



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Claudia Bartholomeu Assumpção de Souza

Comércio de Energia em Microrredes *Ad hoc*:

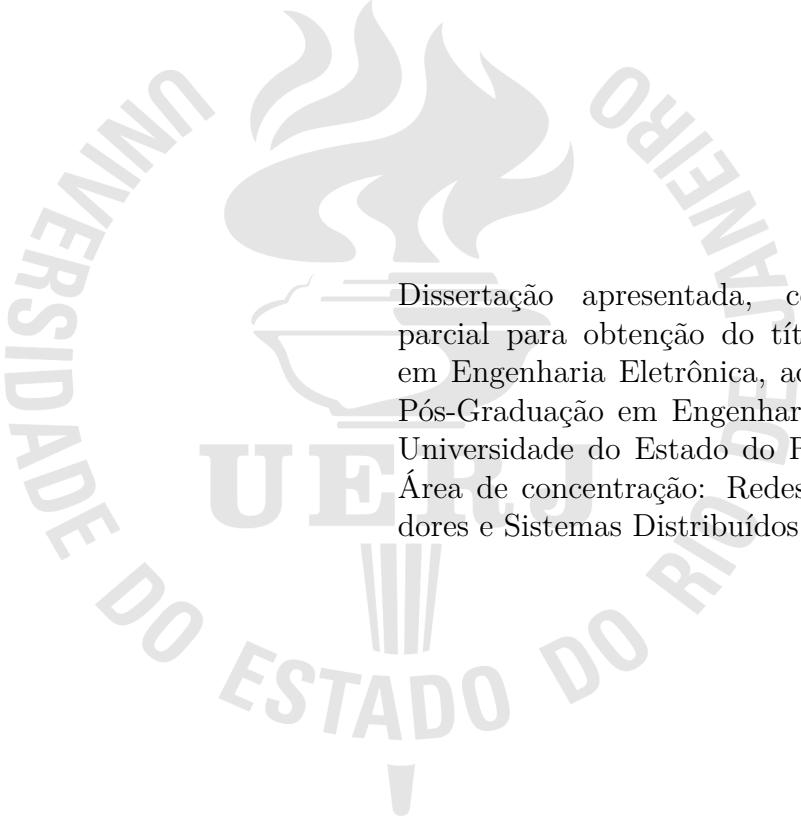
O desafio de Ambientes Não Permissionados

Rio de Janeiro

2025

Claudia Bartholomeu Assumpção de Souza

**Comércio de Energia em Microrredes *Ad hoc*:
O desafio de Ambientes Não Permissionados**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Sztajnberg

Orientador: Prof. Dr. Francisco Figueiredo G. Sant'anna

Rio de Janeiro

2025

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S729 Souza, Cláudia Bartholomeu Assumpção de.
Comércio de energia em microrredes *Ad hoc*: O desafio de ambientes não permissionados / Cláudia Bartholomeu Assumpção de Souza. – 2025. 91 f.

Orientadores: Alexandre Sztajnberg, Francisco Figueiredo Goytacaz Sant'anna

Dissertação(Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica - Teses. 3. Arquitetura não-hierárquica (Rede de computador) - Teses. 4. Energia elétrica - Distribuição - Teses. I. Sztajnberg, Alexandre. II. Sant'anna, Francisco Figueiredo Goytacaz. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.311

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Cláudia Bartholomeu Assumpção de Souza

Comércio de Energia em Microrredes *Ad hoc*:
O desafio de Ambientes Não Permissionados

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.

Aprovado em: 14/10/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Sztajnberg (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Francisco Figueiredo G. Sant'anna (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Evandro Luiz Cardoso Macedo
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Igor Machado Coelho
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Diogo Silveira Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET - RJ

Rio de Janeiro

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe, pelo apoio incondicional e pela presença incansável, que supriu minha ausência com cuidado e dedicação na educação de meus filhos. Sua força, serenidade e confiança constituíram alicerces essenciais nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

Aos meus filhos, expresso minha profunda gratidão pelo apoio constante, pela motivação e pela cumplicidade ao longo de toda essa jornada. O incentivo de vocês foi fundamental para que eu me mantivesse focada e determinada em concluir este mestrado, desde o primeiro momento.

Ao meu marido, registro minha sincera gratidão pelo companheirismo, pela compreensão diante das longas horas dedicadas a este trabalho e pela parceria na condução de nossa família, bem como pelo apoio intelectual que contribuiu significativamente para o fortalecimento de minha trajetória acadêmica.

Aos meus professores e orientadores, agradeço pela orientação competente, pelas discussões enriquecedoras e pela generosidade em compartilhar conhecimento, elementos decisivos para a consolidação desta pesquisa.

Estendo meus agradecimentos aos professores da Faculdade de Engenharia da UFU, cujo apoio e incentivo foi fundamental para o avanço nesta jornada acadêmica.

RESUMO

SOUZA, Cláudia Bartholomeu Assumpção de. *Comércio de Energia em Microrredes Ad Hoc: o desafio do uso de aplicações não-permissionadas*. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2025.

Microrredes *ad hoc* não permissionadas são pequenos sistemas elétricos que crescem de forma orgânica, sem estrutura formal, e sem relação prévia de confiança entre os participantes. Nesses sistemas, alguns participantes podem gerar excedentes de energia, o que estimula o desenvolvimento de um mercado descentralizado. No entanto, ambientes não permissionados trazem desafios para estabelecer relações comerciais e para lidar com incidentes na rede elétrica, tais como furtos e falhas de fornecimento. Este trabalho propõe o uso de uma *blockchain* baseada em reputação, cujas próprias regras de consenso determinam as transações de comércio válidas e, por consequência, o fluxo elétrico esperado em cada trecho da infraestrutura compartilhada. Além disso, o mecanismo de reputação permite que os participantes sejam avaliados de acordo com o comportamento que manifestam na rede. A principal contribuição deste trabalho, portanto, é propor um sistema de comércio de energia para microrredes *ad hoc* não permissionadas resistentes ao comportamento errático de agentes potencialmente maliciosos.

Palavras-chave: Microrrede; *Ad hoc*; Comércio de energia; *Peer-to-Peer*; *Blockchains*; não permissionado.

ABSTRACT

SOUZA, Cláudia Bartholomeu Assumpção de. *Energy Trade in Microgrids Ad Hoc: the challenge of using permissionless applications*. 105 f. Dissertation (Master's in Electronic Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2025.

Permissionless ad hoc microgrids are small electrical systems that grow organically, without formal structure, and without prior trust relationships among participants. In these systems, some participants may generate energy surpluses, which encourages the development of a decentralized market. However, permissionless environments present challenges for establishing commercial relationships and dealing with incidents in the electrical grid, such as thefts and supply failures. This work proposes the use of a reputation-based blockchain, whose own consensus rules determine valid trade transactions and, consequently, the expected electrical flow in each section of the shared infrastructure. Furthermore, the reputation mechanism allows participants to be evaluated based on the behavior they exhibit in the network. Therefore, the main contribution of this work is to propose an energy trading system for permissionless ad hoc microgrids resistant to the erratic behavior of potentially malicious agents.

Microgrids; Ad hoc; Electricity market; Peer-to-Peer; Blockchains; Permissionless.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cenário hipotético da microrrede	12
Figura 2	Modelo de geração centralizado	17
Figura 3	Modelo de geração descentralizado.....	17
Figura 4	Arranjo da microrrede da simulação	21
Figura 5	Comércio de energia centralizado	22
Figura 6	Comércio de energia descentralizado.....	23
Figura 7	Árvore de Merkle.....	26
Figura 8	Consenso <i>Freechains</i>	33
Figura 9	Elementos do controlador de potência	46
Figura 10	Circuito elétrico - referente a Figura 1.....	47
Figura 11	Sequência dos blocos encadeados na cadeia <i>#alce</i> - postagens 86 a 106 ...	49
Figura 12	Diagrama de caso de uso - ALCE	54
Figura 13	Diagrama de Sequência - Transação de venda de energia no ALCE.....	55
Figura 14	Diagrama de Sequência - Transação de compra de energia no ALCE	55
Figura 15	<i>ALCE</i> - Tela de entrada para o ALCE	56
Figura 16	<i>ALCE</i> - Tela de postagem de ramal	57
Figura 17	<i>ALCE</i> - Tela para seleção de ramal.....	58
Figura 18	<i>ALCE</i> - Tela para incluir o atributo distância	58
Figura 19	<i>ALCE</i> - Tela para aprovar novo ramal	59
Figura 20	<i>ALCE</i> - Tela de postagem de Transações	60
Figura 21	<i>ALCE</i> - Tela de postagem dados da oferta de energia.....	61
Figura 22	<i>ALCE</i> - Tela de postagem da disponibilidade de energia	61
Figura 23	<i>ALCE</i> - Tela para seleção da oferta de energia	62
Figura 24	<i>ALCE</i> - Tela para preenchimento da demanda de energia	62
Figura 25	<i>ALCE</i> - Tela para preenchimento do comprovante pagamento	63
Figura 26	<i>ALCE</i> - Listagem de transações de compra	63
Figura 27	<i>ALCE</i> - Lista de reputação dos ramais	64
Figura 28	Cenário completo da microrrede	66
Figura 29	Estabelecimento da infraestrutura - bloco de compra	68

Figura 30 Estabelecimento da infraestrutura - sequência de blocos de postagens 0 a 11	69
Figura 31 Estabelecimento da infraestrutura - demanda de (C).....	70
Figura 32 Estabelecimento da infraestrutura - Parametrização dos controladores CP_AB e CP_BC	70
Figura 33 Estabelecimento da infraestrutura - sequência dos blocos de postagens 12 a 26.....	71
Figura 34 Estabelecimento da infraestrutura - sequência de blocos de postagens 121 a 134	72
Figura 35 Estabelecimento da infraestrutura - Transações na microrrede	73
Figura 36 Tratamento dos Conflitos na rede - Modelagem em rede de Petri - furto de energia	75
Figura 37 Tratamento dos Conflitos na rede - Colapso da cadeia	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Categorização das <i>blockchains</i>	25
Tabela 2	Principais problemas de contratos inteligentes em ambientes não permis- sionados	30
Tabela 3	Entidades e estrutura de atributos	43
Tabela 4	Distribuição da disponibilidade.....	44
Tabela 5	Resumo das interações modeladas na Rede de Petri (cenário de furto de energia)	76
Tabela 6	Indicadores resultantes da simulação de um ambiente hipotético de inte- rações, abrangendo um horizonte temporal de 14 meses.....	80
Tabela 7	Comparação dos trabalhos encontrados na literatura com o modelo pro- posto.....	82

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
1.1	Sistemas Elétricos de Potência	16
1.2	Microrredes	19
1.3	Comércio de Energia	22
1.4	Blockchains	23
2	<i>FREECHAINS</i>	31
2.1	Fundamentos conceituais	31
2.2	Sistema de reputação	32
2.3	Consenso do <i>Freechains</i>	33
2.4	Comandos do <i>Freechains</i>	34
2.5	Estados das postagens na cadeia <i>Freechains</i>	39
2.6	Comunicação entre os nós no <i>Freechains</i>	39
3	ALCE - AMBIENTE DE LIVRE COMÉRCIO DE ENERGIA...	41
3.1	<i>Fundamentos do ALCE</i>	41
3.2	Controlador de potência	45
3.3	Implementação do <i>ALCE</i> sobre o <i>Freechains</i>	49
3.4	Conectividade no ambiente <i>ALCE</i>	54
3.5	Interface de usuário para o ambiente <i>ALCE</i>	54
4	ESTUDOS DE CASO	66
4.1	(i) Estabelecimento da infraestrutura	67
4.2	(ii) Furto de energia	74
4.3	(iii) Falha técnica	76
4.4	(iv) Compras simultâneas	77
4.5	(v) Conflito sem solução	77
4.6	Discussão	78
5	TRABALHOS RELACIONADOS	81

CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS	86

INTRODUÇÃO

Microrredes são sistemas elétricos de potência que ocupam áreas geográficas reduzidas, com a geração de energia ocorrendo próxima de onde é consumida [1], o que proporciona ganhos econômicos, ambientais e de confiabilidade. Em particular, a confiabilidade energética pode ser afetada em crises extremas como foi o caso do furacão Maria, que devastou Porto Rico em 2017 [2]: Enquanto a rede elétrica centralizada colapsou, microrredes isoladas mantiveram algumas instalações operacionais, demonstrando sua resiliência, como foi o caso da Casa Sol, uma pequena pousada localizada no centro histórico de San Juan. A Casa Sol tinha uma pequena geração com 30 painéis solares conectados a 24 baterias. Essa infraestrutura de geração estava conectada a vizinhos, com mais 20 painéis solares, criando uma pequena microrrede comunitária. Com o furacão Maria, ocorreram alguns danos no sistema de geração fotovoltaica dessa microrrede, mas apesar disso, ele voltou a 100% da capacidade em três dias, enquanto a rede elétrica centralizada levou dois meses para ser restabelecida em pouco mais de 50% da sua capacidade [2].

As microrredes adotam um modelo de geração descentralizado, que se contrapõe ao modelo tradicional, centralizado. No modelo centralizado, grandes concessionárias atendem às demandas individuais de um grande número de consumidores. No modelo descentralizado, a gestão da infraestrutura e do comércio de energia pode ser distribuída entre os seus participantes, o que possibilita aos usuários maior autonomia.

Uma microrrede *ad hoc* é um modelo específico de microrredes que nasce de forma espontânea e sem planejamento prévio.

A Figura 1 ilustra um cenário hipotético deste modelo de microrrede, em que três participantes (A), (B) e (C) estabelecem conexões espontâneas e não planejadas formando uma microrrede *ad hoc*. Neste cenário, (A) e (B) são vizinhos, e (C) é vizinho apenas de (B), e não conhece (A). Embora (A) e (C) tenham em comum o vizinho (B), não existe uma relação de confiança prévia entre eles, o que caracteriza o ambiente não permissionado [3]. Consideremos que a dinâmica de crescimento dessa microrrede acontece da seguinte forma:

1. (A) é um gerador que tem excedente e, na expectativa de vender esse excedente, instala um ramal de energia (RA) na sua vizinhança;
2. (B) se propõe a comprar energia de (A). Então, em acordo com (A), conecta seu

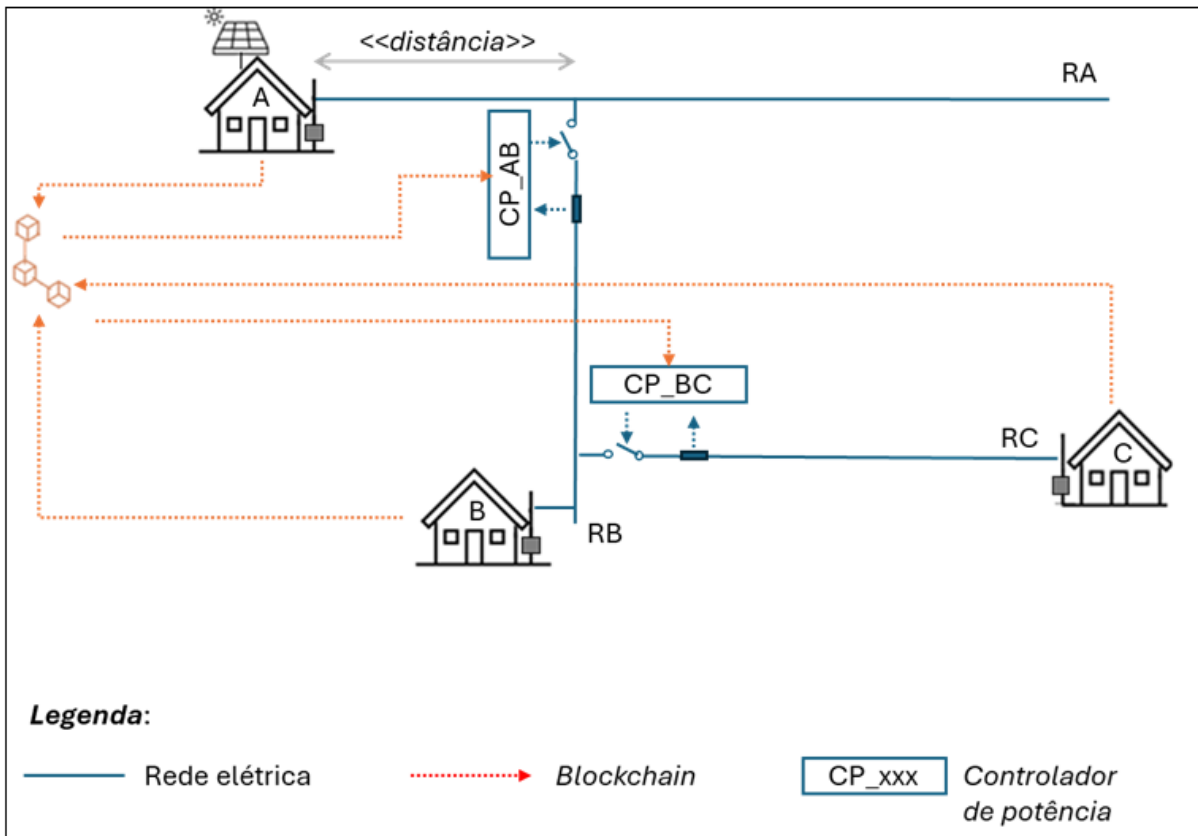


Figura 1: Cenário hipotético da microrrede

ramal (RB) no ramal (RA);

3. Em um momento futuro, (C) também demonstra interesse em participar da microrrede e, em acordo com (B), conecta o seu ramal (RC) em (RB);
4. (C) deseja comprar energia de (A), conforme indicado pela linha tracejada.

Diante da possibilidade de um ambiente não permissionado para comércio de energia em microrredes *ad hoc*, surgem alguns aspectos a serem analisadas e discutidos:

- Como manter uma infraestrutura de distribuição através de conexões *ad hoc*?
- Como evitar abusos do sistema, tais como furtos de energia?
- Como viabilizar um comércio de energia em que consumidores e geradores possam negociar par a par livremente e de forma segura, sem confiança prévia entre as partes, e sem a necessidade de intermediários?
- Como sensibilizar a percepção dos usuários quanto a necessidade de um comportamento colaborativo entre eles de modo a viabilizar o comércio de energia *peer-to-peer*?

peer?

Prosseguindo com a descrição do cenário, cada um dos participantes é responsável por seu ramal elétrico. Esses ramais e as conexões entre eles formando uma rede, a infraestrutura que possibilita a distribuição de energia. Os participantes podem ter diferentes interesses, de meros consumidores ou de vendedores de excedentes, mas com a premissa de cooperarem para manterem a viabilidade do sistema.

Um dos principais desafios para comércio de energia em ambientes não permissionados é o de garantir a validade das informações compartilhadas, particularmente as que envolvem compromissos entre as partes. As *blockchains* não permissionadas trazem a possibilidade de se atingir consenso lógico nos dados armazenados em redes *peer-to-peer* (P2P). Entretanto, no contexto real, emergem divergências decorrentes da ausência de intermediários e de garantias formais de confiança entre as partes. Em transações de compra e venda de energia, por exemplo, podem surgir disputas quanto ao cumprimento das obrigações contratuais: o comprador pode alegar que não recebeu a quantidade de energia acordada, enquanto o vendedor pode sustentar que efetuou a entrega conforme previsto. Essa subjetividade na verificação de eventos e resultados evidencia um dos principais desafios dos sistemas descentralizados, nos quais a confiança deve ser substituída por mecanismos técnicos de validação e consenso. Com base nessas condições, este trabalho propõe um ambiente de livre comércio de energia para microrredes *ad hoc* apoiado pelo uso de *blockchains* não permissionadas que busca conduzir as divergências e abusos do mundo real, denominado *ALCE*.

A particularidade da nossa proposta é a adoção de um tipo de *blockchains* baseado em reputação, conhecido como *Freechains* [4]. Os participantes do *ALCE* utilizam pontos de reputação para publicar registros de venda e compra de energia. Além disso, podem avaliar as interações e condutas de seus pares através de operações de *like* e *dislike*, que transferem reputação entre os participantes. As próprias regras de consenso determinam que transações de energia são válidas em um determinado momento, uma vez que são ordenadas de maneira única na rede em uma linha de tempo compartilhada.

Adicionalmente às questões do comércio de energia, também utilizamos o mecanismo de consenso do *Freechains* para regular a distribuição de energia na infraestrutura elétrica, o que é fundamental para detectar e evitar abusos, tais como furtos de energia. Conforme ilustrado na Figura 1, os equipamentos controladores de potência, identifica-

dos por CP_AB e CP_BC, são instalados pelos participantes na conexão de seus ramais. Estes equipamentos de forma coordenada regulam o fluxo de energia entre ramais.

O equipamento é parametrizado dinamicamente de acordo com os blocos de compra de energia encadeados na *blockchain*, que permitem calcular de forma consensual o fluxo elétrico esperado em cada ramal da infraestrutura compartilhada.

Dessa forma, cada participante da microrrede tem a função de operador e mantenedor de seu ramal.

Implementamos um protótipo do ambiente proposto aplicado à um ambiente hipotético de uma microrrede com 10 participantes, 5 geradores e 5 consumidores. Discutimos situações de conflito no comércio através de estudos de caso, como no caso de múltiplas compras para um mesmo bloco de venda de energia. Também discutimos casos de falhas de fornecimento e furtos de energia. Durante o crescimento da rede, simulamos diferentes cenários para testar a resiliência, inclusive como a introdução de participantes maliciosos.

As principais contribuições desse trabalho são as seguintes:

- A aplicação de consenso baseado em reputação do *Freechains* na gestão do comércio de energia em microrredes *ad hoc*, sem a necessidade de terceiros para garantir e validar as transações.
- A solução de conflitos relacionados ao compartilhamento da infraestrutura de distribuição de microrredes através da associação de um equipamento controlador de potência e do mecanismo de consenso do *Freechains*.
- A garantia da sobrevivência do comércio de energia na microrrede vinculada ao comportamento dos participantes.

Além da Introdução, essa dissertação está organizada em cinco capítulos, mais a Conclusão. O Capítulo 1 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, que inclui sistemas elétricos de potência, microrredes, tipos de comércio de energia e *blockchains*. O Capítulo 2, apresenta o conceito da blockchain não permissionada denominada *Freechains* e o seu mecanismo de consenso. O Capítulo 3 apresenta o ambiente *ALCE*, com os detalhes do ambiente de comércio de energia e da infraestrutura elétrica das microrredes. O Capítulo 4 discute cinco estudos de caso com simulações qualitativas para avaliar o ambiente proposto. O Capítulo 5 apresenta outras propostas de *blockchains* para comércio

de energia em microrredes e discute as lacunas em relação à proposta desta dissertação. Finalmente, a Conclusão discute a eficácia do ambiente proposto.

1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo descreve os fundamentos associados à proposta para o comércio de energia em microrredes *ad hoc* com uso de *blockchain*. Primeiramente, abordamos os conceitos fundamentais dos sistemas elétricos de potência e suas respectivas funções. Em seguida, exploramos os modelos de comércio de energia, destacando sua influência na escolha do modelo mais adequado. Posteriormente, discutimos os conceitos e características das microrredes, além dos diferentes tipos de *blockchains*, explicando como estas tecnologias suportam a implementação de modelos de comércio não permissionados. Por fim, apresentamos a justificativa para a utilização do sistema de consenso do *Freechains* na implementação da aplicação de comércio de energia proposta neste estudo.

1.1 Sistemas Elétricos de Potência

Um sistema elétrico de potência é um conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão, distribuição, medição e controle de energia [5]. Apesar de escala reduzida, uma microrrede também pode ser definida como um sistema elétrico de potência, composta por pequenos geradores, infraestrutura de distribuição e cargas em uma área limitada. Para detalhar um sistema elétrico de potência, e por consequência elementos de uma microrrede, descreveremos a seguir suas funções.

1.1.1 Geração

A geração de energia elétrica compreende o conjunto de diferentes processos pelos quais outras formas de energia, como energia mecânica, química, térmica ou solar, são convertidas em eletricidade [6]. Na geração de energia, existem dois modelos, o centralizado e o descentralizado. No modelo centralizado, grandes usinas, de centenas ou milhares de MW, se instalam longe dos centros de consumo e enviam a energia por longas linhas de transmissão até esses centros, como na Figura 2 [7]. Já na geração descentralizada, um conjunto de pequenos geradores, com fontes de geração diversas, de alguns kW a poucos MW, são instalados próximos ao local de consumo, injetando energia diretamente na rede de distribuição local, como na Figura 3 [8].

