

Eletrificação Rural com Energia Eólica

Dimensionamento e Análise de Sistema Híbrido Off-Grid

Mateus Galeriani^{1*}, Mauro Vitor Queronino Martins^{1†}, Rafael Rodrigues^{1‡}

 ¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Brasil
Apucarana, 2025

Esta apresentação está licenciada sob Creative Commons Atribuição–NãoComercial–SemDerivações 4.0 Internacional 

Roteiro da Apresentação

- **Introdução**
- **Caracterização da Carga**
- **Avaliação do Recurso Eólico**
- **Topologia e Controle**
- **Resultados de Simulação**
- **Viabilidade Econômica**
- **Conclusão**
- **Referências**
- **Agradecimentos**

Contextualização e Problema

O Cenário Rural

- Dificuldade de acesso à rede convencional em áreas remotas [1].
- Dependência de diesel: Custo elevado e poluição.

Desafios da Microrrede Isolada

- **Intermitênci**a: Estocasticidade do vento [2].
- **Estabilid**ade: Necessidade de controle *Grid-Forming* para ditar tensão e frequência [3].

Objetivo:

Projetar e validar um sistema híbrido (Eólica + Bateria) viável para substituir o diesel.

Unidade Consumidora



Dados da UC (Apucarana-PR):

- **Atividade:** Cultivo de Café (B2 Rural).
 - **Sistema:** Trifásico 127/220 V (40 A).

Demandas Energéticas:

- Consumo Crítico: **652 kWh** (Abr/25).
 - Média Diária ($E_{projeto}$): **23,29 kWh**.



