

# Gestão de microrredes desbalanceadas com contratos inteligentes de energia

Rodrigo Damasceno Nascimento\*, Mauricio Sperandio\*,  
Tiago Francisco Hinterholz\*.

\*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul  
Brasil (e-mail: rodrigoml.damasceno@gmail.com, rodrigo.damasceno@acad.ufsm.br, mauricio.sperandio@ufsm.br,  
fh.tiago@gmail.com).

---

**Abstract:** This work proposes a management of unbalanced microgrids using smart contracts involving different types of microgrids and operating states. The validation of the proposed methodology seeks to promote the efficient management of microgrids with single-phase, two-phase and three-phase networks, with or without energy storage. The validation of the proposed models was carried out through computational analysis with the help of Python software in conjunction with OPENDSS. It is believed that the results obtained will contribute to the advancement of knowledge in the management of unbalanced microgrids and to the improvement of energy efficiency in different contexts.

**Resumo:** Este trabalho propõe uma gestão de microrredes desequilibradas usando contratos inteligentes envolvendo diferentes tipos de microrredes e estados de operação. A validação da metodologia proposta busca promover a eficiente gestão de microrredes com redes monofásicas, bifásicas e trifásicas, com ou sem armazenamento de energia. A validação dos modelos propostos, foi realizada por meio de análises computacionais com o auxílio do software Python em conjunto com o OPENDSS. Acredita-se que os resultados obtidos contribuirão para o avanço do conhecimento em gestão de microrredes desbalanceadas e para a melhoria da eficiência energética em diferentes contextos.

**Keywords:** Smart microgrid, multiple microgrids, energy trading, blockchain, unbalanced, cooperation

**Palavras-chaves:** Microrrede inteligente, múltiplas microrredes, comercialização de energia, blockchain, desbalanceado, cooperação.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O funcionamento integral da sociedade moderna é inteiramente dependente do fornecimento seguro de energia e com qualidade. Porém, as atuais redes de transmissão brasileira apresentam graves problemas em relação à segurança, confiabilidade e qualidade de fornecimento devido ao tempo das linhas de transmissão. A renovação da infraestrutura de rede de distribuição e transmissão exige investimentos, mas as fontes locais de energia, como as Microrredes (MRs) são consideradas a maneira mais eficiente de atender às demandas sociais e incorporar soluções inovadoras (Hatziargyriou, 2014).

As MRs são compostas por fontes de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, e armazenadores de energia, permitindo que operem de maneira autônoma e independente da rede elétrica convencional (modo ilhado). No entanto, um problema que pode surgir na operação das MRs é o desbalanceamento de cargas entre as diferentes fontes de energia. Para solucionar esse problema, é necessário o emprego de estratégias de controle que considerem as peculiaridades de cada fonte de energia e a demanda energética em cada ponto da MR, além da utilização de sistemas de monitoramento e medição precisos.

As MRs podem ser conjugadas com a tecnologia de mecanismo de banco de dados avançado que permite o compartilhamento transparente de informações, a *blockchain* para instituir sistemas de comércio de energia Peer To Peer (P2P), permitindo que produtores de energia, como as MRs, comercializem sua energia diretamente aos consumidores. Esta tecnologia é empregada para registrar e rastrear as transações energéticas, proporcionando segurança, transparência e imutabilidade ao sistema (Bukar, 2023). Contratos inteligentes podem ser utilizados para automatizar a negociação e gestão de energia entre os participantes da rede (Ye, 2017). Esse modelo de comércio de energia possibilita aos consumidores escolherem a fonte de sua energia, favorecendo fontes renováveis e geradoras de energia local.

Embora a implementação de sistemas de comércio de energia baseados em MRs e *blockchain* ainda seja limitada e enfrente desafios, como a regulamentação e a integração com o sistema elétrico existente, essa tendência está ganhando força (Andoni, 2018). Esta tecnologia é especialmente relevante para MRs desbalanceadas, ou seja, com desequilíbrio de potência entre fases. Ela permite a instituição de um mercado mais diversificado e equilibrado entre as diferentes fontes energéticas presentes na MR, podendo participar qualquer um que queira negociar.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma metodologia que possibilite: 1) Gestão eficiente de MRs com redes monofásicas, bifásicas, trifásicas, e 2) Inclusão de MRs com armazenamento de energia. Para isso, será proposto um modelo de mercado de compra e venda de energia que permita o equilíbrio de oferta e demanda entre as MRs, promovendo uma operação mais eficiente e sustentável. A proposta de metodologia considerará as particularidades de cada MR, levando em conta fatores como a geração de energia, a demanda e o armazenamento de energia, além de aspectos técnicos e regulatórios. Com a implementação dessa metodologia, espera-se contribuir para o avanço da gestão de MRs, promovendo a integração de fontes de energia renováveis e reduzir os custos de operação.