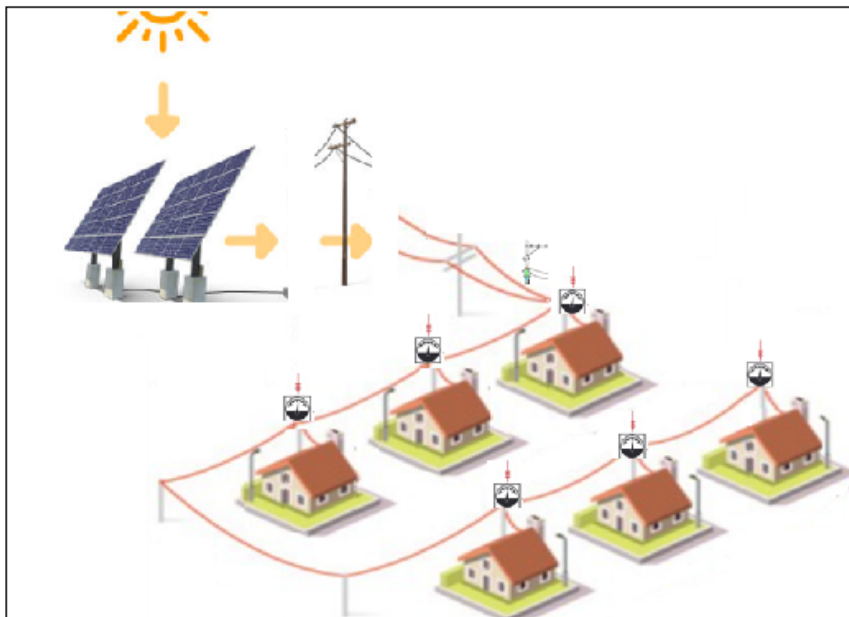


Figura 2: Modelo de geração centralizado

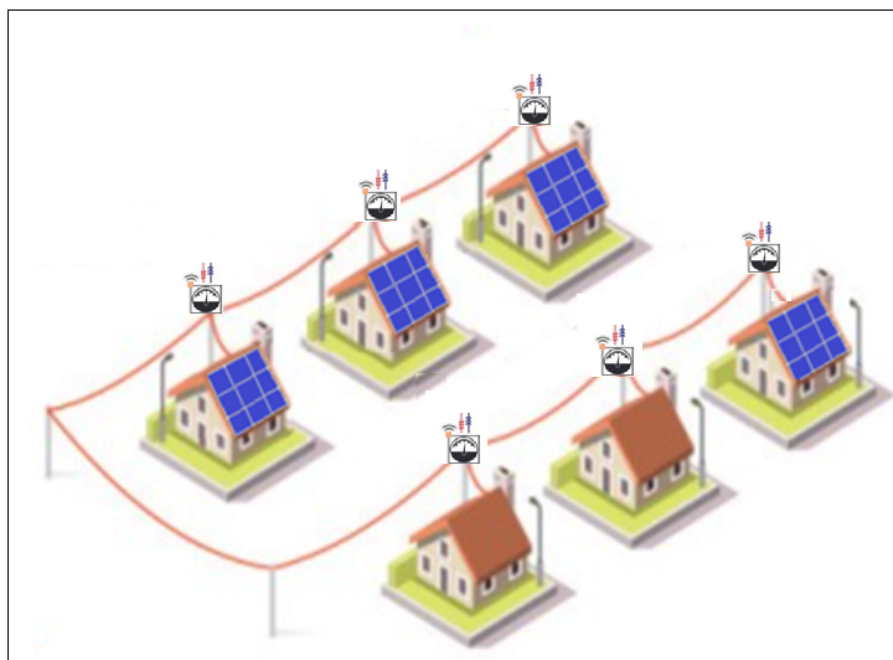


Figura 3: Modelo de geração descentralizado

1.1.2 Transmissão

A transmissão de energia diz respeito ao transporte de grandes blocos de energia através de longas linhas de transmissão, desde a geração até os centros de consumo. Para que seja viável, a transmissão em longas distâncias é indispensável que a tensão tenha valores elevados. Para elevar a tensão da geração para níveis mais altos de transmissão, são utilizados transformadores instalados em subestações elevadoras de energia. As subestações são instalações que possuem a função de elevar a tensão na conexão com a geração, e depois abaixá-la próximas aos pontos de consumo [9]. O transporte de energia através de longas linhas de transmissão envolve perdas, relacionadas aos aspectos físicos da transmissão de energia, como a dissipação de energia nos cabos condutores em forma de calor [10]. O processo de transmissão é complexo envolvendo altos custos, tanto financeiros como ambientais [11]. As microrredes, no entanto, possuem aspectos que desoneram tanto física como ambientalmente um projeto. Os custos envolvidos são menores e diluídos entre os participantes, além de que os impactos ambientais são mitigados pela proximidade entre geração e consumo.

1.1.3 Distribuição

Nos sistemas elétricos de grandes dimensões, a distribuição de energia elétrica é um processo que se inicia na subestação abaixadora, ponto de entrega da transmissão. Nesse ponto, as empresas transmissoras entregam a energia que foi negociada com as empresas concessionárias. Essas empresas são responsáveis pela distribuição até os consumidores finais. Contudo, as tensões de distribuição embora menores que as da transmissão ainda não são adequadas ao consumo, e precisam passar por equipamentos transformadores abaixadores. Tais equipamentos, tem o papel de adequar o nível de tensão ao de consumo [12].

Já na infraestrutura das microrredes, a função de distribuição de energia refere-se ao percurso da energia desde a geração até a entrega no consumo, geralmente já na tensão compatível com a carga.

1.1.4 Sistemas de Medição e Controle

Os sistemas de medição e controle fazem parte do sistema de potência e são configurados para atenderem às funções de geração, transmissão e distribuição. Esses sistemas utilizam equipamentos elétricos e eletrônicos associados a sistemas computacionais. São responsáveis pela coleta de dados, processamento e pelo envio de comandos que definem a interrupção ou o fluxo da energia desde as usinas geradoras, passando pela infraestrutura de transmissão e distribuição, até a entrega aos consumidores finais [13].

1.1.4.1 Controlador de Potência

Controladores de potência são equipamentos eletrônicos destinados ao controle da energia entregue a uma carga consumidora. O ambiente proposto nesse trabalho utiliza a técnica PWM (*Pulse width modulation*) ou Modulação por Largura de Pulso, que é amplamente utilizada como controlador de potência para cargas em corrente contínua devido à sua eficiência e precisão no controle de energia. A técnica consiste em alternar rapidamente o sinal de tensão entre os estados ligado e desligado, variando a largura do pulso de acordo com a necessidade [14].

O controle de potência por PWM geralmente utiliza a tensão como parâmetro de entrada, mas também pode ser ajustado com base na corrente. Isso acontece especialmente em aplicações que requerem um controle mais preciso da potência entregue à carga, como fontes de alimentação reguladas e motores de corrente contínua. Usando a corrente como entrada, emprega um circuito de retroalimentação para medir a corrente que flui na carga e ajustar o ciclo de trabalho do PWM conforme necessário [15]. O funcionamento pode ser descrito da seguinte forma: Um sensor de corrente monitora o fluxo de corrente para a carga. A leitura da corrente é enviada para o controlador, o controlador compara a corrente medida com um valor de referência e ajusta o ciclo do PWM para manter a corrente dentro da faixa desejada.

1.2 Microrredes

Conforme descrito na seção introdutória deste trabalho, microrredes podem ser caracterizadas como pequenos sistemas elétricos de potência, localizados e completos, que podem operar de forma isolada ou conectada a rede da concessionária. Pequenos

e completos pois reúnem em uma área geográfica relativamente pequena, a produção, o fornecimento e o consumo de energia elétrica, havendo, com alguma frequência, geração para autoconsumo. A localização, característica recorrente das microrredes, indica a geração ocorrendo fisicamente próxima de onde a energia é consumida. Também com frequência, as tecnologias e arranjos adotados em uma microrrede são particulares a determinado lugar e à vida das pessoas que ali habitam. Uma microrrede tipicamente cobre uma área com raio de até dezenas de quilômetros, em contraponto às dimensões dos sistemas elétricos tradicionais, que podem chegar a cobrir áreas continentais [16].

1.2.1 Classificação das Microrredes

As microrredes podem empregar diversas tecnologias e podem ser implantadas adotando diversas configurações e políticas de uso. Ainda que a dinâmica de crescimento possa ser “orgânica” como nas *ad hoc*, é necessário o uso de padrões para manter a rede operacional. Por exemplo, uma decisão de padrão diz respeito a energia distribuída: corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Assim, é útil classificar as possibilidades de tecnologia que podem ser adotadas nas microrredes.

Dentre as possibilidades de classificação, destacam-se o tipo de corrente, como já mencionado, o modo que define a conexão à rede da concessionária [17], a topologia, conforme detalhadas a seguir:

1. **Tipo de corrente.** As microrredes podem ser planejadas para operar em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC). A corrente alternada sofre inversão de sentido constantemente, o que está associado ao conceito de frequência da rede que varia entre 50 a 60, medida em Hz ou ciclos por segundo. Este comportamento limita a conexão de equipamentos que precisam estar dimensionados à frequência da rede. A corrente contínua não altera o sentido durante sua propagação. Nesse caso, não existe o conceito de frequência. Com a proliferação das fontes renováveis, o sistema de distribuição CC tem a vantagem de poder incorporar mais diretamente fontes de energia distribuídas diretamente no barramento (células a combustível, fotovoltaicos e dispositivos de armazenamento), sem a necessidade de inversores. Outro fator relevante é o crescimento de cargas CC nas residências e prédios comerciais, tais como os equipamentos eletrônicos e lâmpadas fluorescentes/LEDs, o que elimina perdas com conversões CC/CA [18] [19].

2. **Modo de Conexão com o Grid.** As microrredes podem ter a previsão de uma conexão à rede da concessionária que opera na região, neste caso são identificadas como *ongrid*, ou podem se manter desconectadas, *offgrid*. No formato *offgrid* a microrrede opera isolada, e autônoma [20]. Esse é o formato de conexão adotado nesse trabalho.
3. **Forma de operação.** As microrredes podem operar no modo centralizado ou *peer-to-peer* (P2P). Nesse último nenhum componente é fundamental para manter o sistema operando [21]. Já no centralizado toda a operação da rede depende de um ponto central de controle, o que a torna mais vulnerável, pois qualquer evento que afete este ponto central atinge toda a rede [21].
4. **Estabelecimento da topologia.** Uma microrrede pode ser estruturada, quando se estabelece de forma planejada e obedece a critérios definidos de configuração, sendo o padrão utilizado nas instalações elétricas convencionais. Em contraponto, uma microrrede pode ser *ad hoc*, quando é estabelecida sem um processo de planejamento prévio e sem uma supervisão centralizada. A organização *ad hoc* é adequada para resolver, de forma mais imediata e ágil, a falta de acesso à eletricidade em zonas rurais e/ou ilhadas e/ou em desenvolvimento e podem ser configuradas dependendo das necessidades da comunidade local [22].

Neste trabalho, realizamos simulações em uma microrrede *ad hoc* P2P em corrente contínua, representada pela Figura 4.

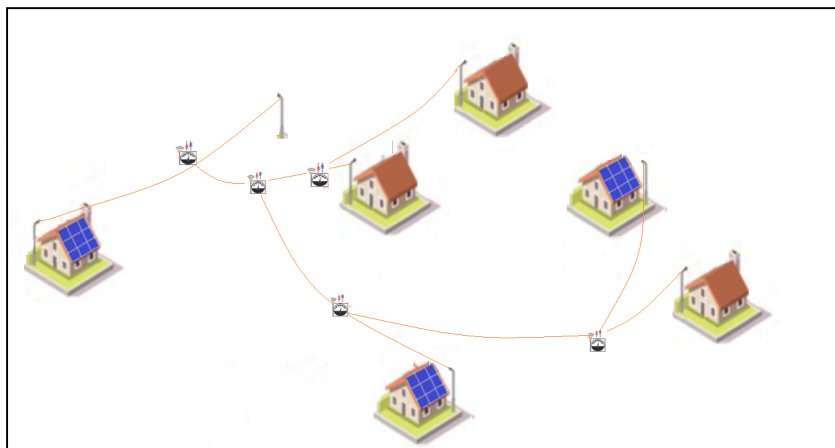


Figura 4: Arranjo da microrrede da simulação

1.3 Comércio de Energia

O comércio de energia elétrica desde seu surgimento, no final do século XIX, tem tido como protagonista grandes empresas de energia, que negociam com o usuário final. Nesse ambiente de negócio, o consumidor tipicamente não pode escolher o fornecedor do qual comprar sua energia [23].

No modelo centralizado, existe um agente intermediador, responsável por toda a parte financeira, trâmites regulatórios e infraestrutura de distribuição. Qualquer gerador ou consumidor interessado em negociar energia o faz direto ao agente intermediador, conforme Figura 5. Este modelo é aplicado na negociação de energia entre empresas de distribuição de energia, as concessionárias, e os usuários finais.

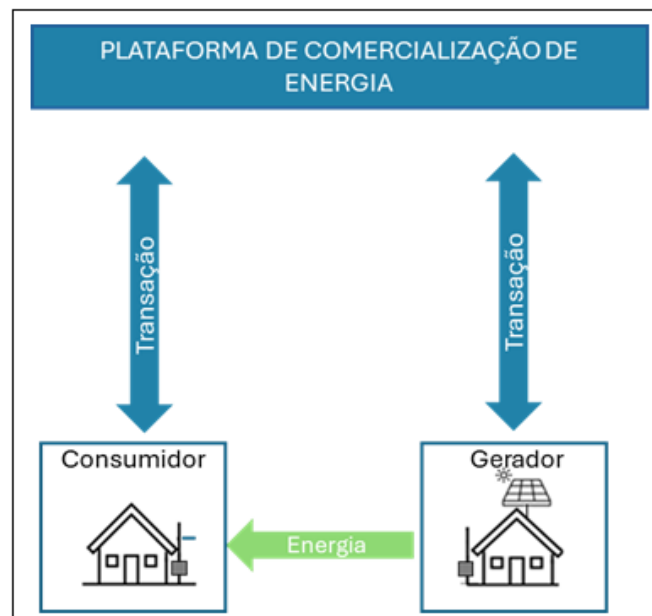


Figura 5: Comércio de energia centralizado

No entanto, nas últimas duas décadas, este cenário foi alvo de uma profunda reestruturação, acompanhando o crescimento da geração distribuída de energia elétrica [24]. Esse movimento alterou o perfil dos consumidores que aproveitam a possibilidade da geração local para atender a seu autoconsumo e ainda gerarem excedentes para venda à outros consumidores próximos [25], conforme Figura 6. Este modelo de comércio é aplicável às microrredes *ad hoc*, nas quais a negociação de energia pode ocorrer de forma direta entre as partes ou por meio de plataformas distribuídas, como aquelas baseadas em tecnologias *blockchain*.. Por exemplo, uma casa com painel solar pode vender o excesso

de energia para outras residências dentro da microrrede.

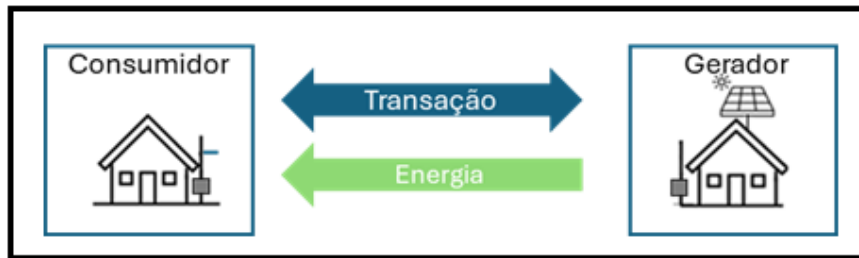


Figura 6: Comércio de energia descentralizado

1.4 Blockchains

As *blockchains* inicialmente emergiram no contexto das criptomoedas; contudo, sua aplicação tem se expandido para diversos setores, como saúde, turismo e energia [26]. Sistemas baseados em *blockchain*, como Bitcoin [27], Ethereum [28] e HyperLedger [29], são considerados livros-razão distribuídos e resistentes a adulterações, utilizados para o rastreamento de transações em redes P2P, sejam estas públicas ou privadas.

Esses sistemas incorporam mecanismos de consenso que asseguram a ordenação sequencial e inequívoca das transações armazenadas [30]. A classificação das *blockchains* pode ser realizada com base na arquitetura adotada na estruturação das cadeias, sendo divididas, principalmente, em três categorias: *blockchains* padrão, híbridas e sistemas baseados em grafos acíclicos direcionados (Directed Acyclic Graphs – DAGs) [31].

As *blockchains* padrão, exemplificadas pelo Bitcoin [27] e pelo Ethereum [32], armazenam transações em uma estrutura sequencial de blocos encadeados linearmente. Essa cadeia é continuamente expandida por meio da adição de novos blocos, cada um contendo um conjunto de transações organizadas. Qualquer dispositivo pode integrar-se à rede como nó, mantendo uma cópia completa da cadeia localmente. A validação das transações é conduzida por um subconjunto de nós, seguindo as regras definidas pelo protocolo. Uma vez validados, os blocos são incorporados à cadeia na ordem estabelecida pelo algoritmo de consenso, sendo que cada bloco referencia criptograficamente o bloco anterior, estabelecendo uma ligação que remonta ao bloco gênese.

Já os sistemas híbridos, como o Hyperledger Fabric [29] e o Ripple [33], surgem com o objetivo de reforçar a privacidade. Nessas arquiteturas, a rede não é totalmente pública, mas preserva propriedades essenciais como integridade, transparência e segu-

rança. Os participantes podem determinar quem está autorizado a ingressar na rede e quais transações serão públicas. Estruturalmente, esses sistemas mantêm a organização típica das *blockchains* padrão, com blocos compostos por dados transacionais, referência criptográfica ao bloco anterior e metadados, que normalmente incluem o hash e o número de conta.

Por sua vez, os sistemas baseados em DAGs, como DagCoin, IOTA e Byteball, substituem a lista linear de blocos por um grafo acíclico direcionado [34], que constitui a estrutura fundamental para o gerenciamento das transações. Nessa abordagem, cada nó do grafo representa uma transação e, ao ser registrada, uma nova transação conecta-se a dois ou mais nós pré-existentes, seguindo algoritmos específicos de seleção, promovendo assim um fluxo de validação não linear.

Além da arquitetura, esses sistemas também podem ser classificados quanto ao controle de acesso e participação na rede. Com relação ao controle de acesso podem ser públicas, privadas ou consórcio. As públicas, como o Bitcoin e o Ethereum, não limitam o acesso, qualquer usuário pode entrar, favorecendo a descentralização, mas apresentando menor privacidade e limitações de escalabilidade. As privadas restringem o acesso a um conjunto específico de usuários, como ocorre em redes corporativas internas, oferecendo maior controle e privacidade, embora com menor descentralização. As *blockchains* de consórcio, por sua vez, são controladas por um grupo de organizações e geralmente adotadas em contextos como cadeias de suprimentos [35]. Nesse modelo semiprivado, o ingresso e a interação na rede dependem de autorização, permitindo colaboração interinstitucional, mas exigindo governança mais complexa.

A participação na rede pode ser classificado em duas modalidades: permissionado e não permissionado. As redes permissionadas requerem autorização para participação, os participantes são identificáveis, há confiança entre as partes, as decisões são tomadas por uma organização ou consórcio e as transações são privadas. Já as não permissionadas são abertas, permitindo que qualquer usuário participe. As decisões são tomadas por comunidades sem a necessidade de pré-aprovação ou relações de confiança estabelecidas previamente entre as partes e as transações são públicas.

A Tabela 1 apresenta exemplos de *blockchains* e como são classificados quanto a forma e controle de acesso.

Tabela 1: Categorização das *blockchains*

Plataforma	<i>Estrutura</i>	<i>Tipo de rede</i>
<i>Bitcoin</i>	cadeia de blocos	Pública/Não permissionada
<i>Ethereum</i>	cadeia de blocos	Pública / Não permissionada
<i>Freechains</i>	cadeia de blocos	Pública / Não permissionada
<i>Hyperledger Fabric</i>	cadeia de blocos	Privada / Permissionada
<i>IOTA</i>	DAG	Pública/Não permissionada
<i>Consórcio Blockchain</i>	cadeia de blocos	Pública ou Privada / Permissionada

1.4.1 Blocos e Árvores Merkle

O bloco é a estrutura de dados básica em uma *blockchain* e é formado por um cabeçalho e por um corpo. O cabeçalho armazena os metadados do bloco e o corpo armazena as transações.

O cabeçalho de diferentes sistemas de *blockchains* é ligeiramente diferente. Esses cabeçalhos podem ser divididos em dois conjuntos, um que inclui informações relacionadas à mineração, como carimbo de tempo ou *timestamp* e o outro que inclui informações relacionadas à árvore *Merkle*, como o *hash* do bloco pai e a chave pública do publicador [36].

Para cada transação é computado um *hash* criptográfico. Na árvore *Merkle*, o *hash* criptográfico de cada transação fica nas folhas, enquanto a raiz da árvore guarda a soma da soma dos *hashes*. Caso haja qualquer tipo de adulteração na transação, a verificação será possível através de um dos valores do somatório dos *hashes* criptográficos. O uso de funções criptográficas de *hash* possibilita a verificação de integridade de dados e sua posterior autenticidade. Porém, para se confiar na integridade atestada por uma função de *hash* também é necessário confiança no valor *hash* de referência. A ligação entre os blocos é concretizada pelo armazenamento do resultado do *hash* criptográfico do bloco anterior no cabeçalho do novo bloco. Esse processo garante a imutabilidade [32] dos dados da cadeia. A Figura 7 apresenta um caso de tentativa de corromper a cadeia. Observa-se que o ramo em vermelho na árvore à direita representa a tentativa de corromper dados de transação na cadeia.

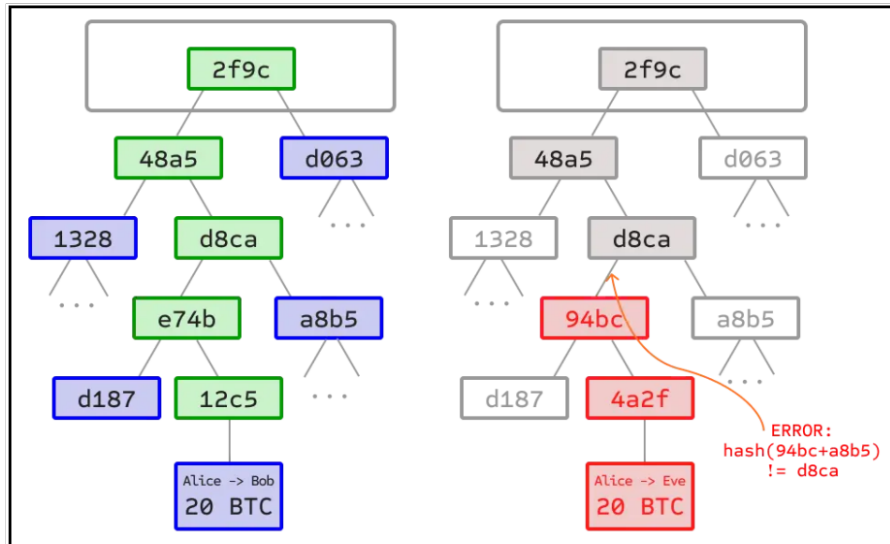


Figura 7: Árvore de Merkle
[32]

1.4.2 Criptografia de chaves públicas

Outro método criptográfico amplamente utilizado em *blockchains* é a criptografia de chave pública. Também conhecida como criptografia assimétrica, ela ajuda a estabelecer transações seguras e verificáveis entre os participantes. Cada usuário possui um par exclusivo de chaves: uma chave privada, que é mantida em segredo e uma chave pública que é compartilhada abertamente. Quando um usuário inicia uma transação, ele a assina usando sua chave privada, criando uma assinatura digital. Os participantes na rede podem verificar a autenticidade da transação aplicando a chave pública do remetente à assinatura digital. Essa abordagem garante transações seguras, pois apenas o proprietário legítimo da chave privada pode autorizar uma transação, mas todos podem verificar as assinaturas com base na chave pública [36].

Neste trabalho, a criptografia assimétrica é empregada como mecanismo para garantir a identidade dos usuários e assegurar a autenticidade das ações realizadas na rede, como publicações e interações (“aprovações” e “reprovações”), as quais servem de base para o cálculo da reputação no sistema.

Cada participante possui um par de chaves criptográficas assimétricas: uma chave pública e uma chave privada. A chave pública atua como identificador único do usuário na rede, enquanto a chave privada é utilizada para assinar digitalmente todas as ações por ele realizadas.

Dessa forma, como a reputação é construída com base nas ações assinadas e associadas a cada identidade criptográfica, ela está diretamente vinculada à chave pública do usuário.

1.4.3 Consenso

O algoritmo de consenso garante uma ordem sequencial e inequívoca das transações e é um mecanismo crucial no contexto das *blockchains*. Ele é responsável por garantir que todas as partes de uma rede distribuída concordem sobre o estado atual do sistema, especialmente sobre a validade das transações e a ordem dos blocos. Existem diversos tipos de algoritmos de consenso:

- Prova de trabalho - *Proof of Work* (PoW)

No PoW os participantes competem para solucionar um problema matemático complexo e adicionar o próximo bloco à *blockchain*. Nesse processo, conhecido como mineração, o primeiro participante a solucionar o problema é recompensado com criptomoedas. O processo de mineração requer quantidades significativas de poder computacional e, conseqüentemente, de energia elétrica, sendo portanto dispendioso. A *blockchain* do Bitcoin usa este mecanismo [37].

