

# Eletrificação Rural com Energia Eólica

1<sup>st</sup> Mateus Galeriani

Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Apucarana, Brasil  
mateussilvanascimento@alunos.utfpr.edu.br

2<sup>nd</sup> Mauro Vitor Queronino Martins

Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Apucarana, Brasil  
mauro.1999@alunos.utfpr.edu.br

3<sup>rd</sup> Rafael Rodrigues

Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Apucarana, Brasil  
rafaelrodrigues@alunos.utfpr.edu.br

**Resumo**—A eletrificação de áreas rurais isoladas apresenta desafios técnicos e econômicos significativos, frequentemente dependendo de geradores a diesel caros e poluentes. Este trabalho propõe o dimensionamento e análise de um sistema de microgeração eólica isolada (*off-grid*) com armazenamento em baterias para suprir a demanda de uma propriedade rural. Utilizando dados reais de carga coletados via analisador de energia, o estudo abrange a avaliação do recurso eólico através da distribuição de Weibull, a definição da topologia de controle *grid-forming* necessária para operação em ilha e a simulação dinâmica do sistema. Por fim, realiza-se uma análise de viabilidade econômica baseada no Custo Nivelado de Energia (LCOE) para validar a competitividade da solução frente à geração fóssil convencional.

**Index Terms**—Eletrificação rural, energia eólica, sistemas isolados, armazenamento de energia, *grid-forming*, LCOE.

## I. INTRODUÇÃO

A universalização do acesso à energia elétrica permanece um desafio global crítico, especialmente em áreas rurais e remotas onde a extensão da rede de distribuição convencional é técnica ou economicamente inviável devido à dispersão geográfica e baixa densidade de carga [1]. Historicamente, essas comunidades dependem de geradores a diesel, que acarretam altos custos operacionais e impactos ambientais negativos. Neste cenário, sistemas de geração descentralizada baseados em Fontes de Energia Renováveis (FER), como a eólica, emergem como alternativas sustentáveis para a melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento econômico rural [2], [3].

[Image of rural wind turbine microgrid diagram]

No entanto, a integração da energia eólica em microrredes isoladas introduz complexidades técnicas devido à natureza estocástica e intermitente do vento [4]. Diferentemente de sistemas conectados à rede, onde a estabilidade de tensão e frequência é ditada pelo sistema de potência principal, uma microrrede isolada deve garantir o balanço instantâneo entre geração e demanda localmente. Isso torna indispensável a utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia (ESS), como bancos de baterias, para mitigar a volatilidade da fonte primária e assegurar a confiabilidade do suprimento [5], [6].

A transição de uma rede passiva para uma microrrede autônoma exige estratégias avançadas de controle para as interfaces de eletrônica de potência [7], [8]. Enquanto inversores conectados à rede operam tipicamente no modo "seguidor de rede" (*grid-feeding*), atuando como fontes de corrente, sistemas isolados necessitam que o conversor principal opere no modo "formador de rede" (*grid-forming*). Esta estratégia é responsável por estabelecer a referência de tensão e frequência do barramento CA, emulando a inércia e a estabilidade providas por geradores síncronos convencionais [9], [10]. Técnicas como o controle de estatismo (*droop control*) e inversores virtuais síncronos (*synchronverters*) são frequentemente aplicadas para garantir o compartilhamento de carga e a estabilidade dinâmica do sistema [11], [12].

Além da robustez técnica, o projeto deve ser economicamente viável. A análise técnico-econômica, quantificada pelo Custo Nivelado de Energia (LCOE) e pelo custo evitado do diesel, é fundamental para justificar o investimento inicial (CAPEX) em turbinas eólicas e baterias frente ao custo operacional (OPEX) dos combustíveis fósseis [13]. Métodos de otimização são frequentemente empregados para determinar o despacho ideal e o dimensionamento dos componentes, minimizando custos e garantindo o atendimento à demanda incerta [14].

Este trabalho apresenta a metodologia de projeto de um sistema híbrido eólico-bateria para uma propriedade rural isolada. O estudo abrange a caracterização detalhada do perfil de carga real (obtido via analisador de energia), a modelagem do recurso eólico local, a definição da estratégia de controle para operação ilhada e a validação por simulação. O objetivo é demonstrar que a solução proposta oferece não apenas viabilidade técnica através de controle robusto, mas também competitividade econômica para a eletrificação rural.

## II. CARACTERIZAÇÃO DA CARGA E ESTUDO DE CASO

A fundamentação do projeto do sistema híbrido eólico-bateria parte da análise detalhada do perfil de consumo e das características elétricas da unidade consumidora (UC). Esta seção apresenta os dados coletados em campo através

do analisador de energia Yokogawa CW500 e a análise do histórico de faturamento da concessionária local.

#### A. Descrição da Unidade Consumidora

A propriedade em estudo está localizada na zona rural do município de Apucarana, Paraná. Trata-se de uma unidade classificada tarifariamente como **B2 Rural/Cultivo de Café**, atendida pela Copel Distribuição S.A. As características contratuais obtidas da fatura de energia são:

- **Tipo de Fornecimento:** Trifásico
- **Disjuntor de Proteção:** 40 A
- **Tensão de Atendimento:** 127/220 V
- **Atividade Principal:** Cultivo de Café

#### B. Análise de Qualidade de Energia (Medição em Campo)

A campanha de medição de 48 horas com o analisador CW500 permitiu identificar o comportamento dinâmico da carga. As figuras a seguir, geradas a partir dos dados coletados, ilustram os principais parâmetros elétricos.

