

DESPACHO ECONÔMICO DE UMA MICRORREDE ISOLADA A PARTIR DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.

1st Tiago Pitol Mroginski
Centro de Tecnologia, UFSM
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
tiagopitolm@gmail.com

2nd Caison Ramos
Centro de Tecnologia, UFSM
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
caison.ramos@acad.ufsm.br

3th Igor Luiz Dal Forno
Centro de Tecnologia, UFSM
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
igor.dal@acad.ufsm.br

4rd Gustavo Marchesan
Centro de Tecnologia, UFSM
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
marchesan.gustavo@ufsm.br

5th Ghendy Cardoso Junior
Centro de Tecnologia, UFSM
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
ghendy@ufsm.br

Resumo—As microrredes podem ser otimizadas de forma a reduzir custos, aumentar eficiência e confiabilidade do sistema. Visto o acima exposto, este artigo possui o objetivo de realizar a otimização de uma microrrede isolada, realizando o despacho otimizado das diferentes gerações de energia que constituem o sistema. A microrrede avaliada é constituída de geração fotovoltaica, geração eólica, sistema de armazenamento de baterias e de hidrogênio. A otimização é feita no software MATLAB através de Programação Linear. A função objetivo possui o intuito de minimizar o custo do consumo de geração, visando assim promover uma microrrede eficiente e economicamente viável. Os resultados demonstraram a importância do uso concomitante dos sistemas de armazenamento com as fontes renováveis intermitentes de energia, de modo a garantir o fornecimento e qualidade de energia com o mínimo custo possível.

Palavras-Chave—Otimização, Microrredes, Programação Linear, Armazenamento de Hidrogênio.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis para o fornecimento de energia tem se intensificado, especialmente em regiões remotas e isoladas, onde a infraestrutura elétrica tradicional é limitada ou inexistente. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de 2023, existem 196 localidades atendidas por microrredes isoladas, onde vivem cerca de 3 milhões de consumidores, dos quais 69% da principal fonte de geração é o diesel [1]. Nesse contexto, as soluções híbridas, que combinam diferentes fontes de energia renovável com sistemas de armazenamento, surgem como uma resposta promissora para atender às demandas energéticas dessas comunidades.

As soluções híbridas ou microrredes apresentam um investimento inicial mais elevado em comparação com as tecnologias convencionais de energia [2]. No entanto, estudos conduzidos pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela EPE demonstraram que, a longo prazo, essas soluções podem

resultar em uma significativa redução nos custos de energia. A diversificação das fontes de geração e a integração de sistemas de armazenamento permitem uma gestão eficiente dos recursos energéticos, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e os custos associados à sua aquisição e transporte [3].

No entanto, para que as microrredes alcancem todo o seu potencial, é essencial empregar técnicas de otimização. A otimização desempenha um papel crucial na maximização da eficiência energética, na minimização dos custos operacionais e na garantia de um fornecimento de energia confiável e estável [2]–[4].

As técnicas de otimização podem ser utilizadas para determinar a melhor configuração e operação da microrrede, levando em consideração uma série de variáveis e restrições, como a demanda de energia, a disponibilidade de recursos renováveis, as condições climáticas, os custos de combustível e os preços da eletricidade. Além disso, a otimização pode ajudar a programar o despacho de energia de forma eficiente, equilibrando a oferta e a demanda em tempo real e minimizando perdas de energia [3], [4].

O objetivo principal deste artigo é realizar a otimização de uma microrrede isolada, considerando as diferentes fontes de energia que a constituem, tais como: eólico, solar e armazenamentos a bateria e a hidrogênio, de forma a minimizar os custos de geração. Para este fim, elaborou-se um modelo de otimização matemática a ser resolvido pelo método de programação linear.

O artigo é dividido da seguinte forma: na segunda seção serão abordados conceitos fundamentais acerca de microrredes, otimização e hidrogênio verde. Na terceira seção é exposta a metodologia, descrevendo como é feita a aplicação da programação linear em diferentes cenários. Na quarta seção é apresentado e analisado os resultados obtidos nos cenários

propostos. Na quinta seção é apresentado as considerações finais do trabalho.