## 2. COMPRA E VENDA DE ENERGIA

O sistema elétrico nacional está passando por transições significativas de alinhamento com o cumprimento das metas de mitigação das mudanças climáticas e utilizando as oportunidades oferecidas pelos sistemas econômicos de energia renovável. Essa transição envolve a mudança de sistemas centralizados de combustíveis fósseis de grande escala com fluxos de energia radial para sistemas distribuídos baseados em energia renovável de pequena escala com fluxo de energia bidirecional. Uma das propostas para permitir transações de eletricidade em tempo real por prosumidores é a adição de recursos como interface de pagamentos unificados (UPI) e tecnologias de contabilidade distribuída (*Distributed Ledger Technology* - DLT). Com esses avanços, espera-se que os futuros sistemas de eletricidade se transformem em MRs interconectadas e que possam permitir o fluxo bidirecional em tempo real de eletricidade, dinheiro e informações.

Essas MRs em rede ou interconectadas também fornecem maior confiabilidade e segurança energética em eventos de interrupções de energia, escassez e ataques ciberfísicos, uma vez que atuam como reservas umas das outras e colaboram para restaurar os serviços. Coletivamente, elas são capazes de gerenciar a variabilidade, a incerteza e a intermitência nesses pequenos sistemas baseados em energia renovável. A DLT é um banco de dados digital descentralizado que é amplamente utilizado em um ambiente distribuído, como a MR interconectada. O *blockchain* é um tipo de DLT amplamente utilizado na indústria de energia devido à sua capacidade de lidar com transações financeiras totalmente descentralizadas e sem confiança ponto a ponto. Ele consiste em registros digitais compartilhados e distribuídos que armazenam com segurança as informações sobre transações sem a presença de uma autoridade central. O *Bitcoin* facilita a execução em tempo real de contratos inteligentes e garante a liquidação rápida de pagamentos.

Existem cerca de 140 projetos e *start-ups* em todo o mundo que utilizam ou planejam utilizar a tecnologia *blockchain* em MRs (Zhang, 2018). O Brooklyn Microgrid Project (BMP) é um dos primeiros projetos a adotar o *blockchain* para promover transações de energia P2P. Desde a primeira transação em 2016, em que cinco prosumidores foram conectados a cinco consumidores na fase piloto, mais de 300 prosumidores já se inscreveram para a próxima etapa do

projeto (Andoni, 2018). As MRs incluem infraestrutura de controle, informação e comunicação, além da infraestrutura física usada para distribuição de energia (Ye, 2017). Para transações em MRs habilitadas para *blockchain* (BSMG), os mecanismos de leilão devem atender às quatro propriedades do mercado, e as transações P2P também precisam ser verificadas para manter as restrições elétricas do sistema. Muitos dos modelos desenvolvidos usam análise de fluxo de potência ótima, que pode não ser adotada pelos prosumidores distribuídos (Baroche, 2019). Escalar modelos P2P pode permitir uma rede mais sustentável, mas aumenta o número de violações e diminui a validade das transações. Um sistema semi-descentralizado pode ajudar a superar essa desvantagem (Souza, 2019).

### 2.1 Mercado P2P

Nos últimos anos, com a ampliação dos recursos energéticos distribuídos (DERs), como células fotovoltaicas e turbinas eólicas, cada vez mais usuários de energia estão se tornando prosumidores, ou seja, produzem e consomem energia. Porém, a geração de energia por meio de DERs é intermitente e de difícil previsão. Para obter um fornecimento mais estável de energia, são implantados dispositivos de armazenamento de energia distribuída (ESDs), como sistemas de armazenamento de bateria recarregável de íon-lítio. Ademais, a distribuição cooperativa de energia entre os prosumidores pode melhorar o equilíbrio do suprimento de energia, uma vez que alguns prosumidores podem ter energia excedente enquanto outros apresentam déficit (Lou, 2014). Devido à natureza climática dos recursos utilizados na geração de eletricidade pelos prosumidores, a quantidade de eletricidade gerada é variável e imprevisível. Quando há excesso de energia, existem diversas opções para os prosumidores, tais como (1) transmitir o excedente para a rede, (2) armazenar em uma bateria para uso posterior, ou (3) vender para outros consumidores da rede. Essa troca de eletricidade entre prosumidores e consumidores é conhecida como comércio de eletricidade P2P (Bukar, 2023).

A Figura 1 apresenta o modelo de negociação de eletricidade P2P, que envolve quatro participantes: o coordenador de compartilhamento de energia, a concessionária de energia elétrica, os consumidores e os prosumidores. A diferenciação entre consumidores e prosumidores encontra-se no fato de que os primeiros apenas consomem eletricidade, enquanto os segundos produzem e consomem eletricidade. Há uma troca de energia e dinheiro entre os clientes e os prosumidores, como mostrado pelas setas de energia e comércio. O prosumidor pode vender eletricidade a outro prosumidor ou a um consumidor. O processo de negociação é realizado através de uma plataforma controlada e monitorada pelo coordenador de compartilhamento de energia. A seta bidirecional indica que os prosumidores têm a capacidade de vender e comprar energia do coordenador. Além disso, esse processo ocorre simultaneamente (Bukar, 2023; Zhou, 2018; Roy, 2016; Gurmani, 2019).