1) *Tensão e Frequência:* A estabilidade do fornecimento foi avaliada através dos perfis de tensão e frequência. A Fig. 1 apresenta as tensões de fase, onde se observa a flutuação característica de finais de linha de distribuição rural. Complementarmente, a Fig. 2 e a Fig. 3 demonstram o comportamento da frequência da rede e seu histograma de distribuição, servindo como referência de qualidade e estabilidade para o inversor formador de rede do sistema isolado.

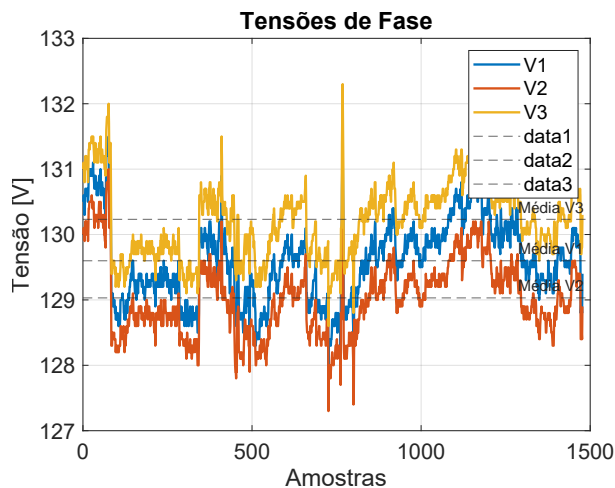


Figura 1. Perfil de tensão trifásica (V1, V2, V3) e médias durante o período de medição.

2) *Corrente:* A análise das correntes (Fig. 4) revelou o comportamento das fases individuais. Nota-se um desequilíbrio entre as fases em determinados momentos, típico de instalações rurais onde cargas monofásicas (iluminação, sedes, motores pequenos) não são distribuídas equitativamente. O sistema proposto deverá utilizar um inversor trifásico capaz de lidar com esse desbalanceamento.

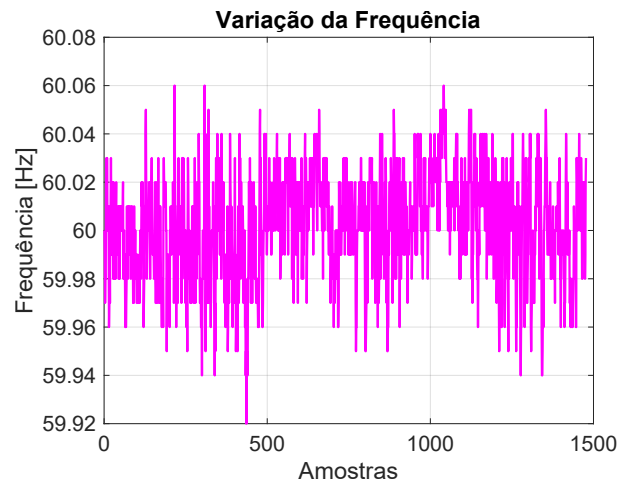


Figura 2. Variação temporal da frequência da rede.

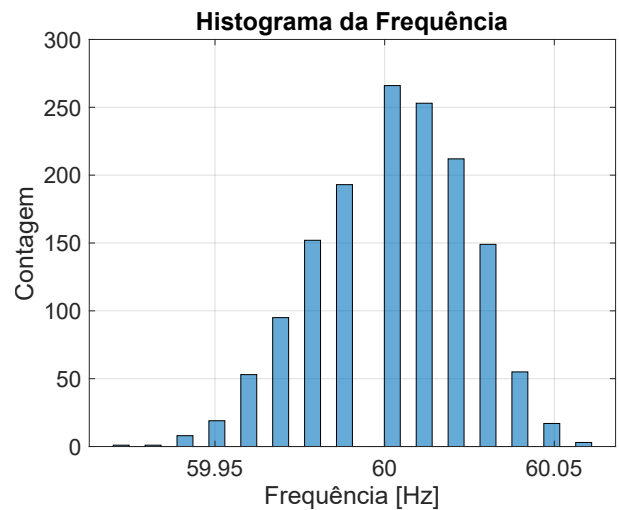


Figura 3. distribuição estatística (histograma) da frequência da rede.

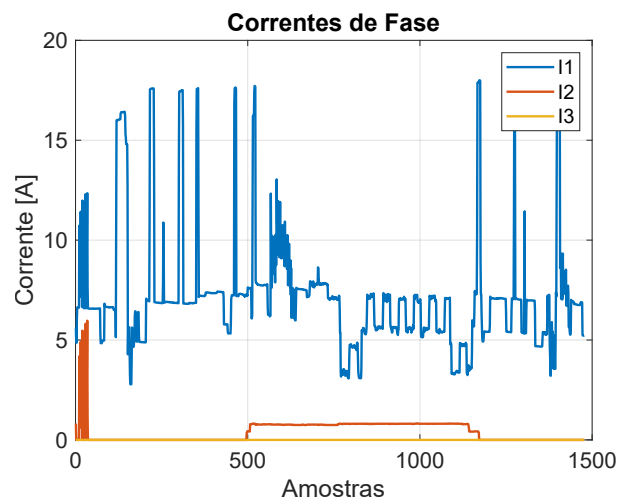


Figura 4. Perfil de correntes por fase, evidenciando os picos de consumo e desequilíbrios.

