

GESTÃO DE SISTEMAS EÓLICOS OFF-GRID PARA PEQUENOS PRODUTORES RURAIS: FRAMEWORK DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMAS

**MANAGEMENT OF OFF-GRID WIND SYSTEMS FOR SMALL RURAL
PRODUCERS: A SYSTEM DYNAMICS-BASED DECISION-SUPPORT
FRAMEWORK**

Ciências Agrárias, Engenharias • 18/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789699898](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789699898)

Antonio Vanderlei dos Santos¹

Ronaldo Waschburger²

Roger Luiz Botini Borges³

Raquele da Vieira Flores⁴

Carla Regina Pires⁵

Patrícia Battú Dellamora Mello⁶

RESUMO

O estudo desenvolve e realiza a pré-validação de um framework técnico-tecnológico para apoiar a decisão sobre sistemas eólicos off-grid em pequenas propriedades rurais. A pesquisa aplicada combina revisão e análise bibliométrica de 52 registros da Scopus, modelagem por Dinâmica de Sistemas e experimento computacional horário com cinco cenários. O framework integra geração eólica, demanda, armazenamento, desempenho econômico, emissões evitadas e critérios multicritério de recomendação. Os resultados ilustrativos distinguem situações de subdimensionamento, adequação e superdimensionamento: a cobertura anual variou de 75,3% a 100%, enquanto a análise de sensibilidade evidenciou retornos marginais decrescentes do aumento da bateria. No cenário provável, a cobertura alcançou 99,8%, porém a comparação exclusiva com a tarifa da rede resultou em LCOE de R\$ 3,16/kWh, payback líquido de 42,5 anos e ROI negativo em vinte anos. Conclui-se que a decisão não deve se apoiar em médias anuais ou em um único indicador, mas na combinação entre confiabilidade, criticidade das cargas, alternativa energética de referência, custo e impacto ambiental. O artefato oferece uma sequência auditável para triagem, parametrização, simulação, teste e recomendação, embora ainda requeira calibração e validação com dados de campo.

Palavras-chave: energia eólica; sistemas off-grid; pequenas propriedades rurais; Dinâmica de Sistemas; apoio à decisão.

ABSTRACT

This study develops and pre-validates a technical-technological framework to support decisions on off-grid wind systems for small rural properties. The applied research combines a review and bibliometric analysis of 52 Scopus records, System Dynamics

modeling, and an hourly computational experiment with five scenarios. The framework integrates wind generation, demand, storage, economic performance, avoided emissions, and multicriteria recommendation rules. The illustrative results distinguish undersized, adequate, and oversized configurations: annual demand coverage ranged from 75.3% to 100%, while sensitivity analysis showed diminishing marginal returns from increasing battery capacity. In the probable scenario, coverage reached 99.8%; however, a comparison based solely on the grid tariff yielded an LCOE of BRL 3.16/kWh, a net payback period of 42.5 years, and a negative twenty-year ROI. The findings indicate that the decision should not rely on annual averages or a single indicator, but on the combined assessment of reliability, load criticality, the reference energy alternative, cost, and environmental impact. The artifact provides an auditable sequence for screening, parameterization, simulation, testing, and recommendation, although calibration and validation with field data are still required.

Keywords: wind energy; off-grid systems; small rural properties; System Dynamics; decision support.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética ampliou o papel das fontes renováveis no planejamento de governos, empresas e unidades produtivas. Em 2025, a geração eólica brasileira alcançou 116,5 TWh e a potência instalada totalizou 34.707 MW, considerando geração centralizada e micro e minigeração distribuída. O crescimento de 8,2% na produção anual confirma a relevância da fonte na matriz elétrica, mas também evidencia uma assimetria: apenas 17 MW da capacidade eólica estavam registrados como micro e minigeração

distribuída, enquanto a expansão ocorreu predominantemente em empreendimentos de grande porte (EPE, 2026).

Essa assimetria não reduz o interesse da energia eólica de pequeno porte. Em propriedades rurais afastadas, a decisão energética não se limita ao preço médio do quilowatt-hora. Continuidade da refrigeração, bombeamento de água, comunicação, iluminação, cercas, monitoramento e processamento da produção podem representar condições para a segurança, a qualidade do produto e a permanência da atividade econômica. Sistemas off-grid também podem evitar a extensão onerosa da rede ou reduzir a dependência de geradores a diesel, desde que o recurso eólico local seja suficiente e o sistema seja dimensionado de forma coerente.