Qualidade de Energia: Perfil de Tensão

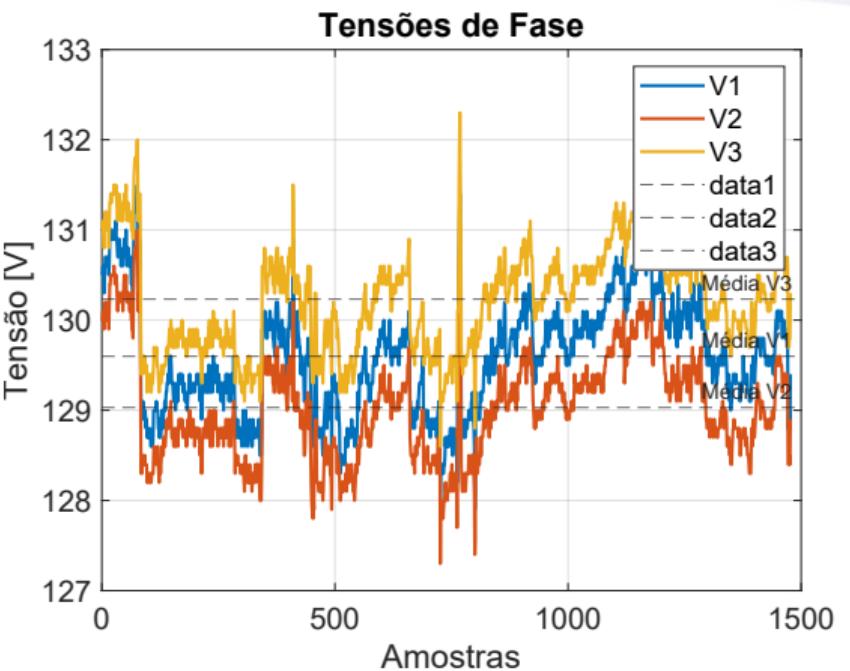
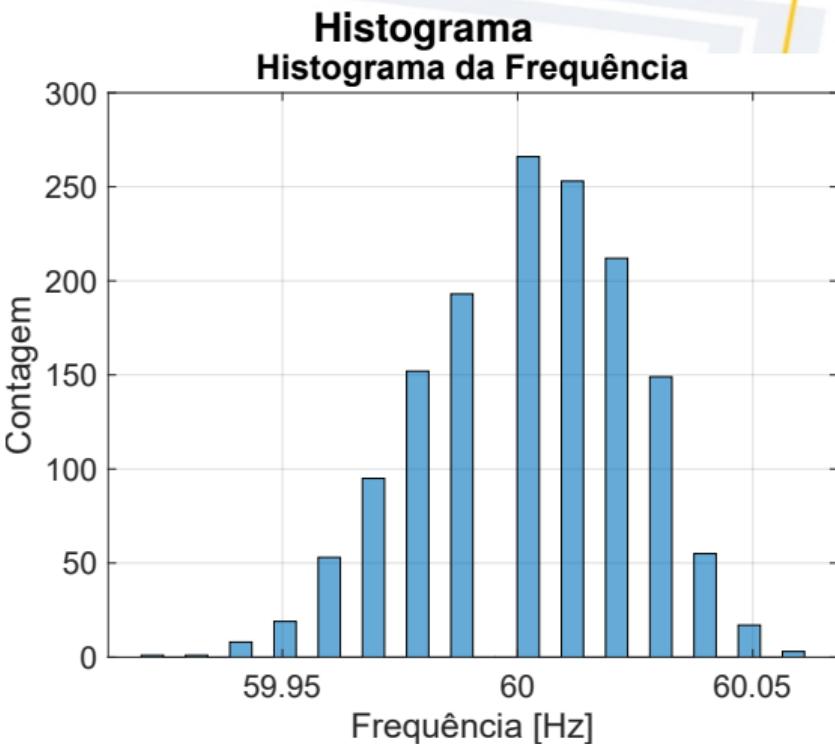
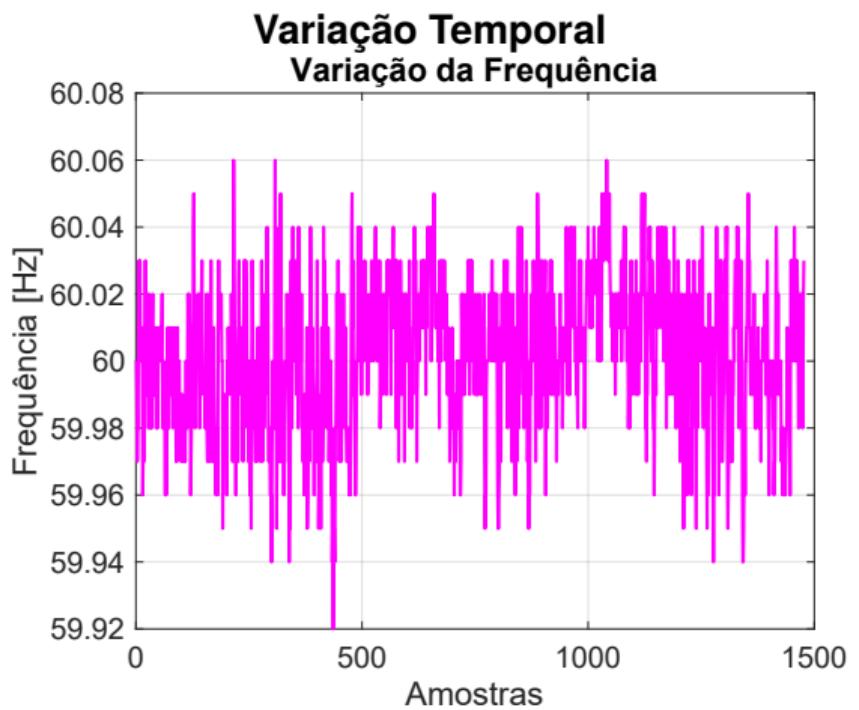