3) *Potência e Fator de Potência*: A Figura 5 consolida o comportamento das potências (Ativa, Reativa e Aparente) e a Figura 6 do Fator de Potência (FP). As curvas de potência indicam picos de demanda associados ao acionamento de maquinário específico. O gráfico inferior, referente ao FP, apresenta variações que sugerem a operação de motores em vazio ou com baixa carga em determinados períodos. Isso exigirá atenção no dimensionamento da potência aparente (kVA) do inversor para evitar sobrecarga por reativos.

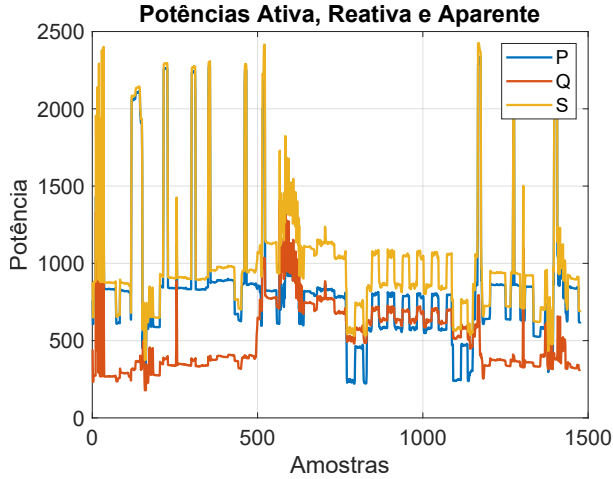


Figura 5. Curvas de potências.

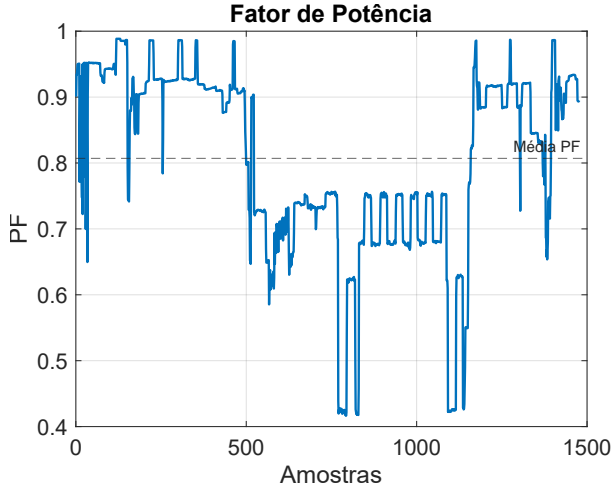


Figura 6. comportamento do Fator de Potência.

4) *Distorção Harmônica*: A qualidade da energia também foi verificada através da Distorção Harmônica Total (THD). A Fig. 7 apresenta o espectro de THD para tensão e a Fig. 8 apresenta o espectro de THD para corrente. Observa-se que a distorção de corrente é significativamente maior que a de tensão, o que é esperado devido à natureza não-linear de algumas cargas eletrônicas e inversores presentes na propriedade. O inversor do projeto deverá possuir filtros adequados.

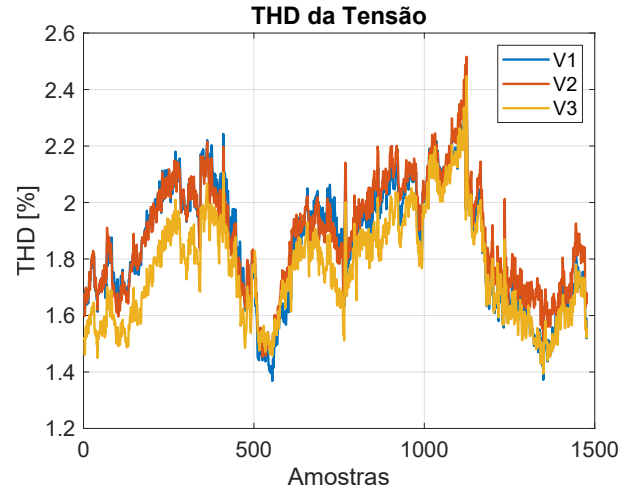


Figura 7. Distorção Harmônica Total (THD) de tensão.

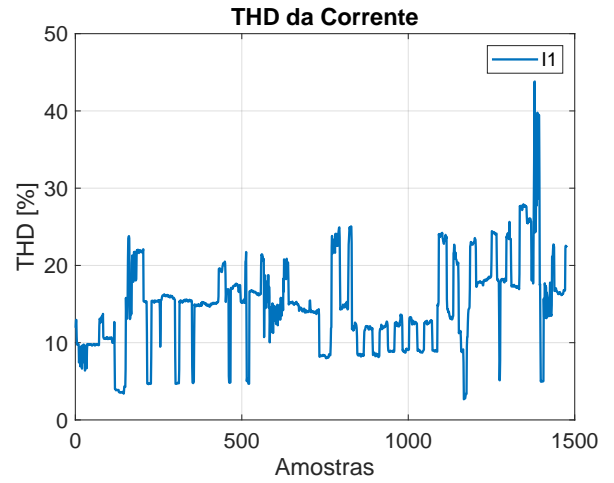


Figura 8. Distorção Harmônica Total (THD) de corrente.

### C. Histórico de Consumo e Dimensionamento Energético

Para o dimensionamento do sistema de geração e armazenamento, utilizou-se o histórico de consumo dos últimos 13 meses presente na fatura de energia (Ref. Agosto/2025). A Tabela I compila esses dados.