A energia disponível no vento varia com o cubo da velocidade. Por isso, diferenças aparentemente pequenas no regime eólico podem alterar de modo substantivo a potência convertível. A média mensal do vento ou a potência nominal do aerogerador, analisadas isoladamente, não descrevem a capacidade de atender cargas em cada período. A bateria introduz memória ao sistema, acumulando excedentes e oferecendo energia nos períodos de calmaria; simultaneamente, sua capacidade, eficiência, reserva mínima e custo restringem o desempenho. O problema é, portanto, técnico, econômico, ambiental e gerencial.

A literatura analisada nesta pesquisa mostra que o conhecimento sobre microrredes eólicas isoladas se concentra em controle, estabilidade, armazenamento e otimização. Embora essas contribuições sejam indispensáveis, ainda existe espaço para instrumentos que conectem as equações de geração ao cotidiano decisório do pequeno produtor. O usuário precisa saber quais dados

coletar, como comparar cenários, como priorizar cargas, quando aumentar o rotor ou a bateria e em que condições a expansão deixa de produzir benefício proporcional.

A Dinâmica de Sistemas oferece uma linguagem adequada a esse desafio. A abordagem representa estoques, fluxos, retroalimentações, atrasos e relações não lineares, permitindo observar como decisões e condições externas produzem trajetórias ao longo do tempo (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Em lugar de uma calculadora estática, o modelo funciona como laboratório de aprendizagem: o usuário explicita premissas, executa cenários e examina resultados técnicos, financeiros e ambientais antes de imobilizar recursos.

Diante disso, formula-se a seguinte questão: como desenvolver e avaliar um framework técnico-tecnológico, fundamentado em Dinâmica de Sistemas, capaz de apoiar a análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental de sistemas eólicos off-grid para pequenas propriedades rurais?

Desenvolver e realizar a pré-validação de um framework técnico-tecnológico, fundamentado em Dinâmica de Sistemas, para apoiar a tomada de decisão sobre sistemas eólicos off-grid em pequenas propriedades rurais, integrando geração, demanda, armazenamento, desempenho econômico, impacto ambiental e critérios de recomendação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Energia Eólica, Sistemas Off-Grid e Contexto Rural

2.2. Armazenamento, Viabilidade e Apoio à Decisão

A viabilidade econômica inclui investimento inicial, operação, manutenção, reposição, vida útil, economia e custo do capital. O payback simples é intuitivo, mas ignora valor do dinheiro no tempo e custos futuros. O ROI resume o resultado em relação ao capital empregado, enquanto o LCOE divide o valor presente dos custos pela energia útil descontada. Grisales-Noreña et al. (2025) e Prakash e Dhal (2022) demonstram a relevância da otimização econômica em microrredes, ainda que com escopos tecnológicos mais amplos.

2.3. Dinâmica de Sistemas e Lacuna de Pesquisa

A Dinâmica de Sistemas é apresentada nesta seção não apenas como técnica de desenho, mas como método de investigação e aprendizagem sobre problemas em que acumulações, atrasos, não linearidades e decisões recorrentes produzem comportamentos difíceis de antecipar. A abordagem parte de um problema dinâmico, formula uma explicação estrutural, converte-a em modelo explícito, simula comportamentos e testa políticas em processo iterativo (Forrester, 1994; Sterman, 2000, 2002).

A utilidade de um modelo depende da adequação ao propósito, da consistência estrutural, da coerência dimensional e do comportamento plausível. Validação não é prova absoluta de verdade. Forrester (1994) trata a adequação como construção de confiança suficiente para o propósito, enquanto Sterman (2000) recomenda acumular evidências por revisão de especialistas, comparação com dados, testes extremos, conservação de massa ou energia, consistência dimensional e análise de sensibilidade.

A fundamentação mostra que a energia eólica rural off-grid é simultaneamente problema de conversão, confiabilidade,

investimento e organização da demanda. A literatura oferece componentes avançados de controle e otimização, mas o pequeno produtor necessita de uma sequência compreensível: caracterizar a propriedade; medir vento e consumo; testar configurações; examinar riscos; e decidir com apoio de indicadores múltiplos.

A lacuna abordada é, portanto, a integração desses componentes em um framework de pré-viabilidade baseado em Dinâmica de Sistemas, exclusivamente eólico e adaptável a dados locais. A contribuição esperada não é uma turbina nova nem um controlador elétrico, mas uma arquitetura decisória que explicita relações causais, acumulações, limites físicos e compromissos entre critérios.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois desenvolve um instrumento destinado a uma decisão prática: avaliar a pré-viabilidade de sistemas eólicos off-grid em propriedades rurais. Quanto à abordagem, é predominantemente quantitativa, uma vez que formaliza relações matemáticas, trata dados bibliográficos estruturados e executa simulação temporal. Elementos qualitativos aparecem na definição das categorias do corpus, dos requisitos do usuário e dos critérios de validação.