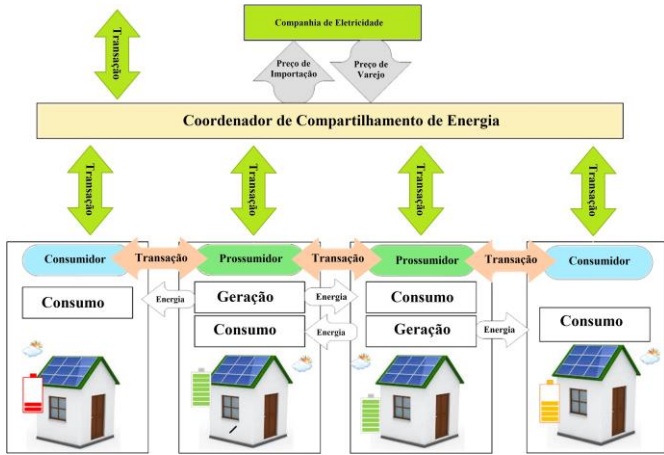


Figura 1 – Paradigma do mercado de eletricidade P2P.

O conceito de negociação P2P, ou economia compartilhada, é amplamente utilizado em redes elétricas locais, conforme referenciado em Hamari (2016) e Avop (2019). Este modelo envolve a participação de prosumidores, consumidores e geradores de eletricidade, que podem comprar e vender energia diretamente entre si, sem depender dos fornecedores convencionais de eletricidade. A comercialização de eletricidade P2P incentiva os prosumidores a compartilhar seu excesso de eletricidade com seus pares para obter mais lucros, fixando o preço de exportação abaixo do preço de varejo. No processo de negociação de eletricidade P2P, os clientes e prosumidores divulgam sua demanda e geração de energia a um preço doméstico no mercado local antes de negociar com um varejista. O preço da eletricidade geralmente fica entre os preços de varejo e exportação. Portanto, a negociação de energia P2P é benéfica para prosumidores e clientes.

O mercado de eletricidade convencional opera em uma única direção, com eletricidade sendo comercializada da fonte para os usuários finais através de linhas de transmissão de longa distância. Com o aumento do número de prosumidores, a rede elétrica tornou-se mais descentralizada (Li, 2019). Além disso, o aumento na adoção de fontes de energia renovável no nível doméstico exige uma estratégia alternativa de mercado, infraestrutura de energia, fixação de preços e descentralização do mercado de energia (Goldthau, 2014). Como resultado, é necessário estabelecer mercados locais de energia onde a geração produzida de forma renovável possa ser vendida diretamente entre prosumidores e consumidores, sem intermediários (Mengelkamp, 2017).

A implantação do comércio de eletricidade P2P traz implicações para a comunidade, afetando os padrões de consumo de energia dos consumidores residenciais, criando oportunidades de trabalho e treinamento para gerenciar e manter os sistemas P2P, aprimorando a transparência das transações e a confiança social, minimizando as transações fraudulentas e aumentando o compromisso com a comunidade. Vários projetos têm se concentrado no comércio de eletricidade P2P, como o projeto Enerchain na Europa, Energy Collective na Dinamarca, o projeto Community First! Village, P2P3M na Coreia do Sul/Estados Unidos, sonnen Community na Alemanha, Vandebroon na Holanda, Yeloha e TransActive-Grid nos Estados Unidos e Piclo no Reino Unido.

### 3. METODOLOGIA PARA COMPRA E VENDA DE ENERGIA

Para calcular a receita gerada pela compra de energia elétrica das MR, utiliza-se a equação (1) onde é utilizada uma matriz de preços ( $\lambda^{MR}$ ), que representa os preços de venda de energia de cada MR em suas colunas e os preços de compra das MRs consumidoras em suas linhas. A multiplicação dessa matriz pela potência de compra das MRs consumidoras ( $P^{MR}$ ) resulta no valor total da receita gerada. Assim, é possível avaliar a efetividade financeira de cada MR envolvida nas transações de compra e venda de energia elétrica. É importante destacar que a precisão dos dados utilizados para o cálculo da receita gerada depende da confiabilidade do sistema de medição de energia elétrica utilizado (Li, 2022) (Hemmati, 2018).

$$R_{receita}(t) = \sum_{t=1}^{288} \lambda^{MR} P^{MR}(t) \quad (1)$$

Com base nos gastos e ganhos das MRs inteligentes reconfiguráveis (MRIR), a prioridade é maximizar o lucro do operador MR conforme equação (2). O lucro geral do operador de MR é obtido pela subtração da receita total pela soma dos custos totais. Portanto, o objetivo do escalonamento ótimo da MRIR é maximizar o lucro geral.

$$G_{anho\ máx.} = \sum_{t=1}^{288} R_{receita}(t) - C_{ustos}(t) \quad (2)$$

O custo da MRIR é composto por quatro partes conforme equação (3): os custos de operação das unidades despacháveis ( $C_{usto_{ger.}}$ ), os custos de troca ( $C_{usto_{chav.}}$ ), os custos de aquisição de energia da rede principal ( $C_{usto_{Net}}$ ) e o custo da energia não fornecida ( $C_{usto_{e.-n\tilde{a}o}}$ ). Para calcular o custo total, é utilizado o framework horário ótimo da MRIR.

