvidos para Data Centers precisam levar em conta que 100% da capacidade de entrega de corrente esteja sendo usada. Sendo assim, é comum encontrar disjuntores gerais acima de 1000A no barramento de 415V, necessários para suportar a corrente de alimentação requerida pelas máquinas. Na Figura 13, que mostra um projeto de alimentação interna de um Data Center, o disjuntor geral utilizado é do modelo A25Q3FH2000, da fabricante Noark. O modelo em si apresenta uma corrente nominal de operação de no máximo 2000A, com 65kA de pico máximo.

Figura 13 – Projeto Unifilar de Container de um Data Center



Fonte: Projeto da GIGA[®] Containers

Para realizar a distribuição de potência entre as máquinas de maneira organizada, são usadas as *Power Distribution Units* (PDUs). As PDUs têm como função distribuir a energia elétrica do quadro principal até cada rack ou grupo de ASICs, garantindo proteção individualizada, monitoramento em tempo real e, em alguns casos, a possibilidade de desligamento remoto. Em Data Centers de mineração, as PDUs são otimizadas para suportar densidades de potência elevadas, frequentemente acima de 10 kW por rack, e devem apresentar elevada confiabilidade mecânica e térmica devido ao regime de operação contínua.

2.4 Carga, consumo e eficiência energética

2.4.1 Eficiência Energética

Um dos parâmetros mais relevantes para avaliar a eficiência energética de um Data Center é o chamado *Power Usage Effectiveness* (PUE). Esse índice, definido pelo consórcio The Green Grid, mede a razão entre o consumo total do Data Center e o consumo efetivamente destinado aos equipamentos de TI (no caso da mineração, os ASICs). O valor ideal de PUE é 1,0, o que significaria que toda a energia consumida é destinada diretamente às máquinas, sem perdas adicionais em sistemas auxiliares.

Data Centers corporativos convencionais apresentam PUEs típicos entre 1,3 e 1,6, em função da necessidade de redundâncias, sistemas de backup e climatização de alta confiabilidade. Já em operações de mineração de Bitcoin, o uso de tecnologias como imersão ou *Hydro-Cooling* pode reduzir o PUE para valores próximos de 1,05–1,1, aumentando significativamente a competitividade econômica da operação (BOSTON CONSULTING GROUP, 2025).

2.4.2 Densidade Energética da Carga

Operações de mineração em contêiner atingem densidades substancialmente superiores às de data centers corporativos. Soluções comerciais variam de *skids* e contêineres hidro/imersão na faixa de 1,0 a 2,6 MW por módulo, abrigando tipicamente de 200 a mais de 300 ASICs, a depender do fabricante e do método de resfriamento. Por exemplo, o *ANTSPACE HK3 V6*[®] (hidro) da Bitmain comporta ~ 210 unidades das linhas S19/S21 Hydro com potência operacional na ordem de 1,03 MW (PUE $\approx 1,02\text{--}1,03$), enquanto contêineres de imersão para a família WhatsMiner suportam até ~ 320 máquinas com capacidade elétrica agregada de até 2,6 MW¹.

Para contextualizar a densidade por área, um contêiner de 20 pés (aprox. $6,06 \times 2,44$ m; $\sim 14,8$ m²) operando a 1,05 MW atinge cerca de 71 kW/m². Já um módulo de 40 pés ($\sim 12,19 \times 2,44$ m; $\sim 29,7$ m²) com 2,6 MW chega a ~ 88 kW/m², valores várias ordens acima de data centers corporativos (tipicamente 1–2 kW/m²). Esses números explicam por que arquiteturas de imersão e *hydro-cooling* dominam os projetos de alta densidade na mineração.

Em termos de contagem de máquinas, há configurações comerciais de ~ 300 ASICs para módulos de $\sim 1,0\text{--}1,9$ MW (ex.: arranjos com séries S17[®]/M20S[®]) e ~ 320 ASICs em contêineres de imersão de 2,6 MW focados nas séries M56[®]/M66[®], evidenciando que o *form factor* do contêiner pode sustentar populações acima de 300 unidades.

Essa elevada densidade energética impõe desafios específicos de engenharia, como:

- Dimensionamento preciso da infraestrutura elétrica para suportar correntes elevadas, frequentemente superiores a 1000 A por quadro geral;
- Necessidade de sistemas de refrigeração altamente eficientes, capazes de remover calor em volumes concentrados;
- Maior exigência na seleção de cabos, barramentos e conexões, que devem apresentar baixa impedância e alta capacidade térmica;

Do ponto de vista do sistema elétrico, essa concentração de potência faz com que Data Centers de mineração sejam vistos como cargas de alta intensidade e baixa dispersão geográfica, em contraste com a distribuição mais difusa de cargas convencionais. Tal característica os torna particularmente atrativos para programas de resposta da demanda, visto que pequenas ações de desligamento ou redução de consumo podem representar centenas de megawatts de alívio instantâneo para o sistema elétrico.

¹ Especificações públicas dos fabricantes e distribuidores.

2.4.3 Característica de carga vista de um sistema de energia elétrica

O consumo de um Data Center para mineração de Bitcoin é majoritariamente representado pelas ASICs. Estas, como anteriormente explicado, são um conjunto de computadores trabalhando em paralelo. Em termos de tensão e corrente, a carga do Data Center tem as seguintes características:

1. Fator de potência próximo da unidade, mas com tensão ligeiramente atrasada em relação à corrente, o que indica uma carga levemente capacitiva. Esta característica é típica em sistemas eletrônicos de potência modernos, contribuindo para menores correntes reativas e melhora nas condições operacionais da rede, especialmente sob grandes chamadas de potência;
2. Baixa distorção harmônica total. A integridade da forma de onda de corrente e tensão, comprovada pelas medições, reflete um projeto cuidadoso das fontes internas dos ASICs e do sistema elétrico do Data Center, trazendo benefícios significativos para a vida útil dos equipamentos, mitigação de perdas por aquecimento e compatibilidade eletromagnética do ambiente;
3. Capacidade de desligamento imediato. O desligamento pode ser realizado em segundos, aspecto crucial para resposta rápida à demanda e participação ativa em programas de flexibilização de carga ou emergência de rede. Este atributo diferencia fortemente a operação do Data de mineração frente a cargas industriais tradicionais, potencializando sua capacidade de atuar como recurso de apoio ao sistema elétrico em situações críticas;

Com o auxílio de dados obtidos através do medidor de energia eletrônicos de um Data Center situado nos Estados Unidos, fornecidos pela ArthurInc, pode-se analisar a natureza da carga e suas peculiaridades. As Tabelas a seguir foram tiradas desses dados, que medem a energia do DC 01 do *site* da ArthurInc nos Estados Unidos. A avaliação dos parâmetros elétricos básicos evidencia a estabilidade operacional do Data Center, com tensões médias próximas ao valor nominal e baixíssima variação entre fases. Na Tabela 1, estão apresentados os dados de tensão de fase, linha, corrente e frequência da rede do local.

Tabela 1 – Medição básica - Data Center 01

Descrição	Valor	Unidade
Tensão de fase nominal	231,022	V
Tensão de linha nominal	400,104	V
Corrente média	1618,227	A
Frequência	59,990	Hz

Fonte: Medidor de energia do Data Center.

Os indicadores de potência e energia indicados na Tabela 2 demonstram um perfil de carga estável e previsível: o fator de potência total de 0,990 indica alta linearidade da carga. Essa baixa discrepância entre potência ativa e aparente reforça a ausência de componentes indutivos ou reativos relevantes, além de não necessitar de componentes de compensação, como banco de capacitores ou reatores. O consumo acumulado de energia ativa sugere alto grau de operação ininterrupta dos servidores.

Tabela 2 – Potência e energia - Data Center 01

Descrição	Valor	Unidade
Fator de potência total	0,990	adim.
Potência ativa total	1110,827	kW
Potência aparente total	1121,843	kVA
Energia ativa importada	753610,00	kWh

Fonte: Medidor de energia do Data Center.

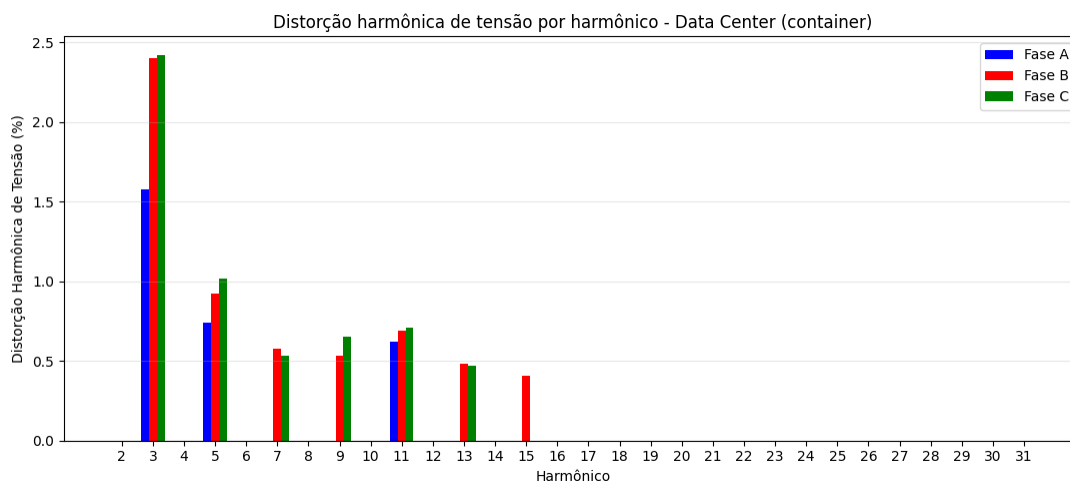
A análise espectral das harmônicas (Figuras 14 e 15) evidencia a predominância da terceira harmônica, típica de cargas eletrônicas monofásicas com retificadores. Como mostrado na Tabela 3, os baixos níveis de THD — 2,63% na tensão e 10,48% na corrente — indicam boa conformidade com padrões de qualidade de energia, reduzindo riscos como aquecimento de transformadores, interferências e penalizações tarifárias.

Tabela 3 – Distorção Harmônica Total (THD) - Data Center 01

Descrição	Valor	Unidade
THD tensão média	2,630	%
THD corrente média	10,480	%

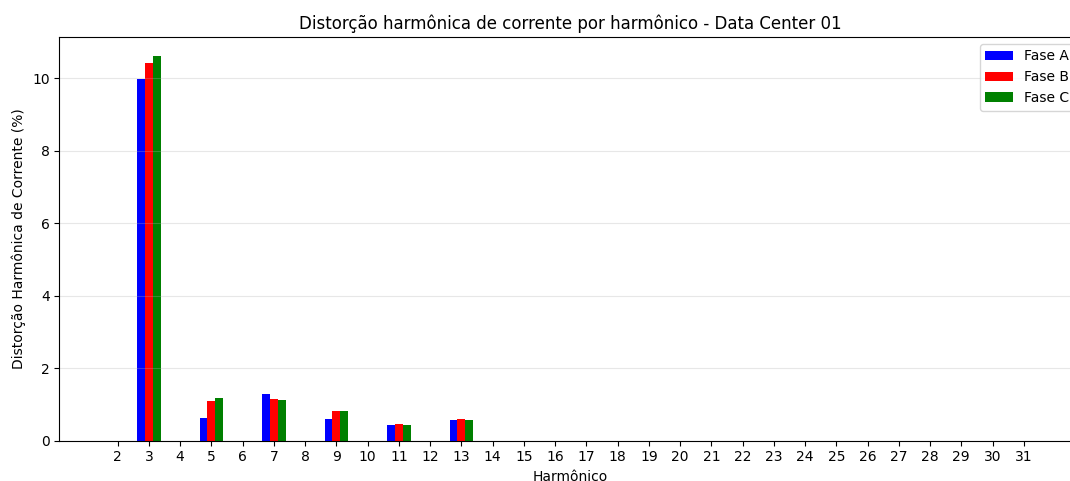
Fonte: Medidor de energia do Data Center.

Figura 14 – Harmônicas de tensão. Elaboração própria a partir de dados medidos no local.



Fonte: Medições do Data Center.