II. REFERÊNCIAL TEÓRICO

Nesta seção é abordado os conceitos de microrrede, destacando seu uso em comunidades isoladas e sua definição como sistema local de geração, armazenamento e consumo de energia. Também é exposto três métodos utilizados para a realização do despacho econômico e ressaltado a importância da otimização para maximizar a eficiência energética e reduzir custos e explicado o processo de armazenamento de hidrogênio para posteriormente sua conversão para energia elétrica.

A. Microrredes

Uma microrrede pode ser definida como um sistema localizado de geração, armazenamento e consumo de energia, capaz de operar de forma independente ou conectada à rede principal. Ela integra uma variedade de fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica, juntamente com sistemas de armazenamento de energia, como baterias ou sistemas de hidrogênio. A flexibilidade e adaptabilidade das microrredes permitem que elas sejam dimensionadas e customizadas de acordo com as necessidades específicas de cada comunidade ou região [5], [6].

Além dos benefícios econômicos, as soluções híbridas também contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação do meio ambiente. Ao substituir gradualmente os combustíveis fósseis por fontes de energia limpa e renovável, esses sistemas ajudam a mitigar as mudanças climáticas e a promover o desenvolvimento sustentável. O uso de energia solar, eólica e, quando possível, hidrelétrica, alinha-se com as demandas crescentes por uma matriz energética mais limpa e sustentável.

A implementação de microrredes em áreas isoladas não apenas proporciona acesso à energia, mas também promove o desenvolvimento tecnológico e a capacitação local. Diante dos desafios enfrentados pelas comunidades isoladas em relação ao fornecimento de energia, as soluções híbridas surgem como uma alternativa viável e sustentável. Ao combinar diferentes fontes de energia renovável com sistemas de armazenamento, esses sistemas oferecem uma série de benefícios, incluindo a redução de custos a longo prazo, a estabilidade financeira, a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento tecnológico local.

B. Hidrogênio Verde

O gás hidrogênio (H_2) pode ser usado como Sistema de Armazenamento Energético (SAE). Essa solução, mitiga a intermitência no fornecimento de energia elétrica em uma microrrede com grande penetração de fontes renováveis, ao permitir que excedentes de geração possam ser armazenados para serem aproveitados posteriormente em períodos de maior demanda e baixa produção. Uma das vantagens do uso de H_2 como SAE é a possibilidade de produzi-lo pelo processo de eletrólise alcalina da água dentro de um eletrolisador, usando energia elétrica proveniente de fontes renováveis;

armazenando-o em tanques pressurizados, e fazendo a reconversão em energia elétrica usando célula a combustível.

Desta maneira o processo torna-se ambientalmente sustentável, uma vez que não há consumo de combustíveis fósseis nem emissões de CO_2 nos processos de produção, armazenamento e uso final do H_2 . Porém, o uso dessa tecnologia como sistema de armazenamento ainda é pouco explorado possuindo dessa forma alto custo de implementação [7].

C. Métodos de Otimização

Ao implementar modelos de otimização, as microrredes podem alcançar uma série de benefícios significativos. Elas podem reduzir os custos de energia a longo prazo, aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover o desenvolvimento de tecnologias renováveis e criar resiliência em face de interrupções na rede principal [2], [3].

A otimização por enxame de partículas (PSO) é um algoritmo metaheurístico, de funções contínuas e não-lineares inspirado no comportamento social de bandos de aves e cardumes de peixes. O PSO é baseado na representação de uma população composta por vários indivíduos capazes de interagir entre si e com o meio ambiente para encontrar uma solução. Cada posição dessas partículas é uma possível solução para o problema e possuem uma velocidade associada que determina a direção do movimento. A velocidade é um vetor que possui três componentes, a inércia que mantém a partícula se movendo na direção atual, a componente cognitiva (memória) que atrai a partícula em direção à sua melhor solução pessoal e a componente social que atrai a partícula em direção a melhor solução global conhecida pelo enxame. A cada iteração o vetor velocidade é atualizado com novos valores de posição encontrados pela partícula e pelo enxame e dessa forma recalculado o valor da velocidade. O processo se repete até que o critério de parada seja satisfeito [8], [9].

