


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 © ⓘ ⓘ ⓘ

- **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

- **Intermitência:** Estocasticidade do vento [2].
- **Estabilidade:** 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.

Dados da UC (Apucarana-PR):

- ### **Demanda Energética:**

- [illegible]

Qualidade de Energia: Perfil de Tensão

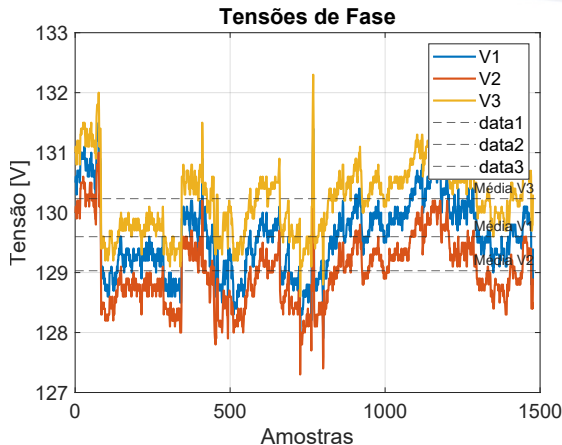
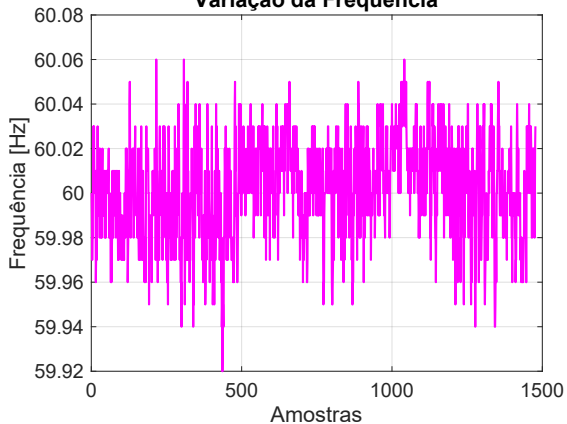


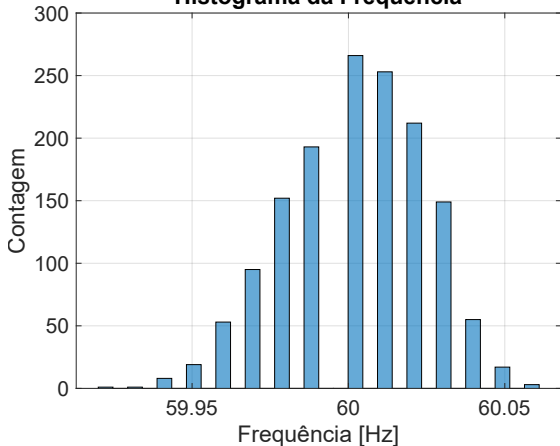
Figura: Flutuação de tensão característica de final de linha rural.