O estudo não é experimental no sentido de intervenção em uma propriedade real. O experimento ocorre em ambiente computacional e utiliza parâmetros ilustrativos declarados. Essa distinção é metodologicamente importante: os resultados avaliam coerência estrutural e comportamento do artefato, mas não demonstram desempenho de uma instalação específica.

O desenho foi organizado em seis etapas encadeadas, apresentadas no Quadro 2. A lógica preserva rastreabilidade: cada etapa gera insumos para a seguinte e possui um resultado verificável. A revisão identifica conhecimento e lacunas; o instrumento define dados; a hipótese dinâmica organiza relações; a formalização converte relações em equações; a simulação testa comportamento; e o produto técnico consolida o uso.

A análise utilizou o arquivo Scopus exportado em 23 de junho de 2026, fornecido com a documentação da pesquisa. O arquivo contém 52 registros e 43 campos, incluindo autores, título, ano, fonte, resumo, palavras-chave, afiliações, citações, DOI, tipo de documento e estágio de publicação. A planilha Excel anexada reproduz os mesmos registros.

A documentação preliminar descrevia um recorte de 2020 a 2026; entretanto, a base efetivamente exportada contém publicações de 2001 a 2026. Para assegurar reprodutibilidade, a análise bibliométrica respeitou o conteúdo do arquivo, sem eliminar registros anteriores. Essa decisão corrige uma inconsistência entre protocolo narrado e evidência disponível. O período 2020–2026 foi mantido apenas como subperíodo de expansão recente na discussão.

Os 52 registros foram preservados na descrição do corpus. A errata foi excluída da síntese temática, resultando em 51 documentos com conteúdo científico. Não foram acrescentados registros localizados fora do arquivo. O tratamento compreendeu padronização de ano e citações, contagem por tipo de documento, fonte e país, normalização simples de palavras-chave e seleção dos registros mais citados.

A revisão seguiu princípios de transparência, rastreabilidade e síntese recomendados por Tranfield, Denyer e Smart (2003). A dimensão bibliométrica descreveu evolução anual, composição documental, fontes, afiliações, citações e palavras-chave. A dimensão temática utilizou títulos, resumos e palavras-chave para organizar os estudos em quatro eixos: controle e estabilidade; armazenamento e gerenciamento; dimensionamento e otimização; e aplicação rural e viabilidade.

O instrumento foi estruturado para uma futura aplicação em propriedades rurais e contém nove blocos: identificação; consumo mensal; inventário de equipamentos; dados eólicos; sistema eólico; armazenamento; dados econômicos; dados ambientais; e observações de campo.

Para a demanda, recomenda-se coletar ao menos doze meses de consumo e, quando possível, registros horários ou sub-horários. O inventário deve informar potência, quantidade, horas de uso, sazonalidade, simultaneidade e criticidade. Para o vento, a prioridade é série medida na altura do rotor; dados regionais podem apoiar triagem, mas não substituem campanha anemométrica quando a decisão envolve aquisição.

A construção foi orientada pelo ciclo iterativo de articulação do problema, formulação da hipótese dinâmica, formalização, teste e avaliação de políticas descrito por Forrester (1994) e Sterman (2000). Na articulação, definiu-se como comportamento problemático a coexistência possível entre energia anual aparentemente suficiente e falhas de atendimento em períodos específicos. Os modos de referência considerados foram déficit recorrente, saturação da bateria, excesso persistente e recuperação financeira lenta. O

propósito delimitado foi apoiar pré-viabilidade e aprendizagem, não produzir projeto executivo.

A hipótese dinâmica estabelece que a adequação decorre do ajuste temporal entre geração e demanda, mediado por armazenamento finito. O vento e a configuração do aerogerador determinam a oferta; moradores, produção e equipamentos determinam a demanda; a bateria desloca energia no tempo; custos e emissões acumulam consequências; e os indicadores orientam nova configuração. Essa hipótese foi inicialmente comunicada por relações causais, sem inferir o comportamento apenas a partir dos laços.

A cautela decorre de Richardson (1986): diagramas causais não distinguem com suficiente clareza enlaces de informação e conexões entre taxas e níveis, podendo ocultar acumulações ou produzir leitura equivocada da polaridade. Por isso, a hipótese foi convertida em três estoques explícitos — energia armazenada, resultado financeiro e emissões evitadas acumuladas —, seus fluxos correspondentes, variáveis auxiliares, condições iniciais e equações dimensionais. A formalização tornou verificáveis limites como capacidade útil, reserva, eficiência e potência máxima.