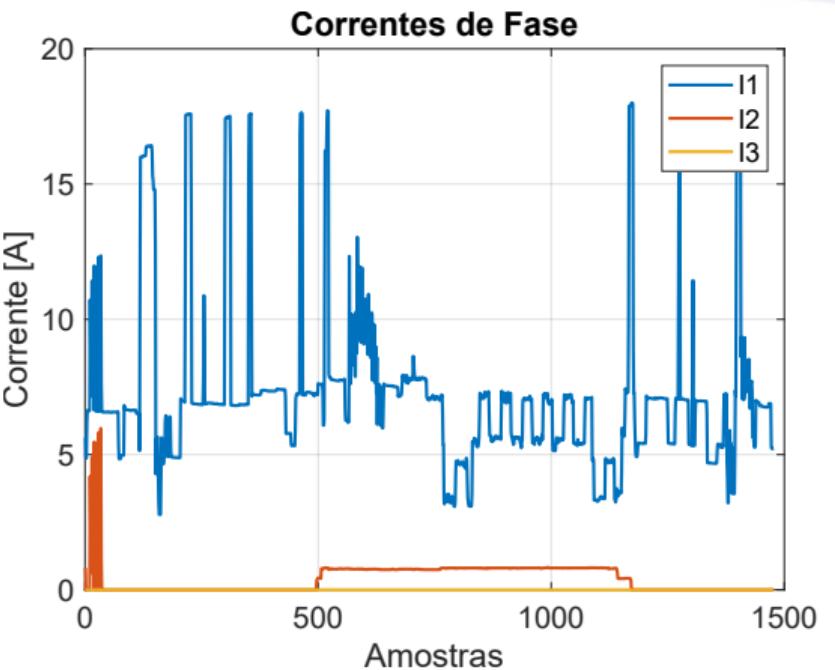
Figura: Flutuação de tensão característica de final de linha rural.

Qualidade de Energia: Frequência



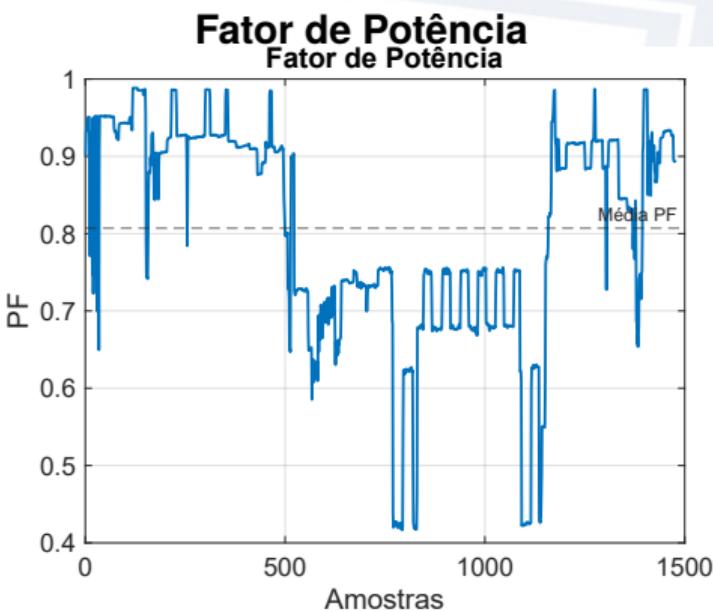
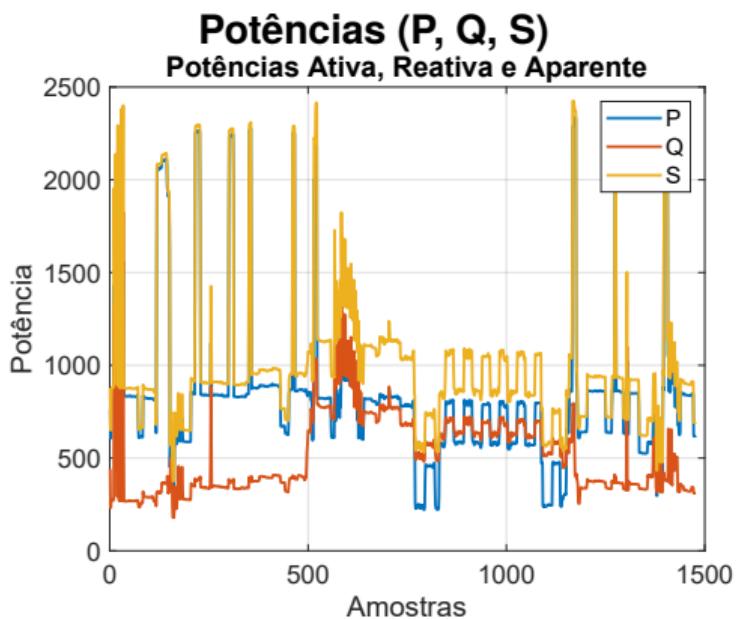
A estabilidade da frequência servirá de referência para o inversor.