Qualidade de Energia: Frequência

Variação Temporal
Variação da Frequência

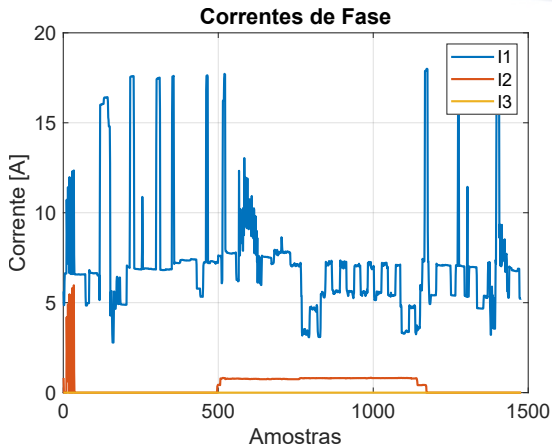


Histograma
Histograma da Frequência



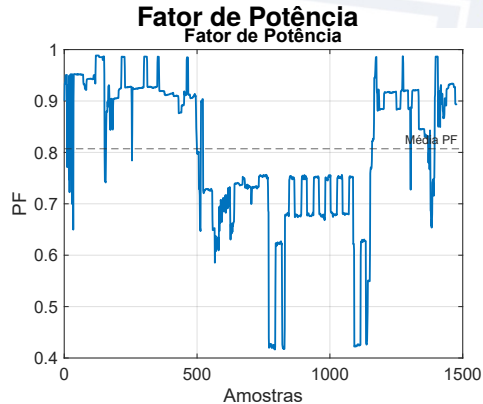
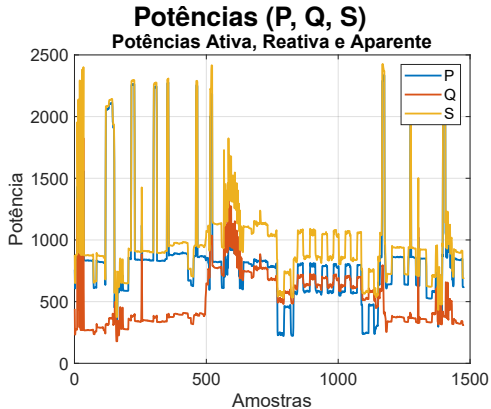
A estabilidade da frequência servirá de referência para o inversor.

Qualidade de Energia: Correntes

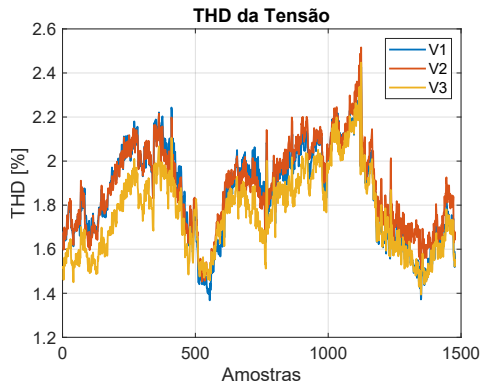


Nota-se grande desequilíbrio entre fases devido a cargas monofásicas.

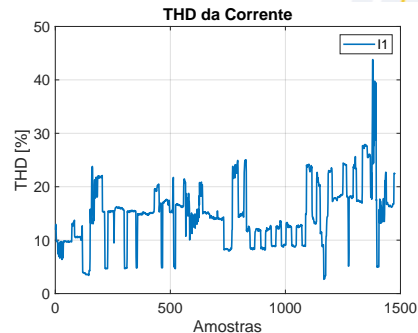
Potência e Fator de Potência



Distorção Harmônica (THD)



THD Tensão



THD Corrente

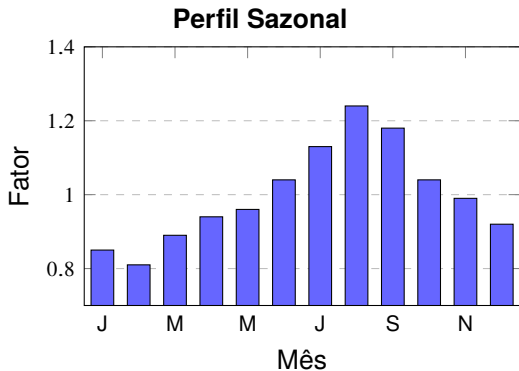
Potencial Eólico (Global Wind Atlas)

Resumo dos Dados (Apucarana-PR)

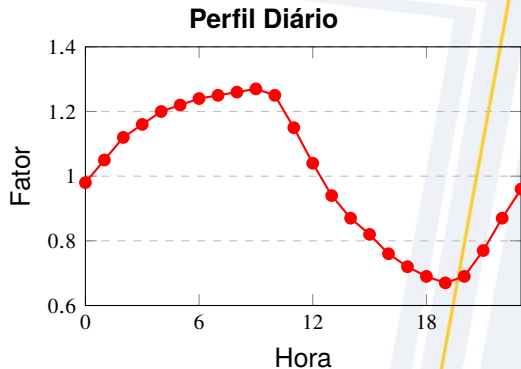
- **Velocidade Mediana:** 6.99 m/s.
- **Densidade de Potência:** $> 275 W/m^2$ (90% do tempo).
- **Classificação:** IEC Class III.