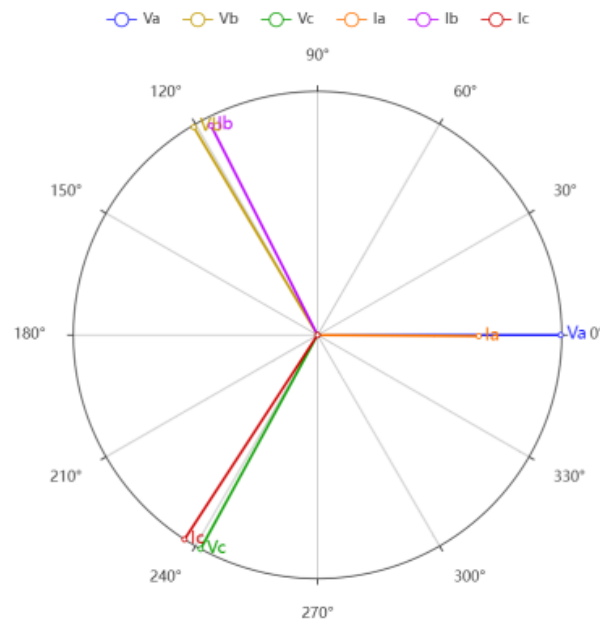
Figura 15 – Harmônicas de corrente. Elaboração própria a partir de dados medidos no local.



Fonte: Medições do Data Center.

Como indicado anteriormente, a carga de um Data Center de mineração apresenta baixa distorção e leve característica capacitiva. A Figura 16 mostra a pequena defasagem entre tensão e corrente, desejável para reduzir interferências na rede e evitar penalizações por baixo fator de potência. Os valores de fase estão apresentados na Tabela 4.

Figura 16 – Ângulos de fase de tensão e corrente - Data Center 01. Todos os ângulos têm a fase A como referência.



Fonte: Medidor de energia do Data Center 01.

Tabela 4 – Ângulos de fase de tensão e corrente - Data Center 01

Parâmetro	Fase A	Fase B	Fase C
Ângulo de fase da tensão (°)	0,000	120,700	241,400
Ângulo de fase da corrente (°)	359,600	116,900	237,000

Fonte: Medidor de energia do Data Center 01.

A Tabela 5 apresenta os níveis extremos de distorção harmônica observados nas medições. Nota-se que todas as fases exibem valores de THD de tensão compatíveis com os limites regulamentares aplicados às redes de distribuição no Brasil. De acordo com o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2023), a distorção harmônica de tensão total admissível para este tipo de instalação é de, no máximo, 10%. Os resultados obtidos situam-se abaixo desse patamar, o que indica condições adequadas de qualidade da energia, favorecendo tanto a operação dos equipamentos quanto uma eventual implementação de Data Centers no local.

Tabela 5 – Valores mínimos e máximos de distorção harmônica total - Data Center 01

Parâmetro	Mínimo (%)	Máximo (%)
THD tensão fase A	0,900	2,380
THD tensão fase B	2,290	3,180
THD tensão fase C	2,560	3,200
THD corrente fase A	0,000	14,030
THD corrente fase B	9,950	11,230
THD corrente fase C	9,980	11,150

Fonte: Medidor de energia do Data Center 01.

Por fim, a demanda máxima observada na Tabela 6 é consistente com o porte e perfil tecnológico do Data Center de mineração de Bitcoin. Os elevados valores de demanda de potência aparente e ativa evidenciam a elevada densidade computacional empregada e reforçam a importância da precisão nos processos de medição e supervisão energética.

Tabela 6 – Demanda máxima - Data Center 01

Descrição	Valor	Unidade
Demanda máxima de potência aparente	1182,500	kVA
Demanda máxima de potência ativa	1170,000	kW

Fonte: Medidor de energia do Data Center 01.

2.4.4 Atributos operacionais e comportamento dinâmico da carga

A mineração de Bitcoin, por sua natureza tecnológica e econômica, representa um tipo de carga particularmente adequada para programas de resposta da demanda e para a provisão de serviços ancilares, em grande parte devido à sua elevada flexibilidade operacional e à capacidade de variação rápida e controlada de potência. Esses atributos a distinguem tanto de outras grandes cargas industriais quanto de data centers tradicionais. Entretanto, o impacto dessa atividade sobre a estabilidade do sistema elétrico não pode ser generalizado como baixo: estudos recentes conduzidos pela *North American Electric Reliability Corporation* demonstram que grandes cargas eletrônicas — incluindo instalações de mineração e centros de dados — podem provocar efeitos significativos de tensão e frequência quando desconectadas abruptamente ou quando operam sem coordenação adequada com o operador do sistema (NERC, 2025). Por esse motivo, encontram-se em andamento iniciativas específicas para aprimorar modelos dinâmicos dessas cargas e estabelecer diretrizes de interconexão que assegurem a confiabilidade do sistema.

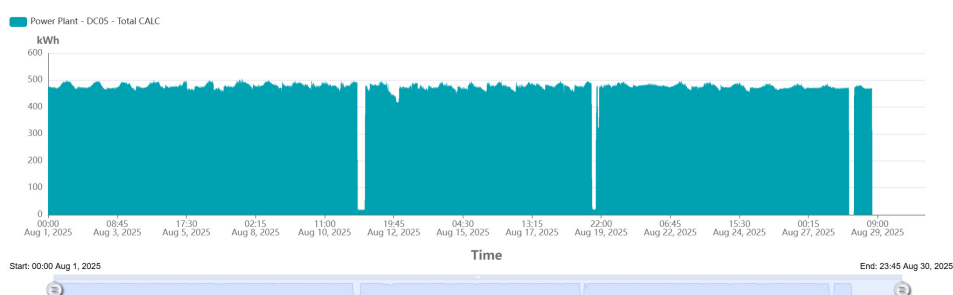
Nesse contexto, as particularidades técnicas da mineração de Bitcoin ajudam a explicar por que, apesar dos desafios identificados, essa atividade continua sendo considerada uma das cargas mais promissoras para programas de flexibilidade. Em primeiro lugar, trata-se de um processo computacional altamente paralelizado, fundamentado no

protocolo criptográfico *Proof of Work*, que pode ser interrompido e reiniciado sem perda de progresso — uma característica incomum entre grandes consumidores de energia. Isso contrasta diretamente com data centers tradicionais de *cloud computing* ou de inteligência artificial, cujas operações são sensíveis a interrupções devido ao treinamento de modelos extensos ou à execução de serviços que demandam elevado *uptime*; nessas infraestruturas, uma perda inesperada pode gerar prejuízos técnicos e financeiros substanciais (CARTER et al., 2023).

Cargas de data centers de IA, por sua vez, podem apresentar rápidas flutuações e pulsos de demanda em função de ciclos de treinamento, sincronização e salvamento de pontos de controle, resultando em elevações de potência de até 1,9 p.u. por segundo. Em contraste, data centers de mineração de Bitcoin tendem a apresentar consumo significativamente mais estável e maior sensibilidade a sinais exógenos de preços de energia, característica valiosa para participação em programas de resposta ao preço. Ademais, a adoção de *ASICs*, aliada a sistemas inteligentes de gestão, permite que a carga seja interrompida ou modulada com latências de resposta medidas em segundos ou milissegundos — uma agilidade substancialmente superior à observada na maioria das cargas industriais tradicionais, como fornos a arco elétrico ou cimenteiras (CARTER et al., 2023).

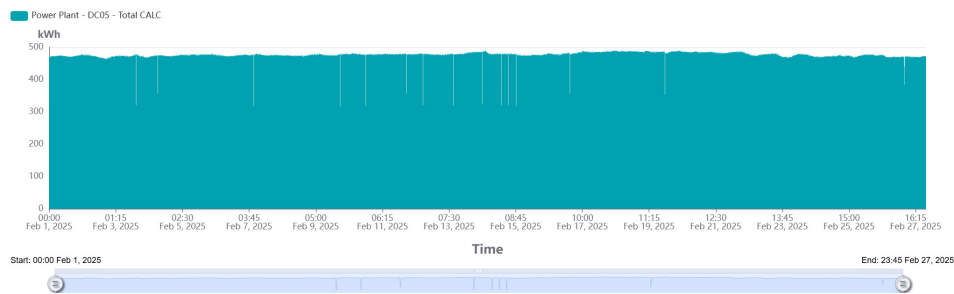
As Figuras 17 e 18 ilustram, respectivamente, o perfil de consumo de um data center submetido a desligamentos programados durante um período de maior demanda do sistema elétrico e o comportamento de consumo em uma época do ano caracterizada por maior estabilidade de demanda do sistema elétrico. A comparação entre os dois cenários evidencia como a flexibilidade operacional desses centros de processamento se manifesta em diferentes condições sistêmicas.

Figura 17 – Consumo de um container de um Data Center da empresa ArthurInc, nos Estados Unidos



Fonte: Medidores eletrônicos da ArthurInc.

Figura 18 – Consumo de um container de um Data Center da empresa ArthurInc, nos Estados Unidos



Fonte: Medidores eletrônicos da ArthurInc.

Para exemplificação, utiliza-se outro Data Center do mesmo site. Conforme a Tabela 7, esse módulo apresenta potência média de 1760 kW, demanda máxima de 2016 kW e fator de carga de 87,3%. Esse fator de carga pode ser considerado baixo para operações de mineração de Bitcoin, nas quais é comum encontrar valores de *uptime* superiores a 95%. No caso específico analisado, o Data Center provavelmente passou por desligamentos mais frequentes ao longo do período, reduzindo seu nível médio de utilização. As medições ocorreram no verão, quando a maior demanda por climatização pode reduzir levemente a eficiência energética.

Tabela 7 – Estatísticas gerais de demanda e fator de carga do Data Center DC05. Fonte: Elaboração própria.

Parâmetro	Unidade	Valor
Demanda média	kW	1.760,00
Demanda máxima	kW	2.016,00
Demanda mínima	kW	0,00
Fator de carga (Load Factor)	%	87,30

2.4.5 Desligamento e tempo de resposta

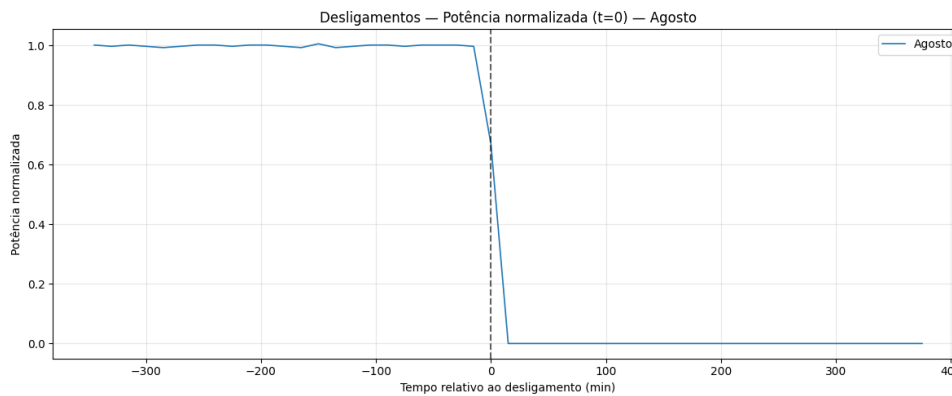
O chamado *Ramping* refere-se à capacidade de um sistema elétrico ajustar rapidamente sua geração ou consumo para compensar variações na demanda. Essa característica é especialmente relevante em redes com alta participação de fontes intermitentes, como solar e eólica, por contribuir para o controle dinâmico e a oferta de serviços ancilares (GINZBURG-GANZ; MENATI; XIE, 2024).

No caso dos data centers de mineração, as ASICs se destacam como cargas altamente flexíveis e responsivas. Além da possibilidade de modulação rápida — inclusive com resposta subsegundo — o desligamento e religamento dessas máquinas ocorre sem prejuízo à segurança ou continuidade operacional, diferentemente de outros ambientes computacionais.

Isso favorece sua participação em mercados elétricos, como programas de resposta da demanda e leilões de capacidade (CARTER et al., 2023).

A análise dos dados de desligamento dos meses de agosto, julho e fevereiro reforça essas características. A Figura 19 mostra a rampa de desligamento registrada em agosto, enquanto a Tabela 8 apresenta os valores extremos de variação de potência no mesmo período. As rampas de descida evidenciam tanto a rapidez do processo quanto sua estabilidade, já que as rampas máximas de subida e descida apresentam magnitudes semelhantes, indicando controle eficiente por parte do operador.