Redes Neurais Artificiais (RNA) são modelos de algoritmo de aprendizado de máquina e inteligência artificial inspirados no cérebro humano. A RNA é um algoritmo não-linear que procura simular o processamento dos neurônios através do treinamento deles com grandes quantidades de dados para estabelecer as correlações e interações entre as diferentes variáveis de um problema. Ela possui a capacidade de se adaptar, aprender, generalizar, e ser tolerante a falhas, dessa forma, as redes neurais são usadas em uma vasta classe de problemas [10], [11].

A Programação Linear (PL) é uma técnica de otimização que busca a distribuição eficiente de recursos limitados para atender um determinado objetivo. Este objetivo é geralmente expresso através de uma função linear, denominada de Função Objetivo, nela são aplicadas as restrições lineares as quais o problema deve satisfazer para encontrar a solução ótima. Os problemas de Programação Linear são frequentemente usados para maximizar lucros ou minimizar custos. Dessa forma, a PL se encarrega de encontrar a solução ótima de um problema,

uma vez definido o modelo linear, ou seja, a função objetivo e as restrições lineares [12].

III. METODOLOGIA

Neste artigo foi optado por usar a Programação Linear por ser um método mais simples e que cumpre com excelência a finalidade do problema proposto.

A simulação foi realizada através do software MATLAB, visto que esse software possui ampla utilização na área de cálculo numérico, análise de dados, programação, modelagem e simulação [13].

Esta microrrede é abastecida por uma usina fotovoltaica e uma usina eólica, além de contar com dois sistemas de armazenamento: um de baterias e outro de hidrogênio.

A geração de energia dessas usinas é modelada com base nas curvas de produção das usinas de Tacaratu, em Pernambuco, obtidas a partir do banco de dados da ONS [14]. Na Figura 1 é exposto os cenários a serem abordados e a carga analisada.

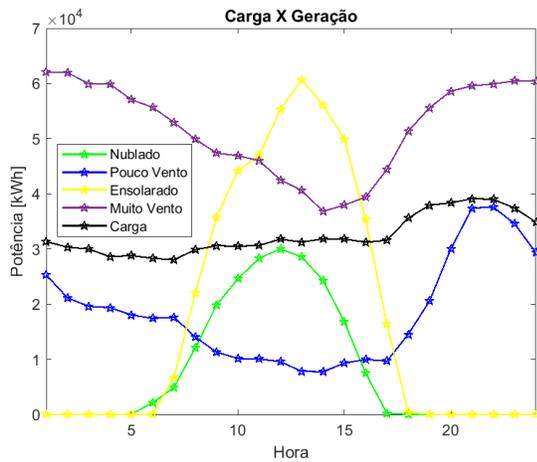


Figura 1. Carga X Geração de cada cenário

As curvas representam a produção média horária de um determinado mês. Elas foram normalizadas para kWh. A carga analisada representa o consumo de uma residência na faixa de 30 a 40 kWh.

A função objetivo, representada na Eq. 1 é definida como o somatório de custos (C) das potências consumidas no sistema.

$$\text{Min}(f) = C_{\text{Solar}} + C_{\text{Eólica}} + C_{\text{H}_2} + C_{\text{Bateria}} \quad (1)$$

Uma restrição imposta é o somatório das potências ativas (P) ser igual ou maior que a carga do sistema.

$$P_{\text{Solar}} + P_{\text{Eólica}} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{Bateria}} \geq P_{\text{Carga}} \quad (2)$$

A outra restrição é os máximos e mínimos das potências do sistema. Para as gerações fotovoltaica e eólica o máximo corresponde às curvas da Figura 1. Para os sistemas de armazenamento o máximo refere-se a sua potência nominal conforme a Tabela I. A potência mínima para todos é igual a zero indicando que a potência não pode ser negativa.

A priori, são analisados cinco cenários distintos tendo como principal objetivo realizar o melhor despacho entre as fontes de energia visando o menor custo: o primeiro cenário refere-se a um dia caracterizado por alta incidência solar, mas com pouco vento; o segundo cenário aborda um dia ensolarado com ventos intensos; o terceiro cenário representa um dia com pouca incidência de vento e céu nublado (considerado o pior caso); por fim, o quarto cenário descreve um dia nublado, porém com ventos fortes. Após a análise dos cenários diários, é avaliado um horizonte anual que abrange as variações de geração e demanda ao longo de todo o ano, considerando os quatro casos mencionados. Em todos os cenários são considerados que os sistemas de armazenamento começam sempre com sua capacidade máxima.