O experimento operacional utilizou horizonte de 8.760 horas e passo de uma hora. Essa resolução permite observar carga, descarga, déficit e excedente que seriam ocultados por médias mensais. A série de vento é sintética e reproduzível, gerada por distribuição Weibull com parâmetro de forma $k = 2$, semente 20260818 e modulação sazonal e diária. A média é escalada para cada cenário.

A demanda anual de referência corresponde a 4,5 kWh/dia, totalizando 1.642,5 kWh/ano. O perfil horário atribui maior peso ao

início da manhã e à noite e aplica variação sazonal de $\pm 15\%$. Quarenta por cento da demanda foi classificada como crítica. Esses valores servem para testar a estrutura e não descrevem uma propriedade observada.

Tabela 1. Parâmetros ilustrativos do experimento horário

Parâmetro	Valor	Unidade/observação
Horizonte	8.760	horas
Passo	1	hora
Densidade do ar	1,225	kg/m ³
Diâmetro do rotor	2,5	m
Potência nominal	1,0	kW
Coeficiente de potência	0,40	adimensional
Eficiência mecânico-elétrica	0,90	adimensional
Disponibilidade	0,95	adimensional
Perdas do sistema	0,12	fração da geração
Velocidade de início/desligamento	3,0 / 25,0	m/s
Demanda diária	4,5	kWh/dia
Bateria nominal	7,2	kWh
Limite útil / reserva	80 / 10	% da capacidade nominal
Eficiência de carga/descarga	95 / 95	%

Fonte: Elaboração própria com base nos documentos técnicos da pesquisa (2026).

Nota: Valores ilustrativos; não substituem dados locais ou especificações do fabricante.

Cinco cenários foram executados com a mesma estrutura. C1 reduz o vento médio; C2 representa a condição provável; C3 aumenta o vento; C4 expande a demanda em 40%; e C5 reduz a demanda em 10% e desloca 35% de uma parcela noturna flexível para as quatro horas diárias de maior geração. A comparação separa efeitos do recurso, do crescimento e da gestão.

Quadro 1. Cenários do experimento computacional

Cenário	Vento médio	Demanda	Finalidade
C1 – Conservador	4,5 m/s	Referência	Teste de estresse do recurso eólico.
C2 – Provável	5,5 m/s	Referência	Configuração central de comparação.
C3 – Favorável	6,5 m/s	Referência	Identificar cobertura e excedente.
C4 – Expansão	5,5 m/s	+40%	Avaliar crescimento produtivo.
C5 – Eficiência	5,5 m/s	-10% e carga deslocada	Avaliar gestão antes de ampliar capacidade.

Fonte: Elaboração própria (2026).

A avaliação estratégica utilizou horizonte de 20 anos, taxa de desconto de 8% ao ano, degradação anual de 0,5%, manutenção de 1,5% do investimento e reposição do banco de baterias no décimo ano. O investimento ilustrativo de R\$ 40.400 e a tarifa de R\$

0,95/kWh provêm do roteiro técnico anexado. Não foram realizadas cotações independentes.

O LCOE foi calculado como razão entre valor presente dos custos e valor presente da energia atendida. O ROI de 20 anos considera economia tarifária, manutenção e reposição, sem monetizar confiabilidade, diesel evitado, extensão de rede ou perdas produtivas. A emissão evitada utiliza 0,0385 kgCO₂/kWh, fator médio anual do SIN em 2023, exclusivamente como demonstração (MCTI, 2024).

A verificação avaliou coerência dimensional, limites, conservação de energia e reprodução do cálculo manual. Testes extremos estabeleceram que vento abaixo do início ou acima do desligamento gera potência zero; bateria no limite útil não carrega; bateria na reserva não descarrega; demanda nula não produz déficit; e a potência efetiva não ultrapassa a nominal.

Os testes foram distribuídos em cinco frentes: estrutura e fronteira; unidades; condições extremas; reprodução do comportamento esperado; e sensibilidade. A presença dos estoques e das equações permite verificar conservação e condições iniciais, superando limitações de uma avaliação baseada somente em diagramas causais (Richardson, 1986). A validação empírica e a validação com produtores e especialistas permanecem como etapas futuras, pois não há série observada nem formulário preenchido.

A sensibilidade concentrou-se na capacidade nominal da bateria: 2,4; 4,8; 7,2; 9,6 e 14,4 kWh, mantendo C2. A finalidade foi verificar retornos marginais sobre cobertura e excedente. Em aplicação real,

vento, curva de potência, perdas, demanda, tarifa, investimento e vida útil também devem ser variados.