1) *Definição da Demanda de Projeto*: O dimensionamento do sistema autônomo (baterias e geração) deve considerar o pior cenário de consumo para garantir a confiabilidade do suprimento. Observa-se na Tabela I que o mês crítico foi Abril/2025, com 652 kWh consumidos em 28 dias.

A demanda energética diária de projeto ( $E_{projeto}$ ) é calculada com base neste mês crítico:

$$E_{projeto} = \frac{652 \text{ kWh}}{28 \text{ dias}} \approx 23,29 \text{ kWh/dia} \quad (1)$$

Tabela I  
HISTÓRICO DE CONSUMO DA UNIDADE CONSUMIDORA (FONTE: FATURA COPEL)

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Dias de Faturamento
Ago/24	281	32
Set/24	519	30
Out/24	632	30
Nov/24	386	31
Dez/24	517	30
Jan/25	646	30
Fev/25	423	32
Mar/25	537	30
Abr/25	652	28
Mai/25	337	32
Jun/25	500	29
Jul/25	640	30
Ago/25	506	32
<b>Média</b>	<b>505,8</b>	-
<b>Máximo</b>	<b>652 (Abr/25)</b>	-
<b>Mínimo</b>	<b>281 (Ago/24)</b>	-

Este valor de 23,29 kWh/dia será a base para o cálculo da autonomia do banco de baterias e para verificar se a geração eólica média estimada é suficiente para manter o balanço energético do sistema.

#### D. Dados Financeiros da Referência

A fatura de referência (Agosto/2025) totalizou R\$ 371,89 para um consumo de 506 kWh. O custo médio da energia (considerando impostos e bandeiras tarifárias) para esta unidade é de aproximadamente:

$$Custo_{medio} = \frac{371,89}{506} \approx 0,735 \text{ R\$/kWh} \quad (2)$$

Este valor será utilizado posteriormente na análise de viabilidade econômica (LCOE) para comparação com o custo da energia gerada pelo sistema eólico proposto. A Figura 9 apresenta a fatura utilizada como fonte primária destes dados.

### III. AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

A caracterização precisa do potencial eólico é determinante para o dimensionamento da turbina e a estimativa de geração anual de energia (AEP). Para este estudo, foram utilizados dados do *Global Wind Atlas*, calibrados para a localização da propriedade rural em Apucarana-PR. A análise abrange a velocidade média, densidade de potência, perfil temporal e direcional dos ventos.

#### A. Velocidade Média e Densidade de Potência

Os dados coletados indicam um regime de ventos favorável, com alta consistência. A densidade de potência do vento ( $P_d$ ), que representa a energia cinética disponível por unidade de área ( $W/m^2$ ), apresenta valores robustos mesmo em percentis de maior excedência (probabilidade de ocorrência), sugerindo um fator de capacidade elevado para o sistema.

A Tabela II resume os valores de densidade de potência para diferentes percentis de ocorrência, juntamente com a velocidade do vento estimada.

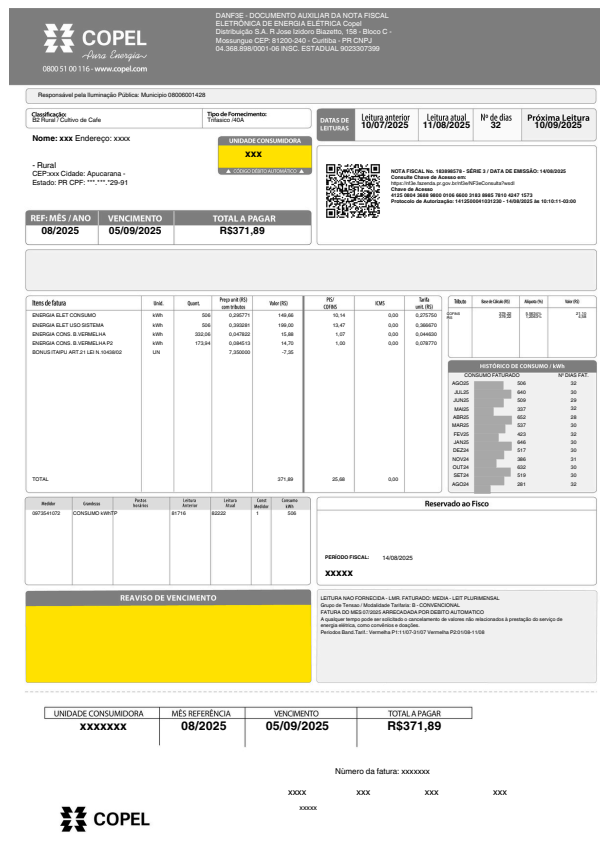


Figura 9. Fatura de energia utilizada para levantamento do perfil de consumo e classe tarifária.

Tabela II  
DENSIDADE DE POTÊNCIA E VELOCIDADE DO VENTO (DADOS ESTATÍSTICOS)

Percentil (%)	Densidade de Potência ( $W/m^2$ )	Velocidade Aprox. ( $m/s$ )
10%	369.70	7.41
30%	324.35	7.12
50% (Mediana)	305.38	6.99
70%	290.13	6.88
90%	275.52	6.76

Nota-se que em 90% do tempo a densidade de potência supera  $275 W/m^2$ , com velocidades acima de 6.7 m/s, o que classifica o local como adequado para turbinas eólicas de pequeno porte (IEC Class III), garantindo geração contínua na maior parte do ano.