- Prova de posse - *Proof of Stake* (PoS)

Em um sistema PoS, em vez de mineradores competirem para resolver problemas matemáticos complexos, os validadores são escolhidos com base na quantidade de criptomoedas que eles possuem na rede. Os validadores mantêm uma certa quantidade de criptomoedas, ou “staking”, como garantia para participar do processo de consenso. Eles são selecionados aleatoriamente para criar novos blocos e validar transações com base em seu valor de staking. Os validadores são recompensados com taxas de transação pela criação de novos blocos e como um incentivo para agir em prol da rede. É o mecanismo usado pelo Ethereum [38].

Diante das limitações dos mecanismos tradicionais de consenso, novas propostas têm explorado abordagens que consideram informações relacionadas ao comprometimento dos usuários como critério para garantir o bom funcionamento da rede. Nesse contexto, a reputação do participante surge como um parâmetro relevante a ser incorporado no

processo de validação e aceitação de blocos nas *blockchains*. Além dos mecanismos baseados em Proof of Work (PoW) e Proof of Stake (PoS), outras alternativas vêm sendo desenvolvidas, como a Tolerância a Falhas Bizantinas (BFT) [39], o Proof of Activity (PoA) [40] e os modelos baseados em reputação [4].

- Tolerância a falhas bizantinas -*BFT*

O princípio de operação do mecanismo BFT é que ele é implantado em uma rede com um número conhecido de validadores: não pode haver mais do que um número pré-determinado. Também exige que cada transação seja verificada por um certo número de validadores. Exemplos: Tendermint, Hyperledger Fabric, portanto, não funciona em redes não permissionadas [41].

- Reputação

Os validadores são identificados com base em sua reputação, em vez da quantidade de criptomoedas que detêm, sendo selecionados conforme seu tempo de participação e grau de interação na rede. Em casos de comportamento malicioso, podem ser excluídos por meio da perda de reputação.

1.4.4 Contratos inteligentes

A terminologia *contrato inteligente* (*smart contract*) foi proposta por Nick Szabo ainda antes do advento das *blockchains*. Segundo o autor, esses contratos correspondem a softwares capazes de replicar relações contratuais, com o objetivo de facilitar negociações, assegurar o cumprimento de acordos e automatizar o controle de ativos digitais [42]. Com o surgimento das tecnologias *blockchain*, os contratos inteligentes passaram a ser amplamente utilizados como mecanismos de formalização e automação de acordos entre partes, eliminando intermediários. Sua lógica transparente e imutável garante que as cláusulas sejam executadas automaticamente sempre que as condições estabelecidas forem satisfeitas [43, 44].

No setor de energia, sua aplicação tem sido especialmente discutida em modelos de comércio *peer-to-peer* (P2P). Nesse contexto, é possível imaginar comunidades residenciais equipadas com painéis solares, em que usuários com excedente de geração negociam diretamente com vizinhos que necessitam de energia adicional, criando mercados locais descentralizados. Essa aplicação pode ser descrita por meio do seguinte fluxo:

1. Oferta e consumo

- O produtor cadastra uma oferta no contrato inteligente: “Disponibilizo 8 kWh por R\$ 0,70/kWh entre 12h e 15h.”
- O consumidor consulta a plataforma *blockchain* e aceita a oferta.

2. Monitoramento

- Os medidores inteligentes medem, em tempo real, quanto foi efetivamente fornecido e consumido.
- A cada 15 minutos, um oráculo envia os dados de consumo e geração para o contrato inteligente.

3. Pagamento Automático

- O contrato verifica se os critérios foram cumpridos (ex: 8 kWh entregues entre 12h e 15h).
- Se sim, transfere automaticamente tokens do consumidor para o produtor.
- O pagamento ocorre em cripto, podendo ser convertido para moeda local por meio de integração com uma carteira.

Apesar de seu potencial, a adoção de contratos inteligentes enfrenta desafios significativos. Um dos principais obstáculos decorre da dependência de dados externos, pois esses contratos não possuem acesso nativo a informações fora das *blockchains*. Em ambientes não permissionados, essa limitação se torna crítica, dado que a verificação da veracidade de dados externos não pode ser realizada intrinsecamente ao protocolo [45]. Uma solução frequentemente empregada consiste no uso de *oráculos*, mecanismos ou serviços intermediários que coletam, processam e inserem informações externas na *blockchain*, permitindo que contratos inteligentes interajam com o “mundo real” [46, 47]. No entanto, esses mecanismos configuram um ponto único de falha, tornando-se vulneráveis a ataques cibernéticos ou conluio entre agentes. Em sistemas de energia P2P, por exemplo, medições adulteradas podem distorcer preços, comprometer a execução das transações e fragilizar a natureza distribuída da rede, uma vez que a confiança passa a depender diretamente da integridade e disponibilidade desses intermediários. Mesmo em propostas

de uso Redes Descentralizadas de Oráculos [48], o desafio permanece: equilibrar descentralização, eficiência e verificabilidade em um cenário em que qualquer nó pode agir de forma oportunista. A verificabilidade limitada de certas informações externas dificulta a validação objetiva dos dados, tornando estas redes dependentes de mecanismos de reputação e auditoria comunitária [49]. A concepção de que um Oráculo desempenhe o papel de "detentor da verdade" é incompatível com as características da rede não permissionada. A Tabela 2 apresenta um quadro comparativo que sintetiza os principais problemas associados ao uso de contratos inteligentes em ambientes não permissionados, evidenciando seus impactos sobre a confiabilidade e a segurança das interações.

Tabela 2: Principais problemas de contratos inteligentes em ambientes não permissionados

Problema	Impacto no Sistema
Dependência de dados fora da cadeia.	Execução com base em informações falsas ou manipuladas
Manipulação de dispositivos	Fraude em medições e transações
Ataques a oráculos	Fornecimento de dados incorretos ou atrasados
Ausência de retroatividade	Impossibilidade de reverter fraude ou erro operacional

Nesse contexto, a proposta deste trabalho busca superar essa limitação ao adotar uma abordagem que dispensa o uso de contratos inteligentes e preserva a descentralização plena, eliminando a necessidade de intermediários. Para tanto, propõe-se a interação direta entre a *blockchain* e o "mundo real" por meio de um protocolo especificamente projetado para o ambientes de microrredes *ad hoc*, detalhado no Capítulo 3.

2 *FREECHAINS*

Neste capítulo, apresentamos o *Freechains*, uma *blockchain* pública e não permissionada, destacando seus fundamentos conceituais. Abordamos o mecanismo de consenso empregado, que assegura integridade e confiança nas interações entre os participantes, e também o sistema de reputação, que incentiva comportamentos colaborativos e ajuda a prevenir abusos na rede. Por fim, exploramos a aplicação prática de seus comandos no contexto do ambiente de comércio de energia *ALCE*, evidenciando como o *Freechains* pode oferecer suporte a transações seguras e transparentes.

2.1 Fundamentos conceituais

Freechains é um protocolo de disseminação de conteúdo P2P que não depende de controle centralizado ou de confiança prévia entre seus participantes [4].

Os participantes interagem com o *Freechains* através de postagens de conteúdo (mensagem de texto, tópicos, dados estruturados). Para realizar uma postagem, os participantes precisam “gastar” unidades de reputação conhecidos como *reps*. Essa estratégia tem o objetivo de combater o abuso por parte de usuários maliciosos e está ligada diretamente ao mecanismo de consenso do *Freechains*. Os participantes também podem “curtir” (*like*) ou “descurtir” (*dislike*) postagens, o que transfere *reps* entre eles.

Quando um participante posta uma mensagem em uma cadeia específica, sua reputação, ou seja, a quantidade de unidades de *reps* da sua “carteira”, influencia a ordem da sua postagem no caso de corrida crítica.

A distribuição da cadeia ocorre de maneira descentralizada e sob demanda, por meio de um protocolo P2P. Cada nó armazena uma cópia da cadeia localmente, com a qual interage diretamente. Quando dois nós estabelecem conexão, eles comparam os hashes dos blocos mais recentes das cadeias em comum e, caso identifiquem divergências ou desatualizações, iniciam um processo de sincronização. Durante esse processo, apenas os blocos ausentes são transferidos, otimizando o uso de largura de banda e armazenamento.

A verificação de integridade no sistema *Freechains* é assegurada por meio do encadeamento criptográfico dos blocos, de forma análoga ao funcionamento das *blockchains* tradicionais. No entanto, o mecanismo de consenso adotado pelo *Freechains* difere substancialmente das abordagens convencionais, uma vez que não depende de processos de

mineração nem requer validação global. Em seu lugar, conforme previamente discutido, o *Freechains* implementa um modelo de ordenação dos blocos baseado na reputação dos participantes da rede.

A proposta apresentada neste trabalho utiliza a infraestrutura do *Freechains* como base para modelar as interações entre os participantes de um sistema de comércio de energia elétrica no paradigma P2P. Através do encadeamento criptográfico de blocos, é construída uma cadeia específica destinada ao registro das atividades de comercialização de energia, que, nas nossas simulações, denominamos de *#alce*. Essa cadeia armazena tanto informações referentes aos ramais de distribuição — que representam a infraestrutura física da rede elétrica — quanto os registros das transações de compra e venda de energia. Além disso, o sistema incorpora um mecanismo de avaliação mútua entre os participantes, viabilizado por meio de interações de comandos *Freechains* do tipo *likes* e *dislikes*, o que permite a construção de uma reputação distribuída e dinamicamente ajustada com base no histórico de participação de cada agente na rede [4].

2.2 Sistema de reputação

O sistema de reputação do *Freechains* regula a entrada de postagens na cadeia. As postagens feitas por usuários sem reputação ficam retidas e precisam que outros participantes com reputação as liberem para que sejam encadeadas na *blockchain*. Essa liberação é feita através de *likes*. O *Freechains* utiliza uma metodologia de cálculo da quantidade de *likes* e *dislikes* direcionados aos usuários e à suas postagens, para restringir os abusos típicos em ambientes não permissionados.

O sistema de reputação funciona da seguinte forma:

1. Incremento de unidades de *reps*:
 - (a) A criação de uma cadeia adiciona uma determinada quantidade de *reps* aos usuários pioneiros.
 - (b) Qualquer postagem mais antiga que 24h conta +1 *rep* ao usuário que postou, mas limitada a uma por dia.
2. Consumo de unidades de *reps*:
 - (a) Qualquer postagem mais jovem que 24h conta -1 *rep* ao usuário que postou.

3. Transferência de unidades de *reps*:

- (a) Um *like* partindo do usuário (A) para o usuário (B) conta -1 *rep* para (A) e +1 *rep* para (B) [4].

2.3 Consenso do *Freechains*

O *Freechains* emprega um algoritmo de consenso para impor uma mesma ordem às postagens na cadeia entre os nós pares da rede, e portanto validar operações simultâneas de forma consistente. Esse consenso, ordena as postagens favorecendo as ramificações que possuem usuários com mais reputação na rede. Isto acontece da seguinte maneira, considerando a Figura 8:

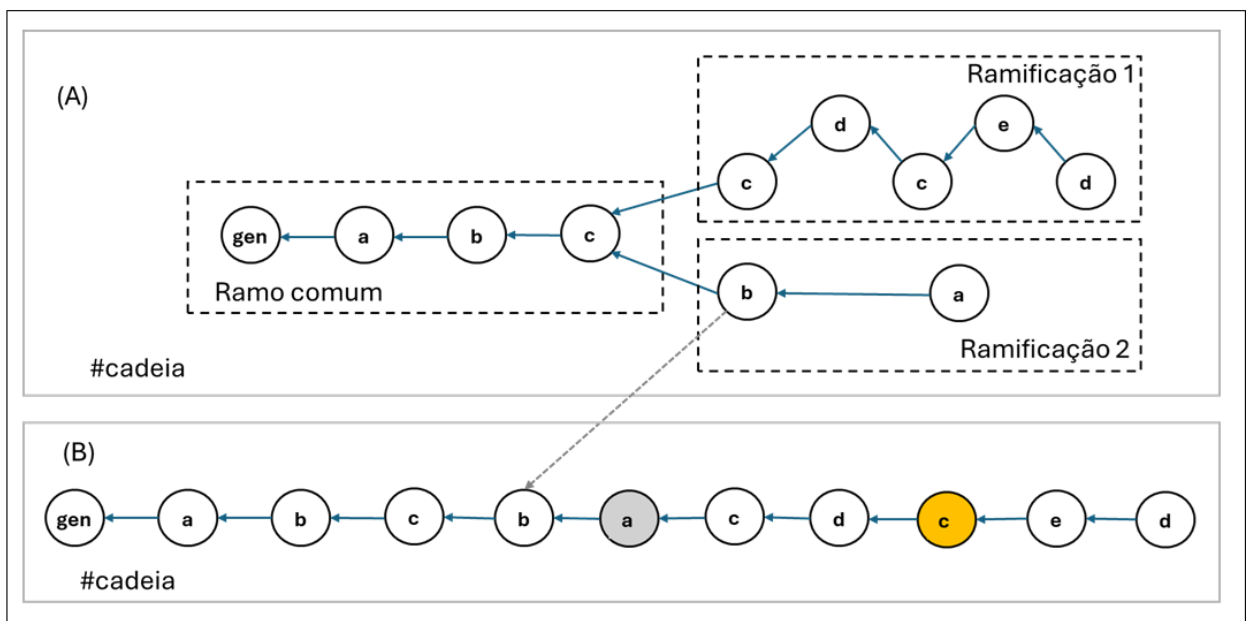


Figura 8: Consenso *Freechains*

- No diagrama (A), as postagens dos usuários (a), (b) e (c) formam um DAG. Vamos supor que, no ramo comum, até um determinado instante os usuários (a) e (b) tenham mais reputação combinados do que (c) sozinho. A partir desse ponto formam-se duas ramificações. Uma ramificação com (a) e (b), que tem menos atividade que a outra ramificação de (c) com dois novos participantes, (d) e (e). No entanto, a ramificação 2 é ordenada primeiro porque, antes do ponto de bifurcação, (a) e (b) tinham mais reputação do que (c), (d) e (e) combinados.

- No diagrama (B), é representada a ordem de consenso formada por todos os blocos na cadeia. Todas as operações na ramificação 2 aparecem antes de qualquer operação da 1. Por exemplo, suponha que a última publicação de (a), em cinza, seja a postagem de um *dislike* para o usuário (c). Então, é possível que a última publicação de (c), em vermelho, agora com 0 de reputação, seja rejeitada junto com todas as publicações de (d) e (e) em sequência.

A estrutura de DAG Merkle permite que o *Freechains* mantenha múltiplas ramificações da cadeia de forma segura e auditável. O mecanismo de consenso baseado em reputação atua sobre essa estrutura para determinar a ramificação canônica (principal), escolhendo o caminho que maximiza a confiança social da rede. Observe que, em um DAG Merkle, não é possível remover apenas o bloco com a operação falha; em vez disso, o *Freechains* remove completamente a ramificação restante, como se ela nunca tivesse existido.

2.4 Comandos do *Freechains*

O *Freechains* disponibiliza uma interface de linha de comando que possibilita aos usuários interagirem diretamente com o sistema de cadeias descentralizadas. Por meio dessa interface, é possível executar operações como criação, publicação, replicação, validação, moderação e sincronização de conteúdos na cadeia. Nesse sentido, a presente proposta estabelece uma integração prática com o *Freechains*, exemplificada pelo uso de alguns de seus comandos, que ilustram de maneira concreta como o protocolo pode ser aplicado em nosso contexto de estudo.

1. Inicialização de um nó local:

```
1 $ freechains-host start
```

2. Criação de um par de chaves que identifica um participante:

```
1 $ freechains keys "senha forte"
2 4E34F4... 299D23... # par de chaves
```

O comando espera uma senha e devolve um par de chaves pública e privada. A chave pública *4E34F4...* identifica o participante em diversas operações do *ALCE*, que são assinadas com a chave privada *299D23...* correspondente.

3. Criação de uma cadeia *#alce*:

```
1 $ freechains join '#alce' '4E34F4... 9C0DA1...'
2 0_712C62... # identificacao da cadeia
```

As chaves *4E34F4...* e a *9C0DA1...* identificam os pioneiros da cadeia, que recebem unidades de reputação iniciais. O parâmetro *#alce* representa a cadeia do comércio de energia na microrrede simulada dessa proposta.

4. Postagens no *Freechains*

Os usuários podem gastar pontos para postar e classificar conteúdos nos fóruns: uma postagem penaliza inicialmente os autores até que se consolide e conte positivamente.

Uma postagem é realizada com comando *post*. Esse comando permitem que o usuário incluam um conteúdo, que pode ser um texto, uma mensagem ou uma estruturas como *likes* e *dislikes*, dependendo da aplicação.

```
1 $ freechains '#alce' post --sign=9C0DA1... \
2 > '{ \
3 >   "tabela": "RAMAL", \
4 >   "conexao": "4E34F4...", \
5 >   "distancia": "200" \
6 > }'
7 1_65C620... # identificacao do bloco da postagem
```

A seguir são descritos alguns parâmetros de postagem:

4.1 Comando *like*

O comando *like* é utilizado para expressar uma avaliação positiva sobre um bloco previamente publicado em uma cadeia. A sintaxe geral do comando com as informações da cadeia *#alce* é apresentada abaixo:

```
1 $ freechains chain '#alce' like '14_80007B...' --sign=A43413
2
3 15_47A7C7... # identificacao do bloco da postagem
```

Funcionamento técnico:

- (a) Ao executar o comando, o *peer* responsável emite uma transação que referencia diretamente o bloco avaliado.

- (b) Essa transação é registrada na cadeia e propagada para os demais participantes, tornando pública a avaliação.
- (c) O efeito imediato é o acréscimo de reputação ao autor do bloco original, fortalecendo sua credibilidade.

4.2 Comando *dislike*

O comando *dislike* é empregado para registrar uma avaliação negativa sobre um bloco previamente publicado em uma cadeia. Em termos formais, trata-se de uma operação que expressa desaprovação ou notificação de não conformidade, implicando em uma redução da reputação do autor do bloco avaliado, mas também do autor do *dislike*.

A sintaxe geral do comando é:

```

1 $ freechains chain '#alce' dislike '2_A336C8...' --sign=A43413 --
   why='Falta de energia no horario de 12:00 as 23:00'
2
3 69_AE7A16... # identificacao do bloco da postagem

```

Funcionamento técnico:

- (a) A execução do comando gera uma transação que referencia diretamente o bloco considerado inadequado ou incorreto.
- (b) Essa transação é incorporada à cadeia e disseminada entre os participantes da rede.
- (c) O efeito imediato é a redução da reputação tanto do autor da postagem de *dislike* como do autor do bloco, comprometendo sua confiabilidade e sua capacidade de influência no sistema.
- (d) Esse mecanismo funciona como um instrumento de moderação distribuída, já que a comunidade pode, de forma colaborativa, sinalizar conteúdos ou práticas nocivas.

4.3 Comando *get (block / payload)*

O comando *get* no *Freechains* é utilizado para recuperar conteúdos armazenados em blocos, através do parâmetro *payload* ou informações do núcleo do bloco através do parâmetro *block*.

Em termos funcionais, trata-se de uma operação de consulta que permite ao usuário acessar os dados associados a um bloco específico, identificado por seu hash (identificador único do bloco).

A sintaxe com parâmetro *payload* (exemplo do *ALCE*):

```

1
2 $ freechains chain \#alce get payload 3_50FDE4...
3
4 # resultado do comando:
5 {"tabela": "VENDA", "preco": "1", "kwh": [ "0,2","0,2","0,2","0,2",
      "0,2","0,2","0,2","0,2","0,7","0,6","0,9","0,9","1,1","1,1",
      "1,1","0,8","0,4","0,2","0,2","0,2","0,2","0,2","0,2"], "
      pix": "oxf54..."}

```

A sintaxe com parâmetro *block* (exemplo do *ALCE*):

```

1
2 $ freechains chain \#alce get block 15\_47A7C7...
3
4 # resultado do comando:
5

```

Bloco 15_47A7C7...:

```

1 {
2 >   "immut": {
3 >     "time": 11550000250,
4 >     "pay": {
5 >       "crypt": false,
6 >       "hash": "FD7B3E..."
7 >     },
8 >     "like": {
9 >       "n": 1,
10 >       "hash": "14_80007B..."
11 >     },
12 >     "backs": [
13 >       "14_80007B..."
14 >     ]
15 >   },
16 >   "hash": "15_47A7C7...",
17 >   "sign": {

```

```

18 >     "hash": "B2F2A0...",
19 >     "pub": "4E34F4..."
20 >   }
21 > }

```

No núcleo do bloco estão armazenadas as informações essenciais da mensagem, incluindo o registro temporal de sua criação, a indicação de criptografia e a marcação de avaliação positiva (*like*) ou negativa (*dislike*).

5. Verificação da quantidade de reps de um usuário

```

1 $freechains chain '#alce' reps '4_29A673...'
2 27          # identificacao a reputacao

```

O sistema de reputação rastreia a reputação dos participantes da cadeia. Cada cadeia é independente, portanto, a reputação de um determinado usuário pode variar entre as cadeias. A unidade de reputação é conhecida como rep e pode ser criada, gasta e transferida.

6. Monitoramento de cadeia: escuta da entrada de novos blocos.

```

1 $freechains chain #alce listen
2
3 1          # sinaliza que um novo bloco entrou

```

Este comando permite ao *Freechains* usar um mecanismo de escuta contínua da cadeia especificada. Sempre que um novo bloco é adicionado ou há alguma alteração relevante, o comando imprime 1 na tela. Ele funciona como um *listener* (um observador), permitindo que aplicações externas reajam a mudanças na *blockchain*.

7. Consenso da cadeia:

```

1 $ freechains chain '#alce' consensus
2 0_712C62... 1_65C620... 2_11FE3D... 3_EE88EB... 4_4C94CC... ...
   # apresenta o ordenamento dos blocos na cadeia

```

O *Freechains* emprega um algoritmo de consenso para impor a mesma ordem de mensagens entre os pares e, assim, validar operações concorrentes de forma consistente.

2.5 Estados das postagens na cadeia *Freechains*

Uma postagem, ao ser submetida à cadeia, pode assumir quatro diferentes estados operacionais, cada um refletindo o nível de validação e de integração ao sistema:

Aceita – ocorre quando o autor possui reputação suficiente para que a postagem seja imediatamente incorporada a cadeia. Nesse estado, a mensagem passa a ser reconhecida como parte integrante da rede, podendo receber conexões de novas publicações.

Bloqueada – caracteriza-se pela ausência de reputação do autor. A postagem não é integrada e permanece inativa até que receba a validação de outro participante por meio de um *like*. Enquanto bloqueada, ela não estabelece conexões com novas publicações, e sua disseminação pela rede não é obrigatória.

Validada por comunidade – corresponde ao estado em que uma postagem inicialmente bloqueada é posteriormente legitimada por meio da atribuição de um *like*. A partir desse momento, a mensagem passa a integrar a cadeia, adquirindo status equivalente ao de uma postagem aceita de forma imediata.

Oculto – representa o estado no qual uma postagem, embora previamente aceita ou validada, é posteriormente marcada com mais *dislikes* do que *likes*, o que representa o status de inadequada pela comunidade. Nesse caso, o conteúdo permanece registrado na cadeia por questões de imutabilidade, mas sua visibilidade e propagação tornam-se restritas, podendo ser omitida das interações usuais entre os pares.

Esses quatro estados estabelecem um mecanismo de governança descentralizada, equilibrando a necessidade de controle de qualidade dos conteúdos publicados com a inclusão de novos participantes, sem recorrer a uma autoridade centralizada.

2.6 Comunicação entre os nós no *Freechains*

Os nós da rede realizam o processo de comunicação seguindo a sequência: conecta, sincroniza e carregam localmente a *blockchain* inteira, conforme descrito abaixo:

1. Inicie o *host* do *Freechains*
2. Entre na mesma cadeia privada, exemplo *#alce*.
3. Sincronize com o primeiro *host*.

```
1
2 $ freechains-host start /tmp/freechains --port=8331
3
4 $ freechains --host=localhost:8331 chains join '#alce' 96700A...
5 C40DBB...
6 $ freechains --host=localhost:8330 peer localhost:8331 send '#alce'
7 2 / 2
```

O último comando envia todas as novas postagens de 8330 para 8331. Não há necessidade de um nó estar o tempo todo conectado. Como em muitas redes P2P, os nós podem entrar e sair, e a conectividade deve lidar com nós que ficam *offline*. Eventualmente todos os nós irão estar com a mesma visão da cadeia. A ideia é que a cadeia seja sempre carregada inteira no nó.