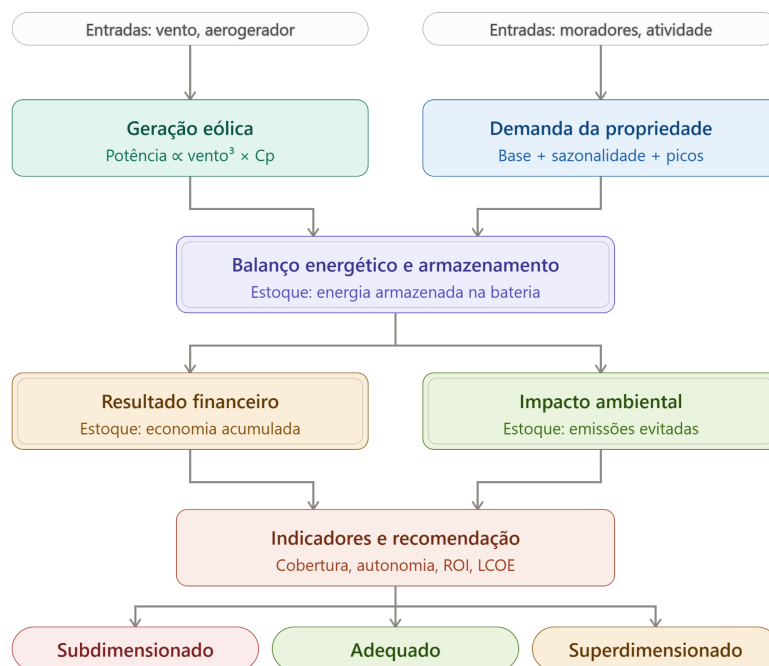
A classificação é multicritério. Uma configuração é subdimensionada quando a cobertura total é inferior à meta, as cargas críticas apresentam falhas relevantes ou há muitas horas de déficit. É adequada quando as metas técnicas são atingidas e o excedente permanece administrável. É superdimensionada quando a ampliação de geração ou armazenamento produz excedente persistente e benefício marginal desproporcional ao custo.

4. FRAMEWORK E MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Esta seção apresenta o produto central da pesquisa. O framework organiza entradas, processamento, estoques, resultados e recomendação. O modelo de Dinâmica de Sistemas operacionaliza a lógica e permite acompanhar a energia ao longo do tempo. A arquitetura foi construída para pré-viabilidade e aprendizagem, e não para substituir projeto elétrico executivo.

A Figura 1 resume a sequência do framework. Dados do vento e do aerogerador alimentam a geração; moradores e atividade determinam a demanda; ambos convergem para o balanço e o armazenamento. Os resultados financeiro e ambiental alimentam indicadores e a classificação final.

Figura 1. Framework de avaliação de sistemas eólicos em propriedades rurais



Fonte: Elaboração própria (2026).

A arquitetura possui quatro princípios. O primeiro é modularidade: cada bloco pode ser testado sem perder as conexões. O segundo é rastreabilidade: toda entrada deve possuir unidade, fonte e status de medição. O terceiro é transparência: equações e limiares ficam visíveis. O quarto é iteratividade: a recomendação retorna ao usuário, que altera a configuração e executa novo cenário.

O framework separa resultado e decisão. Um valor de cobertura não determina sozinho a recomendação; ele precisa ser interpretado com criticidade das cargas, horas de falta, excedente, custo e objetivos do produtor. Essa separação reduz o risco de transformar indicador em decisão automática.

A hipótese dinâmica afirma que a adequação do sistema é produzida pelo ajuste temporal entre geração e demanda, mediado por um estoque finito de energia. Vento maior, rotor maior e eficiência maior elevam a potência, mas a energia útil depende de existir demanda ou espaço na bateria. Demanda maior reduz o

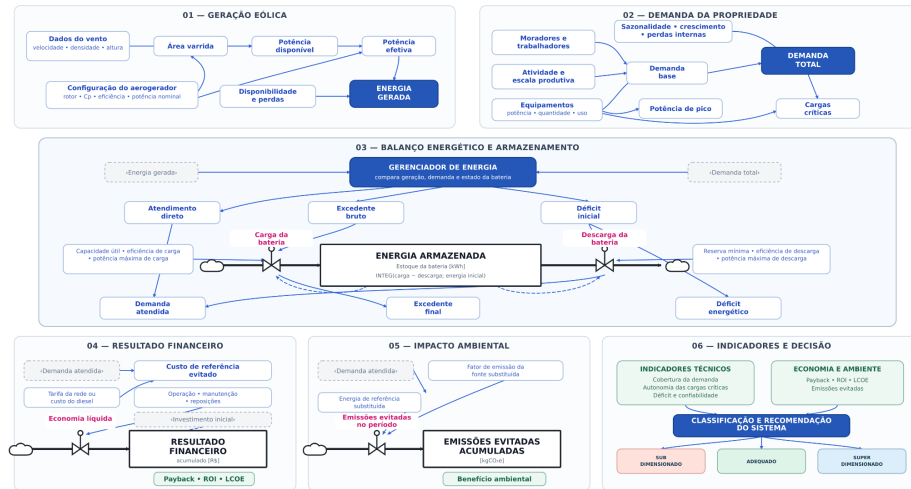
estado de carga e pode criar déficit; gestão de cargas pode alterar o ajuste sem modificar a capacidade instalada.