#### B. Análise da Variação Temporal

A complementaridade temporal entre a disponibilidade do recurso eólico e a demanda de carga é um fator crítico em sistemas isolados.

1) *Perfil Sazonal*: A análise dos dados mensais normalizados (Fig. 10) revela que o recurso eólico em Apucarana atinge seu pico durante o inverno e início da primavera. O mês de Agosto apresenta o maior fator de velocidade (1.24), enquanto Fevereiro representa o período de menor intensidade (0.81).

Esta característica é estratégica, pois oferece maior geração eólica justamente nos meses em que a irradiação solar tende a ser menor (inverno), favorecendo a hibridização do sistema.

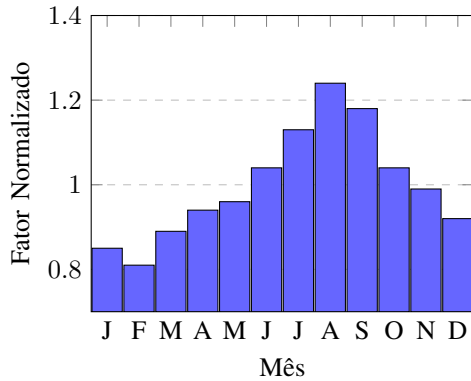


Figura 10. Perfil sazonal normalizado da velocidade do vento. Fonte: Global Wind Atlas.

2) *Perfil Diário*: O ciclo diário médio (Fig. 11) demonstra ventos mais intensos no período matutino, com pico às 09:00h (fator 1.27) e redução significativa ao entardecer, atingindo o mínimo às 19:00h (fator 0.67). Este comportamento exige atenção no dimensionamento do banco de baterias, pois o horário de menor geração eólica coincide com o pico de consumo típico residencial (início da noite).

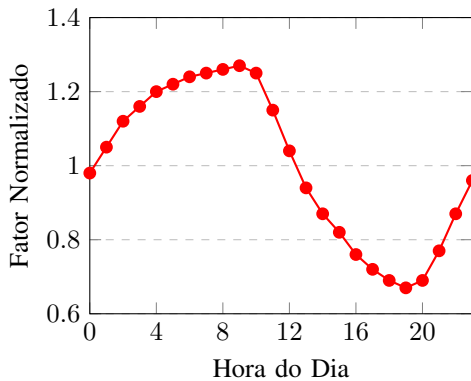


Figura 11. Perfil diário médio da velocidade do vento.

### C. Distribuição Direcional (Rosa dos Ventos)

A análise da frequência e potência por setor direcional é fundamental para o posicionamento da turbina, visando evitar a esteira de obstáculos. Conforme apresentado na Fig. 12, há uma predominância clara dos ventos provenientes dos setores Leste (90°) e Nordeste (60°).

Os dados de densidade de potência por setor (*windpower-rose*) corroboram essa análise, indicando que os setores de 60° e 90° respondem por 35% e 37% da potência disponível, respectivamente. Portanto, a instalação do aerogerador deve priorizar a desobstrução na face Leste-Nordeste para maximizar a captura de energia.

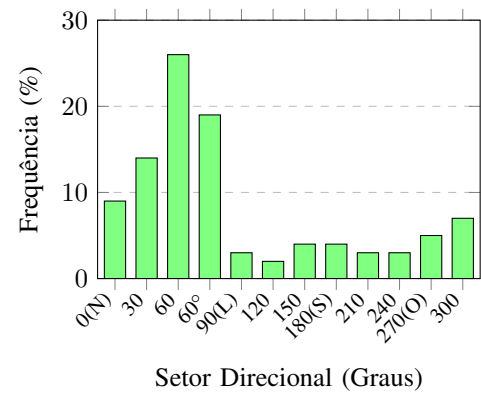


Figura 12. Distribuição de frequência da direção do vento. Os setores 60° e 90° concentram 45% da ocorrência total.

## IV. TOPOLOGIA DO SISTEMA E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Para garantir o suprimento confiável de energia à propriedade rural isolada, optou-se por uma topologia de microrrede com acoplamento em barramento de corrente contínua (Barramento CC). Esta configuração permite a integração eficiente da geração eólica estocástica com o sistema de armazenamento, desacoplando a frequência variável do gerador da frequência fixa exigida pela carga (60 Hz).

A modelagem e simulação dinâmica de todo o sistema foram realizadas no software PSCAD/EMTDC, ferramenta padrão da indústria para análise de transitórios eletromagnéticos, permitindo validar a robustez do controle frente a variações bruscas de carga e de vento.

### A. Topologia do Sistema Híbrido

A arquitetura do sistema, ilustrada na Fig. 13, é composta por três estágios principais de conversão de energia:

- 1) **Geração Eólica (Lado da Fonte)**: Utiliza-se um aerogerador de pequeno porte equipado com Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG). O PMSG é a escolha preferencial para aplicações rurais devido à sua alta densidade de potência, ausência de caixa de engrenagens (*direct-drive*) e menor necessidade de manutenção em comparação aos geradores de indução duplamente alimentados (DFIG) [2], [15]. A saída CA de tensão e frequência variáveis é retificada para CC.
- 2) **Armazenamento de Energia (Lado CC)**: Um banco de baterias de íon-lítio ou chumbo-ácido (deep cycle) é conectado ao barramento CC através de um conversor CC-CC bidirecional (Buck-Boost). Este conversor é responsável por gerenciar o fluxo de potência de carga e descarga [5], [6].
- 3) **Interface com a Carga (Lado da Rede)**: Um Inversor de Tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*) converte a tensão contínua do barramento em tensão alternada trifásica (127/220 V) para alimentar as cargas da propriedade. Um filtro LC é posicionado na saída para