As variáveis de interesse do algoritmo proposto são apresentadas na Tabela I [15].

Tabela I
VARIÁVEIS IMPORTANTES CONSIDERADAS NO PROBLEMA.

Descrição	Valor
Preço kWh solar	R\$ 0,17566
Preço kWh eólica	R\$ 0,1712
Preço kWh bateria	R\$ 0,01
Energia Máxima da Bateria	30 kW h
Potência Nominal Célula Combustível	30 kW h

IV. RESULTADOS

A. Caso 1 - Pouco vento e ensolarado

Neste cenário a curva de carga usada apresenta-se acima da curva de geração como mostra a Figura 2, logo foi necessária a utilização dos sistemas de armazenamentos que são apresentados na Figura 3.

A Figura 4 mostra que primeiramente foi descarregada toda a energia elétrica da bateria, fonte de energia mais barata, para suprir a demanda, visto que no horário da madrugada não existe geração fotovoltaica e a geração de eólica é insuficiente. Posteriormente começa a ser usado o sistema de armazenamento de hidrogênio, convertendo então o H_2 para eletricidade quando necessário. Quando há excedentes, no período da tarde, é carregado novamente os sistemas de armazenamentos.

Com isso, conforme a Figura 5, estima-se um custo total diário de R\$ 1707,63.