Figura 19 – Rampa de desligamento do Container em agosto



Fonte: Elaboração do Autor a partir de dados fornecidos pela ArthurInc.

Tabela 8 – Rampas de variação de potência do Data Center DC05 no mês de agosto. Elaboração do Autor a partir de dados fornecidos pela ArthurInc.

Parâmetro	Unidade	Valor
Maior rampa de subida	pu/min	+0,056614
Maior rampa de descida	pu/min	-0.041534

De forma semelhante, a Figura 20 mostra o perfil de desligamento registrado em julho, cujo comportamento numérico está sintetizado na Tabela 9. A comparação entre os dois meses, consolidada na Tabela 10, evidencia que as rampas de subida e descida permanecem bastante próximas — comportamento que demonstra domínio sobre a dinâmica de consumo desses sistemas e ratifica a aptidão dos data centers de mineração para serviços elétricos de resposta rápida.

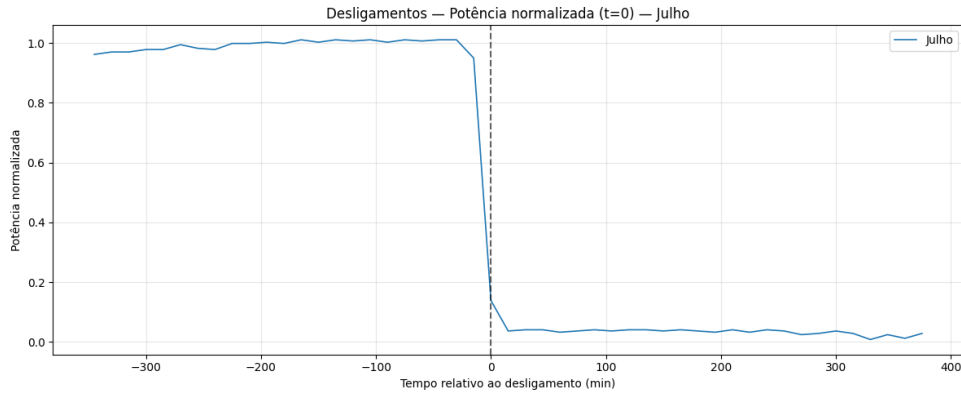


Figura 20 – Rampa de desligamento do Container em Julho. Fonte: Elaboração do Autor a partir de dados fornecidos pela ArthurInc.

Tabela 9 – Rampas de variação de potência do Data Center DC05 — Julho. Elaboração do Autor.

Parâmetro	Unidade	Valor (Julho)
Maior rampa de subida	pu/min	+0,057371
Maior rampa de descida	pu/min	-0,052855

Logo, nota-se que as rampas de subida e descida são bastante próximas, o que demonstra o controle sobre a dinâmica de consumo desses sistemas. Isso ratifica a aptidão dos data centers de mineração para serviços elétricos de resposta rápida.

Tabela 10 – Comparativo das rampas de variação de potência do Data Center DC05 — Julho e Agosto. Elaboração do Autor.

Parâmetro	Unidade	Julho	Agosto
Maior rampa de subida	pu/min	+0,057371	+0,056614
Maior rampa de descida	pu/min	-0,052855	-0,041534

2.4.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma análise abrangente sobre a estrutura, operação e características técnicas dos data centers, com ênfase especial nas operações voltadas à mineração de Bitcoin. Foram discutidos aspectos da rede do Bitcoin, dispositivos inerentes a mineração, infraestrutura física, sistemas de resfriamento, dimensionamento elétrico, eficiência energética e, principalmente, o perfil singular de carga que essas instalações representam para o sistema elétrico moderno.

Os dados e exemplos analisados demonstraram que data centers de mineração se destacam não apenas pela elevada densidade energética e eficiência operacional, mas também pela flexibilidade e rapidez de resposta a comandos de modulação e desligamento. Tais atributos os posicionam como agentes estratégicos para a integração de fontes renováveis,

a prestação de serviços ancilares e a participação em programas de resposta da demanda, contribuindo para a resiliência e a modernização do setor elétrico.

Além disso, a crescente sinergia entre o setor elétrico e o setor de tecnologia, evidenciada por iniciativas de grandes empresas geradoras de energia elétrica no Brasil e nos Estados Unidos, reforça o papel dos data centers como elementos centrais na transição energética e digital. O Sistema Interligado Nacional (SIN), marcado pela abundância de fontes renováveis e pelo interesse de empresas do setor elétrico em explorar novas oportunidades de negócio, aponta para um cenário de expansão e inovação, mas também de desafios regulatórios e de integração sistêmica.

Diante desse contexto, torna-se fundamental compreender como o ambiente regulatório pode influenciar — positiva ou negativamente — o desenvolvimento sustentável dos data centers e sua inserção no sistema elétrico. O próximo capítulo, portanto, abordará em detalhes a revisão do ambiente regulatório nos Estados Unidos e no Brasil, analisando as principais normas, incentivos, barreiras e tendências que moldam o futuro desse setor estratégico.

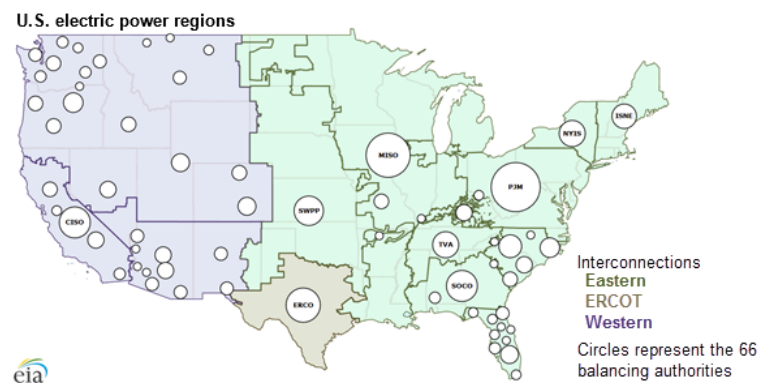
3 Arcabouço regulatório nos EUA e no Brasil

Será apresentado uma revisão bibliográfica do arcabouço regulatório dos Estados Unidos e, posteriormente, do Brasil. Servirá de referência os EUA, por sua explorada competitividade no mercado de Data Centers, em específico na região do Texas, em que há uma alta penetração de recursos intermitentes como Data Centers, e a ampla utilização em programas de serviços ancilares.

3.1 Aspectos gerais da regulação de mercados de energia elétrica nos Estados Unidos da América

O atual sistema de energia elétrica dos EUA é bem diferente do que é visto no Brasil. Ao contrário do sistema interligado que é o SIN, a infraestrutura de geração e transmissão nos EUA é dividida em três subáreas, como mostra a Figura 21: A *Western Interconnect*, *Eastern Interconnect* e a *Texas Interconnect*.

Figura 21 – Interconexões dos Estados Unidos



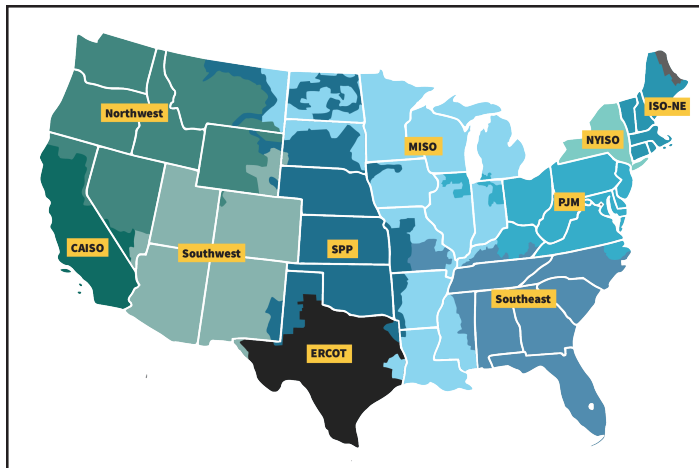
Fonte: US Energy Information Administration

Em 1977, houve a fundação da FERC (Federal Energy Regulatory Commission), que regulava a transmissão, geração e comercialização através das fronteiras dos Estados. O único Estado que não estava sob a jurisdição da FERC era o Texas, que fez a sua própria comissão reguladora, a ERCOT (Energy Reliability Council of Texas).

Em 1990, as chamadas *utilities* se uniram para formar os ISOs (*Independent System Operators*), que receberam aprovação da FERC para operar de maneira autorregulada e compartilhar a responsabilidade pela transmissão de energia elétrica. Atualmente, existem

nove ISOs, sendo sete deles nos Estados Unidos — California Independent System Operator (CAISO), Midcontinent Independent System Operator (MISO), New York Independent System Operator (NYISO), ISO New England (ISO-NE), PJM Interconnection (PJM), Southwest Power Pool (SPP) e Electric Reliability Council of Texas (ERCOT) — e dois no Canadá — Alberta Electric System Operator (AESO) e Independent Electric System Operator (IESO). A disposição geográfica dessas entidades pode ser visualizada na Figura 22, que ilustra a abrangência territorial de cada operador.

Figura 22 – Operadores Independentes nos EUA



Fonte: Federal Energy Regulatory Commission

3.2 Inserção de Data Centers no âmbito da ERCOT

O setor elétrico dos Estados Unidos é organizado em dois níveis principais de operação: o mercado atacadista (*wholesale*) e o mercado varejista (*retail*). Cada um deles pode ser estruturado sob regras tradicionalmente reguladas ou em formato competitivo, dependendo das escolhas regulatórias adotadas por cada estado (EPA, 2024).

Mercado Atacadista (*Wholesale*)

O mercado atacadista compreende as transações de energia realizadas entre geradores, comercializadores e utilities antes que a eletricidade seja entregue ao consumidor final. De acordo com a EPA (EPA, 2024), essa camada do setor é caracterizada por dois modelos institucionais:

- **Áreas tradicionalmente reguladas:** predominantes nas regiões em cinza do mapa, onde utilities verticalmente integradas administram todo o fluxo de energia — desde a geração até a entrega aos consumidores. Nesses locais, a operação do sistema e os investimentos permanecem concentrados sob a mesma entidade.

- **Mercados reestruturados:** presentes sobretudo no Nordeste, Meio-Oeste, Texas e Califórnia. Nesses sistemas, a operação do grid é realizada por **Independent System Operators (ISOs)** ou **Regional Transmission Organizations (RTOs)**, que coordenam o despacho da geração por meio de mecanismos competitivos. Assim, produtores independentes podem vender energia no atacado, reduzindo a participação das utilities na função de geração.

Mercado Varejista (*Retail*)

O mercado varejista define como a energia chega ao consumidor final e é regulado exclusivamente pelos estados. Existem duas configurações predominantes (EPA, 2024):

- **Mercado varejista regulado:** consumidores não têm liberdade de escolher seu fornecedor. Toda a energia é adquirida da utility local, que também é responsável pela infraestrutura e pelo planejamento do atendimento. Esse modelo predomina no Sudeste, Noroeste e em parte significativa do Oeste.
- **Mercado varejista competitivo (*retail choice*):** adotado em diversos estados, onde os consumidores podem contratar energia de diferentes *Retail Electricity Providers*. A distribuição continua regulada, mas a geração é aberta à concorrência, permitindo contratos diferenciados, inclusive voltados a fontes renováveis ou produtos customizados.

A coexistência desses modelos atacadistas e varejistas resulta em um arranjo híbrido e altamente variável entre os estados, refletindo prioridades locais de política energética, estrutura institucional e grau desejado de competição no fornecimento de energia elétrica.

3.2.1 Participantes de Mercado - ERCOT

O ERCOT é um dos operadores independentes dos EUA que aplica o modelo de competição livre. Nele, há uma hierarquia de participantes do mercado, os quais realizam toda a burocracia e regulação do Estado. Esses participantes do mercado estão descritos a seguir:

3.2.1.1 Qualified Scheduling Entity (QSE)

São entidades qualificadas pela ERCOT para submeter cronogramas balanceados de energia elétrica, oferecer serviços ancilares, realizar liquidações financeiras com a ERCOT, entre outras responsabilidades de agendamento.

3.2.1.2 Load Serving Entity (LSE) - Entidade Fornecedora de Carga

São responsáveis por fornecer energia elétrica a consumidores finais e clientes do mercado atacadista de energia elétrica.