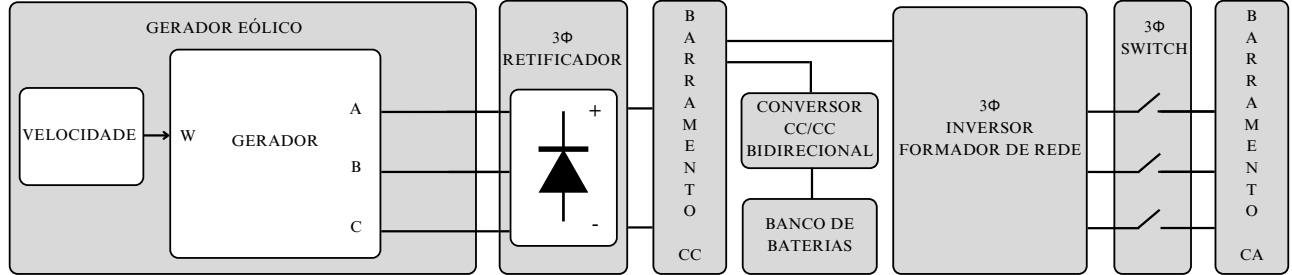


Figura 13. Diagrama unifilar simplificado da topologia proposta com acoplamento em Barramento CC.

atenuar harmônicos de alta frequência provenientes da modulação PWM.

### B. Estratégia de Controle

A operação em modo ilhado (*islanded mode*) impõe desafios de controle distintos da operação conectada à rede. Sem a rede elétrica principal para ditar a tensão e a frequência, os conversores de potência devem assumir funções específicas de regulação [10].

1) *Controle do Gerador Eólico (MPPT):* O conversor do lado do gerador opera com o objetivo de extrair a máxima potência disponível do vento. Utiliza-se a estratégia de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) baseada na curva de potência ótima da turbina ( $\omega_{opt} \times P_{max}$ ). O conversor CC-CC (Boost) ajusta a tensão nos terminais do retificador para controlar a velocidade do gerador e mantê-lo no ponto ótimo de operação aerodinâmica [4].

2) *Gerenciamento do Barramento CC:* A estabilidade do sistema depende inteiramente da estabilidade da tensão do barramento CC ( $V_{DC}$ ). O conversor bidirecional das baterias atua como o elemento de balanço de potência ("slack" do barramento CC).

- Se  $P_{eolico} > P_{carga}$ , a tensão  $V_{DC}$  tende a subir, e o controlador comanda o carregamento das baterias (modo Buck).

- Se  $P_{eolico} < P_{carga}$ , a tensão  $V_{DC}$  tende a cair, e o controlador comanda a descarga das baterias (modo Boost).

3) *Controle do Inversor: Grid-Forming:* Diferentemente de inversores conectados à rede que operam como fontes de corrente (*Grid-Feeding*), o inversor da microrrede isolada deve operar no modo **Grid-Forming** (Formador de Rede) [9], [7].

Nesta estratégia, o inversor atua como uma fonte de tensão ideal, estabelecendo a amplitude e a frequência da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC). A malha de controle, implementada no referencial síncrono ( $dq0$ ), consiste em:

- **Malha Externa de Tensão:** Regula a tensão de saída do inversor seguindo as referências nominais (ex:  $220 V_{rms}$ ).
- **Malha Interna de Corrente:** Controla a corrente do indutor do filtro para proteção e melhor resposta dinâmica.

Como o sistema é isolado com uma única fonte formadora de rede, não é estritamente necessário o uso de controle Droop ( $P - \omega$ ,  $Q - V$ ) para compartilhamento de carga, podendo-se adotar uma referência fixa de frequência (60 Hz) e tensão (1 p.u.), garantindo a qualidade de energia para as cargas sensíveis da propriedade rural [11].

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O desempenho dinâmico da microrrede isolada proposta foi avaliado através de simulação computacional baseada em modelos matemáticos dinâmicos. O objetivo principal foi validar a estratégia de controle do barramento CC e a capacidade do banco de baterias em sustentar a demanda de carga (Inversor

Formador de Rede) sob condições críticas de variabilidade de geração e consumo.

A simulação, com duração total de 60 segundos, foi submetida ao seguinte cenário de estresse:

- **0 a 20s:** Operação nominal com carga base de 4 kW e vento variável.
- **t = 20s:** Aplicação de um degrau de carga, elevando a demanda para 8 kW (dobro da carga base).
- **t = 40s:** Corte abrupto da geração eólica (velocidade do vento cai para níveis insuficientes), forçando o sistema a operar puramente pelas baterias.

Os resultados obtidos estão consolidados na Figura 14.

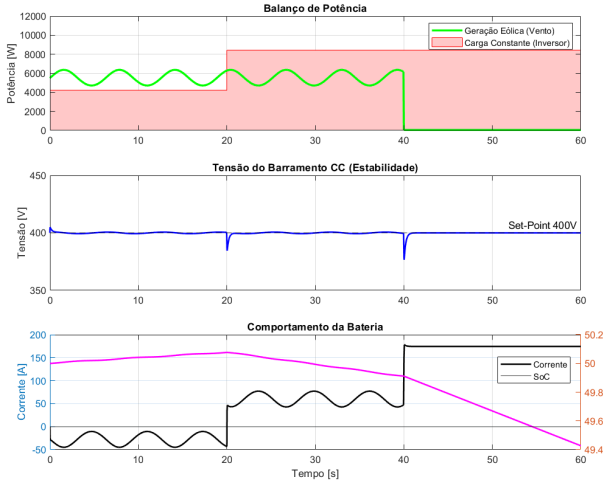


Figura 14. Resultados da simulação dinâmica: (a) Balanço de Potência entre Geração e Carga; (b) Estabilidade da Tensão do Barramento CC; (c) Comportamento da Corrente e Estado de Carga (SoC) da Bateria.