$$C_{ustos} = \sum_{i=1}^{MR} C_{usto_{ger.i}} + C_{usto_{chav.i}} + C_{usto_{Net_i}} + C_{usto_{e.-n\tilde{a}o}} \quad (3)$$

Cada um dos elementos que compõem o custo total (custo de operação, custo de troca e custo de rede) são calculados de acordo com a topologia ótima do MRIR em cada hora. Os gastos de operação das unidades que podem ser controladas incluem os gastos de geração, partida e desligamento. Neste estudo, o gasto de geração é modelado de forma linear por partes, como segue na equação (4):

$$C_{usto_{ger.}} = \sum_{i=1}^{MR} \left\{ \sum_{t=1}^{288} [c_{ger.i} + b_{ger.i} P_{ger.i}(t) + a_{ger.i} (P_{ger.i}(t))^2] + C_{I_i} + C_{F_i} \right\} \quad (4)$$

O termo inicial indica o custo de operação da unidade despachável  $i$  no tempo  $t$ , levando em consideração a parte eólica e PCH. Já o segundo e o terceiro termo de (4) representam o custo de início e desligamento da unidade despachável  $i$ , respectivamente, que basicamente são os custos relacionados a inicialização e desligamento de um sistema. É importante ressaltar que MR representa o número da MR despachável.

O custo de conexão entre MRs é um fator crucial que impacta na implementação eficiente e econômica dessas redes. Esse

custo inclui não apenas os gastos com instalação e manutenção de equipamentos de conexão, como transformadores e cabos de distribuição, mas também os custos operacionais e de manutenção desses equipamentos, que podem variar de acordo com a distância e localização das MRs.

Os switches utilizados nas conexões entre MRs também devem ser considerados, já que cada ação de troca possui um custo de operação associado. Assim, o custo total de troca pode ser calculado de acordo com o número de ações de troca realizadas, conforme a equação (5) apresentada abaixo:

$$Custo_{chav.} = \sum_{s=1}^S \left( \sum_{t=1}^{288} \vartheta_{chave}^s N_{chave}^s(t) \right) \quad (5)$$

Onde,  $\vartheta_{chave}^s$  e  $N_{chave}^s$  representam, respectivamente, o custo de operação por comutação e o número de comutações no sistema. Em determinados momentos, a MR pode não ser capaz de atender toda a demanda de energia local, o que requer a compra de energia da rede elétrica principal. O custo dessa compra é calculado por meio da equação (6), descrita abaixo:

$$Custo_{Net} = \sum_{t=1}^{288} \vartheta^b P^b(t) \quad (6)$$

A equação acima define o preço de compra de energia elétrica, que é modelado por cenário e representado por  $\vartheta^b$ . Esse preço pode ser expresso por meio da matriz  $\vartheta(\omega)$ , com  $\omega$  variando de 1 a  $N_\omega$ . Essa matriz é fundamental para calcular o custo total de compra de energia pela MR, considerando as diferentes possibilidades de preços de compra em cada cenário, dada pela equação (7):

$$\vartheta(\omega) = \begin{bmatrix} \vartheta_{11} & \dots & \vartheta_{\omega N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vartheta_{N_\omega 1} & \dots & \vartheta_{N_\omega N_T} \end{bmatrix} \quad (7)$$

O número de linhas e colunas de  $\vartheta(\omega)$  representa o número de cenários e o horizonte de programação para preço de compra, respectivamente, ou seja  $\vartheta_{N_\omega N_T}$  é o preço do poder de compra no tempo  $N_T$  e cenário  $N_\omega$ .

Inicialmente, para o estudo de compra e venda de energia elétrica entre as MRs, serão realizadas as primeiras simulações sem considerar o armazenamento de baterias. Com base nos resultados obtidos nessas simulações, será possível determinar qual a quantidade de energia elétrica que cada MR precisa comprar ou vender em cada estado para obter o lucro máximo. Será analisado o lucro máximo em cada estado, correspondente a diferentes conexões das MRs. Dessa forma, será possível determinar qual é a melhor estratégia de compra e venda de energia elétrica para o controle antes de existir o armazenamento de energia.

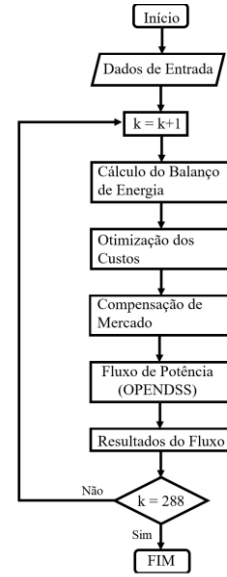


Figura 2 – Fluxograma de compra e venda em redes desbalanceada.

A partir disso, podemos iniciar o processo de compra e venda de MRs por meio da Tabela 1, que representa as possíveis combinações de compras e vendas. Cada coluna representa uma compra potencial, enquanto cada linha representa uma venda potencial. As células da tabela mostram o resultado financeiro da transação, ou seja, se haverá lucro ou prejuízo na compra e venda das MRs. Através da análise da tabela, é possível identificar as melhores oportunidades de compra e venda, levando em consideração os preços praticados no mercado e a capacidade de geração de energia de cada MR. Os valores constantes na tabela foram obtidos com base em referências bibliográficas. O preço médio por geração de energia elétrica no Brasil foi obtido a partir da fonte (Preços, 2022), enquanto os dados relativos aos custos foram obtidos em artigos referenciados como Li (2022) e Hemmati (2018).