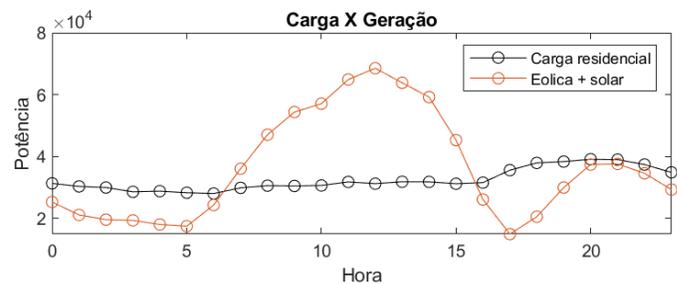


Figura 2. Carga x Geração

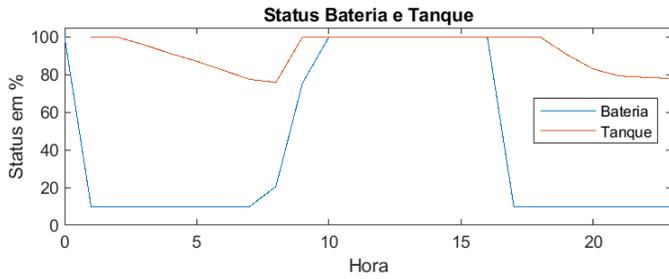


Figura 3. Status dos sistemas de armazenamento

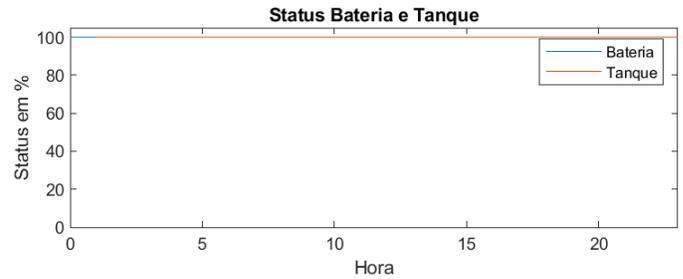


Figura 7. Status dos sistemas de armazenamento

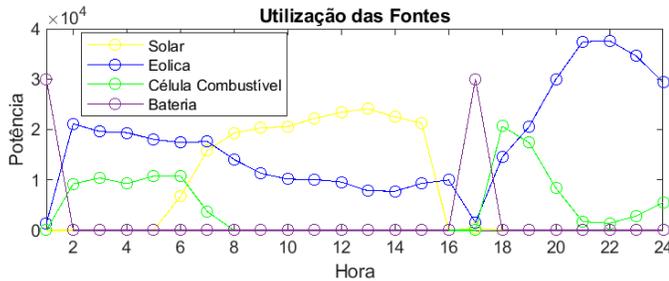


Figura 4. Utilização das fontes por hora

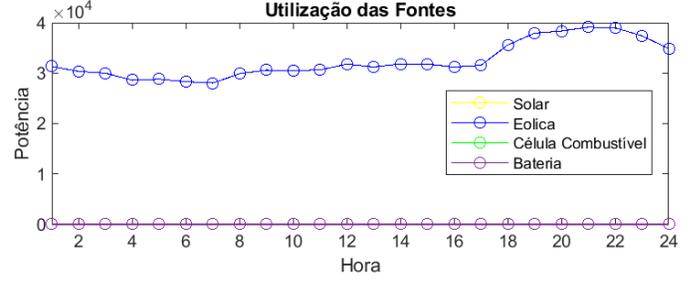


Figura 8. Utilização das fontes por hora

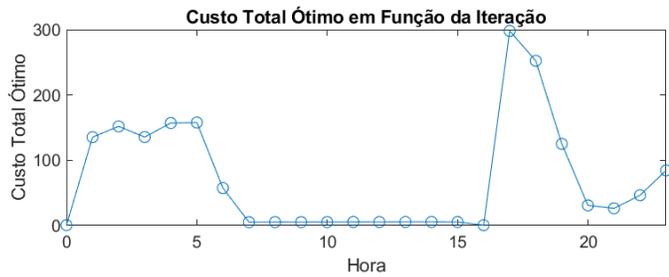


Figura 5. Custo do uso das gerações por hora

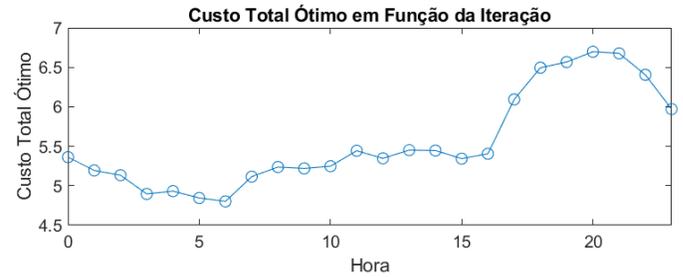


Figura 9. Custo do uso das gerações por hora

B. Caso 2 - Ensolarado e bastante vento:

Este caso se apresenta como o melhor cenário possível pois nele há a maior produção de energia fotovoltaica e eólica. A Figura 6 mostra que a curva de carga permaneceu bem abaixo da curva de geração. Desse modo, não foi necessário o uso dos sistemas de armazenamento como mostrado na Figura 7.

Nesse cenário a Figura 8 demonstra quais fontes são utilizadas durante um dia. Com isso, conforme a Figura 9, o custo total diário diminuiu para R\$ 133,32.

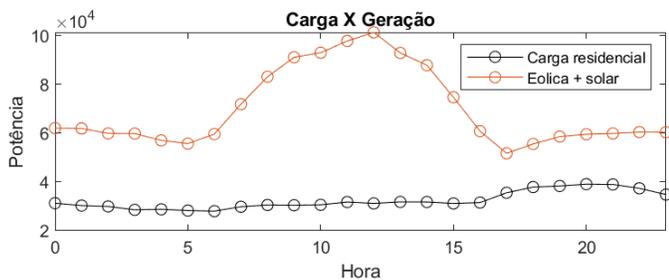


Figura 6. Carga x Geração

C. Caso 3 - Nublado e pouco vento:

Este é o pior cenário, pois apresenta as piores condições para a produção de energia fotovoltaica e eólica. Desse modo a curva de carga ficou quase acima da curva de geração, conforme apresentada na Figura 10. Nesse cenário a Figura 12 demonstra quais fontes são utilizadas durante um dia.

Assim, como mostrado na Figura 11, foi necessário uma maior atuação dos sistemas de armazenamento, elevando assim o custo diário para R\$ 2241,10 tal como ilustrado na Figura 13.