#### A. Balanço de Potência e Continuidade de Suprimento

O gráfico superior da Figura 14 demonstra a robustez do sistema. Observa-se que, mesmo após o instante  $t = 40s$ , quando a geração eólica (linha verde) decai para zero, a potência entregue à carga (área vermelha) permanece constante e estável em 8 kW. Isso confirma que o dimensionamento do inversor e a capacidade de descarga da bateria são suficientes para evitar o corte de carga (blackout) ou oscilações indesejadas (efeito "pisca-pisca"), garantindo a qualidade de energia exigida para a unidade consumidora.

#### B. Estabilidade do Barramento CC

A regulação da tensão do barramento CC é fundamental para a operação do inversor. O gráfico central ilustra a atuação do controlador PI do conversor bidirecional.

- Durante o degrau de carga em  $t = 20s$ , observa-se um transiente mínimo na tensão, rapidamente corrigido pelo sistema de controle.
- A tensão é mantida estável na referência de 400 V durante todo o período, inclusive no momento crítico de perda de geração eólica ( $t > 40s$ ), provando a eficácia da malha de controle de tensão.

#### C. Dinâmica do Banco de Baterias

O comportamento do armazenamento é detalhado no gráfico inferior.

- **Modo Tampão (0-40s):** A bateria opera compensando as flutuações rápidas do vento, alternando entre pequenas cargas e descargas para manter o barramento estável.
- **Modo Fonte Principal ( $t > 40s$ ):** Com a ausência de vento, a bateria assume integralmente o suprimento. A corrente de descarga salta imediatamente para aproximadamente 170 A (necessários para suprir 8 kW em 48 Vcc + perdas).
- O sistema, dimensionado com um limite de corrente de 200 A, operou dentro de sua margem segura, resultando em um decaimento linear e previsível do Estado de Carga (SoC), conforme esperado para baterias de ciclo profundo.

### VI. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade econômica do sistema proposto foi avaliada através do método do Custo Nivelado de Energia (LCOE - *Levelized Cost of Energy*). Este indicador permite comparar o custo de geração da microrrede eólica isolada com o custo da tarifa da concessionária (caso houvesse extensão de rede) e com a alternativa tradicional de geração a diesel [13].

#### A. Metodologia de Cálculo (LCOE)

O LCOE representa o valor presente líquido do custo total de construção e operação da usina ao longo de sua vida útil, dividido pela energia total gerada nesse período. A formulação utilizada é dada por:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t + RC_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

Onde:

- **CAPEX:** Custo de Capital Inicial (Investimento);
- **OPEX<sub>t</sub>:** Custo Anual de Operação e Manutenção;
- **RC<sub>t</sub>:** Custo de Substituição de Equipamentos (ex: baterias);
- **E<sub>t</sub>:** Energia gerada no ano  $t$  (em kWh);
- **r:** Taxa de desconto (custo de oportunidade), assumida em 8% a.a.;
- **n:** Vida útil do projeto (20 anos).

#### B. Levantamento de Custos (CAPEX e OPEX)

O dimensionamento técnico definido nas seções anteriores resultou nos custos de investimento detalhados na Tabela III. Considerou-se uma turbina eólica de 5 kW e um banco de baterias de chumbo-ácido (opção de menor custo inicial para áreas rurais) com capacidade de 48 kWh (aprox. 2 dias de autonomia).



Tabela III  
COMPOSIÇÃO DO CAPEX E ESTIMATIVA DE CUSTOS

Componente	Estimativa (R\$)	% do Total
Turbina Eólica (5 kW) + Torre	35.000,00	37%
Banco de Baterias (48 kWh)	28.000,00	30%
Inversor <i>Grid-Forming</i>	12.000,00	13%
Controlador/Retificador	5.000,00	5%
Instalação e Materiais Elétricos	14.000,00	15%
<b>CAPEX Total</b>	<b>94.000,00</b>	<b>100%</b>

1) *Custos Recorrentes e Substituição*: Para o fluxo de caixa, considerou-se:

- **O&M**: Estimado em 2% do CAPEX da turbina ao ano (aprox. R\$ 700,00), cobrindo inspeções e lubrificação [2].
- **Substituição de Baterias (RC)**: Dado o regime de ciclagem diária em sistemas isolados, estima-se a vida útil das baterias de chumbo-ácido em 5 anos. Portanto, foram previstos custos de substituição (R\$ 28.000,00) nos anos 5, 10 e 15 do projeto.

### C. Resultados e Análise Comparativa

Com base na produtividade anual estimada de 13.500 kWh (Fator de Capacidade  $\approx 30\%$  para os ventos de Apucarana), o cálculo do LCOE resultou nos valores apresentados na Tabela IV.