Qualidade de Energia: Correntes

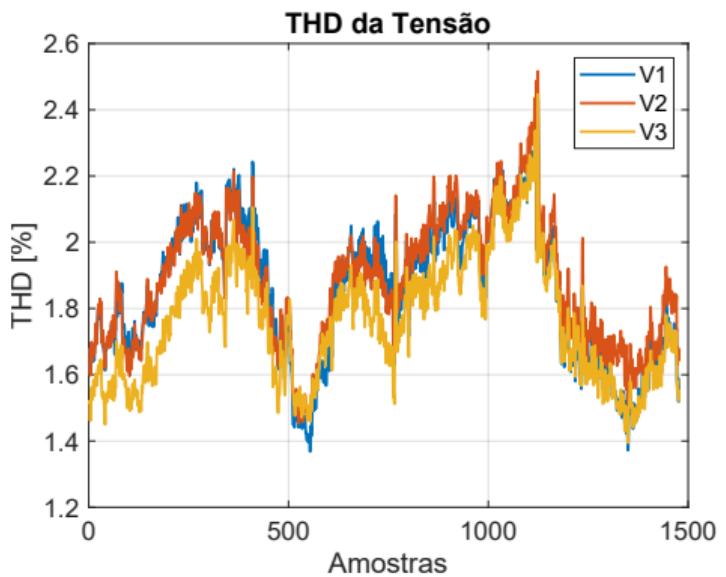


Nota-se grande desequilíbrio entre fases devido a cargas monofásicas.

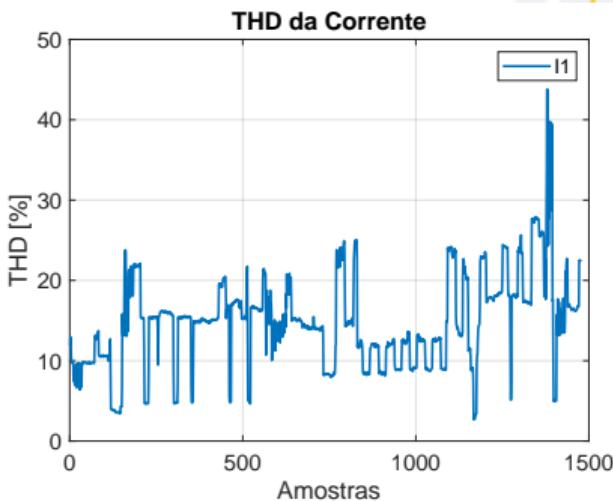
Potência e Fator de Potência



Distorção Harmônica (THD)



THD Tensão



THD Corrente

Potencial Eólico (Global Wind Atlas)

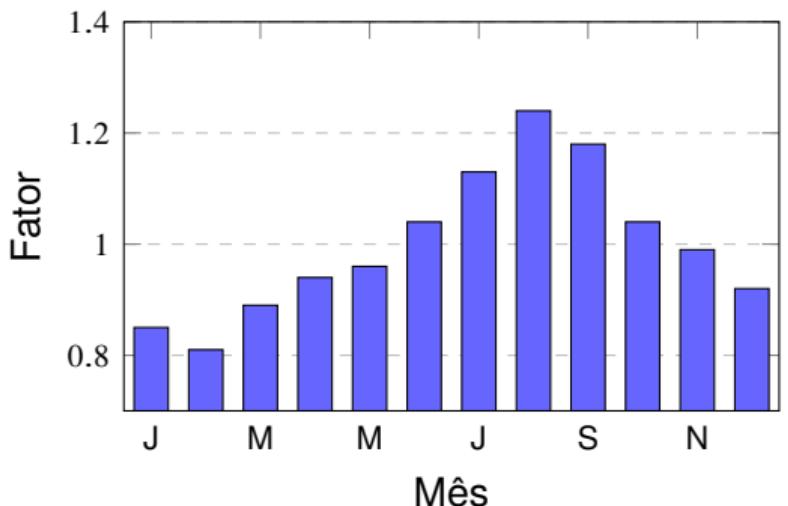
Resumo dos Dados (Apucarana-PR)

- **Velocidade Mediana:** 6.99 m/s.
- **Densidade de Potência:** $> 275W/m^2$ (90% do tempo).
- **Classificação:** IEC Class III.