As LSEs se dividem em duas subentidades:

1. **Competitive Retailers (CRs)**, que atuam em áreas com mercado competitivo e incluem:
 - **Retail Electric Providers (REPs)**: Fornecedores de energia no varejo que contratam com Qualified Scheduling Entities (QSEs) para serviços de agendamento;
 - **Municipally Owned Utilities (MOUs)** e **Electric Cooperatives (ECs)**, que optam por oferecer escolha de compra de energia elétrica ao consumidor final;
2. **Non-Opt-In Entities (NOIEs)**: MOUs e ECs que não participam do mercado competitivo e não oferecem escolha ao consumidor final.

3.2.1.3 Resource Entity

As entidades de recursos (REs) são responsáveis por possuir ou controlar recursos de geração (como usinas) ou recursos de carga (capazes de reduzir consumo sob demanda). Elas participam do mercado de energia ao fornecer capacidade de geração ou redução/aumento de carga. Elas operam através de QSEs para comunicar cronogramas e ofertas de energia.

3.2.1.4 Transmission and/or Distribution Service Provider (TDSP)

TDSPs são responsáveis por: operar a infraestrutura de transmissão e distribuição de eletricidade, realizar leituras de medidores e fornecer informações de consumo e gerenciar o processo de troca de fornecedores para clientes finais.

3.2.1.5 Congestion Revenue Rights Account Holder (CRRAH)

CRRAHs são entidades que detêm Congestion Revenue Rights (CRRs), instrumentos financeiros que compensam ou cobram por congestionamentos na rede de transmissão, participam de leilões anuais e mensais de CRRs organizados pela ERCOT e podem negociar CRRs bilateralmente. Eles são, juntamente com os QSEs, as únicas entidades que realizam liquidações financeiras diretas com a ERCOT.

Em resumo:

- LSEs fornecem energia aos consumidores e são representadas por QSEs para agendamento e liquidação;

- REs geram ou controlam recursos de energia e também operam através de QSEs;
- TDSPs garantem a entrega física da eletricidade e fornecem dados essenciais para a ERCOT;
- CRRAs gerenciam riscos financeiros associados ao congestionamento da rede;

3.2.2 Programas de resposta da demanda no ambiente regulatório do ERCOT

3.2.2.1 Estrutura e Funcionamento Geral

O *Electric Reliability Council of Texas* (ERCOT) define resposta da demanda (*Demand Response* — DR) como a capacidade de consumidores reduzirem ou deslocarem seu consumo elétrico em resposta a sinais do operador do sistema — geralmente associados à manutenção da confiabilidade — ou às condições de preço do mercado atacadista. Os programas de DR existentes em ERCOT são estruturados para prover suporte à estabilidade da rede durante períodos de estresse, contribuindo para a redução da demanda, mitigação de picos e diminuição do acionamento de recursos mais caros ou mais intensivos em emissões (ERCOT, 2024a).

Os principais programas utilizados por ERCOT podem ser agrupados em três categorias centrais. O *Emergency Response Service* (ERS) oferece redução de carga contratada para eventos de emergência; o *Responsive Reserve Service* (RRS) corresponde à reserva rápida acionada automaticamente por relés de frequência; e os *Controllable Load Resources* (CLR) consistem em cargas despacháveis que participam do mercado de energia em tempo real, operando de forma análoga a “geradores negativos”. Além desses, há programas conduzidos por distribuidoras (TDSP Load Management) e mecanismos voluntários de resposta ao preço (*Price-Responsive Load*). A Tabela 11 resume os programas mais relevantes, diferenciando-os pelo agente de acionamento, escala de tempo e características operativas.

Tabela 11 – Resumo dos principais programas de resposta da demanda no ERCOT.

Programa	Agente de acionamento	Escala de tempo	de	Características
ERS	ERCOT (manual)	10–30 min		Acionado exclusivamente em situações de emergência. Redução de carga mediante notificação. Contratação por leilões trimestrais.
RRS	Automático (relé de frequência)	Ciclos a segundos		Corte automático quando a frequência cai. Atua como reserva rápida. Contratado como serviço ancilar.
CLR	ERCOT via SCED	Minutos		Carga despachável no mercado de energia, funcionando como “gerador negativo”. Requer telemetria e capacidade de controle contínuo.
TDSP Load Management	Distribuidoras (TDSPs)	Minutos		Programas sazonais de redução voluntária da demanda em eventos regionais, com incentivos tarifários.
Price-Responsive Load	Consumidor	Resposta a preços	a	Ajuste voluntário conforme o preço do mercado atacadista. Não é contratado pelo operador.

Os programas de DR interagem diretamente com o mercado atacadista de energia, sobretudo no âmbito dos serviços ancilares e das reservas operativas. A participação ocorre por meio das *Qualified Scheduling Entities* (QSEs), responsáveis por submeter ofertas de redução de carga, telemetria e comprovação de desempenho (ERCOT, 2024a).

Além dos programas voluntários e de mercado, o ambiente regulatório texano inclui mecanismos obrigatórios associados à confiabilidade. Um exemplo é o *Senate Bill 6* (2025), que estabelece a instalação de dispositivos automáticos de desligamento para grandes consumidores industriais acima de 75 MW, reforçando a necessidade de integração segura das cargas de grande porte ao sistema elétrico (TEXAS LEGISLATURE, 2025).

3.2.2.2 Participação e Elegibilidade

Os programas de DR do ERCOT são abertos as seguintes tipos de participantes:

- Grandes consumidores industriais e comerciais com capacidade de resposta rápida;
- Agregadores de carga que reúnem pequenas unidades para formar um recurso de DR qualificado;
- Concessionárias que operam programas regionais com seus consumidores;

Cada programa estabelece critérios técnicos específicos. Por exemplo, o ERS exige capacidade de redução de no mínimo 100 kW com medição intervalar de 15 minutos. O RRS demanda instalação de telemetria em tempo real e relés automáticos. Participantes devem estar integrados a uma QSE e comprovar capacidade de resposta através de testes regulares (ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS, 2024; ERCOT, 2024a).

3.2.2.3 Mecanismos de Compensação e Incentivos

Os mecanismos de remuneração variam conforme o programa:

- **ERS:** os participantes recebem pagamento com base em leilões por capacidade de carga reduzível. O valor depende do preço de liquidação por MWh e dos fatores de desempenho e disponibilidade (ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS, 2024);
- **RRS:** remuneração anual por capacidade comprometida, com valores superiores a US\$ 85.000 por MW-ano em alguns casos. O pagamento é feito mesmo que a carga não seja chamada a ser interrompida efetivamente (ERCOT, 2024a);
- **Resposta à Preço:** não há pagamento direto, mas os consumidores se beneficiam da redução de custos com energia em momentos de preços elevados;
- **Programas das concessionárias:** oferecem créditos tarifários ou pagamentos fixos aos participantes (PUBLIC UTILITY COMMISSION OF TEXAS, 2023);

Incentivos adicionais podem incluir bonificações por desempenho, isenção de encargos ou prioridade em programas de confiabilidade.

3.2.2.4 Aspectos Regulatórios e Conformidade

Os programas de DR são regulados pelos *Nodal Protocols* do ERCOT e pelas diretrizes da *Public Utility Commission of Texas* (PUCT). Cada recurso de carga precisa estar devidamente registrado e em conformidade com as exigências de medição, telemetria e testes operacionais (ERCOT, 2024a; ERCOT, 2024b).

O monitoramento é feito em tempo real por meio de dados de medição e relatórios de desempenho submetidos pelas QSEs. Penalidades incluem a perda de pagamentos, exclusão do programa e eventual responsabilização do QSE por desequilíbrio de mercado.

Algumas mudanças recentes, como a ampliação da participação de recursos distribuídos (via projeto ADER), refletem a evolução regulatória em direção a uma maior integração da demanda (ERCOT, 2024b).

3.2.2.5 Impacto e Desafios

Os programas de DR têm contribuído para a confiabilidade do sistema elétrico texano, especialmente em eventos extremos. Em 2024, o ERS alcançou mais de 1.100 MW médios contratados por hora, mostrando crescimento e relevância (ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS, 2024). Entretanto, os seguintes desafios persistem:

- Incerteza na resposta efetiva de cargas flexíveis;
- Complexidade na verificação de desempenho;
- Adesão limitada de consumidores;

A ERCOT tem respondido com melhorias técnicas (ex: requisitos de telemetria) e revisões de mercado para permitir maior previsibilidade e segurança na utilização de recursos de DR (ERCOT, 2024a).

3.3 O ambiente regulatório no Brasil

3.3.1 Programas de resposta da demanda no Brasil

A resposta da demanda (DR) tem se mostrado uma ferramenta promissora no contexto brasileiro, especialmente diante da crescente necessidade de garantir segurança energética, eficiência no uso da infraestrutura elétrica e integração de recursos energéticos distribuídos. Embora sua adoção tenha ocorrido de forma mais lenta em comparação com outros mercados como o norte-americano, observa-se uma evolução significativa nas políticas públicas e regulatórias voltadas à inserção da DR no Sistema Interligado Nacional (SIN) nos últimos anos (MOURA, 2023).

Alguns dos principais marcos e iniciativas serão citadas em seguida, para explicar de forma mais clara o contexto em que se encontra o arcabouço regulatório do mercado de energia brasileiro.

3.3.2 Evolução do marco regulatório brasileiro

No Brasil, a inserção da resposta da demanda como recurso de flexibilidade no setor elétrico é relativamente recente. O primeiro movimento institucional relevante ocorreu com a publicação da **Portaria MME nº 44/2015**, que autorizou a realização de projetos-piloto de DR no país (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015). Essa iniciativa buscou avaliar o potencial técnico e econômico da redução voluntária da carga por consumidores, em especial nas regiões Sudeste e Centro-Oeste.

Em 2017, a **Resolução Normativa ANEEL n° 792** estabeleceu diretrizes para projetos de eficiência energética com participação de consumidores por meio de DR, marcando o início da regulamentação mais clara sobre o tema (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017). No entanto, foi apenas a partir de 2021 que a ANEEL publicou a **Resolução Normativa n° 954**, que passou a considerar formalmente os recursos de DR no planejamento e na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Essa norma possibilitou a criação de programas com maior robustez jurídica e operacional.

3.3.3 Projetos-piloto e experiências práticas

A experiência prática mais significativa ocorreu entre 2015 e 2020, com a condução de um projeto-piloto coordenado pela ANEEL, CCEE e ONS. O projeto avaliou, em caráter experimental, a viabilidade da DR em consumidores livres e especiais no ambiente de contratação livre (ACL), sendo concluído em 2021 com a publicação de um relatório técnico detalhado (CCEE; ONS; ANEEL, 2021).

Esse piloto testou o modelo de “oferta de carga evitada”, no qual os consumidores eram remunerados por sua disponibilidade para reduzir a carga em situações de escassez energética. Segundo os resultados, os principais desafios envolveram barreiras tecnológicas, incertezas quanto ao retorno financeiro e a complexidade dos contratos.

3.3.4 Programa de Resposta Voluntária à Demanda (2022)

Durante a crise hídrica de 2021–2022, o governo brasileiro instituiu, por meio da **Portaria MME n° 44/2022**, o Programa de Resposta Voluntária da Demanda (PRVD) como medida emergencial (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022). O programa ofereceu remuneração aos consumidores que reduzissem voluntariamente seu consumo durante os horários de pico, ajudando a aliviar a pressão sobre o sistema.

Essa experiência, embora pontual, evidenciou o papel estratégico da DR como alternativa à geração emergencial (termelétricas) e consolidou o aprendizado institucional em relação aos mecanismos de remuneração e à confiabilidade da resposta dos consumidores.

O desafio da flexibilidade no SIN se torna ainda mais evidente quando se observa a experiência de outros sistemas elétricos com elevada participação de fontes intermitentes. O relatório do Itaú BBA (2024) destaca que, em mercados como o sistema de energia californiano (CAISO) e o texano (ERCOT), o avanço das energias solar e eólica resultou em acentuadas variações intradiárias de carga — fenômeno conhecido como “curva do pato” — que intensificaram a necessidade de programas de resposta da demanda e de mecanismos de despacho flexível (ITAÚ BBA, 2024). Assim como o PRVD busca prover essa adaptabilidade no contexto brasileiro, tais iniciativas têm se mostrado essenciais para

evitar desligamentos forçados e garantir a estabilidade do sistema.