Tabela 1. Preços de compra e venda

	MG1.3	MG2.1	MG2.2	MG2.3	MG3.1	MG3.2	MG3.3	MG4.2	MG5.1
MG1.3	<b>0,000</b>	0,027	0,028	0,029	0,027	0,028	0,029	0,028	0,029
MG2.1	0,020	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,018	0,019	0,020	0,022	0,026
MG2.2	0,019	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,017	0,018	0,019	0,021	0,025
MG2.3	0,018	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,016	0,017	0,018	0,020	0,024
MG3.1	0,025	0,021	0,022	0,023	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,026	0,031
MG3.2	0,024	0,020	0,021	0,022	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,025	0,030
MG3.3	0,023	0,019	0,020	0,021	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,024	0,029
MG4.2	0,023	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,034	<b>0,000</b>	0,022
MG5.1	0,029	0,031	0,032	0,033	0,033	0,034	0,035	0,026	<b>0,000</b>
MG5.2	0,028	0,030	0,031	0,032	0,032	0,033	0,034	0,025	<b>0,000</b>
MG5.3	0,027	0,029	0,030	0,031	0,031	0,032	0,033	0,024	<b>0,000</b>
MG6.1	0,029	0,031	0,032	0,033	0,033	0,034	0,035	0,026	0,023
MG6.2	0,028	0,030	0,031	0,032	0,032	0,033	0,034	0,025	0,022
MG6.3	0,027	0,029	0,030	0,031	0,031	0,032	0,033	0,024	0,021
MG7.1	0,031	0,033	0,034	0,035	0,023	0,024	0,025	0,026	0,024
MG7.2	0,030	0,032	0,033	0,034	0,022	0,023	0,024	0,025	0,023
MG7.3	0,029	0,031	0,032	0,033	0,021	0,022	0,023	0,024	0,022
MG8.1	0,028	0,023	0,024	0,025	0,022	0,023	0,024	0,024	0,032
MG8.2	0,027	0,022	0,023	0,024	0,021	0,022	0,023	0,023	0,031
MG9.1	0,023	0,025	0,026	0,027	0,026	0,027	0,028	0,030	0,032

MG5.2	MG5.3	MG6.1	MG6.2	MG6.3	MG7.1	MG7.2	MG7.3	MG8.1	MG8.2	MG9.1
0,030	0,031	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,034	0,028	0,029	0,023
0,027	0,028	0,026	0,027	0,028	0,028	0,029	0,030	0,020	0,021	0,022
0,026	0,027	0,025	0,026	0,027	0,027	0,028	0,029	0,019	0,020	0,021
0,025	0,026	0,024	0,025	0,026	0,026	0,027	0,028	0,018	0,019	0,020
0,032	0,033	0,031	0,032	0,033	0,021	0,022	0,023	0,022	0,023	0,026
0,031	0,032	0,030	0,031	0,032	0,020	0,021	0,022	0,021	0,022	0,025
0,030	0,031	0,029	0,030	0,031	0,019	0,020	0,021	0,020	0,021	0,024
0,023	0,024	0,022	0,023	0,024	0,024	0,025	0,026	0,033	0,034	0,030
<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,023	0,024	0,025	0,025	0,026	0,027	0,034	0,035	0,034
<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,022	0,023	0,024	0,024	0,025	0,026	0,033	0,034	0,033
<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,021	0,022	0,023	0,023	0,024	0,025	0,032	0,033	0,032
0,024	0,025	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,025	0,026	0,027	0,034	0,035	0,034
0,023	0,024	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,024	0,025	0,026	0,033	0,034	0,033
0,022	0,023	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,023	0,024	0,025	0,032	0,033	0,032
0,025	0,026	0,033	0,034	0,035	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,034	0,035	0,034
0,024	0,025	0,032	0,033	0,034	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,033	0,034	0,033
0,023	0,024	0,031	0,032	0,033	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,032	0,033	0,032
0,033	0,034	0,032	0,033	0,034	0,032	0,033	0,034	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,028
0,032	0,033	0,031	0,032	0,033	0,031	0,032	0,033	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,027
0,033	0,034	0,032	0,033	0,034	0,032	0,033	0,034	0,028	0,029	<b>0,000</b>

Tabela 2. Tipos de microrredes

MICRORREDE	TIPO
MR1, MR4, MR9	Monofásica
MR8	Bifásica
MR2, MR3, MR5, MR6, MR7	Trifásica