A análise temporal demonstra complementaridade com a fonte solar (ventos mais fortes no inverno).

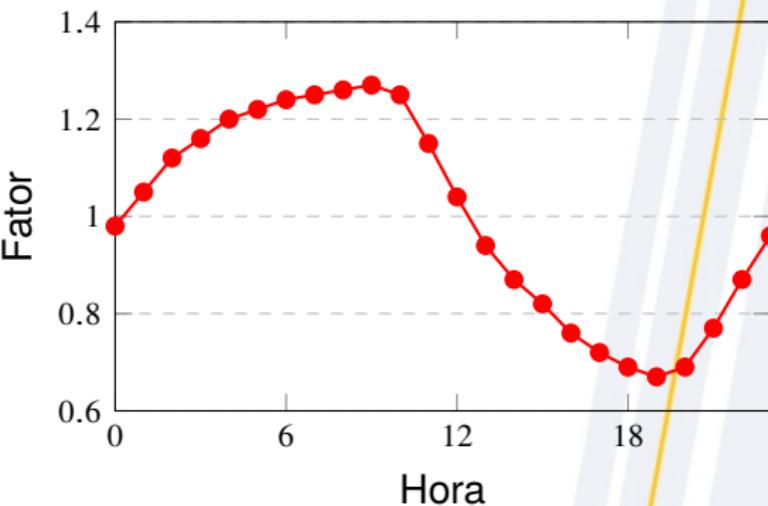
Variação Temporal: Sazonal e Diária

Perfil Sazonal



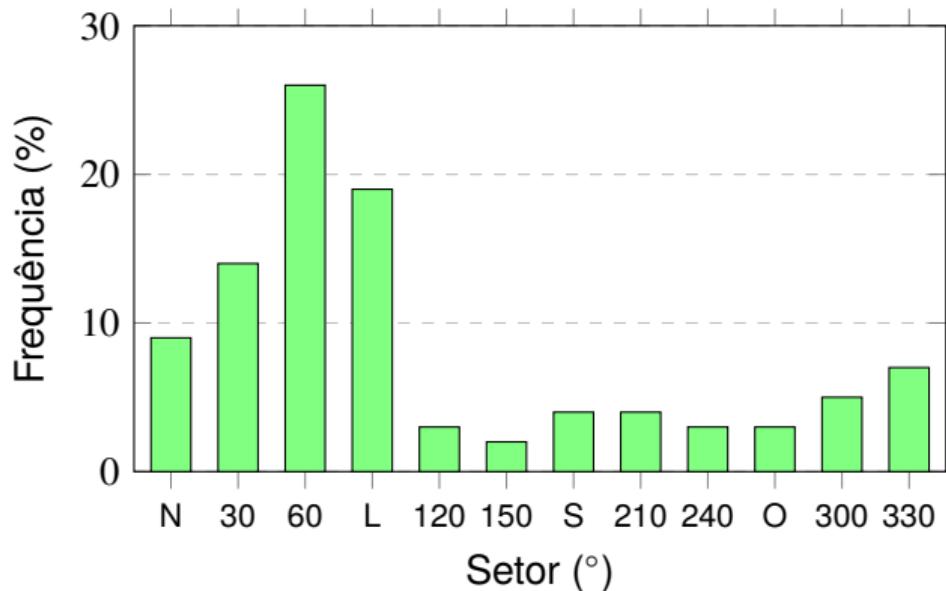
Pico no Inverno (Agosto).

Perfil Diário



Queda acentuada às 19h.