3.3.5 Avanços recentes dos programas de resposta da demanda no Brasil (2024–2025)

A partir de 2023, e especialmente nos anos de 2024 e 2025, o Brasil passou por um processo de consolidação institucional da resposta da demanda, transformando-a de um mecanismo episódico em um instrumento permanente de gestão da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A CCEE e o ONS passaram a operar ciclos regulares de chamada de carga, integrando a DR ao despacho eletroenergético e ampliando o número de consumidores e agregadores habilitados (CCEE, 2024). Em 2024, o programa registrou seu maior nível de participação desde a criação: ao longo daquele ano, as reduções efetivas de carga alcançaram, em média, 237 MW médios, distribuídos em 69 dias acionados pelo ONS, contribuindo para evitar o despacho fora da ordem de mérito de usinas termelétricas (CCEE, 2024).

Paralelamente, a regulamentação evoluiu com a introdução do *Produto Disponibilidade*, modalidade na qual os participantes são remunerados pela simples capacidade de reduzir sua carga quando acionados pelo operador. Essa inovação fortaleceu o papel da demanda como recurso modular e previsível, permitindo ao ONS contratá-la de forma análoga à reserva de potência. O primeiro leilão desse produto, realizado em 2024, sinalizou interesse relevante do setor, mas foi o segundo certame, em 2025, que confirmou a maturação do mecanismo: foram contratados 229 MW de capacidade flexível, mais que o dobro do volume do leilão anterior, com deságio superior a 30% em relação ao preço-teto estabelecido (EIXOS, 2025).

Esses resultados refletem uma mudança estrutural no papel da demanda dentro do SIN, aproximando o Brasil de práticas já consolidadas em mercados como CAISO, PJM e ERCOT. A abertura regulatória promovida pela ANEEL — especialmente após a REN nº 954/2021 — e a adoção de estruturas de mercado pela CCEE têm permitido a participação não apenas de grandes consumidores eletrointensivos, mas também de agregadores de carga, ampliando o conjunto de recursos distribuídos capazes de ofertar flexibilidade ao sistema (ONS, 2024). Essa expansão normativa e operacional é particularmente relevante diante da crescente participação de fontes intermitentes na matriz elétrica, como a geração solar fotovoltaica distribuída e centralizada, que intensificam a necessidade de mecanismos rápidos e economicamente eficientes para suavizar rampas intradiárias e mitigar riscos de déficit de potência.

Assim, o período 2024–2025 marca o início de uma fase de institucionalização da resposta da demanda no Brasil: não mais vista como solução emergencial, mas como componente estratégico da segurança energética, do planejamento da operação e da

transição para um sistema elétrico mais renovável e flexível.

3.3.6 Desafios e perspectivas

Apesar dos avanços recentes e do crescente amadurecimento institucional da resposta da demanda no período de 2024–2025, a participação efetiva desse recurso no SIN ainda permanece limitada. Ainda barreiras estruturais relacionadas à ausência de mecanismos de precificação plenamente consolidados, à baixa digitalização e automação das cargas e à elevada concentração do consumo em poucos agentes no Ambiente de Contratação Livre (ACL). Tais desafios continuam válidos no contexto atual e ajudam a explicar por que, mesmo com a ampliação das oportunidades regulatórias, o potencial total da DR ainda está longe de ser plenamente explorado (PIMENTA; DIAS, 2020).

Esse cenário torna-se mais complexo com a chegada de novas cargas eletrointensivas, como grandes Data Centers e plantas de hidrogênio verde via eletrólise, cuja expansão acelera a necessidade de flexibilidade sistêmica. O crescimento da infraestrutura de processamento de dados no país, impulsionado pela adoção massiva de aplicações de inteligência artificial, ilustra essa tendência: até junho de 2024, aproximadamente 2,5 GW de solicitações de acesso à Rede Básica estavam em análise, com implantação prevista até 2037. Em resposta a essa dinâmica, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) passou a direcionar esforços específicos de planejamento para as regiões com maior concentração desses empreendimentos, reconhecendo seus potenciais impactos sobre a operação e a expansão do sistema (EPE, 2024).

Ainda assim, as perspectivas para a expansão da resposta da demanda são favoráveis. A consolidação do mercado de capacidade, o avanço das redes inteligentes (*smart grids*) e a modernização regulatória em curso — incluindo as discussões sobre a reforma do setor elétrico — tendem a ampliar o espaço para a participação ativa do lado da demanda. A integração sistemática das experiências internacionais bem-sucedidas, aliada à adaptação desses modelos às especificidades do SIN, pode fortalecer o papel da DR como recurso estratégico para garantir flexibilidade, modicidade tarifária e confiabilidade ao sistema elétrico brasileiro.

4 Avaliação de potenciais efeitos de cargas flexíveis no SIN

O presente capítulo irá apresentar um apanhado geral do Sistema Interligado Nacional (SIN), com suas características de geração e carga atuais. Em seguida, será apresentado como que as grandes cargas flexíveis, como os Data Centers, podem ser utilizados para contribuir com a modulação do perfil de carga do sistema.

4.1 O perfil de carga no SIN

A matriz de geração de energia elétrica brasileira é uma das mais renováveis do mundo, como mostra a Tabela 11. De acordo com o Balanço Energético Nacional, relatório anual da EPE (Empresa de pesquisa energética), a participação de renováveis no SIN ficou em 88,2% no ano de 2024. Em relação as fontes, a participação da geração hidrelétrica apresentou pequena queda no ano de 2024, como resultado do aumento do uso de fontes como solar, eólica e gás natural.

O mesmo levantamento aponta que, no lado da demanda, cerca de 31,7% da carga total do sistema provém do setor industrial, perdendo apenas para o setor de transportes (33,2%). O consumo de energia na indústria, além de apresentar 1,4% de crescimento entre 2023 e 2024, teve 64,4% de energia renováveis em sua matriz energética. a Tabela 12 mostra a expressividade do crescimento de fontes intermitentes como solar e eólica

Tabela 12 – Geração de energia elétrica no Brasil por fonte – 2023 e 2024. Elaboração própria a partir de dados do BEN 2025.

Fonte (GWh)	2023	2024	$\Delta\%$ 24/23
Hidrelétrica	425.996	421.799	-1,0%
Gás Natural	38.589	47.792	23,9%
Eólica	95.801	107.654	12,4%
Biomassa	54.210	58.027	7,0%
Nuclear	14.504	15.767	8,7%
Carvão Vapor	8.770	10.247	16,8%
Derivados de Petróleo	5.686	5.960	4,8%
Solar Fotovoltaica	50.633	70.665	39,6%
Outras	13.932	13.425	-3,6%
Geração Total	708.119	751.335	6,1%

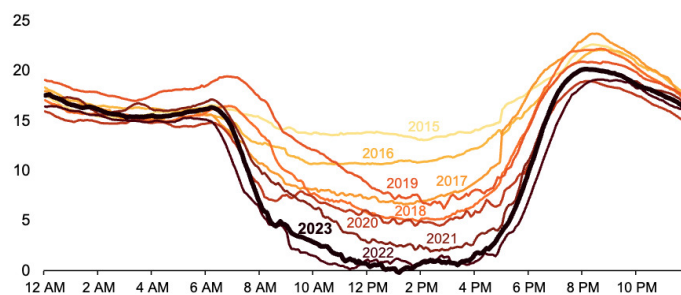
4.2 A Curva do Pato

Embora essa transição traga benefícios ambientais, ela também introduz desafios técnicos complexos, principalmente relacionados à intermitência e à impossibilidade de despacho controlado dessas fontes.

Ao longo do tempo, foi observado um fenômeno que foi posteriormente chamado de "Curva do Pato" (*Duck Curve*). Observada pela primeira vez em 2013 no sistema elétrico da Califórnia, hoje ela é vista frequentemente em sistemas com forte penetração solar. Durante o período da manhã, observa-se uma elevação gradual da carga, acompanhada pela entrada progressiva da geração solar. No início da tarde, a produção fotovoltaica atinge seu ponto máximo, ocasionando uma redução acentuada da carga líquida — fenômeno conhecido como a "barriga do pato". Posteriormente, no final da tarde, a queda da geração solar coincide com o aumento da demanda, configurando o chamado "pescoço do pato", caracterizado por uma rampa íngreme que exige rápida resposta do sistema elétrico. Essa dinâmica acarreta dois riscos principais: i) excesso de geração em determinados momentos, potencialmente levando à instabilidade do sistema e à necessidade de desligamento de usinas; e ii) necessidade de *ramping*, que aumentam os custos operacionais e prejudicam a operação de fontes de energia que não comportam rápida capacidade de geração.

A Figura 23 mostra que esta curva não está apenas presente, como ela vem se agravando. A "barriga" do pato está a cada ano se tornando mais profunda, chegando a ser chamada de "*Canyon Curve*".

Figura 23 – A “curva do pato” no sistema da Califórnia (CAISO). Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) com base em dados do operador californiano.



Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) com base em dados do operador californiano.

No Brasil, um desligamento (ou *curtailment*) é descrito como a "restrição forçada da geração de energia, quando a produção supera a capacidade de transmissão do sistema elétrico ou a necessidade de consumo demandado pela sociedade". O ONS categoriza os curtailments em três tipos (ONS, 2025):

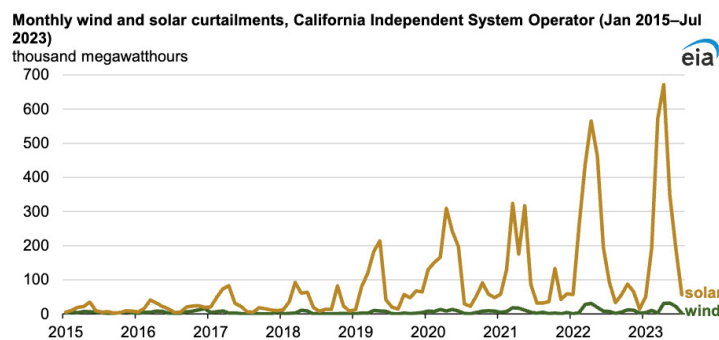
1. Disponibilidade Externa (REL): Restrições decorrentes da indisponibilidade de

equipamentos externos à usina, como falhas em linhas de transmissão ou equipamentos em subestações;

2. Confiabilidade elétrica (CNF): Restrições causadas pela insuficiência da rede de transmissão para escoar toda a energia gerada, mesmo com a infraestrutura em pleno funcionamento;
3. Razões energéticas (ENE): Restrições que surgem quando a oferta de energia excede a demanda, resultando em um excedente no balanço energético;

Esse tipo de restrição — em crescimento contínuo, como ilustrado na Figura 24 — geram perdas financeiras relevantes aos geradores e representam desperdício de energia. Em escala global, o problema também é significativo: somente em 2021, nos Estados Unidos, cerca de 15 TWh de geração eólica e solar foram submetidos a curtailment, resultando em perda estimada de 610 milhões de dólares, energia suficiente para abastecer aproximadamente 1,3 milhão de residências ao longo de um ano (ITAU BBA, 2024).

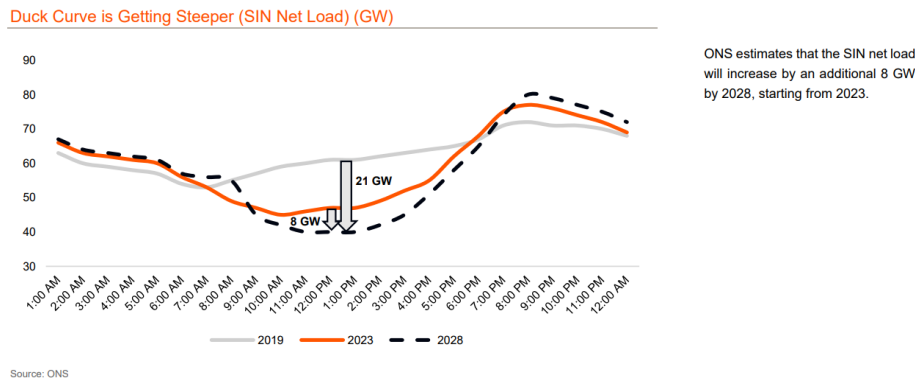
Figura 24 – Desligamento de fontes solares e eólicas no grid da Califórnia ao longo dos anos. Fonte: Dados abertos da CAISO.