A bateria amortece a intermitência, mas não cria energia. Quando o déficit é estrutural, aumentar somente o armazenamento desloca a falta no tempo e apresenta retorno decrescente. Quando a geração anual é suficiente, mas mal distribuída, a bateria reduz horas de falta. Essa distinção é uma das principais aprendizagens do modelo.

A dimensão financeira possui atraso: o investimento ocorre no início e a economia se acumula. A dimensão ambiental também se acumula, porém começa em zero e cresce apenas com energia convencional efetivamente substituída. O usuário observa essas trajetórias, compara metas e ajusta o sistema.

A Figura 2 apresenta a formalização integrada dos seis módulos e destaca os estoques de energia armazenada, resultado financeiro e emissões evitadas, bem como os fluxos que produzem o comportamento do sistema.

Figura 2. Modelo de estoques e fluxos para energia eólica em propriedades rurais



Fonte: Elaboração própria com base em Sterman (2000) e Simonetto et al. (2016).

Os mecanismos de retroalimentação explicam como uma alteração inicial retorna ao sistema e modifica decisões ou limites posteriores. Esses mecanismos constituem a hipótese de comunicação; sua interpretação é confrontada com os estoques, os fluxos e as equações formais.

Esta seção converte a hipótese dinâmica em relações matemáticas auditáveis. As equações foram agrupadas por geração, demanda, balanço e indicadores; em cada grupo, o texto explicita a função das expressões, as unidades e as restrições necessárias para preservar coerência física.

O primeiro conjunto transforma geometria, vento e eficiência em energia entregue no passo de tempo, impondo a faixa operacional e o limite nominal do aerogerador.

$$A = \pi \times (D/2)^2 \quad (3)$$

$$P_{disp} = 0,5 \times \rho \times A \times V^3 \quad (4)$$

$$P_{ef} = IF(V < V_{ci} \text{ OR } V > V_{co}; 0; \text{MIN}(P_{nom}; P_{disp} \times C_p \times \eta)) \quad (5)$$

$$E_{ger} = P_{ef} \times \Delta t \times \text{disponibilidade} \times (1 - \text{perdas}) \quad (6)$$

$$\text{Carga} = \text{MIN}(E_{exc,bruto} \times \eta_c; \text{Cap\acute{u}til} - \text{Estoque}; P_{carga} \times \Delta t) \quad (13)$$

$$\text{Descarga} = \text{MIN}(E_{def,inicial}/\eta_d; \text{MAX}(\text{Estoque} - \text{Reserva}; 0); P_{desc} \times \Delta t) \quad (14)$$

$$\text{Estoque} = \text{INTEG}(\text{Carga} - \text{Descarga}; E_{inicial}) \quad (15)$$

$$\text{Cobertura} = \Sigma(E_{atendida}) / \Sigma(E_{dem}) \quad (19)$$

$$\text{LCOE} = \Sigma(\text{Custot}/(1+r)^t) / \Sigma(\text{Energia \acute{u}til}/(1+r)^t) \quad (23)$$

$$\text{Emiss\~{o}es evitadas} = \text{Energia substituída} \times \text{FE} \quad (24)$$

As Equações 3 a 6 convertem geometria e recurso eólico em energia. Unidades precisam ser compatibilizadas: potência em kW multiplicada por hora resulta em kWh. A relação cúbica justifica sensibilidade específica do vento.

As funções MIN e MAX impõem restrições físicas. A energia retirada do estoque é superior à entregue quando a eficiência de descarga é inferior a um. A Equação 15 representa a memória central do sistema.

Cobertura utiliza somas acumuladas, evitando média de percentuais horários. O LCOE desconta custos e energia. Emissões evitadas utilizam energia efetivamente substituída e fator correspondente à fonte de referência.

A implementação recomendada possui seis views: Entradas; Demanda; Geração Eólica; Balanço e Bateria; Economia; Ambiente e

Decisão. Cada variável deve conter definição, unidade, fonte, intervalo aceitável e indicação de valor medido ou estimado. Parâmetros editáveis podem ser diferenciados visualmente.