Com base em todos os resultados e demonstrações obtidas, é possível prosseguir para o próximo estágio, que envolve o cálculo de compra e venda de energia elétrica entre elas. Para isso, será utilizado o algoritmo abaixo representado pela Figura 4, que considera 5 estados diferentes. O primeiro estado corresponde à situação inicial do sistema, enquanto os demais envolvem a conexão de diferentes MRs. No segundo estado, ocorre a conexão entre as MRs 3 e 7, no terceiro a conexão será entre as MRs 1 e 2, no quarto será entre as MRs 2 e 3 e, por fim, no quinto estado haverá a conexão entre as MRs 5 e 7.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validação das equações e modelo proposto, a simulação será baseada no estudo de caso IEEE 123 barras, largamente empregado em análises de sistemas elétricos de distribuição. Serão utilizadas nove MRs subdivididas em redes monofásicas, bifásicas e trifásicas, como mostrado na Figura 3. Os dados relacionados as cargas e geração de energia serão disponibilizados em Dados do projeto (2023)

As imagens foram geradas por meio da simulação do fluxo de potência utilizando o software OpenDSS. As cargas elétricas de cada MR foram medidas em kilowatts (kW) ao longo de um período de 24 horas, com 288 intervalos de tempo de 5 minutos cada. Essas informações são importantes para a previsão e gestão da demanda de energia elétrica em cada MR, podendo ser utilizadas para otimizar a alocação de recursos e garantir a estabilidade do sistema elétrico.

Para a condução do presente estudo, foi decidido utilizar o modelo de demanda, geração fotovoltaica e eólica e de PCH (Pequena Central Hidrelétrica) disponibilizado pelo California ISO (Independent System Operator). Este modelo é amplamente empregado na análise de sistemas elétricos, permitindo uma avaliação minuciosa da geração de energia renovável e da demanda de energia em diferentes regiões. A utilização desse modelo possibilitará a obtenção de informações precisas acerca da disponibilidade de energia renovável em regiões específicas, bem como da demanda de energia elétrica nessas mesmas áreas. Com isso, será possível realizar uma análise abrangente e detalhada do sistema elétrico estudado, obtendo-se informações interessantes para o planejamento e gestão da matriz energética.

Será realizado neste artigo a análise dos dados relacionados ao sistema elétrico da Califórnia (Today's Outlook, 2022). Os dados foram obtidos entre as datas de 03 a 09 do mês de janeiro do ano de 2022. Os dados correspondem à geração de energia a partir de fontes renováveis, incluindo energia eólica, solar e hidrelétrica de pequena escala (PCH). Esses dados foram coletados e organizados em gráficos, a Figura 4 mostra o gráfico relacionado a demanda fornecida pelo ISO Califórnia. A análise desses dados é relevante para entender como a produção de energia renovável e demanda pode ser integrada ao sistema teste que será utilizado neste trabalho.

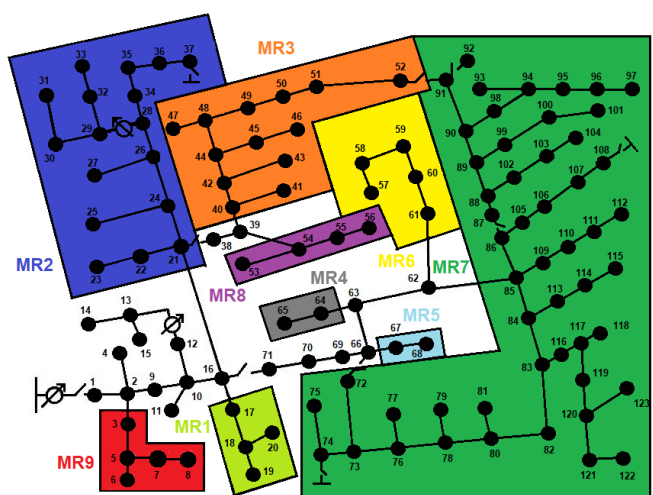


Figura 3 – IEEE 123 barras com as subdivisões das MRs.

A Tabela 2 mostra as subdivisões relacionadas as microrredes, mostrando as redes monofásicas, bifásicas e trifásicas.

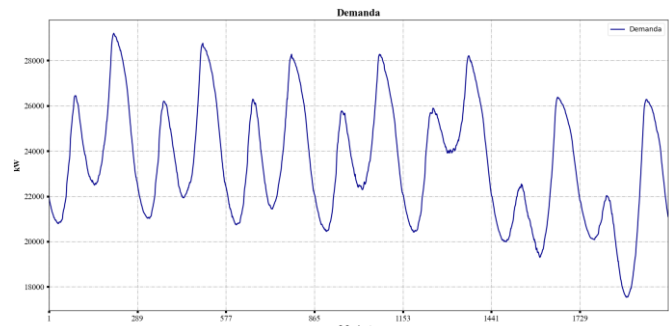


Figura 4 - Dados relacionados a demanda importados do ISO Califórnia.

A obtenção de dados confiáveis é fundamental para a implementação de um sistema de compra e venda de energia elétrica entre MRs. Para isso, foram submetidos ao algoritmo de previsão de dados três metodologias distintas: método ARIMA, redes neurais e regressão linear. A escolha da melhor metodologia deu-se pela capacidade de cada uma em prever a demanda futura de energia elétrica e o potencial de geração de energia eólica e fotovoltaica, que são fatores importantes para o cálculo de preços.

O estudo comparativo realizado indicou que o método ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) foi superior na obtenção dos dados de previsão de demanda de energia elétrica. Já nas previsões relacionadas à geração de energia eólica e solar, o método ARIMA também se mostrou superior quando comparado com outros modelos citados acima.