3 ALCE - AMBIENTE DE LIVRE COMÉRCIO DE ENERGIA

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um ambiente não permissionado de comércio de energia elétrica em um arranjo *peer-to-peer* com aplicação à microrredes *ad hoc*.

A proposta fundamenta-se em diferentes aspectos que, embora distintos em sua natureza, quando articulados de forma integrada, constituem elementos essenciais para a estrutura da solução:

- O comportamento cooperativo esperado dos participantes, onde cada usuário é o operador da sua infraestrutura de distribuição, que inclui ramais, fontes e medidores;
- A conexão de um novo ramal de usuário implica na implantação de um dispositivo controlador de potência. Coletivamente, esses controladores gerenciam a corrente máxima que deve fluir em cada ramal, assim gerenciando indiretamente toda a microrrede. Adicionalmente este dispositivo cooperam na identificação de falhas e furtos;
- Os usuários interagem para realizar transações de oferta e compra de energia, utilizando uma *blockchain* não permissionada, denominado *Freechains*. A integração desse ambiente de comércio ao *Freechains* é o núcleo da proposta. Os conflitos nesse ambiente são dirimidos através do mecanismo de reputação do *Freechains*.

Neste capítulo apresentamos o ambiente proposto, batizado *Ambiente de livre comércio de energia, ALCE*. Descrevemos inicialmente a base e os elementos considerados no ambiente. Em seguida, apresentamos e discutimos os detalhes do modelo de comércio proposto e como se dá a dinâmica entre vendedores e compradores de energia e como se dão as interações com o *Freechains*. Uma proposta de interface amigável, que abstrai o usuário dos detalhes do uso da *blockchain* é, então, discutida.

3.1 Fundamentos do ALCE

ALCE é um ambiente que implementa o comércio de energia P2P não permissionado projetado para microrredes *ad hoc* utilizando a tecnologia *blockchain*.

A responsabilidade pelo controle e operação da infraestrutura da microrrede é distribuída entre todos os participantes, sem que a saída ou entrada de um participante comprometa a continuidade dos serviços de distribuição.

Como apresentado na Introdução desse trabalho, a microrrede da Figura 1 surge quando o participante (A), que possui excedente de energia, instala o seu ramal (RA) aguardando por interessados em efetuar a compra dessa energia. (B) que é vizinho (A) demonstra interesse em adquirir parte desse excedente, instala seu ramal (RB) e controlador de potência e faz a conexão no ramal de A. Então (A) e (B) fazem um acordo par a par. Através desse acordo (B) paga antecipadamente a (A) pela energia que será consumida. (B) passa a consumir energia de (A).

Quando (C) um vizinho de (B) também decide participar da microrrede, ele combina sua conexão com ramal de (B). (C) quer comprar energia de (A). Porém, não existe relação de confiança entre (A) e (C). O desafio de ambientes não permissionados é justamente como garantir transações seguras sem confiança prévia entre as partes sem uma autoridade central. Nesse cenário, é preciso que exista uma forma de consenso robusta. Assim, os participantes (A) e (B) decidem utilizar suporte da *blockchain* através da criação de uma cadeia *Freechains*, que futuramente também terá que ser usada pelos demais participantes.

Para mitigar conflitos externos a *blockchain*, (A) e (B) combinam regras para o convívio na microrrede, que vão desde a instalação dos ramais e controladores até a forma de notificações que utilizam recursos de postagens do *Freechains* como *likes* e *dislikes*. Caso ocorram falhas de fornecimento o prejudicado pode usar do mecanismo de *dislike* para notificar. Como implica em perda de reputação, uma vez reconhecida a falha o causador deve restaurar o prejuízo inclusive da perda de reputação do notificador através do uso de *likes*.

As interações dos participantes da aplicação são realizadas através de postagens *Freechains* nessa cadeia específica. Toda postagem, de compra, venda ou para resolver conflitos, é relacionada a uma ou mais das três entidades do ambiente *ALCE*: Ramal, Venda, Compra ou Notificação, conforme detalhado na Subseção 3.1.1.

3.1.1 Estrutura dos dados do ambiente ALCE

A seguir, apresentam-se as descrições das entidades que estruturam o ambiente *ALCE*, com ênfase em seus atributos, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Entidades e estrutura de atributos

<i>Entidades</i>	<i>Atributos</i>
<i>Ramal</i>	id, conexao, distancia
<i>Venda</i>	preço, kwh, pix
<i>Compra</i>	venda, prazo, kwh, pix
<i>Notificacao</i>	referencia,motivo

Entidade RAMAL, tem a função de armazenar informações nominativas e referenciais do mundo real relativas a infraestrutura física de distribuição. Os atributos dessa entidade são detalhados a seguir:

- **id="RA"** representa a identificação descritiva do ramal, seu nome;
- **conexao="x"**, representa o ponto de conexão do ramal. No caso de (A) está identificado com (x) porque (RA) é o ramal inicial da microrrede. Para o ramal de (B), **conexao="4E34F4..."**, o conteúdo deste atributo é a chave pública de (A), uma vez que o ramal de (RB) é conectado ao (RA).
- **distancia="0"** representa a distância física do ponto de conexão até a origem do ramal "pai". Como (RA) é o primeiro ramal da microrrede, as informações relativas de localização são vazias. Para (B) o atributo **distancia=200**, indica a distância em metros entre o ponto de conexão de (RB) e a localização do dono do ramal (RA), conforme representada na Figura 1.

Com as informações de *conexao* e *distancia* para todos os ramais, a cadeia tem o registro da localização de todos os pontos de conexão, o que é essencial para determinar o fluxo elétrico entre os ramais da rede.

Entidade VENDA, representa informações relacionadas a primeira etapa do processo de comércio de energia, tem a função de organizar os dados da oferta de energia, com os seguintes atributos:

- `preco=1`, é o custo em reais para cada kWh contratado;
- `kwh=[...,1.6,1.4,...]`, representa a quantidade de energia disponível a cada hora durante as 24 horas do dia, conforme Tabela 4;
- `pix="oxf541..."`, representa uma identificação real para pagamento, transferência ou depósito (e.g., uma chave PIX).

Tabela 4: Distribuição da disponibilidade

<i>Periodo (hora)</i>	<i>kWh</i>
...	...
11:00	1.2
12:00	1.6
13:00	1.4
...	...

A entidade COMPRA representa a segunda etapa do comércio de energia e está atrelada obrigatoriamente à oferta de energia. A concretização da compra ocorre com o pagamento e apresentação do comprovante. Se não há contestação encerra-se a negociação, restando o cumprimento do acordo no mundo físico com a entrega da energia.

Essa entidade possui os seguintes atributos:

- `venda="2_11FE3D..."`, identifica o bloco com a oferta de energia a ser comprado;
- `kwh=[...,0.6,0.6,...]`, identifica a quantidade de energia contratada a cada hora, que está limitada a disponibilidade do pacote de venda;
- `prazo`, indica o período de consumo;
- `pix`, armazena o comprovante do pagamento, transferência ou depósito (já efetuado pelo comprador).

As entidades descritas anteriormente são o núcleo das postagens associadas a uma parte das interações entre usuários do *ALCE*, especificamente quando não existem problemas ou conflitos.

Após a compra de energia ter sido validada na cadeia, ela precisa ser validada no mundo físico, ou seja, o vendedor deve reconhecer o pagamento. Agora o novo usuário tem que parametrizar o seu controlador de potência. Esse processo de parametrização viabiliza a distribuição de energia, pois regula quanto de corrente irá circular entre ramais. Conforme descrito anteriormente, cada usuário é responsável por sua infraestrutura de distribuição e precisa estar atento as alterações da microrrede. A gestão colaborativa dos controladores de potência depende deste compromisso operativo de todos.

A infraestrutura elétrica de cada participante envolve os cabos condutores e equipamentos de proteção e controle, como o controlador de potência. Estes elementos são externos a *blockchain*. O controlador de potência é detalhado na Seção 3.2.

3.2 Controlador de potência

Este trabalho adota como infraestrutura elétrica uma topologia de distribuição em corrente contínua (CC), o que se justifica pela prevalência de fontes e cargas intrinsecamente compatíveis com esse tipo de corrente — como módulos fotovoltaicos, baterias, LEDs e aparelhos eletrônicos portáteis. Em uma residência típica, estima-se que entre 60% e 70% das cargas sejam de natureza CC, enquanto o restante (30% a 40%) corresponde a equipamentos projetados para operar em corrente alternada (CA), como motores, compressores e eletrodomésticos convencionais [50] [51].

A opção pela CC elimina a necessidade de conversores CA/CC, o que reduz as perdas associadas a inversores e retificadores. Assim, ao evitar tais conversões, ganha-se em eficiência energética, simplificação do sistema e redução de custos operacionais.

Além disso, a infraestrutura proposta combina uma fonte de energia com um controlador de potência e cargas, assegurando interface adequada com a rede e estabilidade na operação da microrrede.

O sentido da corrente em controladores de potência em corrente contínua é estabelecido por convenção, a partir da referência de fluxo de energia entre a fonte e a carga. Correntes positivas indicam fornecimento de potência (da fonte para a carga), enquanto correntes negativas representam retorno ou absorção de potência (da carga para a fonte). Essa definição é fundamental para a modelagem, implementação do controle e estratégias de proteção.

O controlador de potência apresentado na Figura 9 tem basicamente duas funções:

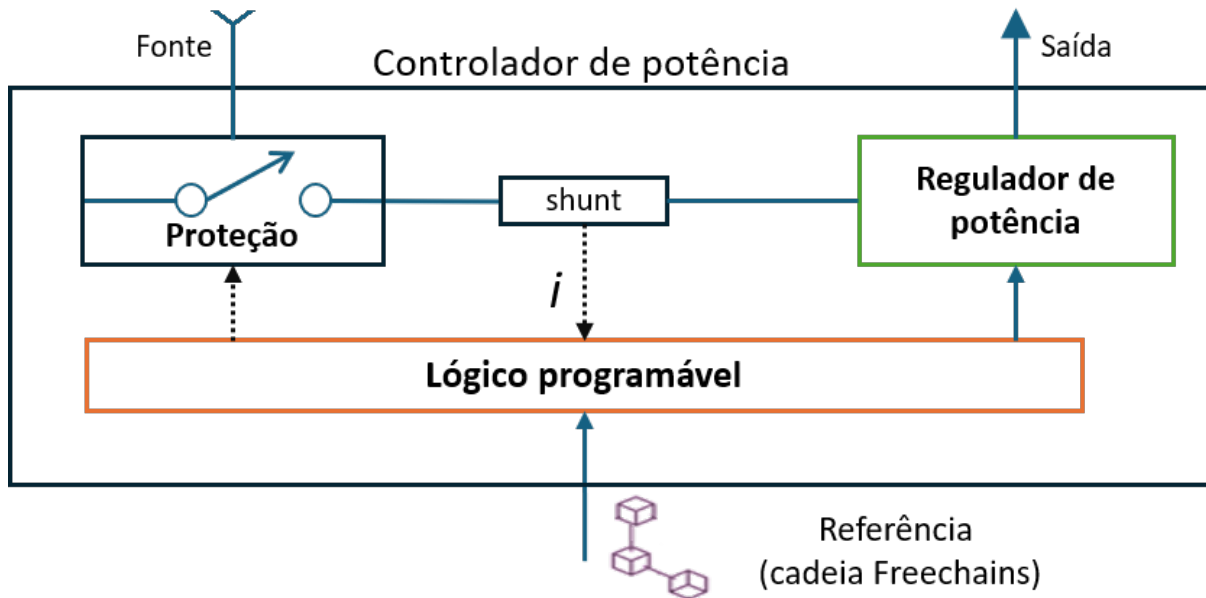


Figura 9: Elementos do controlador de potência

proteção e regulação. A função de proteção atua sempre que um distúrbio aconteça na rede. Desse modo, quando ocorre uma sobrecarga ou subtensão em um determinado ramal a conexão com o ramal “pai” abre automaticamente. A função de regulação limita o fluxo de energia através do controlador de um ramal para outro. Esses controladores precisam trabalhar de forma coordenada para regular o fluxo de energia na microrrede.

Os parâmetros dos controladores são baseados nas demandas contratadas que estão validadas na cadeia, nos atributos “kwh” dos blocos cujo atributo “tabela” tenha o conteúdo “COMPRA”, conforme exemplos a seguir relativos à compra de energia da oferta de (A) feitas por (B) e por (C):

- Postagem de Compra de energia de (B):

```

1 $ freechains '#alce' post --sign=7AFCD1... \
2 > '{ \
3 >   "tabela": "COMPRA", \
4 >   "venda": "16_E7F863...", \ #identificacao do bloco de venda
   de (A)
5 >   "kwh": [..., "0,5", "0,6", "0,6",...], \
6 >   "prazo": "25", \
7 >   "pix": "123467ADF" \
8 > }'
```

```
9 18_2DBF8E... # identificacao do bloco de compra de (B)
```

- Postagem de Compra de energia de (C):

```
1 $ freechains '#alce' post --sign=A43413... \
2 > '{ \
3 >   "tabela": "COMPRA", \
4 >   "venda": "16_E7F863...", \ #identificacao do bloco de venda (
5 >   "kwh": [..., "0,5", "0,8", "0,6",...], \
6 >   "prazo": "20", \
7 >   "pix": "T001XPTT" \
8 > }'
9 17_EB1792... # identificacao do bloco de compra de (C)
```

No exemplo, se às 12:00, (B) e (C) contrataram 0,6kWh e 0,8kWh, respectivamente. Então, o controlador (CP_AB) deixará fluir 1,4kWh entre os ramais (RA) e (RB) e (CP_BC) 0,8kWh entre os ramais (RB) e (RC).

O cálculo das correntes em cada ramal é realizado com análise de malhas empregando a lei de Kirchhoff das tensões em cada uma das malhas do circuito [52].

O cálculo das correntes de malha utiliza a equação $i=P/V_{cc}$, onde i representa valor da corrente da malha, P a sua potência, e V_{cc} a tensão de distribuição da microrrede.

A Figura 10 apresenta o circuito elétrico do cenário com (A), (B) e (C).

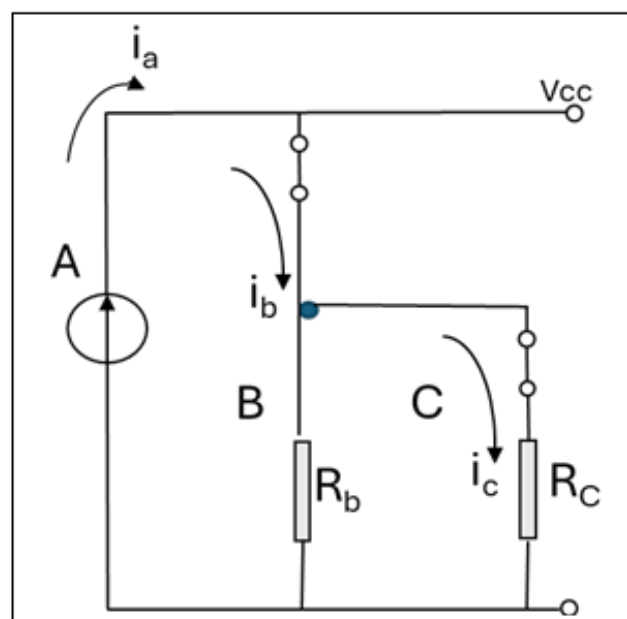


Figura 10: Circuito elétrico - referente a Figura 1

Cada novo participante que deseje se conectar à microrrede deve buscar um ponto de conexão em um ramal existente, considerando proximidade e demanda de energia. O participante deve então entrar em acordo com o dono do ramal “pai”, e instalar seu controlador de potência. Esse processo ocorre fora da *blockchain*, uma vez que envolve vizinhos próximos, que necessariamente têm uma relação não virtual. No entanto, como discutiremos no Capítulo 4, nenhum problema relacionado a ramal deve impedir o funcionamento ou continuidade da microrrede.

Dessa forma, o novo participante (C) negocia com (B) sua entrada na microrrede e conecta seu ramal (RC) ao (RB), postando as informações do seu ramal na cadeia. Como (C) ainda não tem reputação, sua postagem não é aceita na cadeia. Por isso, o seu endossante (B) precisa ainda transferir *reps* à (C) através de *likes*, que tem a sua postagem enfim aceita. Agora com reputação, (C) pode postar a compra da energia de (A), e parametrizar seu controlador de potência. Com a entrada de (C), (B) também tem que atualizar os parâmetros de seu controlador para ajustá-lo a demanda total de forma a suportar tanto a sua demanda como a de (C).

Um usuário, ao assumir o papel de operador de seu respectivo ramal de distribuição e controladores de potência, deve adotar uma postura proativa, de modo a identificar com celeridade eventuais alterações na configuração da microrrede ou falhas em seus sistemas de geração ou distribuição. Tal conduta visa mitigar a ocorrência de *dislikes* e, conseqüentemente, evitar seus impactos negativos na rede. As regras de operação, previamente estabelecidas entre os participantes no Capítulo 3, determinam que qualquer não conformidade detectada deve ser registrada por meio da emissão de *dislikes*. Entretanto, esse mecanismo acarreta prejuízos diretos à carteira de reputação dos participantes, reduzindo seus indicadores de confiabilidade.

Nesse contexto, quando um *dislike* é validado como procedente e, portanto, caracterizado como uma reclamação legítima, o participante alvo da notificação assume a responsabilidade de restituir a reputação afetada. Essa restituição é realizada por meio da emissão de *likes*, conforme previsto nos mecanismos de compensação do sistema. A Figura 11 ilustra esse processo a partir da interação registrada entre os blocos #88, #89 e #90: o participante (F) notifica (D) com a emissão de um *dislike* devido à ausência de fornecimento, e (D), reconhecendo a falha, procede com o estorno dos *reps* de (F) por meio da emissão de *likes* vinculados ao bloco #88, originalmente postado por (F).

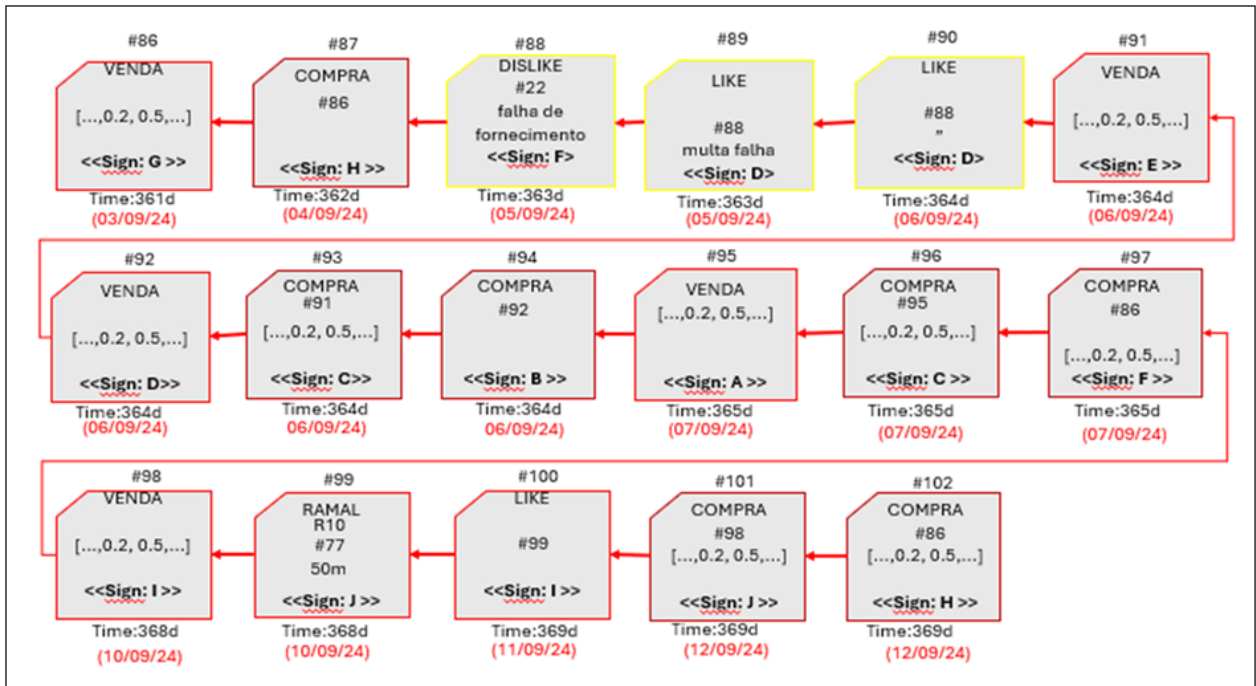


Figura 11: Sequência dos blocos encadeados na cadeia *#alce* - postagens 86 a 106

O *Freechains*, por meio do comando *listen*, descrito na Seção 2.4, viabiliza que a aplicação ALCE realize o monitoramento contínuo da cadeia. A cada nova postagem registrada, a aplicação executa o processamento e a interpretação do conteúdo com o propósito de identificar informações relativas à compra de energia e aos ramais correspondentes. Quando uma postagem de compra é identificada, a aplicação desencadeia o processo de reparametrização dos controladores de potência envolvidos. Com o intuito de garantir a conformidade operacional, estabelece-se um prazo de dois dias para a adequação das configurações, assegurando assim a viabilidade da nova operação. Esta dinâmica é detalhada em 4.1.

3.3 Implementação do ALCE sobre o Freechains

As interações previstas para o comércio de energia no ALCE foram mapeadas em postagens *Freechains*. Estas postagens são submetidas à cadeia através de comandos, com a sintaxe geral descrita na Seção 2.4.

As interações previstas para o comércio de energia considerando as características e elementos propostos, mapeadas em comandos *Freechains* são:

- Inicialização dos terminais, o que permite a execução de comandos por usuários

humanos;

- Criação das chaves publicas e privadas;
- Criação da cadeia *Freechains* #alce;
- Comandos para postagem de dados dos ramais;
- Comandos para postagens de venda de energia;
- Comandos para postagens de compra de energia;
- Comandos de aprovação - *likes* ou notificação - *dislikes*, para sinalizar a todos os participantes as não conformidades no acesso a energia;
- Comando para monitorar a cadeia. A cada entrada de um novo bloco a aplicação notifica a todos os participantes.
- Comandos para sincronização da cadeia local com um par remoto.
- Comandos para encerramento da conexão dos terminais remotos.

Para uso dos comandos *Freechains* com as especificidades do ambiente *ALCE*, foi desenvolvido um *script* contendo um conjunto de comandos com parâmetros necessários para cada interação. Essa abordagem permitiu configurar um ambiente experimental destinado a simular a dinâmica de interações entre participantes, geradores e consumidores em uma rede descentralizada.

Embora o conjunto completo de comandos do *Freechains* tenha sido previamente descrito no Capítulo 2, nesta seção são destacados aqueles que apresentam relação direta com a operação do *ALCE*. O objetivo é evidenciar como tais comandos sustentam as interações necessárias ao comércio de energia.

- Criação de um ramal:

```

1 $ freechains '#alce' post --sign=9C0DA1... \
2 >   '{ \
3 >     "tabela": "RAMAL", \
4 >     "conexao": "4E34F4...", \ # chave publica do ramal "pai"
5 >     "distancia": "200" \
6 >   }'
7 4_B62B0B... # identificacao do bloco do ramal (RB)

```

Observe-se que a dinâmica de postagens no ambiente *ALCE*, quando implementada sobre a infraestrutura do *Freechains*, pressupõe que cada ramal da rede seja publicado com a assinatura da chave privada pertencente ao seu proprietário. Esse procedimento estabelece uma associação criptográfica irrefutável entre o ramal publicado e o participante responsável por sua criação.

No exemplo considerado, um novo ramal (`"tabela": "RAMAL"`) é adicionado à estrutura da cadeia com uma conexão estabelecida a 200 metros (`"distancia": "200"`) do ponto inicial do ramal *hospedeiro* (`"conexao": "4E34F4..."`)

Este ramal precisa ser identificado nesta postagem através da sua chave. No caso do exemplo, a chave identifica o ramal implantado pelo usuário (A), pioneiro.

- Oferta de venda de energia:

```

1 $ freechains '#alce' post --sign=299D23... \
2 >   '{ \
3 >     "tabela": "VENDA", \
4 >     "pix": "oxf541...", \
5 >     "preco": "1", \
6 >     "kwh": ["0,2","0,2",...] \
7 >   }'
8 3_920C30... # identificacao do bloco de venda

```

A postagem de oferta de venda de energia (`"tabela": "VENDA"`) cujos atributos foram detalhados na Subseção 3.1.1 contém as informações suficientes o comprador. Assim, o *payload* do bloco de venda contém: o (`"pix": "oxf54..."`) - para que possa ser identificada a chave para depósito na postagem de compra de energia, o preço do kWh (`"preco": "1"`) - para calculo do montante a ser pago, e a disponibilidade de energia por hora do dia (`"kwh": ["0,2","0,2",...]`) - para o potencial comprador possa avaliar se a disponibilidade atente a sua demanda.