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

Variação Temporal: Sazonal e Diária

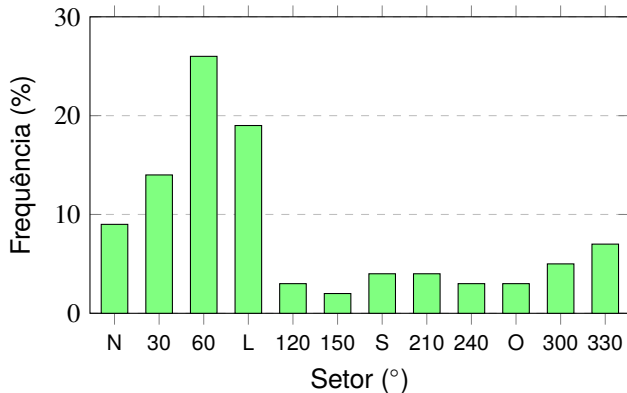


Pico no Inverno (Agosto).



Queda acentuada às 19h.

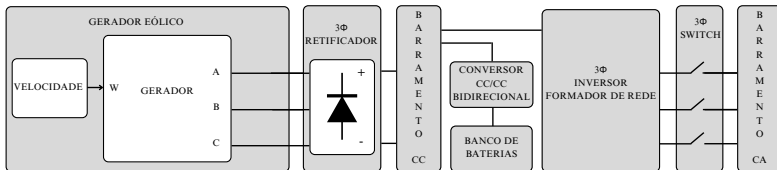
Distribuição Direcional (Rosa dos Ventos)



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)

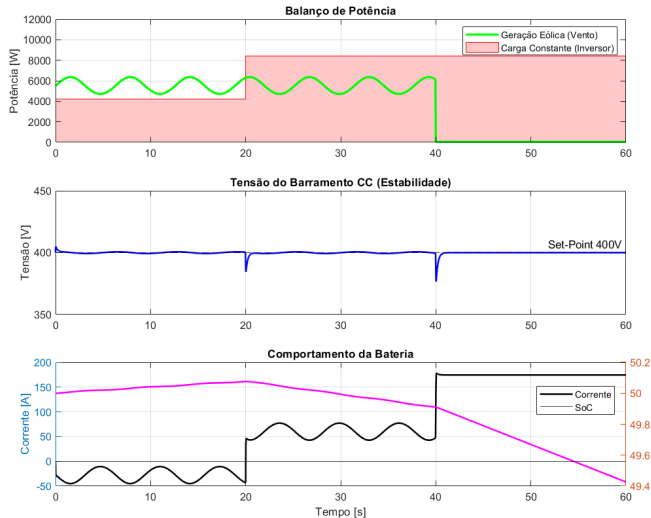
- Controla tensão do barramento CC (V_{DC}).
- Equilibra geração e consumo [4].

3. Inversor (Carga)

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

Simulação de estresse do sistema (60s):

Análise dos Resultados Dinâmicos



Parâmetros:

- Comparativo (R\$/kWh):**

-
- A bar chart comparing electricity prices in R\$/kWh for three categories: Rede, Comercial, and Industrial. The y-axis is labeled 'R\$/kWh' and ranges from 0 to 3. The x-axis lists the categories. The prices are 0.65 for Rede, 0.98 for Comercial, and 2.85 for Industrial.
- | Categoria | Preço (R\$/kWh) |
|------------|-----------------|
| Rede | 0.65 |
| Comercial | 0.98 |
| Industrial | 2.85 |

Economia de 65% vs Diesel.

- **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).

Obrigado!

Perguntas?