#### 4.1 Compra e Venda de Microrredes sem banco de baterias

A Figura 5 representa o lucro máximo de cada estado proposto. O primeiro estado corresponde à situação inicial do sistema, enquanto os demais envolvem a conexão de diferentes microrredes. No segundo estado, ocorre a conexão entre as Microrredes 3 e 7, no terceiro a conexão será entre as Microrredes 1 e 2, no quarto será entre as Microrredes 2 e 3 e, por fim, no quinto estado haverá a conexão entre as Microrredes 5 e 7.

Inicialmente, para o estudo de compra e venda de energia elétrica entre as microrredes, serão realizadas as primeiras simulações sem considerar o armazenamento de baterias. Com base nos resultados obtidos nessas simulações, será possível determinar qual a quantidade de energia elétrica que cada microrrede precisa comprar ou vender em cada estado para obter o lucro máximo. Será analisado o lucro máximo em cada estado, correspondente a diferentes conexões das microrredes.

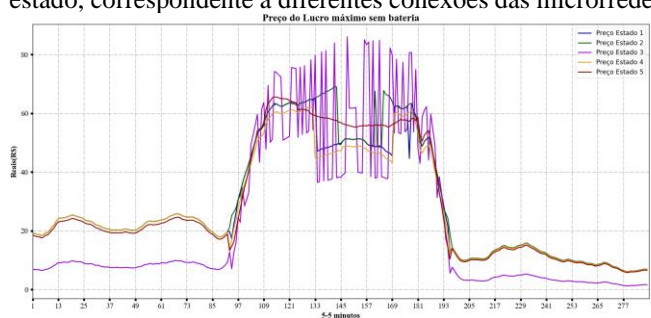


Fig. 5 Comparação do Lucro máximo das microrredes sem banco de baterias.

Com base nos resultados obtidos nessas simulações, a Fig. 6 demonstra a melhor combinação entre os chaveamentos relacionados as MRs para obtenção do lucro máximo.

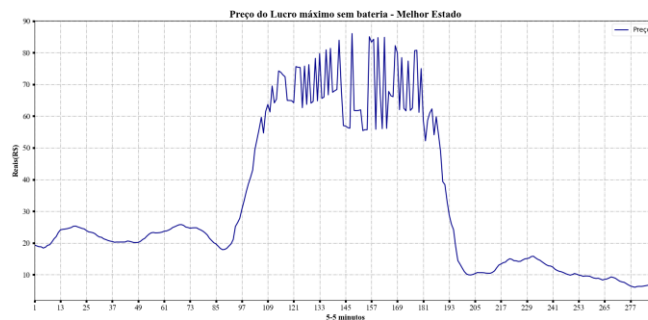


Fig. 6 Lucro máximo das MRs sem banco de baterias.

#### 4.2 Compra e Venda de Microrredes com banco de baterias

Para aprimorar ainda mais o funcionamento das MRs, será adicionado ao sistema um banco de baterias que estará localizado na entrada de cada MR. Essas baterias serão responsáveis por armazenar a energia produzida pelas fontes renováveis e disponibilizá-la quando necessário, garantindo assim uma maior estabilidade e segurança na operação das MRs. Cumpre salientar que, em situações em que a oferta de energia é superior à demanda, algumas das MRs poderão operar em modo ilhado, desconectando-se da rede por um período determinado.

No entanto, é importante ressaltar que o software OpenDSS utilizado para simulação e análise das MRs não permite o armazenamento desigual por fase em um único nó. Sendo assim, para as redes bifásicas e trifásicas, o banco de baterias foi colocado em diferentes barramentos, garantindo o armazenamento adequado e uniforme da energia produzida. Dessa forma, será possível maximizar a utilização da energia renovável disponível e reduzir a dependência das fontes convencionais de energia. A Fig. 7 ilustra o lucro máximo dos cinco estados do sistema com banco de baterias, onde pode-se analisar um pico nos valores vendidos devido ao armazenamento de energia. Ressalva-se que poderia ser realizados ajustes para uma venda mais linear com relação ao algoritmo, fazendo limitações de demanda de venda do mesmo.

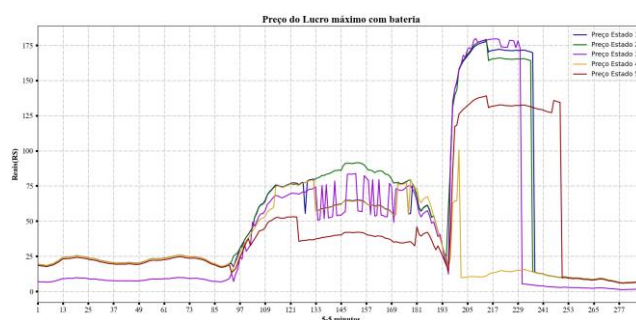


Fig. 7 Comparação do Lucro máximo das MRs com banco de baterias.

Com base nos resultados obtidos nessas simulações, a Fig. 8 demonstra a melhor combinação entre os chaveamentos relacionados as MRs para obtenção do lucro máximo com banco de baterias.