- Compra de energia:

```

1 $ freechains '#alce' post --sign=299D23... \
2 >   '{ \
3 >     "tabela": "COMPRA", \
4 >     "venda": "3_920C30...", \
5 >     "kwh": ["0,1","0,1",...], \

```

```

6 >         "prazo": "25", \
7 >         "pix": "123467ADF \
8 >     }',
9 4_33FE3D... # identificacao do bloco de compra

```

De forma análoga à postagem de venda, a postagem de uma compra deve incluir informações suficientes para a concretização de uma transação de compra. Assim, o *payload* do bloco de compra conterá além da identificação da tabela, ("tabela": "COMPRA"), os atributos ("venda": "3_920C30...") - para identificação do bloco que contém a oferta de venda de energia, o ("kwh": ["0,1", "0", "...]) - para identificação da quantidade de energia demandada hora a hora, o ("prazo": "25") - para identificação do período de consumo e o atributo "pix" que guarda o código da transferência, que pode ser um comprovante de depósito (PIX, transferência bancária, etc) - exemplo ("pix": "123467ADF"), referente ao montante de kWh comprado.

3.3.1 Diagrama de caso de uso

O diagrama de caso de uso na Figura 12 representa as interações entre os atores (gerador e consumidor) para inclusão de dados dos ramais, postagens de ofertas de energia e transações de compra com a intervenção do sistema de reputação representando o funcionamento do ambiente de comércio de energia em microrredes *ad hoc* não permissionado. Neste diagrama os geradores (usuários que produzem energia) e consumidores (que compram energia) interagem através de postagens na cadeia Freechains #alce. A seguir são relacionados os atores, as descrições e estrutura textual do diagrama.

- Atores
 1. *Gerador* (Vendedor): Gera energia e disponibiliza para venda.
 2. *Consumidor* (Comprador): Adquire energia conforme demanda e oferta.
 3. *Sistema de Reputação* (Freechains): Calcula e armazena pontuações de *reps*.
- Casos de Uso
 1. Postar Oferta de Energia

- Ator: Gerador
 - Descrição: Define quantidade, preço e período de disponibilidade.
2. Postar Informações do Ramal
 - Ator: Gerador/Consumidor
 - Descrição: Define características do ramal.
 3. Postar Notificações| Aprovações (likes e dislikes)
 - Ator: Gerador/Consumidor
 - Descrição: Aprovações ou Notificações resultados das interações.
 4. Consultar Ofertas Disponíveis
 - Ator: Consumidor
 - Descrição: Visualiza as ofertas de energia.
 5. Selecionar Oferta com Base na demanda
 - Ator: Consumidor
 - Descrição: Escolhe a oferta que melhor atende a demanda.
 6. Postar Compra de Energia
 - Atores: Consumidor
 - Descrição: Define demanda contratada, o período de uso e comprova pagamento.
 7. Atualizar Reputação
 - Ator: Sistema de Reputação
 - Descrição: O Sistema de Reputação valida saldo de reps, registra no blockchain.
- Relacionamentos:

“Selecionar Oferta com Base na demanda” *inclui* “Consultar Ofertas Disponíveis”.

“Atualizar Reputação” *estende* “Postar Oferta de Energia” , “Postar Compra de Energia” , “ Postar Informações do Ramal” e “Postar likes e dislikes”.

“Atualizar Reputação” é acionado automaticamente após comandos de “Postar ..”.

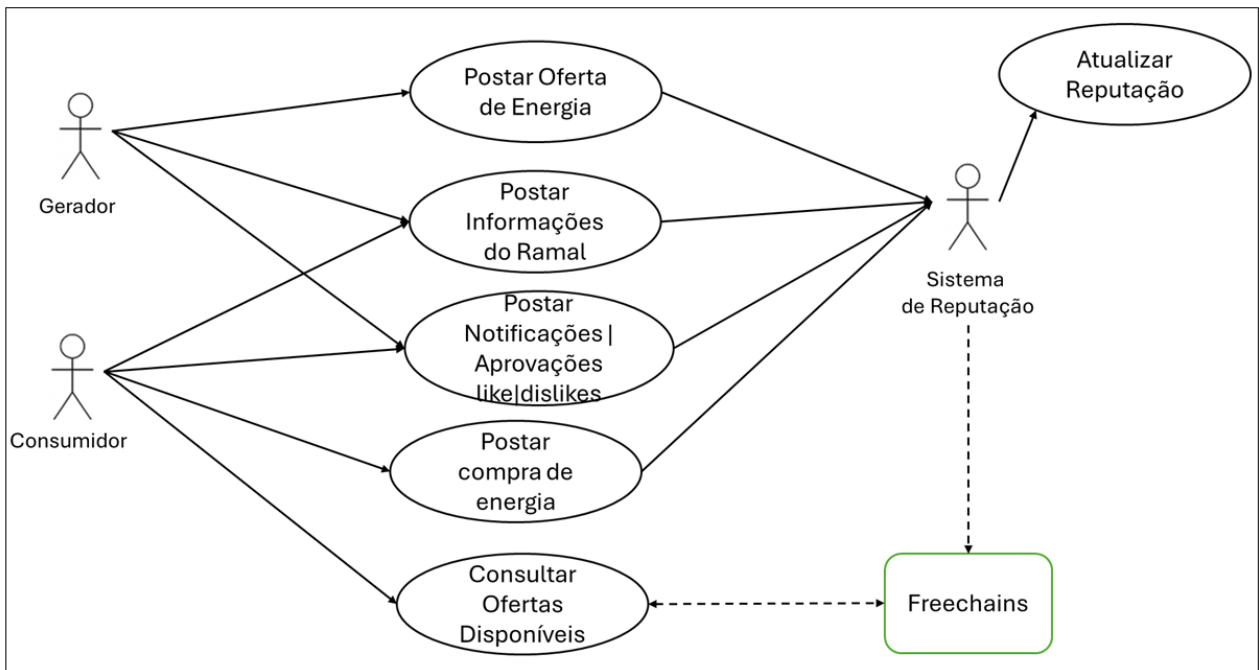


Figura 12: Diagrama de caso de uso - ALCE

Dessa forma, a implementação forneceu uma base para observar o comportamento coletivo emergente a partir das interações entre agentes, destacando a relevância do mecanismo de consenso do *Freechains* na coordenação do comércio de energia.

3.4 Conectividade no ambiente *ALCE*

A conectividade no ambiente *ALCE* pode usar qualquer modelo de rede ponto a ponto. A infraestrutura depende do protocolo de comunicação do *Freechains*, conforme descrito na 2.6.

Não faz parte deste estudo a implementação da rede de comunicação.

3.5 Interface de usuário para o ambiente *ALCE*

Os tipos de postagem discutidos na seção anterior são considerados APIs do ambiente *ALCE*. O usuário interage com o ambiente através de *scripts* que acionam APIs do *Freechains*.

As APIs do *Freechains* são os mecanismos que permitem a interação programática. Isso inclui a interface de linha de comando (CLI), que pode ser chamada por *scripts* e sistemas externos, e a interface exposta pelo daemon (HTTP/REST), que viabiliza

a integração com aplicações distribuídas de maneira automatizada e independente do terminal.

Assim, com base nas APIs do *ALCE* desenvolvemos um protótipo de aplicação, conferindo uma interface amigável aos usuários.

As Figura 13 e Figura 14 representam parte da modelagem da aplicação do ambiente ALCE, com os diagramas de sequência das transações de venda e compra de energia.

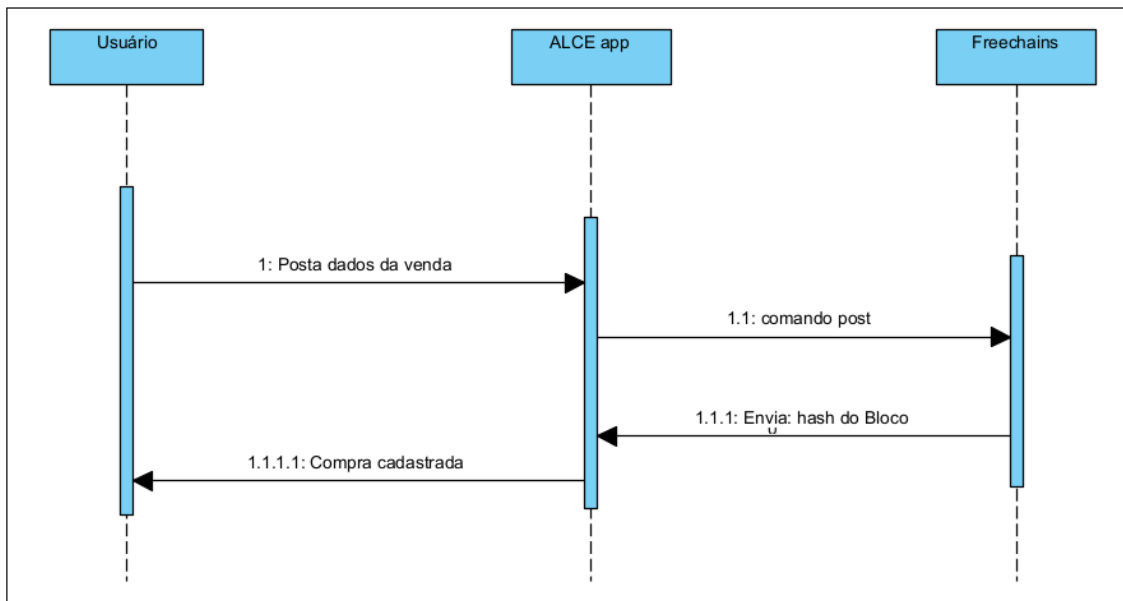


Figura 13: Diagrama de Sequência - Transação de venda de energia no ALCE

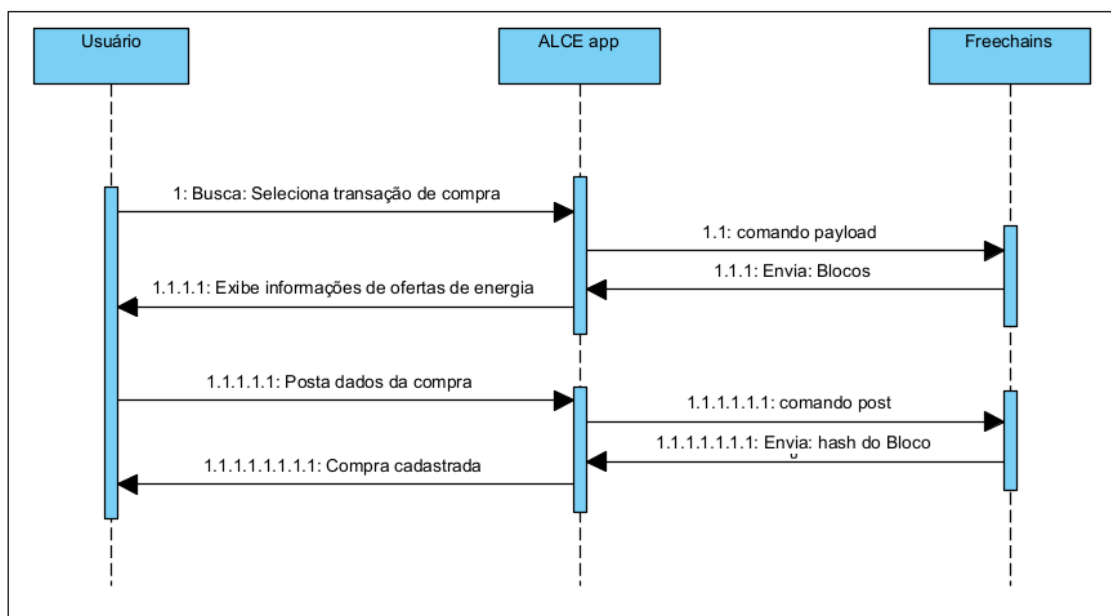


Figura 14: Diagrama de Sequência - Transação de compra de energia no ALCE

A aplicação é postada em um bloco da cadeia #alce através do comando a seguir:

- Comando para Criação da cadeia #alce

```
1 > '{ \
2 >           $ freechains chain '#alce' post file 'alce.sh' -- sign
   = '299D23...'
3 > }'
```

A aplicação pode ser executada a partir da própria cadeia #alce com comando *Freechains*. Para recuperação do código usamos a linha de comando a seguir:

- Comando para recuperar conteúdo do bloco de hash 134_FCE85... que contém o código da aplicação

```
1 > '{ \
2 >           $freechains chain '#alce' get payload 134_FCE85... \
3 >           | bash
4 > }'
```

A tela principal da aplicação é apresentada na Figura 15.

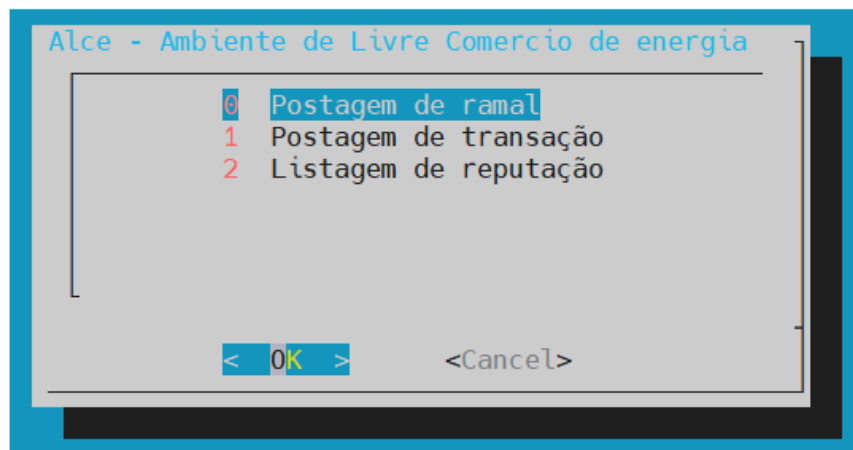


Figura 15: ALCE - Tela de entrada para o ALCE

Nesta interface o usuário pode acessar as principais funcionalidades da aplicação, *Postagem de ramal*, *Postagem de transação* e *Listagem de reputação*, que são detalhadas a seguir. Além dessas funcionalidades a aplicação provém a escuta das atividades da cadeia *Freechains* com objetivo de apoiar o processo de parametrização dos controladores de potência, detalhada na Subseção 3.5.4.

3.5.1 Postagem de ramal

Nessa etapa, na Figura 16 são disponibilizadas ao usuário informações referentes aos ramais através das opções *Consulta ramal*, *Inclui ramal* e *Aprova ramal*:

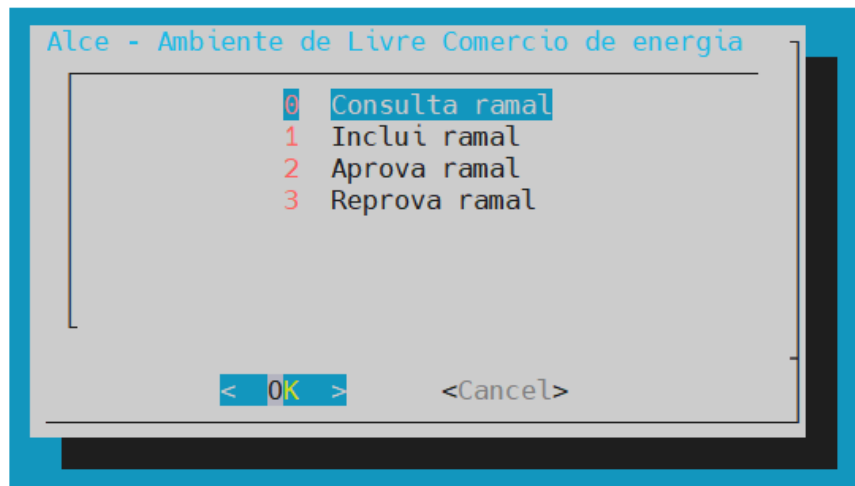


Figura 16: *ALCE* - Tela de postagem de ramal

- Consulta ramal

A opção Consulta ramal traz a listagem de todos ramais da cadeia, através do código abaixo:

```

1 > '{ \
2 >     tabela=$(echo "$PAYLOAD" | jq -r '.tabela') \
3 >     if [ "$tabela" = "RAMAL" ] \
4 >     then \
5 >         echo " Montado lista de ramais ..." \
6 >         ramal=$(jq -r '.id' <<< "$PAYLOAD")
7 >         conexao=$(jq -r '.conexao' <<< "$PAYLOAD") \
8 >         distancia=$(jq -r '.distancia' <<< "$PAYLOAD") \
9 >         echo ${I:0:5} ''' - Ramal: $ramal \
10 >             - Conexao: ${conexao:0:5} \
11 >             - Distancia: $distancia ''' \ \
12 >             >>/tmp/ramais.menu \
13 >     }'
```

A Figura 17 apresenta essa listagem com toda a infraestrutura da microrrede *ALCE*. Nessa tela cada ramal tem sua estrutura identificada com o ponto de conexão, a

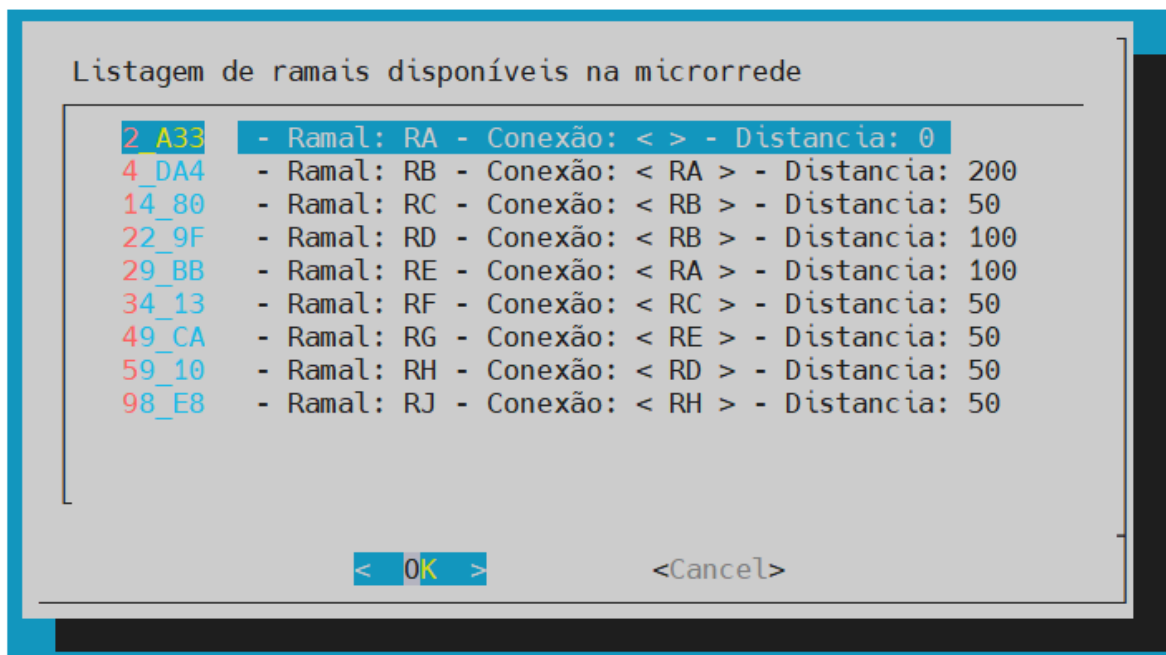


Figura 17: ALCE - Tela para seleção de ramal

distância da conexão do ramal até o dono do ramal conectado. Assim, RB está conectado ao RA a distância de 200m do dono deste ramal.

- Inclui ramal

A seleção dessa opção direciona o usuário para a tela ilustrada na Figura 17. Nesta tela o usuário faz a seleção do ramal “pai”. Após o usuário selecionar o ramal onde foi feita a conexão de seu ramal, ele é direcionado para a tela da Figura 18 para preenchimento da distância, conforme detalhado na Seção 3.3.

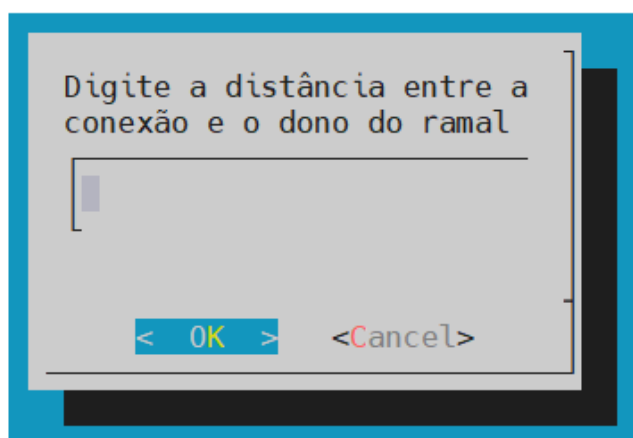


Figura 18: ALCE - Tela para incluir o atributo distância

- Aprova ramal

A seleção da opção *Aprova ramal* direciona o usuário para tela da Figura 19 com lista de blocos bloqueados que tenham seu conteúdo informações de ramais. Essa

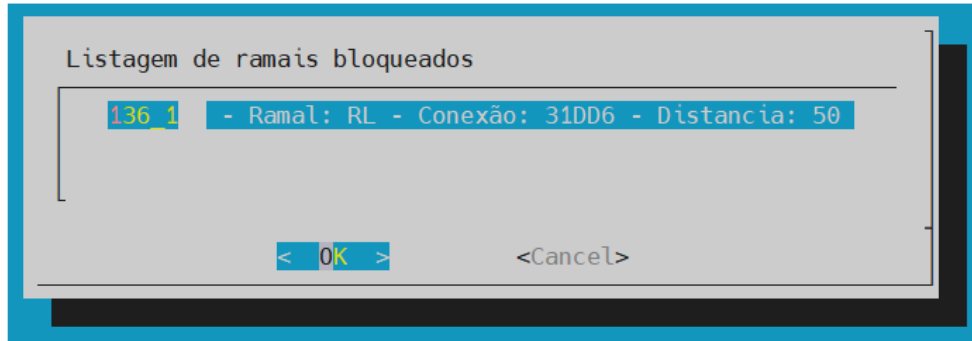


Figura 19: *ALCE* - Tela para aprovar novo ramal

opção é utilizada para que um ramal com reputação na cadeia possa transferir unidades de reputação a um ramal que acabou de realizar sua primeira postagem, o que por si representa sua entrada na cadeia *#alce*. A transferência de unidades de reputação propicia ao novo usuário a possibilidade de interagir na cadeia.

O código referente a essa funcionalidade está descrito abaixo:

```

1 > '{ \
2 >         BLOCKED=$(freechains chain '#alce' heads blocked)) /
3 > for I in ${BLOCKED[*]} /
4 > do /
5 >     PAYLOAD=$(freechains chain '#alce' get payload ${I}) /
6 >     echo "$PAYLOAD" | jq empty >/dev/null 2>&1 /
7 >     tabela=$(echo "$PAYLOAD" | jq -r '.tabela') /
8 >     if [ "$tabela" = "RAMAL" ] /
9 >     then /
10 >         J=$I /
11 >         ramal=$(jq -r '.id' <<< "$PAYLOAD") /
12 >         conexao=$(jq -r '.conexao' <<< "$PAYLOAD") /
13 >         distancia=$(jq -r '.distancia' <<< "$PAYLOAD") /
14 >         echo ${I:0:5} ' ' - Ramal: $ramal - Conexao: / >${conexao
:0:5} - Distancia: $distancia ' ' \ / >> >/tmp/block.men
/
15 >     fi /
16 > done

```

- Desaprova ramal

A opção *Desaprova ramal* é utilizada para que o usuário notifique o dono do ramal em caso de um comportamento ou incidente na microrrede ou na cadeia, como por exemplo em caso de abertura de um controlador de potência devido a algum mal fornecimento ou falha na distribuição de energia. Neste caso o código é semelhante ao *Aprova ramal* utilizando comando *dislike*.

3.5.2 Postagem de transação

No menu principal desse protótipo a opção *Postagem de transação* é utilizada para postar a oferta de energia, na opção (Proposta de venda), a opção de compra de energia na opção (Proposta de compra) ou consultar as transações realizadas através da opção (Lista transações), conforme tela da Figura 20.

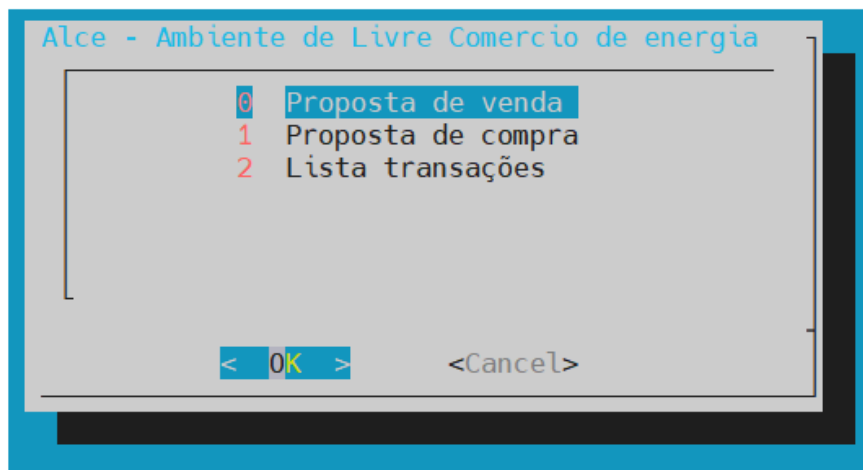


Figura 20: *ALCE* - Tela de postagem de Transações

As opções desta tela são descritas a seguir, de modo a evidenciar suas funcionalidades específicas.