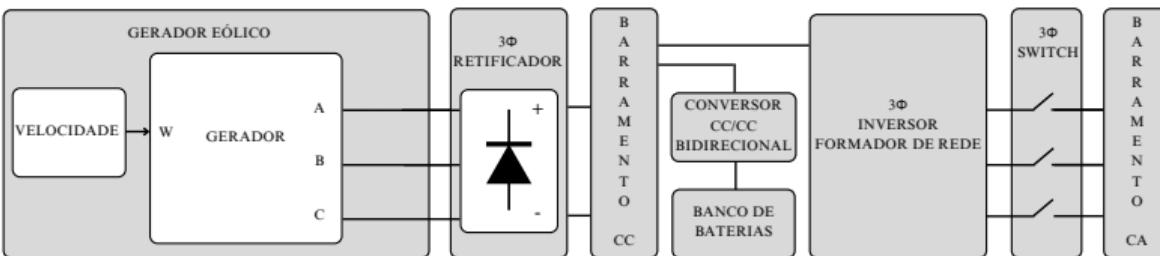
Distribuição Direcional (Rosa dos Ventos)



Análise:

- Predominância: **Nordeste (60°) e Leste (90°).**
- Juntos concentram **45%** da frequência e a maior parte da energia.

Arquitetura do Sistema



Topologia com Barramento CC: PMSG + Baterias + Inversor.

Estratégias de Controle

1. Geração (MPPT)

- Maximizar potência extraída ($P_{max} \times \omega_{opt}$).
- Conversor Boost ajusta rotação [2].

2. Bateria (Slack)

- Controla tensão do baramento CC (V_{DC}).
- Equilibra geração e consumo [4].

3. Inversor (Carga)

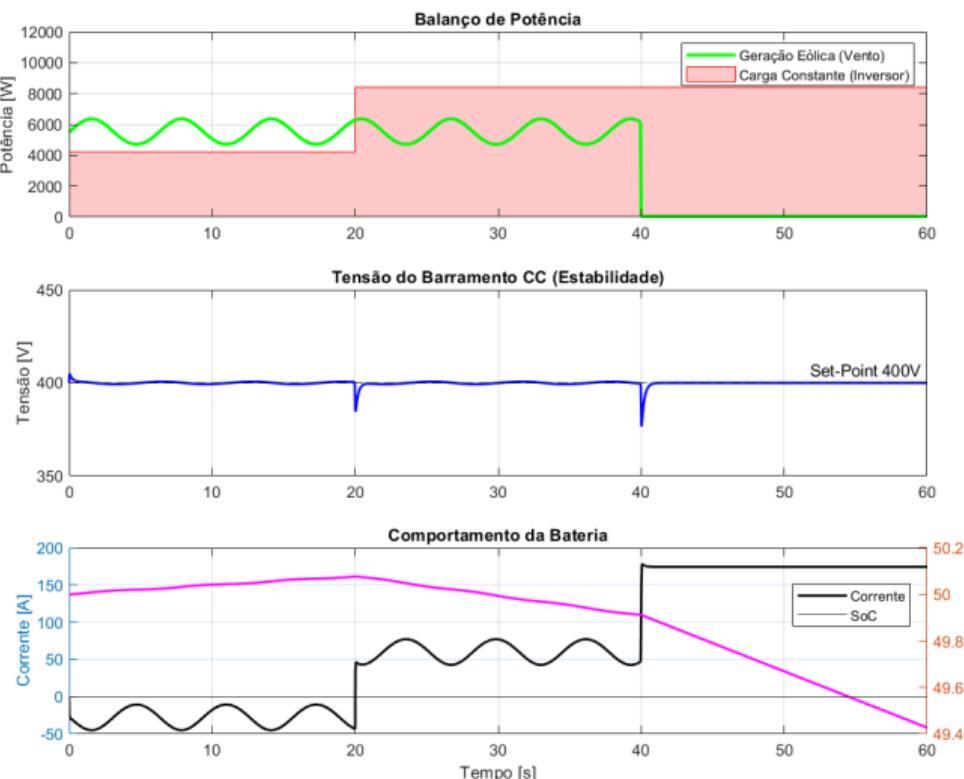
- Modo Grid-Forming.
- Impõe tensão e frequência (60Hz) [5].