Fonte: Dados abertos da CAISO.

O ONS já traz estimativas do impacto da curva do pato no SIN. Com o crescimento das fontes renováveis intermitentes, o efeito da ‘Duck Curve’ deve se intensificar ao longo do tempo, resultando em maior volatilidade intradiária de geração. A figura 25 mostra a estimativa do ONS de que o valor mínimo da carga líquida do SIN aprofundar-se-á em mais 8 GW até 2028, exigindo rampas mais rápidas de outras usinas durante o pico da noite e desligamentos no meio do dia quando há excesso de energia (ITAU BBA, 2024).

Figura 25 – Estimativas da curva do pato no SIN. Fonte: ONS



Fonte: ONS

Dados do ONS indicam que, apenas entre abril e agosto de 2024, o Nordeste — especialmente os estados do Rio Grande do Norte e Ceará — apresentou curtailment médio de até 28% na geração solar e 17% na geração eólica. Esses números evidenciam que o fenômeno da “curva do pato” já não é apenas uma abstração teórica, mas um fator operacional concreto no sistema elétrico brasileiro (ITAU BBA, 2024).

Assim, o Brasil reproduz, em escala crescente, a mesma trajetória de sistemas como o californiano (CAISO), onde o aumento da penetração solar gerou curtailments sucessivos e a necessidade de incorporar soluções de flexibilidade, como armazenamento em baterias, resposta da demanda e despacho inteligente. No caso brasileiro, a diferença é que o efeito tem se manifestado de maneira mais intensa no Nordeste, em razão da combinação entre alta produção renovável e limitações na capacidade de transmissão para o Sudeste, reforçando o paralelo direto com os estágios mais críticos da curva do pato observados nos mercados internacionais.

4.3 O uso de cargas flexíveis em períodos de excedentes energéticos

A integração da mineração de Bitcoin ao uso de fontes intermitentes de energia oferece uma oportunidade de otimização de recursos para o mercado de renováveis. Introduzir esse tipo de consumidor, que é um Data Center, na rede tradicional de energia pode mitigar os efeitos do curtailment na receita de fontes de energia subutilizadas. Data Centers utilizados para mineração de Bitcoin estarão disponíveis para consumir essa energia que seria desperdiçada (CARTER et al., 2023).

O resultado esperado é a possibilidade do achatamento da curva do pato, em que ao invés de realizar cortes de geração quando temos sobre-oferta de energia, são utilizados os Data Centers diretamente ligados nas plantas de geração, para que o potencial de

energia produzido possa ser consumido. Além disso, o problema de *ramping* também seria minimizado. O Data Center absorveria o impacto da curva do pato no horário de pico e reduziria seu consumo após isso, estando disponível para desligamentos com de uma compensação financeira através de um programa de resposta a demanda.

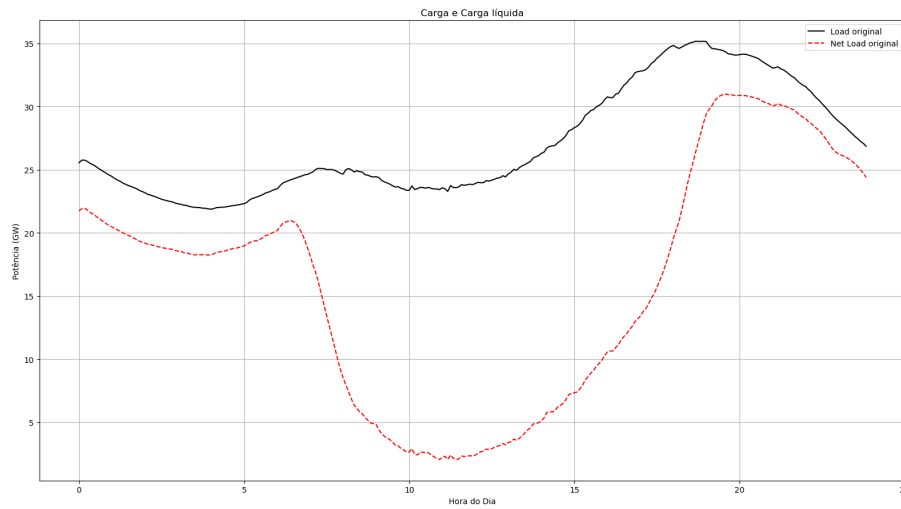
O custo de oportunidade de um minerador que interrompe sua operação é relativamente baixo, pois a única perda é a chance de receber a recompensa de bloco naquele instante, sem prejuízos técnicos ao equipamento ou ao processo. Essa natureza intrínseca do trabalho computacional da mineração a torna uma candidata ideal para a provisão de flexibilidade, oferecendo um perfil de carga que pode ser modulado de maneira rápida, granular e previsível, o que é de grande valor para a estabilidade e a eficiência de redes elétricas modernas (CARTER et al., 2023).

Embora o governo federal tenha anunciado o Leilão de Reserva de Capacidade (LRCAP) de Armazenamento para ampliar a flexibilidade do SIN, essa medida não deve resolver, no curto e médio prazo, os desafios associados às rampas acentuadas e à variabilidade das renováveis. Mesmo com novas baterias, ainda haverá necessidade de soluções complementares capazes de absorver excedentes de forma rápida e contínua. Nesse contexto, a mineração de Bitcoin se destaca por oferecer flexibilidade imediata, ausência de perdas de ciclo, operação ininterrupta e fácil modularidade, além de apresentar autofinanciamento ao converter eletricidade diretamente em ativos digitais. Essas características configuram a atividade como uma alternativa responsiva e economicamente sustentável para apoiar a integração de renováveis (MELLERUD, 2021; K33, 2022).

4.4 Descrição do Cenário de Simulação

Para a simulação da inserção de cargas flexíveis no SIN, foi utilizada uma curva de carga e geração do operador da Califórnia (CAISO) como base. Isso se justifica pois o sistema elétrico da Califórnia tem uma alta penetração de fontes de geração intermitente, principalmente solar, apresentando um perfil de carga com características de curva do pato. Nessas análises, além da curva de carga total, torna-se relevante considerar o comportamento da *carga líquida*. Neste contexto, a carga líquida corresponde demanda a ser atendida pelos recursos controláveis do sistema (EPE, 2018). A Figura 26 ilustra o cenário original utilizado: sem Data Centers, evidenciando apenas a forte incidência solar e suas implicações sobre o perfil de carga líquida.

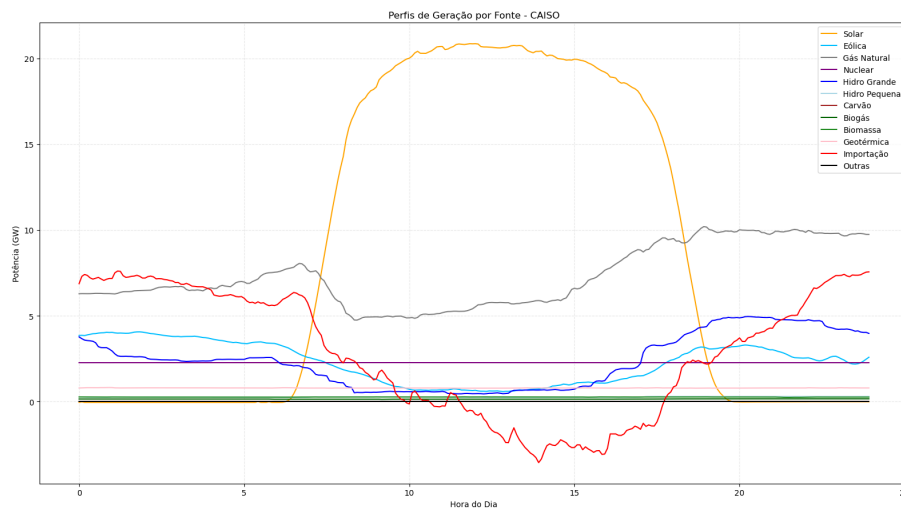
Figura 26 – Curvas de Carga e Carga líquida do operador da Califórnia. Fonte: Dados obtidos através do portal Grid Status.



Fonte: Dados obtidos através do portal Grid Status.

A Figura 27 evidencia a curva de geração do sistema original. Nota-se a predominância de fontes intermitentes, assim como uma espessiva quantidade de exportações de energia elétrica, assim como os curtailments evidenciados nas curvas. A Tabela 12 mostra a inserção dessas diferentes fontes de energia.

Figura 27 – Fontes de Energia Elétrica do operador da Califórnia. Dados obtidos através do portal Grid Status.



Fonte: Dados obtidos através do portal Grid Status.

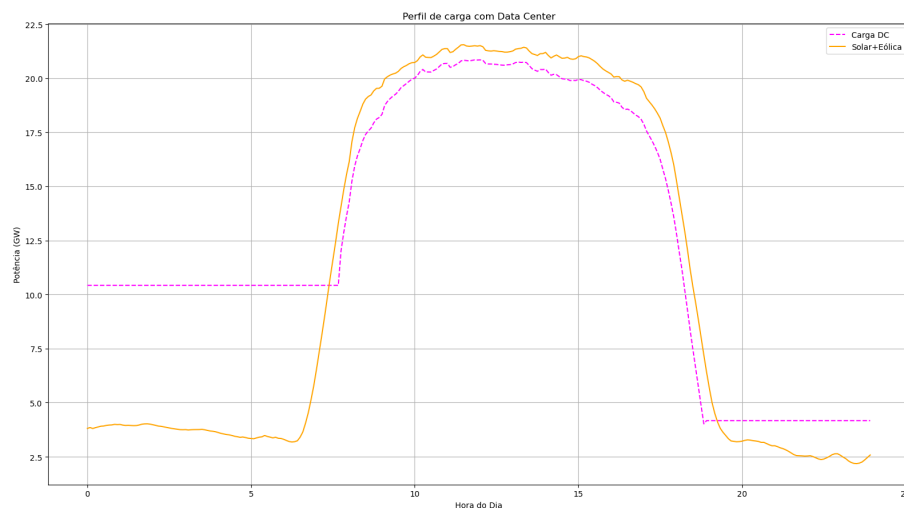
Tabela 13 – Estatísticas das Fontes de Energia

Fonte	Média (MW)	Máximo (MW)
Solar	8794.69	20850.00
Eólica	2297.75	4065.00
Geotérmica	796.27	823.00
Biomassa	269.52	279.00
Biogás	150.76	164.00
Hidro Pequena	270.83	270.83
Carvão	0.00	0.00
Nuclear	2272.07	2275.00
Gás Natural	7318.25	7318.25
Hidro Grande	2360.15	2360.15

Fonte: Dados obtidos através do portal Grid Status.

Na estratégia considerada, o de Data Center segue a curva das fontes intermitentes de energia elétrica. A penetração renovável é quase em sua totalidade absorvida pelos DCs. Para demonstrar a flexibilização do Data Center, foi programado a carga para consumir em níveis constantes antes da geração solar começar a subir. Após a descida de geração e o aumento da demanda residencial ao final do dia, o nível do Data Center pode ser reduzido e até zerado em situações críticas. Essa dinâmica é ilustrada na Figura 28.

Figura 28 – Geração Solar e o aumento de carga do Data Center.

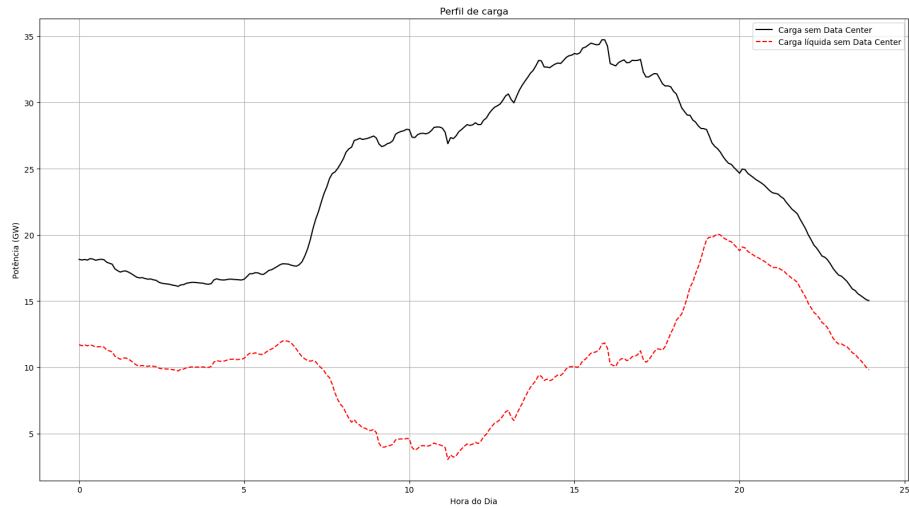


Fonte: Autor.