- Proposta de venda

Esta opção chama a tela da Figura 21 para preenchimento dos dados da proposta de venda, o preço do kWh, e a chave para depósito denominada por simplicidade pela palavra *PIX*, e a Figura 22 para preenchimento da disponibilidade .

Preencha os campos:

Disponibilidade (array d[])

Preco:

Pix:

< OK > <Cancelar>

Figura 21: *ALCE* - Tela de postagem dados da oferta de energia

Preencha com a oferta de energia dentro das 24 horas do dia (em kWh):

0:00

1:00

2:00

3:00

4:00

5:00

6:00

7:00

8:00

9:00

10:00

11:00

12:00

13:00

14:00

15:00

16:00

17:00

18:00

↓(+)

83%

Figura 22: *ALCE* - Tela de postagem da disponibilidade de energia

- Proposta de compra

Através dessa opção o usuário seleciona a oferta de energia na tela da Figura 23. Após a seleção da oferta de energia a aplicação carrega a tela para preenchimento da demanda Figura 24. Nessa tela o usuário verifica a quantidade de kWh disponibilizada hora/hora e informa a sua demanda. Após informada a demanda necessária

é apresentada ao usuário a tela da Figura 25. Esta tela apresenta os valores da compra.

O valor a ser pago é calculado pela aplicação através da multiplicação do prazo informado pelo usuário e da soma total da demanda. Este valor é informado ao usuário para que efetive o pagamento. O código do comprovante deve ser informado para postagem da compra.

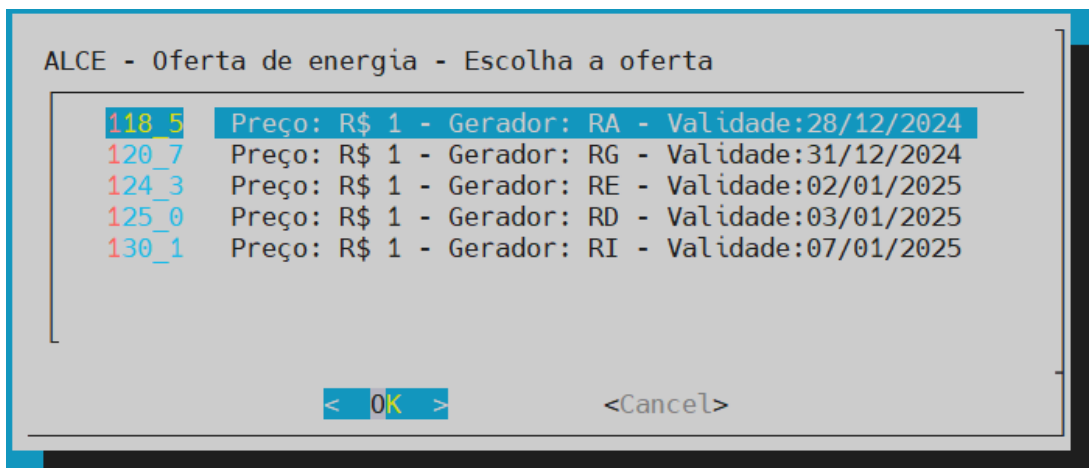


Figura 23: ALCE - Tela para seleção da oferta de energia

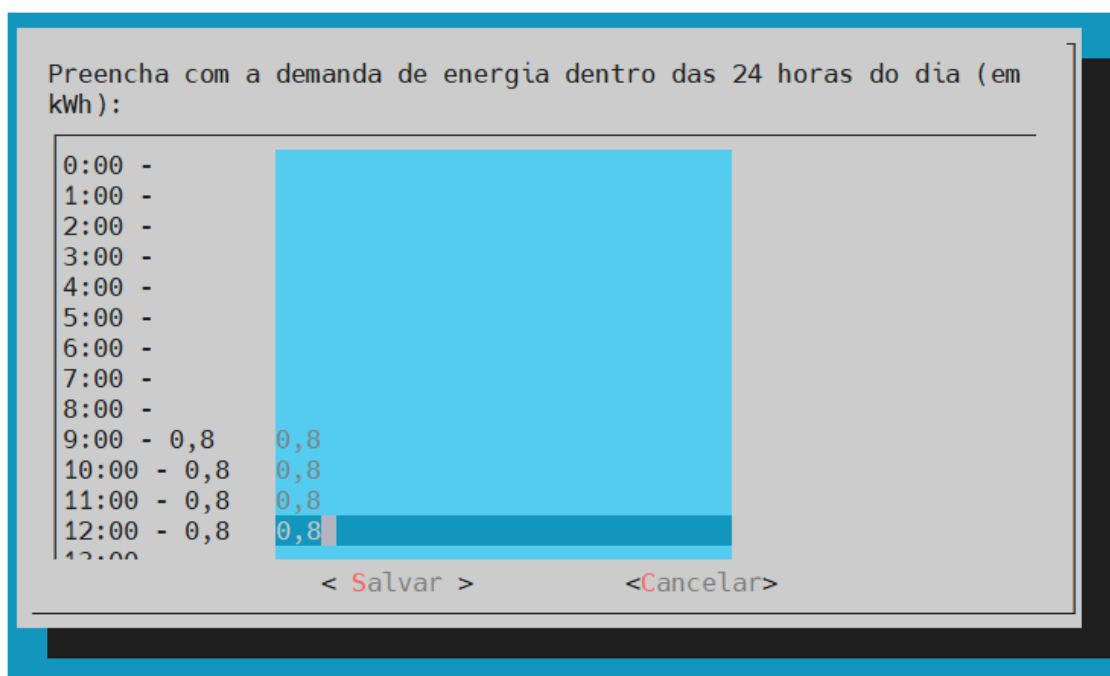


Figura 24: ALCE - Tela para preenchimento da demanda de energia

Formulário

Preencha os dados abaixo:

Total da demanda(kWh): 3.20
 Custo (R\$): 64.00
 Prazo (dias): 20
 Pix:

< OK > <Cancel>

Figura 25: *ALCE* - Tela para preenchimento do comprovante pagamento

- Lista transações

A funcionalidade em questão disponibiliza a visualização das transações publicadas na cadeia, representadas pelas postagens referentes às operações de compra de energia, conforme representado na Figura 26.

ID	Gerador	Data
5_A3E	Gerador: - Bloco da oferta:3_8CB	12/09/2023
9_50A	Gerador: - Bloco da oferta:8_B10	04/10/2023
11_42	Gerador: - Bloco da oferta:10_E7	03/11/2023
13_DD	Gerador: - Bloco da oferta:12_4C	03/12/2023
17_3F	Gerador: - Bloco da oferta:16_51	03/01/2024
18_6C	Gerador: - Bloco da oferta:16_51	03/01/2024
20_73	Gerador: - Bloco da oferta:19_EB	03/02/2024
21_E0	Gerador: - Bloco da oferta:3_8CB	12/09/2023
25_3C	Gerador: - Bloco da oferta:24_01	07/03/2024
27_39	Gerador: - Bloco da oferta:26_7B	09/03/2024
28_44	Gerador: - Bloco da oferta:26_7B	09/03/2024
33_42	Gerador: - Bloco da oferta:32_96	07/04/2024
37_EB	Gerador: - Bloco da oferta:36_2E	09/04/2024
38_E4	Gerador: - Bloco da oferta:36_2E	09/04/2024
39_CE	Gerador: - Bloco da oferta:31_E0	07/04/2024
40_9F	Gerador: - Bloco da oferta:32_96	07/04/2024
44_37	Gerador: - Bloco da oferta:41_45	07/05/2024
45_EB	Gerador: - Bloco da oferta:42_8A	07/05/2024
46_B4	Gerador: - Bloco da oferta:42_8A	07/05/2024

Figura 26: *ALCE* - Listagem de transações de compra

3.5.3 Listagem de reputação

Nesta opção do menu é apresentada a opção pela listagem da reputação dos ramos da microrrede na cadeia #alce, da Figura 27. A reputação do usuário constitui um elemento central na governança do comércio de energia P2P em microrrede, uma

vez que influencia diretamente as definições de negócio e a seleção de parceiros confiáveis. Ao fornecer um indicador de credibilidade construído a partir do histórico de interações, a reputação confere maior segurança às transações e reduz a probabilidade de comportamentos oportunistas ou maliciosos. Além disso, o uso de métricas relacionadas a reputação contribui para preservar o caráter colaborativo da rede, criando um ambiente de incentivos no qual a cooperação é valorizada e práticas abusivas são desestimuladas.

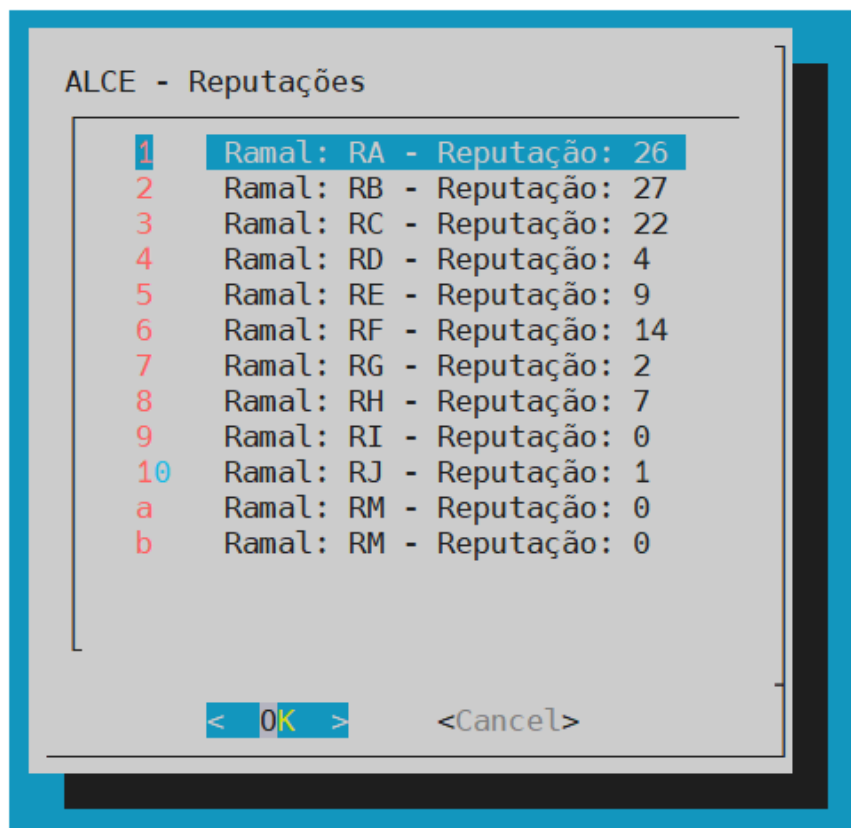


Figura 27: *ALCE* - Lista de reputação dos ramais

3.5.4 Monitoramento da atividade da rede

O *ALCE* utiliza um mecanismo que possibilita monitoramento da atividade da cadeia e auxilia interação com “mundo real” (externo a *blockchain*). Este mecanismo roda em *backend* através do comando *listen* do *Freechains*, descrito na Seção 2.4. Conforme citado em 3.2, quando uma nova transação é acrescentada à cadeia o comando detecta e é usado para disparar notificações automáticas. O *ALCE* então é capaz de verificar o conteúdo do bloco que foi encadeado e decidir por atualizações de parametrização nos

equipamentos controladores nos ramais.

```
1 > '{ \  
2 >     # rodando o monitoramento  
3 >     nohup freechains chain \#alce listen  
4 >
```

O comando acima é executado em *backend*, monitorando a rede e auxiliando a dinâmica de parametrização dos equipamentos controladores.

Note que os comandos disparados por este protótipo são processados no *backend* do *Freechains*, de modo que são processos internos não visíveis aos usuários finais. Para interagir com a aplicação, os participantes utilizam interface amigável de usuário (*frontend*), sem necessidade de conhecimento prévio sobre *blockchains*.

4 ESTUDOS DE CASO

A avaliação do ambiente proposto neste estudo foi conduzida por meio da simulação do comércio de energia entre os participantes de uma microrrede *ad hoc*. As interações entre os usuários nos estudos de caso foram simuladas conforme os procedimentos descritos na Seção 3.3, que apresenta a implementação do ambiente ALCE e os mecanismos de comunicação entre os participantes. Para tal, adotou-se uma abordagem incremental, iniciando-se a partir de um cenário simplificado, representado na Figura 1, no qual apenas três participantes estavam presentes. A partir desse arranjo inicial, procedeu-se à expansão gradual até se alcançar dez participantes, conforme ilustrado na Figura 28. Essa estratégia permitiu observar de forma sistemática os impactos da ampliação da escala de participantes sobre a dinâmica das transações de energia, possibilitando avaliar a robustez, a adaptabilidade e a eficácia do ambiente proposto em diferentes condições operacionais.

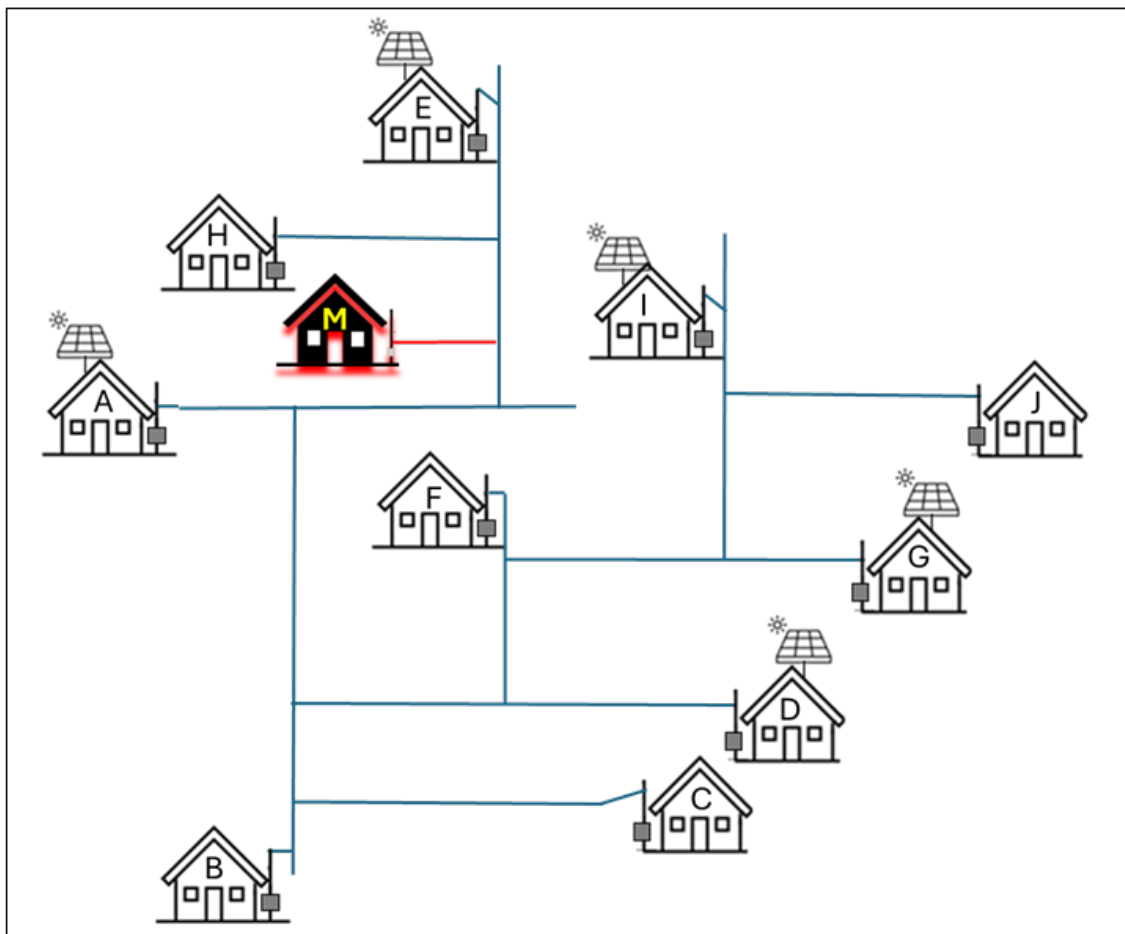


Figura 28: Cenário completo da microrrede

Foram explorados cinco cenários de interesse distintos: (i) o **estabelecimento da infraestrutura**, por meio da conexão de novos ramais; (ii) o conflito decorrente de **furto de energia**; (iii) o conflito associado a **falhas técnicas**, de caráter temporário ou permanente; (iv) o conflito originado por **compras simultâneas** da mesma oferta de energia; e, por fim, (v) um cenário caracterizado como **conflito sem solução**. Esses cenários possuem caráter qualitativo, na medida em que reproduzem ou mimetizam o comportamento humano dos participantes da rede em situações reais, frequentemente permeadas por certo grau de subjetividade. As subseções seguintes discutem estes cenários.

4.1 (i) Estabelecimento da infraestrutura

Nesse cenário detalhamos os eventos que levaram os primeiros participantes (A), (B) e (C) a estabelecerem a microrrede, conforme descrito na Introdução deste estudo.

(A) possui fonte de geração fotovoltaica instalada no telhado de sua residência para consumo próprio, porém com excedentes de geração. (B) busca por fonte de energia, já que não possui geração própria. (A) cria uma estrutura para distribuição de seu excedente para (B) através da instalação de cabos, o primeiro ramal da microrrede. (B), então, ajustado ao fornecimento de (A), instala seu próprio ramal e o conecta no ramal de (A). Assim, (A) e (B) criam uma microrrede. Para proteger suas infraestruturas e garantir o fluxo de energia, definem a instalação de um equipamento controlador. Este equipamento, um controlador de potência, deve ser instalado por (B) e a operação também ser de sua responsabilidade. A Subseção 3.2 apresenta uma discussão sobre funcionamento deste equipamento.

Com a infraestrutura elétrica definida (A) e (B) precisam de um mecanismo que viabilize o comércio de energia entre eles. Diante das características de P2P do comércio que está se estabelecendo, decidem usar uma *blockchains* que ofereça suporte a aplicações não permissionadas e que garanta a imutabilidade das transações. (A) e (B) optam por aplicar um mecanismo de consenso respaldado na reputação dos participantes e implementam o modelo de comércio sobre o *Freechains*, como detalhado no Capítulo 3.

Assim, (A) e (B) criam a cadeia *Freechains* denominada *#alce*, para viabilizar o comércio de energia P2P não permissionado. Na sequência, (A) posta as informações de seu ramal (RA), e realiza sua oferta de venda de energia, com a postagem das informações de disponibilidade distribuídas hora/hora. A capacidade de geração da fonte fotovoltaica

depende dos horários de incidência da luz solar. Para ser possível oferecer a energia em faixas de tempo e manter alguma simplicidade, foi utilizada faixas de negociação de uma hora.

Na sequência, o participante (B) faz a postagem das informações de seu ramal (RB). Nessa postagem (B) informa que realizou a conexão do ramal (RB) no ramal (RA) a uma distância de 200 metros da fonte geradora de (A). Esta formatação de dados permite localizar os pontos de conexão, conforme Figura 1. A postagem de compra de (B) considerou sua demanda distribuída durante as 24 horas do dia e compatibilizada à oferta de energia postada por (A). Uma vez que o bloco é incluído na cadeia a transação é considerada consolidada e imutável.

Posteriormente, voltando a infraestrutura elétrica da microrrede, (B) deve parametrizar seu equipamento controlador de potência.

Para parametrização do equipamento são utilizados os dados da postagem de compra, conforme Figura 29, que registrados na cadeia #alce. Cada ramal da microrrede tem seu fluxo definido por esta parametrização. A cada novo participante que entra na microrrede temos diretamente associada sua entrada na cadeia. Esta dinâmica implica na reconfiguração dos equipamentos controladores atingidos pela nova entrada, conforme descrito na Seção 3.2. Essas informações definem quanto de energia irá fluir da conexão entre ramais RA e RB, controlando a distribuição de energia. Assim, qualquer alteração no fluxo, por nova transação de oferta/venda e compra, acarreta atualização na parametrização da conexões. O funcionamento do controlador foi detalhado na Seção 3.2.

```
{
  "tabela": "COMPRA",
  "venda": "3_50FDE4796...",
  "kwh": [
    "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,4",
    "0,35", "0,6", "0,5", "0,7", "0,6", "0,6", "0,4", "0,2", "0,1", "0,1",
    "0,1", "0,1", "0,1", "0,1", "0,1"],
  "prazo": "25",
  "pix": "codigo"
}
```

Figura 29: Estabelecimento da infraestrutura - bloco de compra

A Figura 30 apresenta os primeiros dois meses da implantação do comércio de energia na microrrede. Após este período, outro morador (C) que é vizinho de (B) demonstra interesse em participar da microrrede, e realiza sua conexão no ramal de (B). Todo participante, com exceção dos pioneiros, quando entra na cadeia não possui

nenhuma unidade de reputação. Por isso, sua primeira postagem não é, de imediato, encadeada na cadeia *Freechains*, conforme descrito no Capítulo 2. Para realizar postagens válidas na cadeia (C) precisa receber unidades de reputação, *reps*, de algum participante com reputação. Como o participante que concordou com sua conexão na infraestrutura elétrica foi o (B), por lógico, o participante (B) fará a transferência de reputação utilizando o comando *like*, conforme descrito no Capítulo 3. Após o *like*, a postagem de (C) é desbloqueada, e validada na cadeia. (C) agora tem reputação para fazer novas postagens na cadeia #alce. (C) inspeciona as postagens na cadeia e identifica a disponibilidade de energia de (A).

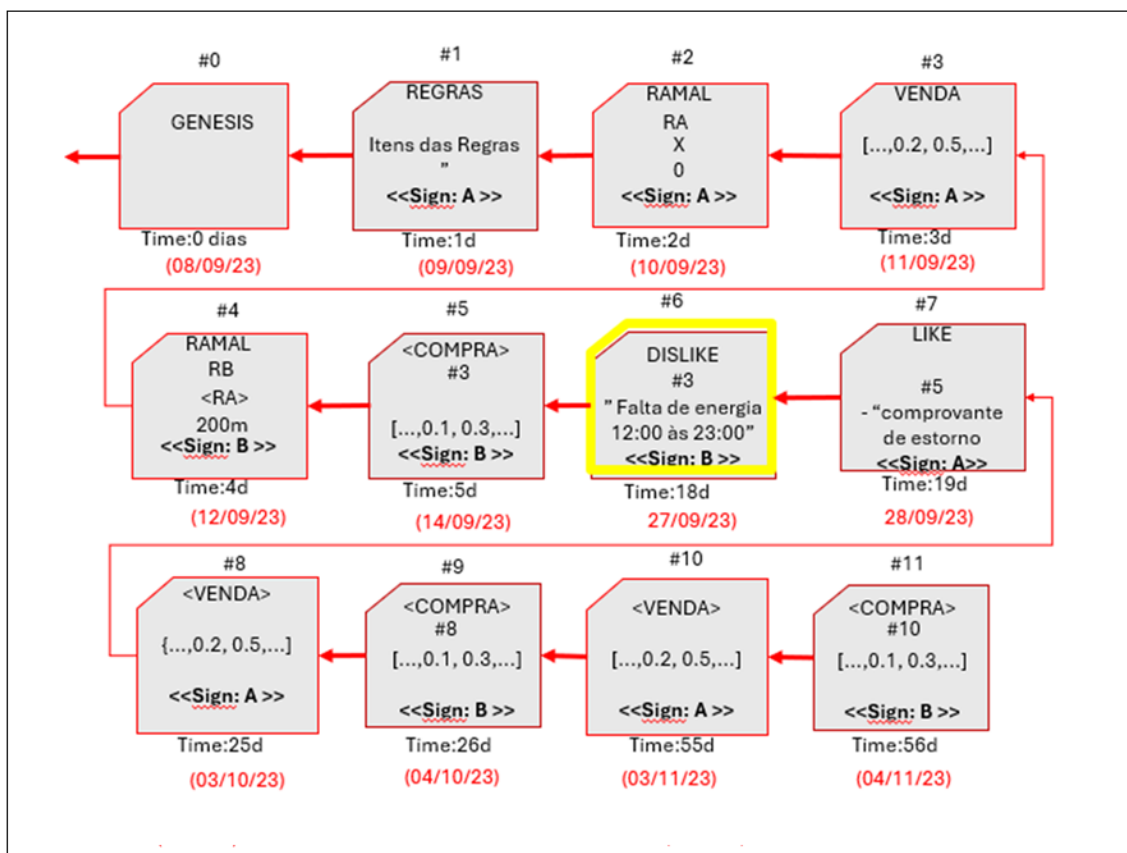


Figura 30: Estabelecimento da infraestrutura - sequência de blocos de postagens 0 a 11

(C) monta sua planilha de demanda, conforme Figura 31. Faz o pix e posta compra de energia referente ao bloco de compra de (A).