Cenário de Teste (MATLAB)

Simulação de estresse do sistema (60s):

- 1 **0 - 20s:** Operação nominal (Carga 4 kW).
- 2 **t = 20s:** Degrau de carga (4 kW → 8 kW).
- 3 **t = 40s:** Corte da Geração Eólica (Vento → 0).

Análise dos Resultados Dinâmicos



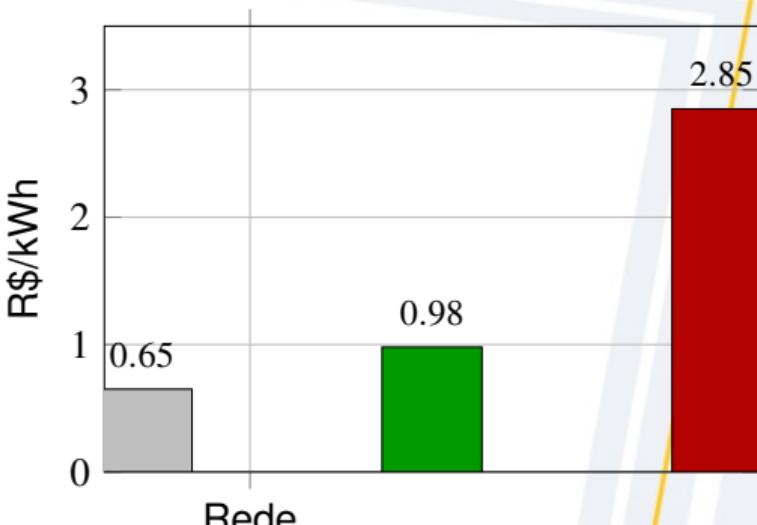
Análise Econômica (LCOE)

Parâmetros:

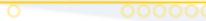
- CAPEX: R\$ 94.000,00.
 - Vida Útil: 20 anos.
 - Troca de Baterias: Cada 5 anos.

Comparativo (R\$/kWh):

- **Eólica:** 0,98.
 - **Diesel:** 2,85.



Economia de 65% vs Diesel.



Considerações Finais

- **Técnica:** A topologia *Grid-Forming* garantiu a qualidade de energia exigida, suportando variações bruscas de carga e perda de vento.
- **Recurso:** Vento em Apucarana é favorável (IEC Class III) e complementar à energia solar no inverno.
- **Econômica:** O sistema eólico apresentou LCOE **65% menor** que a geração a diesel, viabilizando a eletrificação off-grid.
- **Trabalhos Futuros:** Hibridização Eólica-Solar para otimizar o banco de baterias.

Referências Bibliográficas

- [1] CHOMPOO-INWAI, Chai/Chow et al. Optimal Design of a Small Scale Wind Power Generation System for a Rural and Low Capacity Factor Area. In: 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. [S. l.: s. n.], 2009. p. 1–6. DOI: [10.1109/IAS.2009.5324937](https://doi.org/10.1109/IAS.2009.5324937).
- [2] WANG, Rui, WANG, Zheng e REN, Shaoyi. Research on the Impact of Wind Speed on Wind Turbine Power Generation in the Background of New Power Systems. In: 2024 International Seminar on Artificial Intelligence, Computer Technology and Control Engineering (ACTCE). [S. l.: s. n.], 2024. p. 34–38. DOI: [10.1109/ACTCE65085.2024.00014](https://doi.org/10.1109/ACTCE65085.2024.00014).
- [3] BLAABJERG, F. et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 5, p. 1398–1409, 2006. DOI: [10.1109/TIE.2006.881997](https://doi.org/10.1109/TIE.2006.881997).
- [4] MASENGE, Irene e MWASILU, Francis. Hybrid Solar PV-Wind Generation System Coordination Control and Optimization of Battery Energy Storage System for Rural Electrification. In: 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica. [S. l.: s. n.], 2020. p. 1–5. DOI: [10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219890](https://doi.org/10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219890).
- [5] ROCABERT, Joan et al. Control of Power Converters in AC Microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012. DOI: [10.1109/TPEL.2012.2199334](https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334).



Agradecimentos

Obrigado!

Perguntas?