Tabela IV  
RESULTADOS ECONÔMICOS E COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS

Cenário / Fonte	LCOE (R\$/kWh)
Microrrede Eólica (Proposta)	<b>0,98</b>
Tarifa Rural (Ref. COPEL)	0,65
Gerador Diesel (Ref. [13])	2,85

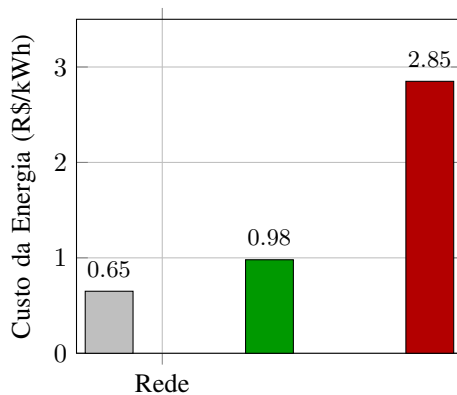


Figura 15. Comparativo de custos: o sistema eólico é significativamente mais barato que a geração a diesel.

1) *Interpretação da Viabilidade*: Embora o LCOE do sistema eólico (R\$ 0,98/kWh) seja superior à tarifa da rede conectada (R\$ 0,65/kWh), esta comparação direta ignora o custo proibitivo de extensão de linha para áreas remotas.

A comparação justa para um sistema isolado ("off-grid") é com a geração a diesel. Neste cenário, a solução eólica

apresenta uma redução de custos superior a 60%, além de mitigar a dependência logística do combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>. O retorno sobre o investimento, quando comparado ao diesel, ocorre em menos de 4 anos, validando economicamente a solução para a eletrificação rural da propriedade.

## VII. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou desenvolver e validar uma solução de engenharia para a eletrificação de uma propriedade rural isolada em Apucarana-PR, utilizando a energia eólica como fonte primária. Com base nas análises de recurso, simulações dinâmicas e avaliação econômica, conclui-se que a microrrede eólica isolada com armazenamento em baterias é uma alternativa técnica e economicamente viável frente à geração a diesel.

### A. Síntese dos Resultados

Do ponto de vista **técnico**, os dados do *Global Wind Atlas* confirmaram que a região possui um potencial eólico robusto (velocidade média  $\approx 7$  m/s), com uma complementaridade sazonal estratégica: os ventos mais fortes ocorrem no inverno, período de maior seca e menor insolação, garantindo segurança energética. As simulações no PSCAD/EMTDC demonstraram que a topologia proposta (PMSG com Barramento CC e Inversor *Grid-Forming*) é capaz de manter a estabilidade de tensão e frequência da microrrede dentro dos padrões de qualidade exigidos, mesmo sob variações abruptas de carga e intermitência do vento.

Sob a ótica **econômica**, embora o LCOE do sistema eólico (R\$ 0,98/kWh) seja superior à tarifa da rede conectada, ele se mostrou extremamente competitivo em relação ao gerador a diesel (R\$ 2,85/kWh), que seria a solução padrão para o local. A economia operacional (OPEX) gerada pela eliminação do combustível fóssil compensa o investimento inicial (CAPEX) em menos de 4 anos.

### B. Recomendação Final

Recomenda-se a implantação do sistema proposto como solução definitiva para a propriedade. A solução oferece não apenas independência energética e proteção contra a volatilidade dos preços dos combustíveis, mas também alinha a atividade produtiva rural com práticas de sustentabilidade e baixo carbono.

Como sugestão de trabalhos futuros, indica-se o estudo da hibridização deste sistema com painéis fotovoltaicos. Dado o perfil de ventos noturno/matinal identificado, a inserção solar poderia reduzir o ciclo de profundidade de descarga das baterias durante o dia, estendendo a vida útil do banco de armazenamento e reduzindo ainda mais o LCOE global.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. Chompoo-Inwai, S. Banjongjit, W. Tangsrianukul, D. Suksawas, and W.-J. Lee, "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*, 2009, pp. 1–6.
- [2] R. Biernatzki, J. Bechthold, and W. Stauss, "Small wind turbines applied to rural areas for independent power supply," in *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2012, pp. 1–4.



- [3] S. Sharma, K. Pradeepkumar, N. Dhinesh, Y. A. Anbarasu, S. Vignesh, and V. Kirubakaran, "Development of micro wind turbine for rural livelihood improvement," in *2017 International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT)*, 2017, pp. 114–120.
- [4] R. Wang, Z. Wang, and S. Ren, "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)*, 2024, pp. 34–38.
- [5] S. Xuwei, S. Xuefang, D. Wenqi, Z. Peng, J. Hongyan, W. Jinfang, and W. Yang, "Research on energy storage configuration method based on wind and solar volatility," in *2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2020, pp. 464–468.
- [6] I. Masenge and F. Mwasilu, "Hybrid solar pv-wind generation system coordination control and optimization of battery energy storage system for rural electrification," in *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2020, pp. 1–5.
- [7] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, 2006.
- [8] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.
- [9] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of power converters in ac microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [10] J. Lopes, C. Moreira, and A. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916–924, 2006.
- [11] Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259–1267, 2011.
- [12] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [13] M.-S. Kang, "Generation cost assessment of an isolated power system with a fuzzy wind power generation model," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 397–404, 2007.
- [14] C. Guo, "Optimal dispatching of rural microgrids based on uncertain output power of wind and photovoltaics," in *2024 4th International Signal Processing, Communications and Engineering Management Conference (ISPCEM)*, 2024, pp. 1073–1079.
- [15] H. Ma, L. Chen, P. Ju, H. Liu, N. Jiang, and C. Wang, "Feasibility research on dc generator based wind power generation system," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1–5.