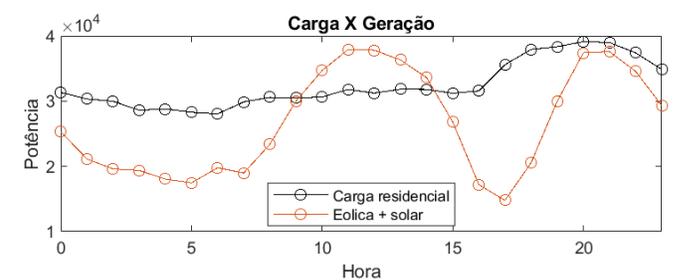


Figura 10. Carga x Geração

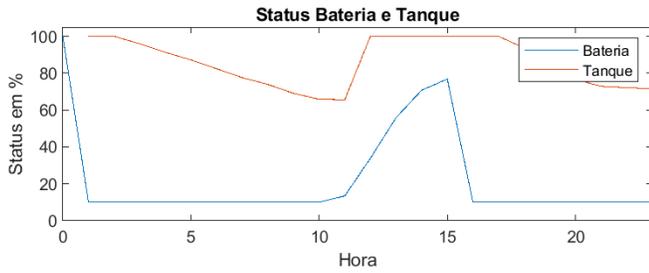


Figura 11. Status dos sistemas de armazenamento

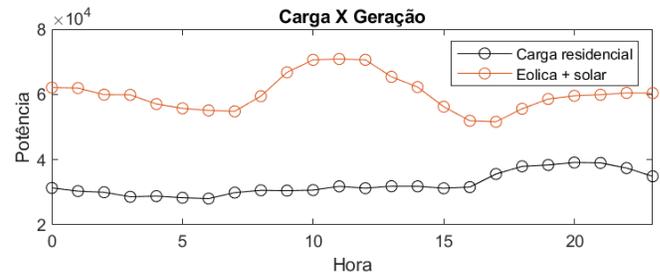


Figura 14. Carga x Geração

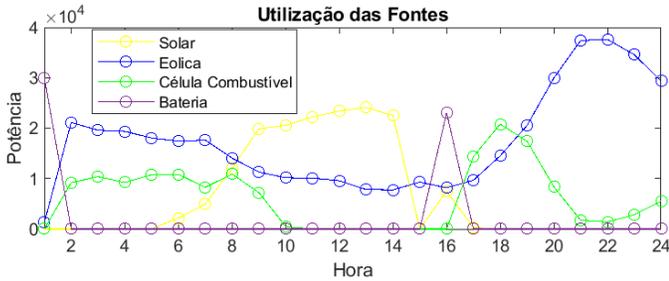


Figura 12. Utilização das fontes por hora

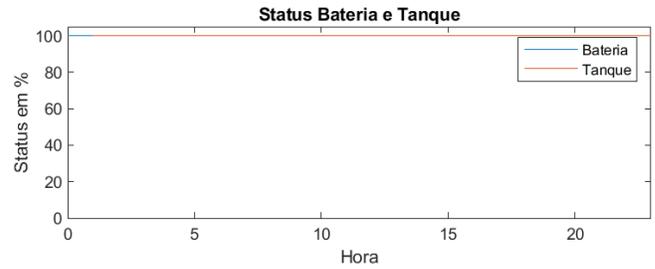


Figura 15. Status dos sistemas de armazenamento

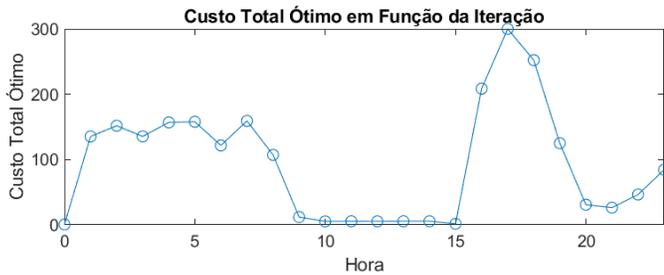


Figura 13. Custo do uso das gerações por hora

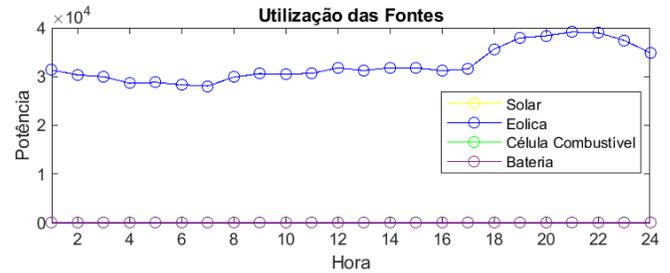


Figura 16. Utilização das fontes por hora

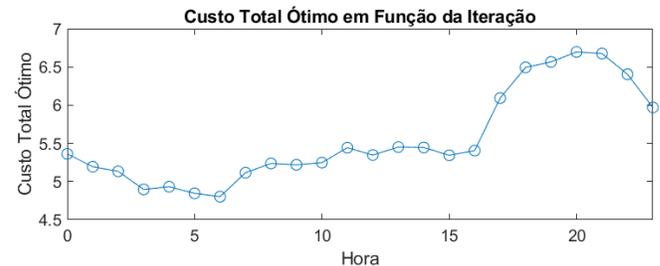


Figura 17. Custo do uso das gerações por hora

D. Caso 4 - Nublado e bastante vento:

Neste cenário, assim como o Caso 2 a curva de carga ficou abaixo da curva de geração como mostrado na Figura 14. Dessa forma nota-se que apenas a energia eólica, operando em sua capacidade máxima, é capaz de suprir toda a carga demandada. Conforme ilustrado na Figura 15 novamente não foi necessário o uso dos sistemas de armazenamento, já que a energia gerada foi capaz de atender à demanda diretamente. Isso reforça a eficiência da geração eólica em dias com ventos fortes, eliminando a necessidade de recorrer às baterias ou ao sistema de armazenamento de hidrogênio. A Figura 16 demonstra de forma clara a participação das fontes de energia ao longo do dia. Sendo assim, conforme a Figura 17 o custo diário foi igual ao do Caso 2 de R\$ 133,32.