Para realizar a simulação desse sistema hipotético, é necessário retirar o efeito de *curtailments* do sistema, causados pela penetração de gerações de fontes intermitentes. Assim, as fontes de geração hidrelétricas e gás natural foram consideradas constantes em um nível médio. As importações de energia, ou seja, energia que é importada de outro

submercado, foi reduzida a. Assim, curva de carga total e líquida são apresentadas na Figura 29.

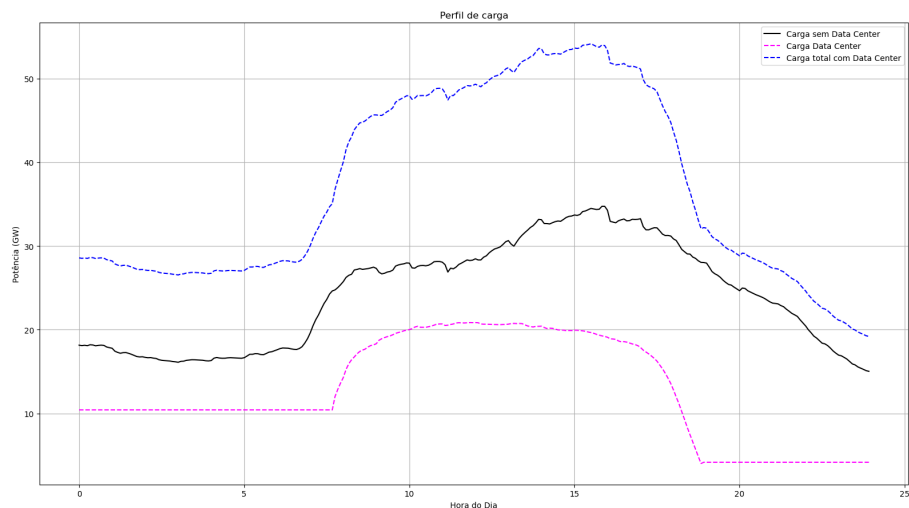
Figura 29 – Curva de carga do sistema hipotético. Fonte: Autor



Fonte: Autor

Em sequência, é inserido o Data Center no sistema. Nota-se na Figura 30 que a curva de carga naturalmente aumenta a medida que o DC começa a consumir. É prudente realizar a análise da curva de carga com os DCs mas também sem os mesmos, a fim de analisar o perfil anterior e posterior a inserção dessa carga no grid de energia.

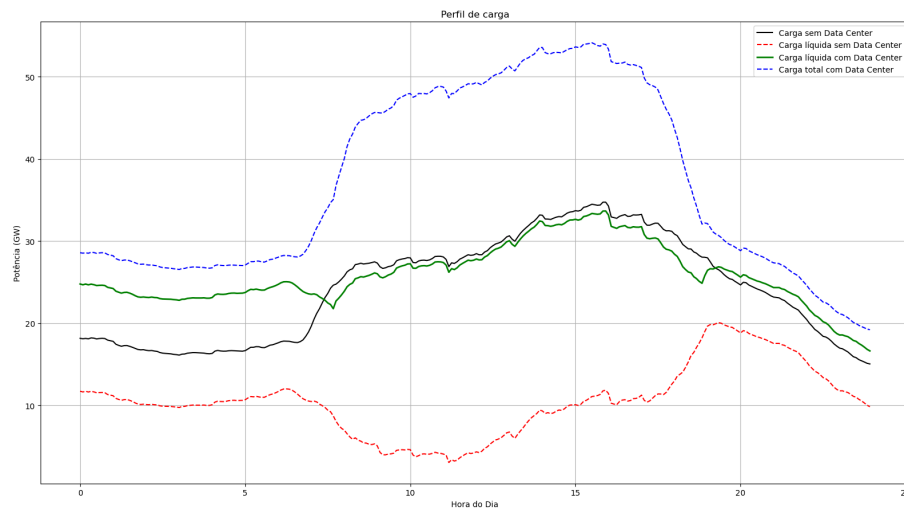
Figura 30 – Comparação da carga com a carga após a inserção de Data Centers.



Fonte: Autor

E por fim, evidencia-se na Figura 31 o achatamento da curva do pato na curva em verde, resultante de uma inserção de carga flexível que serve como amortizadora para o sistema de energia elétrica em questão.

Figura 31 – Carga líquida original e Carga líquida após inserção do Data Center.



Fonte: Autor

4.5 Análise dos resultados

Para operar como carga flexível e despachável, um data center deve apresentar demanda robusta, bom fator de carga e capacidade de rampas rápidas. Como mostrado na Tabela 13, as rampas chegam a 319 MW/min na subida e $-190,60$ MW/min na descida. Essa dinâmica permite ao operador do sistema absorver excedentes renováveis e suavizar rampas críticas ao longo do dia.

A Tabela 13 mostra que o data center absorve mais de 50% da carga total (52,56%), evidenciando a eficácia do modelo proposto. O fator de carga de 61,12% é baixo devido ao longo período de desligamento, reforçando a necessidade de compensação via programas de resposta à demanda. Como discutido no capítulo 2, essas cargas podem atingir fatores superiores a 90%, demonstrando sua alta modularidade e adaptação a diferentes cenários.

Tabela 14 – Estatísticas do Data Center

Indicador	Valor
Load Factor do DC	61.12%
Carga máxima do DC (MW)	20850.00
Carga média do DC (MW)	12743.62
Energia total do DC (MWh)	1835081.50
Rampa máxima de subida (MW/min)	319.00
Rampa máxima de descida (MW/min)	-190.60
Participação na carga total (%)	52.56%

Fonte: Autor

Como resultado, na Tabela 14 e na Figura 32 nota-se uma alta redução na variância

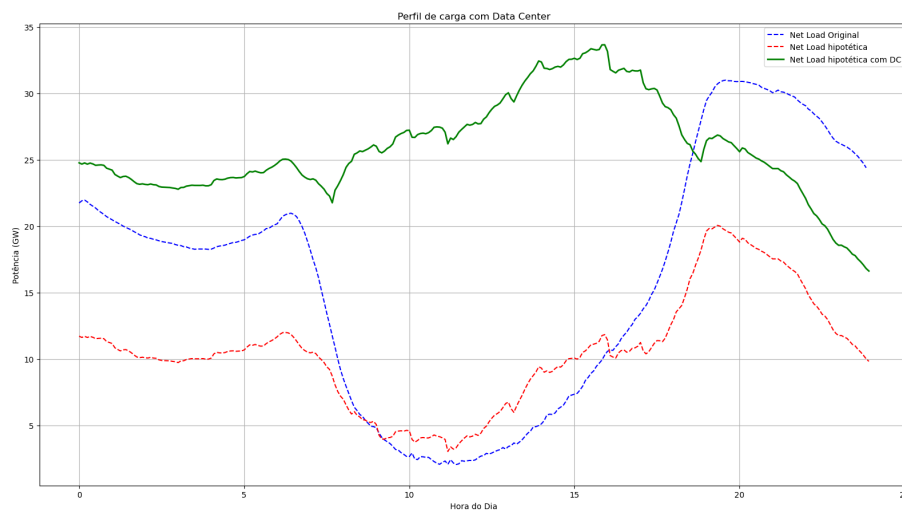
da carga líquida ao comparar o cenário original com os cenários hipotéticos e com a operação otimizada da carga do Data Center. Isso significa que a participação ativa deste operador contribui significativamente para a suavização das oscilações da carga líquida, promovendo maior previsibilidade e facilitando o despacho energético.

Tabela 15 – Estatísticas da Carga Recalculada e da Carga Líquida

Indicador	Valor
Carga média (MW)	24246.51
Carga máxima (MW)	34736.23
Carga mínima (MW)	15032.23
Variância da carga líquida hipotética com DC (GW ²)	13.86
Variância da carga líquida hipotética sem DC (GW ²)	17.68
Variância da carga líquida original sem DC (GW ²)	89.65

Fonte: Autor

Figura 32 – Comparação da carga líquida original, hipotética e hipotética com Data Center.



Fonte: Autor

Os resultados evidenciam o expressivo potencial de utilização dessas cargas como recursos de flexibilidade no Sistema Interligado Nacional. Integradas a programas de resposta à demanda e serviços ancilares, essas cargas podem ser utilizadas como instrumentos regulatórios para aprimorar a operação do sistema elétrico, aumentar sua confiabilidade e promover maior eficiência energética. Além de melhorar o equilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica gerada por fontes intermitentes, tais mecanismos também viabilizam a expansão planejada de projetos de geração em regiões atualmente com baixa demanda, mas que tendem a requerer, no futuro, uma infraestrutura elétrica mais robusta e preparada para suportar o crescimento do consumo e a inserção de novas fontes energéticas.

4.6 Limitações do modelo e riscos operativos associados à desconexão de múltiplos Data Centers

Embora a Seção 2.4.4 tenha sido mencionado o comportamento dinâmico de cargas eletrônicas — destacando a sensibilidade dessas unidades a afundamentos de tensão e a possibilidade de desligamentos rápidos diante de distúrbios — é importante observar que tais fenômenos não foram explicitamente modelados nas simulações deste capítulo. Assim, os resultados apresentados refletem apenas efeitos ilustrativos sobre a carga líquida, sem contemplar o risco de desconexões intempestivas de grandes blocos de carga.

Em particular, este trabalho não avaliou cenários em que múltiplos Data Centers possam se desligar simultaneamente em decorrência de um curto-circuito ou de perturbações transitórias mais severas, evento que pode acarretar variações abruptas de potência e impactar a estabilidade de frequência e tensão do sistema. Estudos recentes da *North American Electric Reliability Corporation* (NERC) relatam ocorrências reais de desligamentos súbitos envolvendo centenas de megawatts de cargas eletrônicas, evidenciando que a perda simultânea de grandes consumidores pode representar um desafio adicional para os operadores de sistemas elétricos (NERC, 2025).

Outro aspecto não capturado pelo modelo é a complexidade operacional associada à coordenação de grandes quantidades de Data Centers flexíveis. Conforme discutido em análises internacionais, a não uniformidade da resposta, bem como processos automáticos de reconexão após perturbações, pode dificultar o despacho em tempo real e exigir diretrizes específicas de interconexão para garantir previsibilidade operativa. Assim, embora os resultados indiquem benefícios potenciais para a suavização da carga líquida, a aplicação sistêmica dessa solução requer estudos adicionais que incorporem explicitamente esses comportamentos dinâmicos.

5 Conclusão

5.1 Resultados

Os resultados deste trabalho evidenciam que a flexibilidade operacional dos Data Centers de mineração de Bitcoin representa uma oportunidade concreta de solução de flexibilidade de carga. Ao operar como cargas despacháveis, esses agentes têm potencial para mitigar os desafios impostos pela intermitência da geração renovável, contribuindo para a estabilidade do sistema e para o uso mais eficiente dos recursos energéticos.

A análise dos dados e das simulações confirmou que a adição de cargas flexíveis reduz significativamente a amplitude da curva do pato, suaviza rampas de despacho e permite reduzir cortes de energia solar e eólica em períodos de excedente. Esses resultados estão alinhados com experiências internacionais e reforçam o papel das grandes cargas flexíveis como elementos estratégicos para viabilizar uma maior participação das fontes renováveis de forma segura e eficiente.

As simulações realizadas com base em dados do operador californiano (CAISO) demonstraram que a inserção estratégica de *data centers* flexíveis promove:

- **Redução significativa da amplitude da curva do pato**, suavizando as variações entre períodos de alta geração renovável e demanda reduzida.
- **Maior absorção de excedentes renováveis**, evitando desperdícios energéticos e aproveitando energia que, de outra forma, seria desperdiçada.
- **Viabilidade operacional para expansão do parque gerador renovável**, especialmente em regiões com baixa densidade de carga.