A atividade de compra de energia por (C) uma vez aceita na cadeia #alce gera a necessidade de parametrização dos controladores CP_AB e CP_BC, conforme detalhado na Seção 3.2. A Figura 32 apresenta as parametrizações de CP_AB e CP_BC antes e após a entrada de (C).

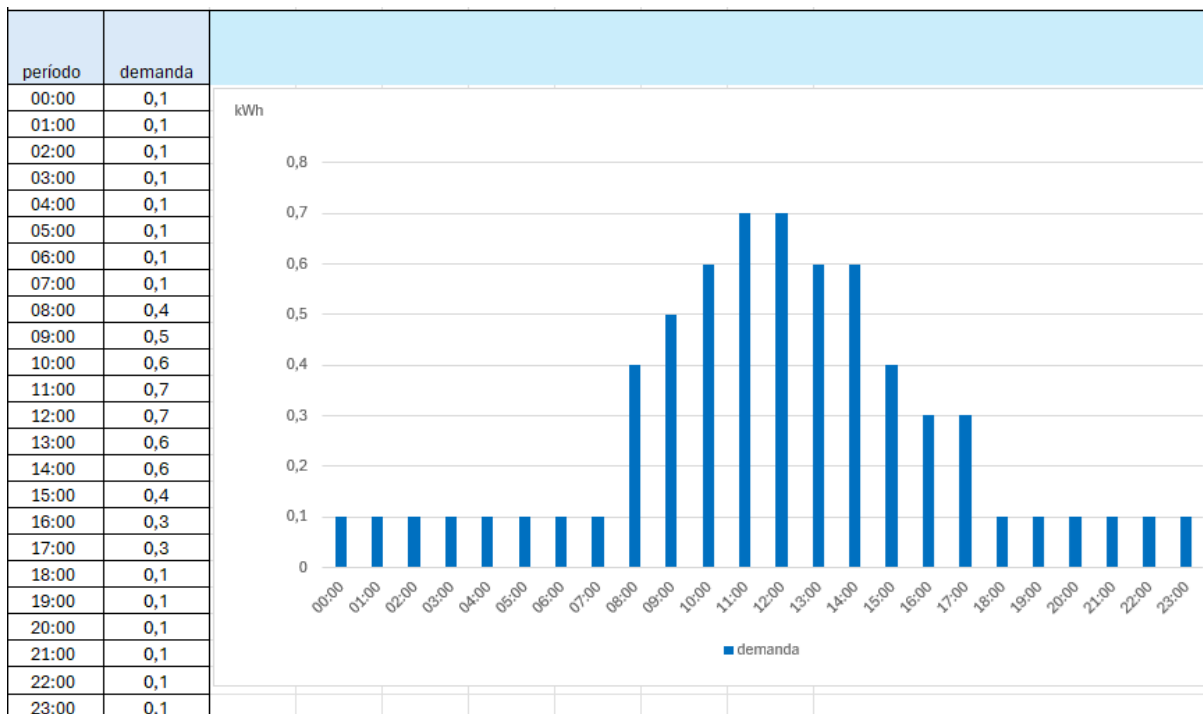


Figura 31: Estabelecimento da infraestrutura - demanda de (C)

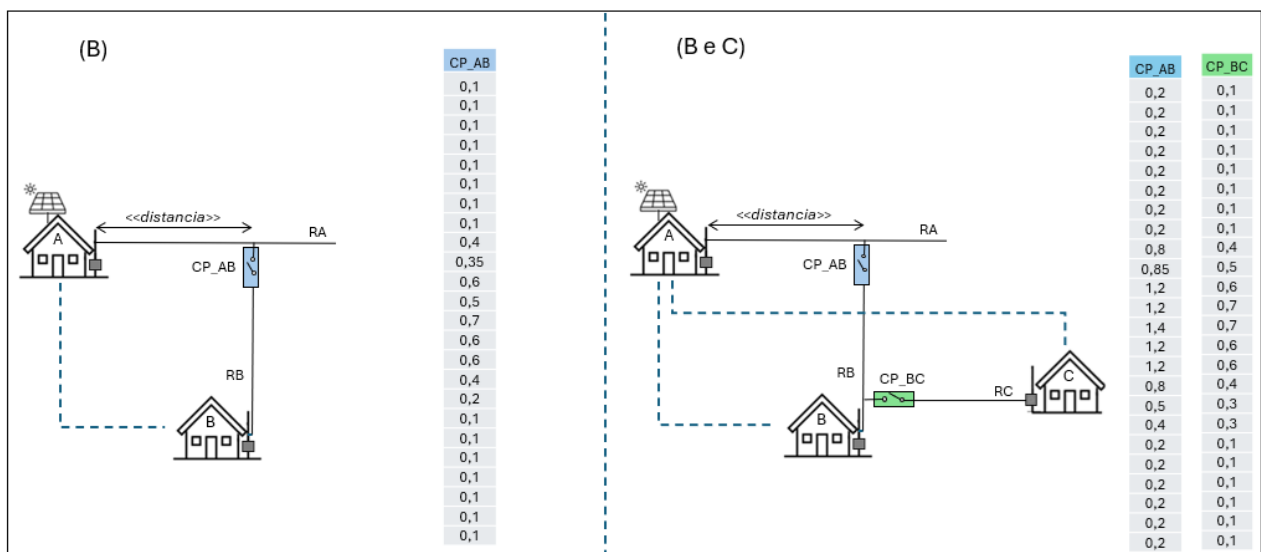


Figura 32: Estabelecimento da infraestrutura - Parametrização dos controladores CP_AB e CP_BC

A Figura 33 apresenta a sequência das postagens e a passagem de 6 meses.

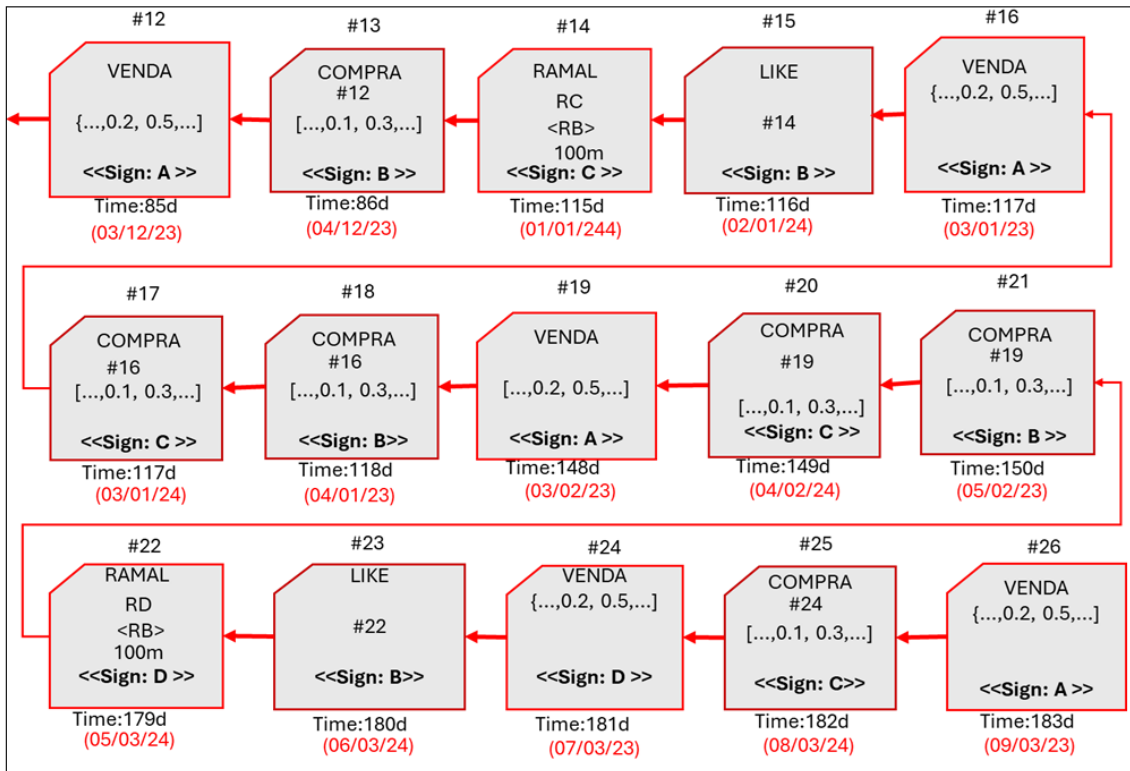


Figura 33: Estabelecimento da infraestrutura - sequência dos blocos de postagens 12 a 26

Todos os participantes da microrrede possuem um ramal e um controlador de potência associado. A dinâmica das postagens é a mesma utilizada nas transações entre (A), (B) e (C). A perda e ganho de unidades de *reps* segue o regramento da *Freechains* descrita no Capítulo 2, e assim os participantes interagem na microrrede, vendem e compram energia, controlam seus ramais, perdem e ganham reputação.

A sequência de postagens, para este cenário inicial, gera um total de 133 blocos na cadeia Freechains #alce, conforme Figura 34.

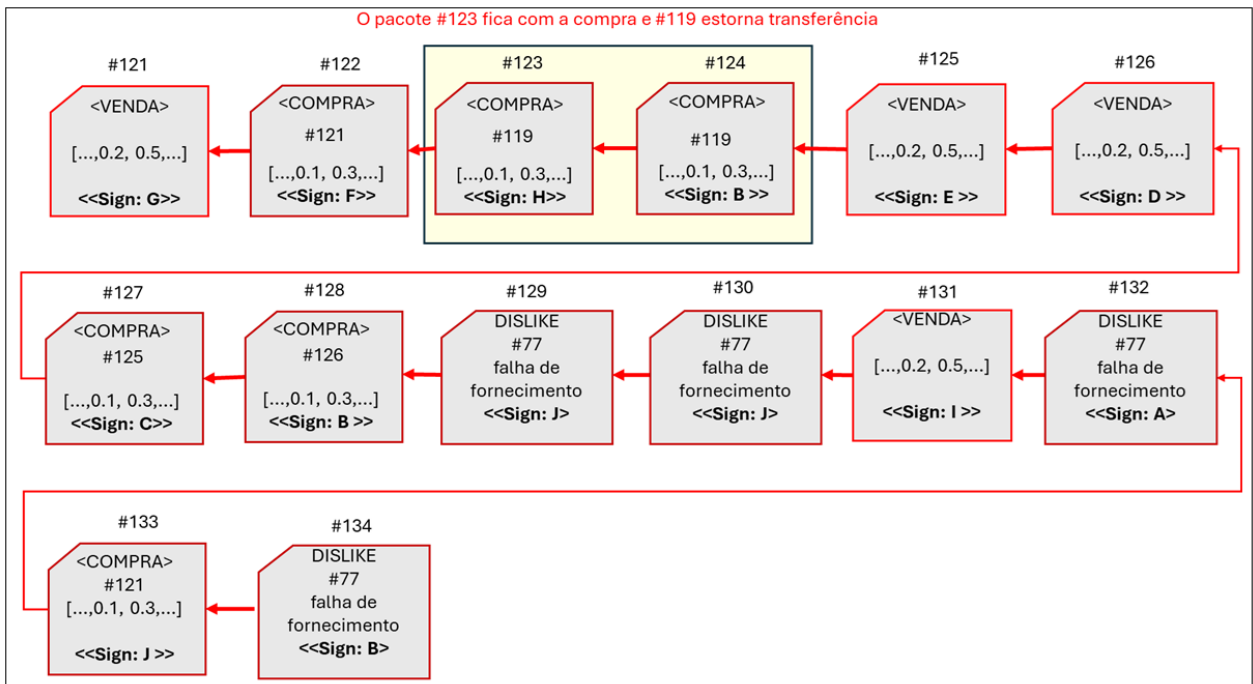


Figura 34: Estabelecimento da infraestrutura - sequência de blocos de postagens 121 a 134

Na Figura 35 está representado o esquema da transação de compra de energia na *blockchains*, através de linha tracejadas em vermelho, a transação *blockchain* representada pelos blocos.

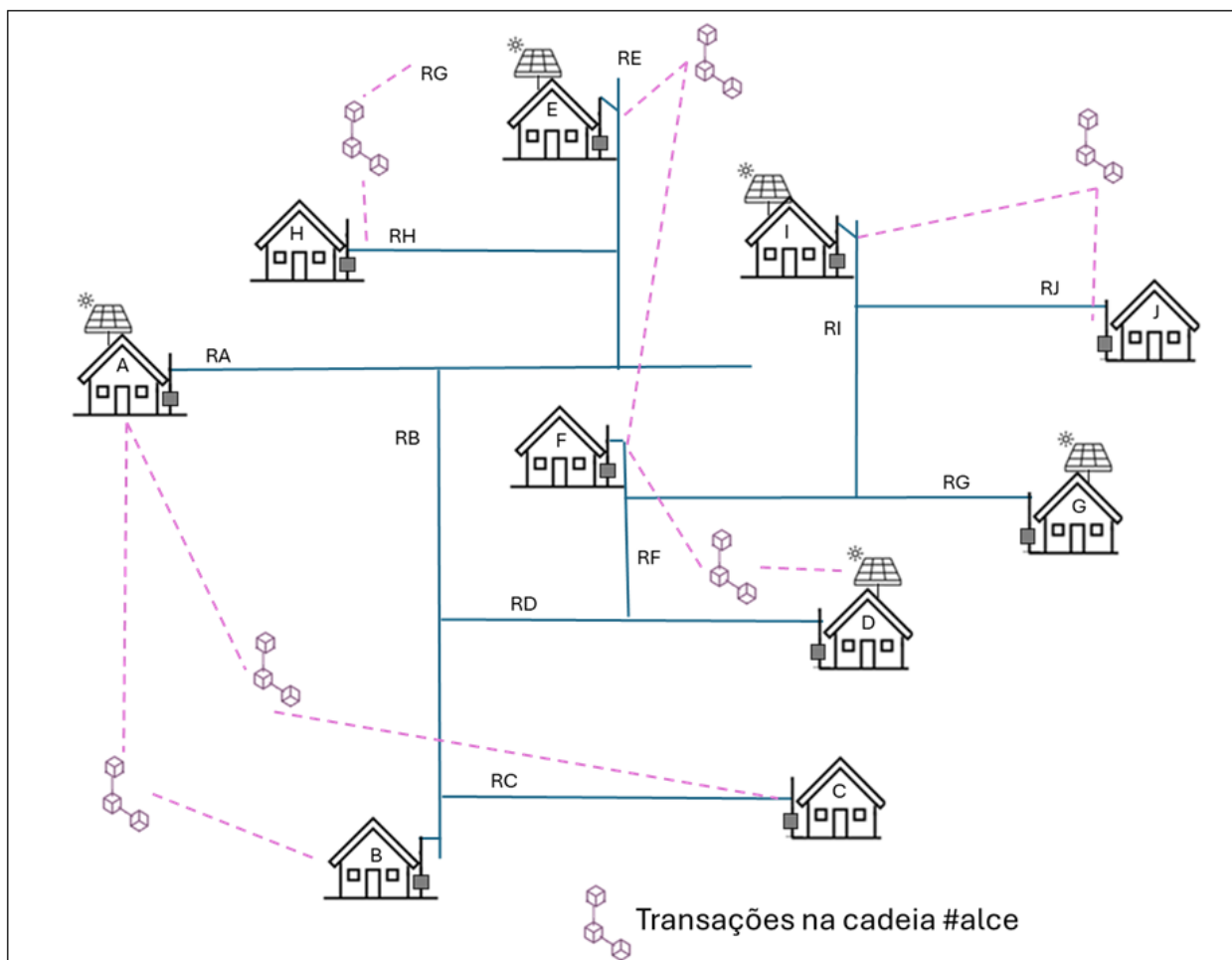


Figura 35: Estabelecimento da infraestrutura - Transações na microrrede

Nessa microrrede *ad hoc*, caso uma oferta de venda não seja integralmente negociada, fica disponível dentro de sua validade, para que outro interessado a complemente. Como aconteceu com a proposta de venda de energia de (A) que foi negociada em duas etapas, dividindo a disponibilidade de energia ofertada por (A), entre (B) e (C). Primeiro ocorreu a negociação entre (A) e (B), que posteriormente foi complementada pela transação entre (A) e (C).

Outra entrada de usuário, que pode ser identificada na Figura 33 é a entrada de (D), que opera um gerador fotovoltaico com excedentes. (D) também é vizinho de (B), que pode se beneficiar com mais ofertas de energia na rede. (D) então entra em acordo com (B) para conectar o seu ramal. Como (D) não possui reputação prévia, (B) também precisa transferir a ele reputação através de *likes*. Dessa forma, (D) passa a ter reputação para postar sua oferta de venda de energia. Agora a cadeia possui oferta de energia tanto de (A) como de (D). Em princípio, todos os participantes da rede se beneficiam com a

entrada de (D) na rede.

Como o comércio de energia atende aos interesses individuais dos participantes, tanto a rede do *Freechains* como a própria microrrede são ajustadas de acordo com as necessidades de cada participante. Na cadeia #alce todos tem acesso ao conteúdo de todos os blocos, cada um pode planejar e programar suas próprias transações, diante da distribuição de disponibilidades postadas na cadeia, e conectar a qualquer ponto da microrrede que tenha dimensionamento para receber seu ramal de acesso.

4.2 (ii) Furto de energia

Consideremos o cenário em que o ramal de (E) sofre com uma falta de energia. A percepção inicial dos participantes da rede é que a culpa seja de (E), o que poderia provocar uma enxurrada de *dislikes*. Então, a primeira atitude de (E) é verificar se há problema em seu controlador. Ele detecta que houve a atuação da proteção por sobrecorrente. Assim, (E) precisa ser rápido para identificar o ponto de fuga de corrente para evitar *dislikes*, e mede todas as seções do seu ramal em busca de alguma ligação irregular. (E) encontra o ramal (M) que representa um indivíduo malicioso que furta energia, identificado em vermelho na Figura 28. Para finalizar a ocorrência e normalizar a distribuição (E) realiza a desconexão de (M).

A Figura 36 apresenta a modelagem do conflito por meio de uma Rede de Petri. Nessa representação, são definidos os estados e as transições que descrevem as interações entre os elementos do sistema. O cenário tem início com o ramal (RA), que, por meio da transição «distribuindo energia», libera o fluxo de energia para o ramal (RE). Uma vez energizado, o ramal (RE) possibilita que as cargas nele conectadas realizem o consumo de energia, representado pela ativação da transição «consumindo energia», associada ao usuário regular no estado «E».

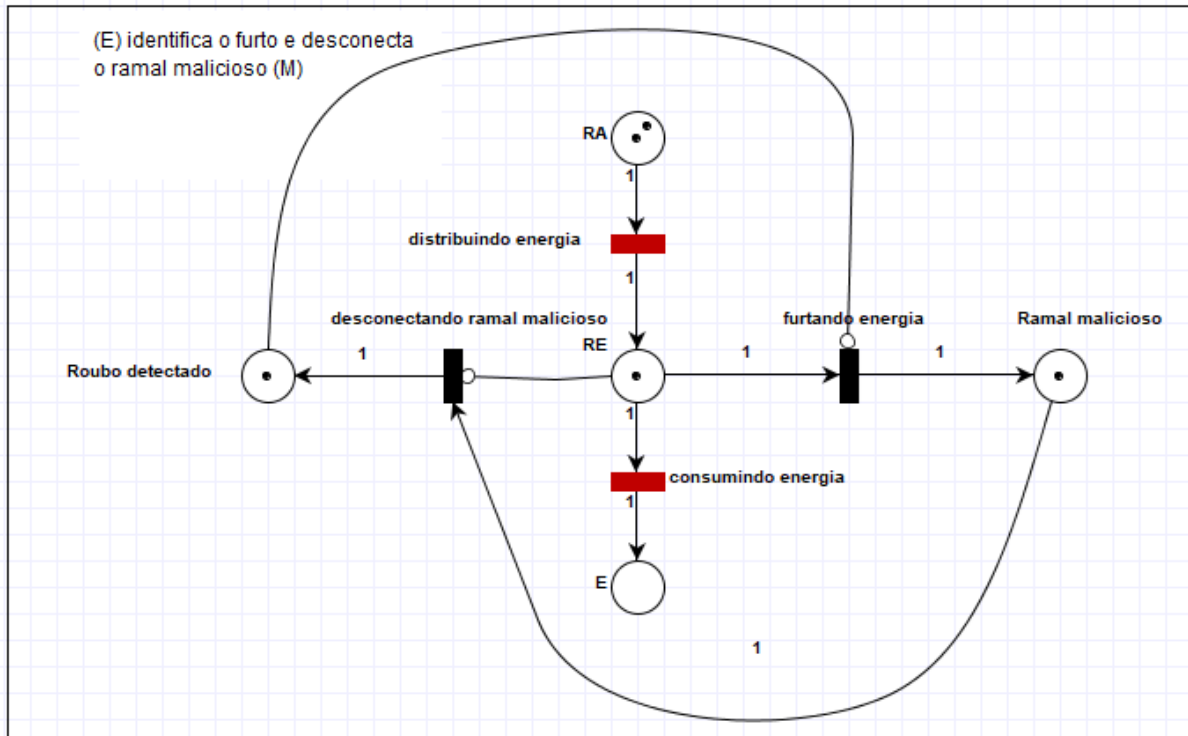


Figura 36: Tratamento dos Conflitos na rede - Modelagem em rede de Petri - furto de energia

Considera-se, entretanto, a presença de um usuário malicioso infiltrado, representado pelo estado «Ramal malicioso», cujo objetivo é realizar o consumo não autorizado. Nesse contexto, quando o estado «RE» recebe ficha — indicando a disponibilidade de energia — também é habilitada a transição «furtando energia», que permite ao usuário malicioso acessar o fluxo energético. A modelagem demonstra que, ao ocorrer o furto, a ficha é simultaneamente registrada no estado «Ramal malicioso», o que torna possível identificar o comportamento indevido. Nesse momento, é ativada a transição «desconectando ramal malicioso», ação associada ao usuário regular (estado «E»), responsável por interromper o fornecimento ao ramal comprometido. Assim, mesmo que o ramal RE permaneça energizado, o mecanismo assegura que o consumo fraudulento não possa ser mantido pelo usuário malicioso.

Para sistematizar as interações representadas na modelagem, a Tabela 5 sintetiza os principais elementos, suas funções e os efeitos resultantes no sistema.

Tabela 5: Resumo das interações modeladas na Rede de Petri (cenário de furto de energia)

Transição	Ação	Efeito no sistema
distribuindo energia	Habilita o fluxo de energia do ramal RA para o ramal RE.	Energiza o ramal RE, permitindo o consumo pelas cargas conectadas.
consumindo energia	Representa o consumo legítimo de energia pelo usuário regular (estado E).	O usuário regular utiliza a energia fornecida pelo ramal RE.
furtando energia	Ativada quando o estado RE possui ficha, permitindo o consumo não autorizado pelo estado Ramal malicioso.	Possibilita o desvio de energia por parte do usuário malicioso.
desconectando ramal malicioso	Acionada quando a ficha é simultaneamente registrada no estado Ramal malicioso, permitindo a identificação do furto.	O usuário regular (estado E) executa a interrupção do fornecimento, impedindo a continuidade do consumo fraudulento.

4.3 (iii) Falha técnica

O mecanismo de *dislike* foi mapeado na Seção 3.1 e é aplicado no ambiente *ALCE* para notificação de qualquer problema de falha de fornecimento na microrrede. No caso de falha, qualquer participante pode postar *dislike* para notificar o ramal ao qual está conectado. Uma circunstância importante é que uma falta, de geração ou distribuição, em um ponto da microrrede pode sobrecarregar um ou mais ramais da infraestrutura de distribuição, e provocar a atuação da proteção de um ou mais controladores de potência devido a subtensão no ramal acima. Por exemplo, digamos que o participante (B), que comprou energia de (A), percebe falta de energia em um período do dia. Ele notifica (A) através de postagem *dislike*. O conteúdo dessa postagem inclui a justificativa, com a indicação do bloco de venda, referenciado pelo *dislike*:

```
1 freechains '#alce' dislike 3_B23BDE0 --sign=7AFCD1... --why='Falta de
   energia no horario de 12:00 as 23:00'
```

Qualquer participante pode usar esse recurso para notificar uma falha na distribuição. Em reação, o vendedor (A) reconhece a falha e retorna uma postagem *like* para o bloco que gerou a notificação, no caso do participante (B), recompensando pela perda de pontos na postagem de *dislike*. Adicionalmente, (A) pode fazer uma devolução compensatória de valor proporcional ao tempo em que a energia não fora fornecida, caso definido previamente pelos participantes. Esta ocorrência está identificada na Figura 30, blocos #6 e #7.