E. Horizonte anual

Ademais foi realizado a simulação para um horizonte anual englobando assim os 4 casos citados anteriormente, dessa forma é possível observar com mais clareza como a intermitência das gerações impactam no custo do despacho conforme mostrado na Figura 18, pois a produção de energia solar e eólica varia substancialmente ao longo do ano. já nas Figuras 19 e 20 se evidencia como o uso das SAEs desempenham um papel crucial na estabilidade do sistema,

garantindo o fornecimento contínuo de energia evitando falhas ao atendimento à carga quando as energias renováveis são escassas. Com isso, ao longo do ano se obteve o custo do despacho de R\$ 15.068,39.

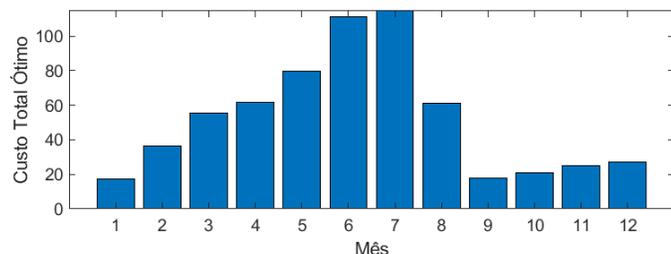


Figura 18. Custo do uso das gerações por mês

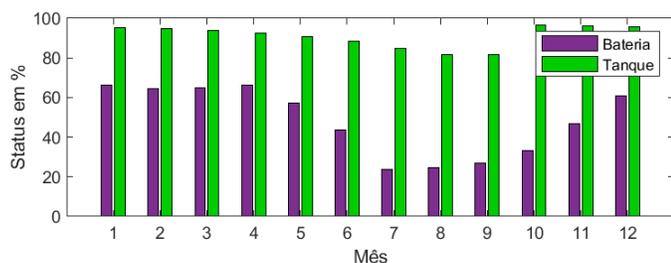


Figura 19. Status dos sistemas de armazenamento

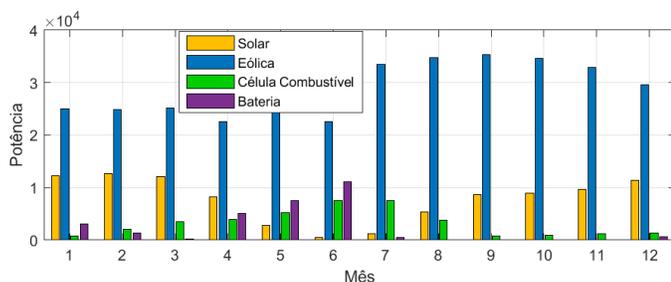


Figura 20. Utilização das fontes por mês

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados os resultados e análises da aplicação do método de otimização PL em microrredes de geração e distribuição para o atendimento a comunidades isoladas que não possuem o acesso a rede convencional.