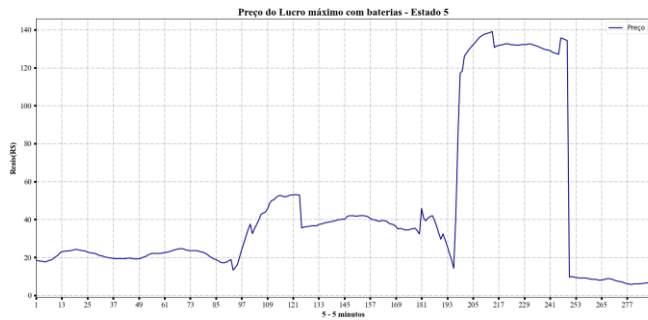


Fig. 8 Lucro máximo das MRs com banco de baterias.

## 5. CONCLUSÕES

Através deste estudo, foi possível analisar a viabilidade e eficiência da compra e venda de energia elétrica em microrredes, considerando cinco estados diferentes. A inclusão de um banco de baterias mostrou-se uma estratégia promissora para melhorar o desempenho das microrredes, permitindo um armazenamento de energia mais equilibrado e o aproveitamento máximo das fontes renováveis disponíveis.

Nos resultados obtidos, observamos que a utilização de contratos inteligentes e algoritmos de otimização contribuíram para maximizar os lucros e minimizar os custos de operação das microrredes. Em cada estado analisado, foram identificados os pontos de compra e venda mais vantajosos, levando em consideração a demanda, a oferta de energia e os preços de mercado.

Além disso, as simulações realizadas proporcionaram uma visão abrangente dos diferentes cenários de operação das microrredes, tanto com o uso de banco de baterias quanto sem ele. Isso permitiu comparar os resultados e avaliar os benefícios proporcionados pelo armazenamento de energia.

Por fim, com a metodologia proposta, é possível determinar não apenas a receita gerada pela compra e venda de energia elétrica entre MR, mas o custo de compra e venda, onde, pode-se analisar outras formas de contratos. Ao estabelecer preços transparentes e justos para a compra e venda, o sistema de MRs pode incentivar a adoção de fontes de energia renovável e promover a eficiência do sistema elétrico. A análise dos dados coletados permite que as MRs identifiquem oportunidades de negócios, avaliem a rentabilidade de suas operações e tomem decisões informadas sobre investimentos futuros.

Este estudo contribui para o avanço do conhecimento no que diz respeito à compra e venda de energia elétrica em microrredes de diferentes tipos, incluindo sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos, bem como o compartilhamento de energia entre todas as microrredes envolvidas.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, e do

INCT-GD (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

## REFERÊNCIAS

- Andoni, and Others (2018), Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp 143-174.
- Avop, R. and Others (2019), Simple and fast computation photovoltaic emulator using shift controller, *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, pp 2017-2026
- Baroche, T., and Others (2019), Exogenous Cost Allocation in Peer-to-Peer Electricity Markets, *IEEE Transactions on Powers Systems*, vol. 34, pp 2553-2564.
- Burkar, A. L., and Others (2023), Peer-to-peer electricity trading: A systematic review on current developments and perspectives, *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp 317-333.
- Dados do Projeto, *drive*, Disponível em :< <https://drive.google.com/drive/folders/11GqUiawbAqFm pTmWdFeRbNmVznmTYA1?usp=sharing>>
- Goldthau, A. (2014) Rethinking the governance of energy infrastructure: scale, decentralization and polycentrism, *Energy Research & Social Science*, vol. 1, pp 134-140.
- Gurmani, and Other (2019). Energy Trading Between Prosumer and Consumer in P2P Network Using Blockchain, *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, vol. 96, pp 875-886.
- Hamari, J., Sjuklint, M., and Other A. U. (2016), The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption, *Journal of the Association for Information Science and Technology*, vol. 67, pp 2047-2059
- Hatzigiorgiou, N. (2014). *Microgrids Architecture and Control*, pp 1-24.
- Hemmati, M., Mohammadi-Ivatloo, B., and Others (2018), Risk-based optimal scheduling of reconfigurable smart renewable energy based microgrids, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 101, pp 415-428.
- Khorasany, M., Mishra, Y., and Other G.L. (2018), Market framework for local energy trading: a review of potential designs and market clearing approaches, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, pp 5899-5908.
- Li, X., Zhang Q. (2022). Machine learning approach for system reconfiguration considering Profit-Driven security market, *Computers and Electrical Engineering*, vol 100, pp 1-19.
- Li, Z., and Others (2019), Blockchain for decentralized transactive energy management system in networked microgrids, *The Electricity Journal*, vol. 32, pp 58-72
- Lou, Y., and Others (2014), Autonomous cooperative energy trading between prosumers for microgrid systems, *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops, Edmonton, AB, Canada*, vol. 96, pp 875-886.
- Mengelkamp, E., and Others (2017), A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets, *Comput Sci Res Dev.*, vol. 33, pp 207-214.
- Preços do A-5 variam de R\$194,96/MWh a mais R\$ 600/MWh (2022). *Canal Energia*. Disponível em <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53221995/pr>>