Esses resultados reforçam achados da literatura recente, que destacam a participação de LFLs como elemento central para viabilizar o aumento seguro da participação renovável, reduzir custos operacionais e oferecer novos serviços sistêmicos, a exemplo da resposta rápida à demanda e provisionamento de reservas controláveis.

5.2 Limitações do Estudo e Recomendações Futuras

O próximo passo natural desta pesquisa consiste em avaliar a **viabilidade econômica da operação flexível de *data centers***. Embora este estudo se concentrou em aspectos técnicos e sistêmicos, é essencial compreender sob quais condições o controle dinâmico da carga se torna financeiramente atrativo. Essa avaliação deve considerar o

custo de oportunidade da ociosidade, os potenciais ganhos com redução de tarifas e, principalmente, a remuneração por serviços ancilares, como ocorre em mercados mais desenvolvidos. Essa análise econômica é indispensável para consolidar o modelo proposto e deve ser acompanhada de um aprimoramento do arcabouço regulatório brasileiro.

Do ponto de vista regulatório, o Brasil ainda se encontra em um estágio inicial na incorporação de cargas flexíveis e programas de resposta da demanda. Apesar dos avanços recentes, como a promulgação da Lei nº 14.300/2022 e os projetos-piloto conduzidos pela ANEEL, o país ainda carece de mecanismos para permitir a participação efetiva desses consumidores no mercado de energia. A ausência de uma política clara de remuneração pela flexibilidade, aliada à falta de integração com o mercado de curto prazo e de sinalização de preço eficiente, limita a adoção de modelos inovadores.

Em contraste, no mercado norte-americano — especialmente o **ERCOT** — existem exemplos concretos de integração bem-sucedida de grandes cargas flexíveis. Programas como o *Load Resources* e o *Controllable Load Resources* permitem que consumidores de grande porte, incluindo *data centers*, prestem serviços de controle de frequência, reserva operativa e resposta rápida à demanda, sendo remunerados diretamente por sua contribuição à estabilidade do sistema. Além disso, a estrutura de preços em tempo real (*real-time pricing*) cria incentivos econômicos claros para o ajuste voluntário do consumo e com isso alinhando os interesses dos agentes privados com as necessidades do operador. A adoção de políticas semelhantes no Brasil poderia estimular a inserção de cargas flexíveis, reduzindo custos operacionais e acelerando a integração de fontes renováveis intermitentes ao SIN.

Outro ponto relevante é o papel destes Data Centers não apenas como cargas, mas como elementos de infraestrutura estratégica. Ao se instalarem próximos a usinas renováveis, esses empreendimentos podem consumir a energia excedente que seria desperdiçada, tornando economicamente viáveis projetos de geração que, de outro modo, não seriam implementados. Um exemplo prático é o de plantas solares em regiões de baixa densidade populacional: a presença de *data centers* como consumidores âncora permite viabilizar esses projetos, criando demanda local, reduzindo perdas de transmissão e fomentando o desenvolvimento regional.

É importante destacar algumas limitações do presente estudo, como a dependência de dados simulados, supostos cenários regulatórios e ausência de modelagem econômica detalhada. Recomenda-se a continuidade da pesquisa em múltiplos horizontes:

- **Análise financeira aprofundada:** estudos de viabilidade econômica considerando diferentes cenários tarifários, custos de oportunidade e modelos de remuneração.
- **Estudos de impacto ambiental:** avaliação dos benefícios ambientais da redução de *curtailment* e do deslocamento de fontes fósseis.

- **Avaliação de oportunidades de desenvolvimento tecnológico:** investigação de sistemas de controle avançados, integração com tecnologias de armazenamento e automação de resposta à demanda.
- **Monitoramento de pilotos no mercado brasileiro:** acompanhamento de iniciativas como a da Arthur Inc no Tocantins e da Petrobras com gás natural excedente.

5.2.1 Síntese Final

Portanto, os Data Centers flexíveis devem ser considerados como agentes-chave na transição energética, combinando alto valor tecnológico com impacto positivo sobre a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico. Sua integração ao SIN depende de uma coordenação entre o setor público e o privado, de marcos regulatórios que reconheçam a flexibilidade como ativo econômico e de estudos contínuos que quantifiquem seus benefícios em diferentes horizontes de tempo.

O fortalecimento desse ecossistema irá aproximar o Brasil das melhores práticas internacionais e consolidará sua trajetória rumo a uma matriz mais limpa, inteligente e resiliente.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 792, de 17 de outubro de 2017*. 2017. Dispõe sobre diretrizes para projetos de eficiência energética com participação de consumidores. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Citado na página 69.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 954, de 23 de novembro de 2021*. 2021. Estabelece procedimentos para inserção de recursos de resposta da demanda no planejamento e operação do SIN. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Citado na página 69.

ANEEL. *PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. 2023. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 10 set. 2025. Citado na página 54.

BOSTON CONSULTING GROUP. *Breaking Barriers: Unlocking the Next Wave of Data Center Growth*. 2025. Acesso em: 14 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.bcg.com/publications/2025/breaking-barriers-data-center-growth>>. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 49.

BRAIINS. *Antminer Efficiency Comparison*. 2024. Acessed 2025-06-20. Disponível em: <<https://braiins.com/blog/tuv-sud-testing-how-braiins-os-delivers-more-efficient-bitcoin-mining#:~:text=Thermal%20Chamber-,Mining%20Tests%20Performed,%E2%80%93a%205.89%25%20efficiency%20boost.>> Citado na página 38.

BRAIINS. *Hashprice Index*. 2024. Indicador econômico do valor do hashrate em USD/TH/s/dia. Disponível em: <<https://hashrateindex.com>>. Citado na página 37.

CARTER, N. et al. *Leveraging Bitcoin miners as flexible load resources for power system stability and efficiency*. 2023. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=4634256>>. Citado 5 vezes nas páginas 25, 56, 58, 76 e 77.

CCEE. *Com resposta da demanda, CCEE ajuda a reduzir custos na gestão da oferta e do consumo de energia elétrica no Brasil*. 2024. Página institucional. Acesso em: 2025. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>. Citado na página 70.

CCEE; ONS; ANEEL. *Projeto Piloto de Resposta da Demanda – Relatório Final*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>. Citado na página 69.

COINSHARES RESEARCH. *The Bitcoin Mining Network - Trends, Composition, Consumption and Performance*. 2019. Disponível em: <<https://coinshares.com/research/bitcoin-mining-network-december-2019>>. Citado na página 36.

DIGICONOMIST. *Bitcoin Energy Consumption Index*. 2024. Disponível em: <<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>>. Citado na página 36.

EIXOS. *Resposta da Demanda avançando: uma alternativa estratégica frente ao déficit de potência*. 2025. Análise de mercado. Acesso em: 2025. Disponível em: <<https://eixos.com.br>>. Citado na página 70.

ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS. *Emergency Response Service (ERS)*. 2024. Site oficial do ERCOT. Disponível em: <<https://www.ercot.com/services/programs/load/ers>>. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 68.

EPA. *U.S. Electricity Grid & Markets*. 2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/green-power-markets/us-electricity-grid-markets>>. Acesso em: 10 set. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

EPE. *Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a Incorporação de Atributos ao Planejamento*. Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 77.

EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia: PDE 2034*. Brasília, 2024. Acesso em: 10 set. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>>. Citado na página 71.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional 2025: Síntese*. Rio de Janeiro, 2025. Acesso em: 3 set. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN---Sintese>>. Citado na página 27.

ERCOT. *Nodal Protocols*. 2024. Disponível em: <<https://www.ercot.com>>. Citado 4 vezes nas páginas 65, 66, 67 e 68.

ERCOT. *Project No. 53911 - Aggregated DER Pilot Project*. 2024. Disponível em: <https://www.ercot.com/files/docs/2024/ADER_Project>. Citado na página 67.

FRUMKIN, D. *Bitcoin Mining Economics*. Praga, República Tcheca: Braains Insights, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 38.

GINZBURG-GANZ, E.; MENATI, A.; XIE, L. *Leveraging Bitcoin Mining Machines in Demand-Response Mechanisms to Mitigate Ramping-Induced Transients*. 2024. ArXiv preprint arXiv:2411.11119. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2411.11119.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 38 e 57.

ITAU BBA. Flash News, *Fading Sunshine and Silent Turbines: The Curtailment Conundrum*. 2024. Citado 3 vezes nas páginas 69, 75 e 76.

K33. *Bitcoin Mining Improves the Economics of Renewable Energy*. 2022. <<https://k33.com/research/archive/articles/bitcoin-mining-improves-the-economics-of-renewable-energy>>. Accessed: 2025-11-26. Citado na página 77.

MAJUMDER, S.; XIE, L.; ARAVENA, I. *An Econometric Analysis of Large Flexible Cryptocurrency-mining Consumers in Electricity Markets*. 2024. ArXiv preprint arXiv:2408.12014. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2408.12014.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 38.

MELLERUD, J. *Bitcoin mining as a demand response in an electric power system: A case study of the ERCOT-system in Texas*. Dissertação (Master's Thesis) — Nord University, Bodø, Norway, 2021. Citado na página 77.

- MENATI, A.; LEE, K.; XIE, L. *Modeling and Analysis of Utilizing Cryptocurrency Mining for Demand Flexibility in Electric Energy Systems: A Synthetic Texas Grid Case Study*. 2022. ArXiv preprint arXiv:2207.02428. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2207.02428.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 27 e 38.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Portaria MME nº 44, de 24 de fevereiro de 2015*. 2015. Estabelece diretrizes para projetos pilotos de resposta da demanda. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme>>. Citado na página 68.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Portaria MME nº 44, de 4 de março de 2022*. 2022. Institui o Programa de Resposta Voluntária da Demanda em razão da escassez hídrica. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme>>. Citado na página 69.
- MOURA, M. *Resposta da demanda no Brasil: avanços, desafios e perspectivas*. 2023. <<https://www.iee.usp.br>>. Acesso em: 28 jul. 2025. Citado na página 68.
- NAKAMOTO, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. White Paper. Disponível em: <<https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>>. Citado na página 37.
- NERC. *Large Loads Task Force Meeting: Characteristics and Risks of Emerging Large Loads*. 2025. Presentation. Disponível em: NERC LLTF Meeting, 9 Jan. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 83.
- ONS. *Resposta da Demanda: conceitos, operação e diretrizes*. 2024. Documento institucional. Acesso em: 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br>>. Citado na página 70.
- ONS. *NT-ONS DOP 0022/2025: Critérios para Gestão de Excedentes Energéticos*. Rio de Janeiro, 2025. 19 de agosto de 2025. Citado na página 74.
- PIMENTA, M.; DIAS, M. Resposta da demanda no brasil: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Energia*, AB3E, v. 26, n. 2, p. 85–101, 2020. ISSN 1982-7282. Citado na página 71.
- PUBLIC UTILITY COMMISSION OF TEXAS. *DR Program Evaluation Report*. 2023. Disponível em: <<https://www.puc.texas.gov>>. Citado na página 67.
- RHODES, J. D.; DEETJEN, T.; SMITH, C. *Impacts of Large, Flexible Data Center Operations on the Future of ERCOT*. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://lancium.com/wp-content/uploads/2022/06/Lancium_Flexible_Data_Center_Whitepaper_4.2022.pdf>. Citado na página 25.
- ROSENFELD, M. Analysis of bitcoin pooled mining reward systems. *Bitcoin Research*, 2011. Disponível em: <<https://www.bitcoinresearch.org/2011/12/analysis-of-bitcoin-pooled-mining-reward-systems>>. Citado na página 35.
- TAYLOR, M. Bitcoin and the age of bespoke silicon. *Proceedings of the International Conference on Compilers, Architecture and Synthesis for Embedded Systems (CASES)*, 2017. Citado na página 35.
- TEXAS LEGISLATURE. *Senate Bill 6*. 2025. Disponível em: <<https://capitol.texas.gov>>. Citado na página 66.

UPTIME. *Data Center Site Infrastructure Tier Standard: Topology*. 2018. Padrão técnico. Acesso em 2025. Disponível em: <<https://uptimeinstitute.com>>. Citado na página 42.