Foi desenvolvido o código no MATLAB, para a implementação do despacho ótimo das potências ativas do sistema através da coordenação das gerações eólica e fotovoltaica.

As simulações demonstraram a importância dos sistemas de armazenamento em concomitância as gerações renováveis intermitentes, de forma que quando havia geração de excedentes, no período do dia geralmente, eles eram armazenados seja nas baterias ou em forma de H₂ para posteriormente suprir a demanda da carga quando há escassez de geração, normalmente no período da noite.

Ao fazer a análise do despacho econômico no horizonte anual refletiu a importância de um planejamento energético mais robusto, que considere a variabilidade das condições climáticas e as limitações das fontes renováveis. A otimização proposta pelo artigo ajuda a manter a microrrede eficiente e economicamente viável, ao garantir que os sistemas de armazenamento possam suprir a demanda em períodos críticos. A combinação de fontes de energia e a adoção de técnicas de otimização tornam a microrrede uma solução viável para comunidades isoladas

Percebe-se assim a necessidade do ótimo uso das gerações, tentando evitar o máximo de perdas, para que no pior dos cenários, em que a produção das energias renováveis é mínima, não falte energia elétrica para o usuário.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] E. de P. Energética, "Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados - Ciclo 2023", 2023.
- [2] A. S. da Silveira, "Método Heurístico para Otimização do Dimensionamento de uma Microrrede de Energia", 2021.
- [3] E. L. G. da Silva, "Despacho Otimizado de uma Microrrede para atendimento à Cargas em Sistemas Isolados Brasileiros", Florianópolis, 2018.
- [4] M. Machado, "Otimização Multiobjetivo de Microrrede Utilizando NSGA-II", Curitiba, 2021.
- [5] J. L. M. Tarrillo, "An novel power dispatch optimization using linear programming and operating strategy in DC Microgrid", em Proceedings - 2020 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, ICMEAE 2020, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., nov. 2020, p. 196–201. doi: 10.1109/ICMEAE51770.2020.00041.
- [6] C. Marnay et al., "Microgrid Evolution Roadmap Engineering, Economics, and Experience", 2015.
- [7] I. U. Diaz, "Hidrogênio como Sistema de Armazenamento Energético de Fontes Renováveis Intermitentes no Contexto de uma Microrrede", Foz do Iguaçu, 2020.
- [8] J. O. Dos Santos, K. Kapelinski, E. M. Dos Santos, e J. P. Juchem Neto, "Resolução de um Problema de Despacho Econômico de Carga utilizando Enxames de Partículas e Vaga-lumes", SBMAC, fev. 2018. doi: 10.5540/03.2018.006.01.0426.
- [9] G. Q. Fechine, W. L. A. Neves, e B. A. Souza, "Método de Otimização por Enxame de Partículas Aplicado ao Despacho Econômico de Geradores", Sociedade Brasileira de Automatica, fev. 2021. doi: 10.48011/sbse.v1i1.2480.
- [10] L. A. Laboissiere, "Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Previsão de Demanda e Preço de Energia Elétrica no Contexto de Cidades Inteligentes", São Carlos, 2009.
- [11] G. Leticia Takahashi, "Abordagens de Sistemas Inteligentes Para a Solução do Problema de Despacho Econômico de Geração", BAURU, 2004.
- [12] L. Henrique Rodrigues, F. Ahlert, D. P. Lacerda, L. F. R. Camargo, e P. N. De Lima, "Pesquisa Operacional-Programação Linear Passo a Passo: Do Entendimento do Problema à interpretação da Solução", 2014.
- [13] D. S. Oliveira, "Micro Redes de Geração Híbrida para Atendimento a Comunidades Isoladas", Salvador, 2020.
- [14] Geração Média Diária e Horária. ONS, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx>. Acesso em: 1 maio de 2024.
- [15] Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA, 2022. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/usinas-solares-e-eolicas-sao-contratadas-e-pelo-melhor-preco-no-ultimo-leilao-de-energia-20221014>. Acesso em: 1 de maio de 2024.