A classificação resume o diagnóstico sem substituir a leitura das trajetórias. Cada classe é relacionada às condições predominantes e às ações seguintes, mantendo os limiares editáveis conforme criticidade, custo da falta e objetivo produtivo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização e Síntese do Portfólio Bibliográfico

O arquivo Scopus anexado contém 52 registros publicados entre 2001 e 2026. Excluída uma errata, permaneceram 51 documentos para a leitura de conteúdo. A distribuição temporal não é contínua: há publicações esparsas até 2014 e maior atividade a partir de 2015. Trinta registros foram publicados entre 2020 e 2026, equivalentes a 57,7% do total exportado. Esse crescimento é compatível com o interesse recente por microrredes, armazenamento e controle de recursos distribuídos.

Entre os estudos exclusivamente ou predominantemente eólicos, Hemmati et al. (2018) abordam controle frequência-tensão em configuração turbina–carga–bateria; Tanvir e Merabet (2020) tratam estimação e controle em microrrede CC; Abbey e Joos (2007) demonstram o papel coordenador do armazenamento em sistema rural. Esses trabalhos sustentam a inclusão de limites de potência, estado de carga, reserva e prioridade de atendimento no framework.

O primeiro eixo reúne trabalhos de controle elétrico e estabilidade. Hemmati et al. (2018), Tanvir e Merabet (2020) e Santhosam, U e

Kartikeyan (2026) mostram que atendimento energético não basta para afirmar qualidade de serviço. A presente pesquisa não resolve transitórios, mas incorpora o alerta metodológico: potência nominal, cargas críticas e limitações do inversor devem aparecer no protocolo de decisão.

O quarto eixo aproxima o problema do território e do usuário. Notton et al. (2001), Ndiaye et al. (2019) e Crook et al. (2025) destacam cargas remotas, soluções de pequeno porte e oportunidades em áreas rurais. Esse eixo sustenta a coleta de rotinas produtivas, competências de manutenção, expansão da atividade e alternativas locais de suprimento.

5.2. Desempenho Técnico dos Cenários

A concordância entre cálculo manual e implementação confirma a equação básica, mas o exemplo não é previsão de produção: não contém distribuição de vento, cut-in, cut-out, saturação na potência nominal, indisponibilidade ou perdas completas. A simulação horária incorpora essas restrições.

O desempenho técnico foi comparado em cinco cenários para distinguir insuficiência de recurso, adequação, excedente, crescimento da propriedade e efeito da gestão de cargas. A Tabela 2 reúne os resultados anuais, enquanto a Tabela 2 permite comparar cobertura, déficit e excedente.

Tabela 2. Resultados anuais dos cenários simulados

Cen.	Vento / (m/s)	Demanda / (kWh)	Geração / (kWh)	Cobertura	Défici (kWl
------	------------------	--------------------	--------------------	-----------	----------------

C1	4,5	1642,5	1291,3	75,3%	404,9
C2	5,5	1642,5	2054,6	99,8%	3,7
C3	6,5	1642,5	2806,2	100,0%	0,0

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/gestao-de-sistemas-eolicos-off-grid-para-pequenos-produtores-rurais-framework-de-apoio-a-decisao-baseado-em-dinamica-de-sistemas?noblockage>

Fonte: Elaboração própria (2026).

Nota: Simulação determinística com série sintética; parâmetros apresentados na Tabela 1.

A Tabela 2 separa três mecanismos: em C1 falta energia ao longo do ano; em C2 a geração anual é suficiente, restando pequeno déficit temporal; em C3 o acréscimo de recurso se converte principalmente em excedente. C4 demonstra vulnerabilidade ao crescimento da carga e C5 mostra que eficiência e flexibilidade podem produzir ganho equivalente ao aumento de ativos.

A Tabela 2 evidencia que C1 e C4 ficam abaixo da referência de triagem, enquanto C2, C3 e C5 atingem cobertura elevada. A proximidade de C2 com 100% não elimina a necessidade de localizar as 24 horas de falha e verificar se coincidem com cargas críticas.

A Tabela 2 mostra que déficit e excedente não são opostos simples: uma configuração pode produzir excedente em algumas horas e déficit em outras. O contraste entre C2 e C3 evidencia o custo

potencial de buscar déficit nulo apenas pelo aumento da geração, sem planejar o uso da energia adicional.

No C1, a velocidade média de 4,5 m/s produziu 1.291,3 kWh, abaixo da demanda anual de 1.642,5 kWh. A bateria atingiu a reserva repetidamente e ocorreram 404,9 kWh de déficit em 3.004 horas. A cobertura de 75,3% e a cobertura de cargas críticas de 83,8% justificam a classificação subdimensionado. Como quase não houve excedente, ampliar apenas a bateria teria efeito limitado; a resposta deve priorizar maior recurso eólico, rotor, redução de consumo ou fonte de backup.