4.4 (iv) Compras simultâneas

Digamos que dois (ou mais) participantes não maliciosos postem compra para a mesma disponibilidade de energia, ao mesmo tempo, na cadeia, porém o vendedor não consegue atender a ambas. Para resolver este impasse, é respeitada a ordem determinada pelo mecanismo de consenso do *Freechains*: a postagem do comprador com maior reputação entrará primeiro na cadeia e será aceita pelo vendedor. A outra sera estornada pelo vendedor através de uma postagem de *like*. Na Figura 34, observa-se na sequência de postagem que os blocos #123 e #124 fazem referência ao mesmo pacote de venda (#119), a solução deste conflito foi considerar o ordenamento do consenso *Freechains*.

4.5 (v) Conflito sem solução

É possível haver uma sequência de eventos de conflito que provoca o colapso da cadeia. Este seria o caso de uma ocorrência onde não haja acordo entre os envolvidos, resultando em uma perda irreversível de unidades de reputação ocasionada por uma sequência de *dislikes*.

Por exemplo, considerando que ainda na fase de formação, (A), como fornecedor supostamente não estivesse entregando energia com qualidade. Neste caso, tanto (B) como (C) postariam *dislikes*. Por sua vez, se (A) não reconhecesse sua responsabilidade, argumentando que os equipamentos controladores de potência tanto de (B) como de (C) estariam causando o problema, devolvendo postagens de *dislikes*. Não havendo entendimento entre eles, todos perderiam suas unidades de reputação, a um ponto em que nenhuma nova postagem seria possível, tornando a *blockchain* inerte. Sem unidades de reputação (*reps*), nenhum deles conseguiria recuperar a cadeia. Trata-se de uma situação

indesejável que pode culminar no colapso da *blockchain*. Isso ocorre quando os participantes deixam de possuir reputação, de modo que o mecanismo de consenso não os considera no processo de ordenamento. Nessa condição, não há novos incrementos: como evidenciado na Figura 37, as postagens permanecem bloqueadas e não são incorporadas ao encadeamento da cadeia. Tal fenômeno pode ser comparado a problemas enfrentados por grandes fornecedores de energia, como a ruptura contratual ou a judicialização de conflitos, refletindo assim uma vulnerabilidade inerente a cenários do mundo real.

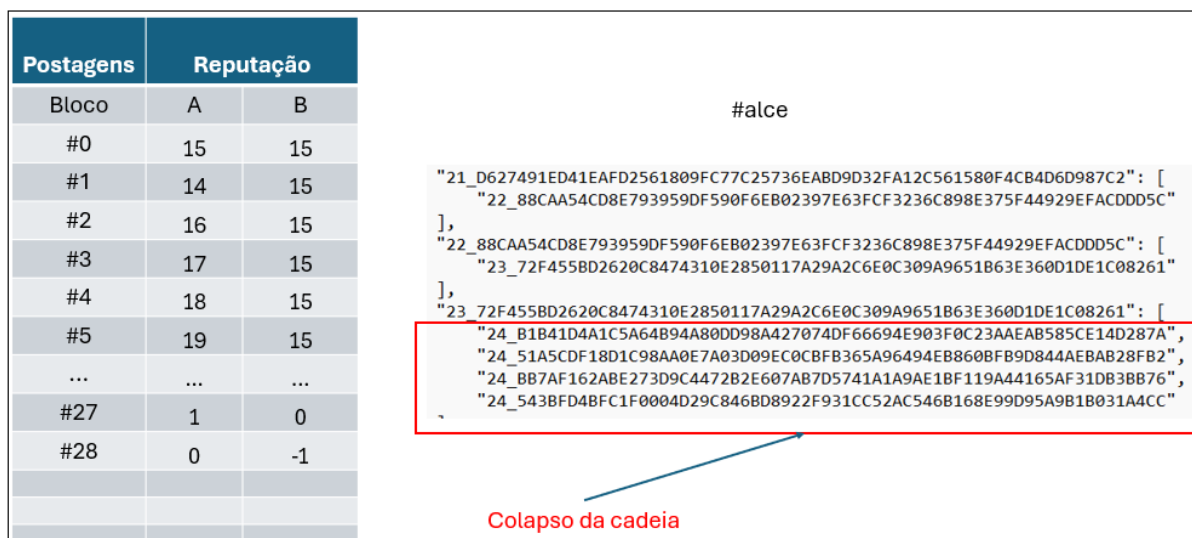


Figura 37: Tratamento dos Conflitos na rede - Colapso da cadeia

4.6 Discussão

Na sequência dos cenários simulados, 10 participantes interagem através da cadeia #alce com 134 postagens, sendo 39 blocos de venda de energia, 59 de compra, 10 de notificações, e 8 de respostas às notificações. As postagens registradas na cadeia resultaram em 125 kilobytes de dados, em um período de 14 meses simulados.

A Tabela 6 apresenta os indicadores utilizados no processo de simulação do ambiente proposto, que explorou diferentes cenários. Se compararmos o estado final das métricas associadas à (D) e (E), observaremos que a quantidade de reputação não está associada apenas ao tempo de permanência na rede, mas também às interações realizadas através de postagens de likes e os *dislikes*.

O envolvimento em conflitos, provoca perda de reputação. Por exemplo, um participante gerador que recebe muitos *dislikes* tem sua reputação comprometida, o que influencia a percepção da qualidade da sua energia pelos demais participantes. Já um

participante que não colabore na manutenção da infraestrutura, por exemplo não parametrizando com eficiência seu controlador, pode ser banido por um número alto de *dislikes* enviados pelos vários usuários insatisfeitos com o comportamento negligente. No contexto do ALCE, o *dislike* não é apenas um mecanismo de notificação de perda de reputação, mas também um mecanismo de governança da rede, uma vez que em seu campo *why* são armazenadas as justificativas pelo envio de tal postagem.

Do ponto de vista de governança em sistemas descentralizados, o comando *like* pode ser interpretado como um mecanismo de reputação explícita, onde a confiança é construída de forma distribuída e transparente. Diferentemente de métricas implícitas, esse mecanismo permite que cada participante exerça influência direta na valoração de conteúdos, estabelecendo um sistema de incentivos alinhado ao engajamento coletivo e à integridade da rede.

Enquanto o comando *dislike* pode ser entendido como um mecanismo de penalização por reputação, essencial para a manutenção da integridade da rede. Diferente de abordagens centralizadas de moderação, em que uma autoridade define e aplica sanções, no ALCE o comando *dislike* distribui essa responsabilidade entre os participantes, fortalecendo a governança coletiva. Além disso, sua aplicação desencadeia dinâmicas de compensação (como a restituição por meio de likes em situações de reconhecimento de falha), evidenciando o papel dos mecanismos de reputação como base para confiança, cooperação e autorregulação da rede.

Tabela 6: Indicadores resultantes da simulação de um ambiente hipotético de interações, abrangendo um horizonte temporal de 14 meses.

Participantes	Indicadores das interações (14 meses)			
	<i>Postagens</i>	<i>Tempo</i>	<i>Reputação</i>	<i>Dislikes</i>
A	16	12	24	2
B	17	12	24	5
C	17	9	15	0
D	10	6	4	4
E	6	5	7	0
F	12	5	10	2
G	4	3	1	1
H	3	2	1	2
I	2	1	3	2
J	2	0	1	1

5 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta alguns estudos sobre a aplicação da tecnologia *Blockchain* para mercados de energia em microrredes.

O tema tem despertado crescente interesse da comunidade científica internacional, em virtude do potencial da tecnologia *Blockchain*. Essa tecnologia tem sido usada para viabilizar a descentralização do comércio de energia e fomentar o desenvolvimento de novas soluções.

Diversas pesquisas têm explorado tais possibilidades. Saeed et al. [53], por exemplo, propõem um modelo de negociação de energia descentralizado baseado na “tokenização” de créditos energéticos, associados a *tokens* de resposta à demanda. Nesse modelo, o excedente de energia é comercializado por meio de contratos inteligentes na plataforma Ethereum [54] resultando, segundo os autores, em um ambiente automatizado, seguro e eficiente.

Contudo, o estudo não aborda aspectos práticos da distribuição de energia, como a ocorrência de perdas não técnicas e o furto de energia, que representam desafios significativos para a aplicação de tais modelos em cenários reais.

Wang [55] propõe uma *blockchain* permissionada baseada no Hyperledger Fabric [29], com consenso baseado em nós confiáveis. No entanto, depende de uma entidade centralizada certificadora de chaves públicas.

Khorasany [56] propõe uma estrutura de negociação P2P descentralizada que utiliza a proximidade e o fator de reputação dos participantes na definição de preços. Um Certificado de Localização (CoL) é emitido por medidores inteligentes instalados pela concessionária de energia. Ainda que uma *blockchain* ofereça suporte para a negociação descentralizada, a abordagem depende de uma entidade central, a concessionária, que provê infraestrutura e informações externas para se obter o consenso.

O trabalho de Long [57] utiliza a teoria dos jogos e valor de Shapley para modelar o mecanismo de comércio e o processo de tomada de decisão dos participantes. Este trabalho não considera, entretanto, participantes maliciosos.

Khan em [58] propõe um modelo de comércio de energia baseado em leilões e contratos inteligentes implementados na plataforma Ethereum, utilizando um mecanismo de consenso fundamentado em valores de confiança. O controle de acesso é realizado por

meio de medidores inteligentes, que também são responsáveis pela validação das faturas de energia. A solução, contudo, depende diretamente desses dispositivos, e o experimento pressupõe sua segurança física e resistência a violações.

Ahmed em [59] também apresenta uma solução para comércio de energia em microrredes utilizando *blockchain* permissionada para comércio de energia *peer to peer* usando contratos inteligentes e plataforma Ethereum. Novamente, esta solução não considera ambientes altamente expostos a abusos.

De modo geral, as propostas existentes abordam pontos específicos dos modelos de comércio de energia e se apoiam em *blockchain* para questões como pagamento ou privacidade. Algumas das soluções propostas dependem de uma entidade central confiável. Já este trabalho tem o foco em microrredes descentralizadas não permissionadas e em viabilizar o comércio livre, mesmo na presença de conflitos e falhas na distribuição.

Assim, diferentemente dos trabalhos analisados, propomos um modelo de comércio apoiado em uma *blockchain* que mapeia o comportamento dos usuários em seu mecanismo de consenso por reputação, utilizando *likes* e *dislikes* para moderação dos comportamentos. Com isso, considera-se a confiança estabelecida entre os próprios membros do grupo como um componente essencial para o suporte e a efetividade do mecanismo de reputação.

Tabela 7: Comparação dos trabalhos encontrados na literatura com o modelo proposto.

Comércio de energia em microrredes com uso da <i>blockchain</i>			
<i>Pesquisas</i>	<i>Tipo de acesso</i>	<i>Contratos inteligentes</i>	<i>Digital vs Físico</i>
[53]	não permissionado	sim	não
[55]	permissionado	sim	não
[56]	não permissionado	sim	não
[57]	não permissionado	não	não
[58]	não permissionado	sim	não
[59]	permissionado	sim	não
Proposto	não permissionado	não	sim

Os trabalhos pesquisados estão relacionados na Tabela 7 com destaque para características que identificam as possibilidades de ambientes de comércio de energia. Observa-

se que, apesar dos inúmeros estudos realizados sobre comércio de energia em microrredes, os sistemas propostos apresentam limitações como alto custo de transação, desafios de anonimato, controle de acesso, que precisam ser abordados. A principal lacuna encontrada foi a falta de preocupação em tratar aos conflitos relativos ao uso da energia, indicando solução para questões como roubo de energia e falhas no sistema de geração ou distribuição. Nesse sentido, esse trabalho buscou utilizar os recursos da *Blockchain*, como o algoritmo de consenso, a criptografia e a imutabilidade, para modelar soluções e possibilitar a gestão do sistema perante agentes maliciosos.

CONCLUSÃO

Este trabalho propõe um ambiente não permissionado para o comércio de energia P2P em microrredes *ad hoc*. A proposta baseia-se na integração com a *blockchain* *Freechains*, que utiliza a reputação dos usuários como insumo para obter consenso.

Nesse contexto descentralizado, cada usuário é um operador da sua infraestrutura de distribuição, que inclui ramais, fontes e medidores. A conexão de um novo ramal de usuário implica na implantação de um dispositivo controlador de potência que protege indiretamente toda a microrrede e permite a identificação de falhas e furtos. Esse ambiente conecta o mundo físico ao ambiente digital de comércio, trazendo para dentro do ambiente uma forma de tratamento de conflitos sem a dependência de um árbitro central.

O ambiente proposto, denominado *ALCE*, foi implementado com um conjunto de rotinas que interagem com o *Freechains* para realizar as transações de oferta e compra de energia, bem como para a solução de conflitos através de transferência de unidades de reputação. A correlação entre os valores armazenados na cadeia e a operação do dispositivo controlador com as ações correspondentes dos usuários na aplicação, diminui a lacuna entre a infraestrutura física para o fornecimento de energia e o comércio livre e não permissionado no mundo digital. Este parágrafo apresenta a solução para os dois primeiros questionamentos desta pesquisa: Como manter uma infraestrutura de distribuição através de conexões *ad hoc*? Como evitar abusos do sistema, tais como furtos de energia?

Para avaliar o *ALCE* realizamos simulações mimetizando diversos cenários reais possíveis. Observamos que o crescimento orgânico da microrrede e as várias transações realizadas ao longo das simulações não têm impacto significativo na escalabilidade da *blockchain*. O ambiente de comércio proposto é viável, mesmo em diversas situações de conflito, cujos eventos adversos podem ocorrer em microrredes não permissionadas. A eficácia do *ALCE* no comércio de energia foi avaliada considerando o formato da microrrede não permissionada *ad hoc*, pois nesse ambiente não existe o suporte de uma entidade certificadora que garanta as transações entre pares, nem mesmo a infraestrutura de distribuição. Nesse caso, esse ambiente utiliza como métrica autorreguladora o comportamento do usuário através da reputação. Este parágrafo apresenta as simulações que balizam os demais questionamentos apresentados na introdução: Como viabilizar

um comércio de energia em que consumidores e geradores possam negociar par a par livremente e de forma segura, sem confiança prévia entre as partes, e sem a necessidade de intermediários? E finalmente, como sensibilizar a percepção dos usuários quanto a necessidade de um comportamento colaborativo pode viabilizar o comércio de energia *peer-to-peer*?

Como trabalhos futuros, planejamos implementar um protótipo do controlador, cujo o primeiro passo foi modelar este dispositivo em uma Rede de Petri para verificar propriedades de chaveamento. Outros estudos envolvem a automatização do processo de parametrização e a troca de informação entre os controladores.

REFERÊNCIAS

- [1] LASSETER, R. H. Microgrids. In: IEEE. *2002 IEEE power engineering society winter meeting. Conference proceedings (Cat. No. 02CH37309)*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 305–308.
- [2] AROS-VERA, F. et al. Increasing the resilience of critical infrastructure networks through the strategic location of microgrids: A case study of hurricane maria in puerto rico. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 55, p. 102055, 2021. ISSN 2212-4209. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420921000212>>.
- [3] PENG, L. et al. Privacy preservation in permissionless blockchain: A survey. *Digital Communications and Networks*, v. 7, n. 3, p. 295–307, 2021. ISSN 2352-8648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864819303827>>.
- [4] SANT'ANNA, F.; BOSISIO, F.; PIRES, L. Freechains: Disseminação de conteúdo peer-to-peer. In: SBC. *Anais Estendidos do XX Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*. [S.l.], 2020. p. 101–108.
- [5] WEEDY, B. M. et al. *Electric power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Substation auxiliary power supplies - cap. 4. In: BAYLISS, C.; HARDY, B. (Ed.). *Transmission and Distribution Electrical Engineering (Third Edition)*. Third edition. Oxford: Newnes, 2007. p. 115–148. ISBN 978-0-7506-6673-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750666732500082>>.
- [7] SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. Geração distribuída versus centralizada. *m*, Instituto Politécnico de Viseu, 2008.
- [8] ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 10, n. 6, p. 539–558, 2006.
- [9] ROBBA, E. J. et al. *Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

- [10] LOPES, I. J. da S.; MANSUR, R. M. Modelagem de uma linha de transmissão com trecho aéreo, subterrâneo e subaquático para o estudo de perdas e desequilíbrio de tensão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.
- [11] KREUTZ, C. Avaliação de risco de um sistema de transmissão elétrica. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 6, n. 14, p. 989–1002, 2019.
- [12] BOTELHO, G. L. *PERDAS NÃO TÉCNICAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM DESAFIO COMPORTAMENTAL*. [S.l.]: Rio de Janeiro, RJ–Brasil, 2022.
- [13] KUNDUR, P. et al. Power system stability. *Power system stability and control*, v. 10, n. 1, p. 7–1, 2007.
- [14] SOBRINHO et al. Novos conversores retificadores sepic zcs-pwm, operando como abaixadores de tensão, com elevados rendimento e fator de potência—um estudo comparativo. 2000.
- [15] BROWN, M. *Power supply cookbook*. [S.l.]: Elsevier, 2001.
- [16] JUNIOR, M. E. T. S.; FREITAS, L. C. G. de. Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 6, p. 3888–3906, 2020.
- [17] CHARTIER, S. L. et al. Microgrid emergence, integration, and influence on the future energy generation equilibrium—a review. *Electronics*, v. 11, n. 5, 2022. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/5/791>>.
- [18] OLIVEIRA, T. R. de. Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de rede cc dedicado aos setores residencial e comercial. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- [19] HAMMERSTROM, D. J. Ac versus dc distribution systems did we get it right? In: IEEE. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.], 2007. p. 1–5.
- [20] CALVILLO, C.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; VILLAR, J. Assessing low voltage network constraints in distributed energy resources plan-

- ning. *Energy*, v. 84, p. 783–793, 2015. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215003382>>.
- [21] LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid: A conceptual solution. In: IEEE. *2004 IEEE 35th annual power electronics specialists conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*. [S.l.], 2004. v. 6, p. 4285–4290.
- [22] CAVANAGH, K.; BELK, J. A.; TURITSYN, K. Transient stability guarantees for ad hoc dc microgrids. *IEEE Control Systems Letters*, IEEE, v. 2, n. 1, p. 139–144, 2017.
- [23] REINA, F. C. G. *Avaliação do impacto de mercados peer-to-peer na operação da rede de distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto (Portugal), 2021.
- [24] GONÇALVES, J. L. P. Modelos para a comercialização de energia elétrica em ambiente de mercado. *Master's in Automation and Communications in Energy Systems, ISEC, Coimbra*, 2013.
- [25] GUO, H. et al. Constraining the oligopoly manipulation in electricity market: A vertical integration perspective. *Energy*, Elsevier, v. 194, p. 116877, 2020.
- [26] ALHADHRAMI, Z. et al. Introducing blockchains for healthcare. In: *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.
- [27] NAKAMOTO, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized business review*, 2008.
- [28] TIKHOMIROV, S. Ethereum: state of knowledge and research perspectives. In: SPRINGER. *International symposium on foundations and practice of security*. [S.l.], 2017. p. 206–221.
- [29] BALIGA, A. et al. Performance characterization of hyperledger fabric. In: IEEE. *2018 Crypto Valley conference on blockchain technology (CVCBT)*. [S.l.], 2018. p. 65–74.
- [30] STODT, F. et al. Collaborative smart production supply chains with blockchain based digital product passports. *Preprints*, p. 202402119, 2024.

- [31] WEI, Q. et al. A survey of blockchain data management systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, ACM New York, NY, v. 21, n. 3, p. 1–28, 2022.
- [32] BUTERIN, V. et al. Ethereum white paper. *GitHub repository*, v. 1, n. 22-23, p. 5–7, 2013.
- [33] AMORES-SESAR, I.; CACHIN, C.; MIĆIĆ, J. Security analysis of ripple consensus. *arXiv preprint arXiv:2011.14816*, 2020.
- [34] PERVEZ, H. et al. A comparative analysis of dag-based blockchain architectures. In: *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 27–34.
- [35] POLGE, J.; ROBERT, J.; Le Traon, Y. Permissioned blockchain frameworks in the industry: A comparison. *ICT Express*, v. 7, n. 2, p. 229–233, 2021. ISSN 2405-9595. Disponible em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959520301909>>.
- [36] ZHANG, R.; XUE, R.; LIU, L. Security and privacy on blockchain. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 52, n. 3, 2019. ISSN 0360-0300. Disponible em: <<https://doi.org/10.1145/3316481>>.
- [37] SRIMAN, B.; KUMAR, S. G.; SHAMILI, P. Blockchain technology: Consensus protocol proof of work and proof of stake. In: *Intelligent computing and applications: Proceedings of ICICA 2019*. [S.l.]: Springer, 2020. p. 395–406.
- [38] ABRAR, I.; SHEIKH, J. A. Current trends of blockchain technology: architecture, applications, challenges, and opportunities. *Discover Internet of Things*, Springer, v. 4, n. 1, p. 7, 2024.
- [39] BOUSBIBA, O.; ECHTLE, K. A fast byzantine fault-tolerant diagnostic agreement protocol for synchronous distributed systems. In: VDE. *ARCS 2016; 29th International Conference on Architecture of Computing Systems*. [S.l.], 2016. p. 1–11.
- [40] BENTOV, I. et al. Proof of activity: Extending bitcoin’s proof of work via proof of stake [extended abstract] y. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, ACM New York, NY, USA, v. 42, n. 3, p. 34–37, 2014.

- [41] CASTRO, M.; LISKOV, B. et al. Practical byzantine fault tolerance. In: *OsDI*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 99, n. 1999, p. 173–186.
- [42] SZABO, N. Winning strategies for smart contracts. *foreword by Don Tapscott, Blockchain Research Institute*, v. 4, 2017.
- [43] MAGAZZENI, D.; MCBURNEY, P.; NASH, W. Validation and verification of smart contracts: A research agenda. *Computer, IEEE*, v. 50, n. 9, p. 50–57, 2017.
- [44] CHRISTIDIS, K.; DEVETSIKIOTIS, M. Blockchains and smart contracts for the internet of things. *IEEE access, Ieee*, v. 4, p. 2292–2303, 2016.
- [45] ZHANG, L. et al. Research on a covert communication model realized by using smart contracts in blockchain environment. *IEEE Systems Journal, IEEE*, v. 16, n. 2, p. 2822–2833, 2021.
- [46] NAZAROV, S.; ELLIS, S. *Chainlink: A Decentralized Oracle Network*. 2017. <https://chain.link/whitepaper>.
- [47] PASDAR, A.; FAGHANI, M. R. Oracles in blockchain: A survey on technical challenges and future research directions. *Journal of Network and Computer Applications, Elsevier*, v. 201, p. 103332, 2022.
- [48] DONG, J. et al. Daon: A decentralized autonomous oracle network to provide secure data for smart contracts. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, v. 18, p. 5920–5935, 2023.
- [49] OPEN. *Tellor: Decentralized Oracle Protocol– Whitepaper*. 2024. <https://docs.tellor.io>.
- [50] AGENCY, I. E. *DC Distribution Systems and Microgrids*. Paris: [s.n.], 2020. Accessed: 2025-10-16. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/dc-distribution-systems-and-microgrids>>.
- [51] LABORATORY, N. R. E. *DC Power Systems for Buildings: A Review of Applications and Benefits*. Golden, CO, 2018. Accessed: 2025-10-16. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70098.pdf>>.

- [52] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- [53] SAEED, N.; WEN, F.; AFZAL, M. Z. Decentralized peer-to-peer energy trading in microgrids: Leveraging blockchain technology and smart contracts. *Energy Reports*, v. 12, p. 1753–1764, 2024. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724004797>>.
- [54] VUJIČIĆ, D.; JAGODIĆ, D.; RANĐIĆ, S. Blockchain technology, bitcoin, and ethereum: A brief overview. In: IEEE. *2018 17th international symposium infoteh-jahorina (infoteh)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- [55] WANG, L. et al. A permissioned blockchain-based energy management system for renewable energy microgrids. *Sustainability*, v. 13, n. 3, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1317>>.
- [56] KHORASANY, M. et al. Lightweight blockchain framework for location-aware peer-to-peer energy trading. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 127, p. 106610, 2021. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152031807X>>.
- [57] LONG, C.; ZHOU, Y.; WU, J. A game theoretic approach for peer to peer energy trading. *Energy Procedia*, v. 159, p. 454–459, 2019. ISSN 1876-6102. Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218313705>>.
- [58] KHAN, M. H. D.; IMTIAZ, J.; ISLAM, M. N. U. A blockchain based secure decentralized transaction system for energy trading in microgrids. *IEEE Access*, IEEE, v. 11, p. 47236–47257, 2023.
- [59] AHMED, M. et al. Energy trading and control in microgrid network by using blockchain technology. *Miscellaneous*, 2022.