No C2, com vento médio de 5,5 m/s, a geração alcançou 2.054,6 kWh. A cobertura foi 99,8%, o déficit 3,7 kWh em 24 horas e o excedente 339,8 kWh. O cenário foi considerado adequado para a meta ilustrativa, embora o déficit residual exija decisão explícita se houver cargas cuja interrupção seja inaceitável. O fator de capacidade simulado foi 23,5%.

No C3, com 6,5 m/s, não houve déficit, mas 1.102,7 kWh foram excedentes, equivalentes a 39,3% da geração. A configuração foi classificada como superdimensionada porque a capacidade adicional não produziu benefício proporcional para a demanda representada. O excedente poderia alterar a decisão se fosse destinado a bombeamento, aquecimento, refrigeração ou expansão produtiva.

O C4 mantém o recurso do C2 e amplia a demanda em 40%. A cobertura cai para 85,3% e aparecem 338,3 kWh de déficit em 1.859 horas. O resultado demonstra risco de dimensionar somente para a fotografia atual da propriedade. No C5, redução de 10% da energia e

deslocamento de cargas eliminam o déficit com os mesmos ativos de geração e armazenamento, reforçando o valor gerencial da eficiência e da flexibilidade.

5.3. Sensibilidade do Armazenamento

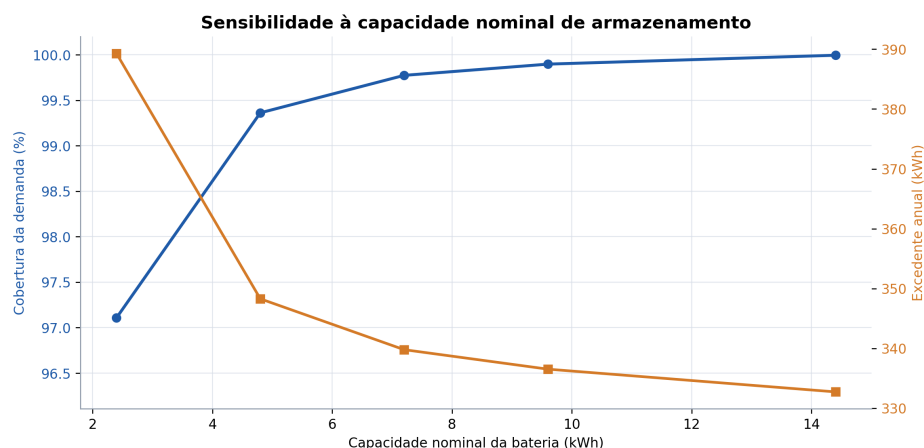
A sensibilidade foi realizada para verificar se o déficit do cenário provável decorre principalmente de armazenamento insuficiente e para identificar ganhos marginais. A Tabela 3 e a Figura 3 comparam cinco capacidades nominais sob a mesma série de vento e demanda.

Tabela 3. Sensibilidade do cenário provável à capacidade da bateria

Bateria nominal (kWh)	Cobertura	Déficit (kWh)	Excedente (kWh)	Horas com déficit
2,4	97,11%	47,50	389,3	380
4,8	99,36%	10,49	348,3	79
7,2	99,77%	3,73	339,8	24
9,6	99,90%	1,70	336,5	10
14,4	99,99%	0,10	332,7	1

Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 3. Cobertura e déficit em função da capacidade da bateria



Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 3 evidencia uma curva de saturação: os primeiros incrementos de capacidade reduzem o déficit de modo expressivo, enquanto os ganhos posteriores se aproximam de zero. O padrão é compatível com um laço de equilíbrio e sustenta a avaliação conjunta entre confiabilidade adicional e custo marginal.

5.4. Resultados Econômico-Financeiros, Ambientais e Discussão Integrada

A avaliação técnica foi complementada por indicadores de custo e benefício ambiental, calculados para o cenário provável sob hipóteses explicitamente ilustrativas. A Tabela 4 apresenta investimento, economia, retorno, custo nivelado e emissões evitadas; a análise posterior discute por que a alternativa de referência altera a conclusão.

Tabela 4. Indicadores econômico-financeiros e ambientais do cenário provável

Indicador	Resultado ilustrativo	Interpretação
Investimento inicial	R\$ 40.400,00	Aerogerador, torre, bateria, conversão e instalação.

Economia bruta anual	R\$ 1.556,83	Energia atendida multiplicada pela tarifa de R\$ 0,95/kWh.
Economia líquida anual inicial	R\$ 950,83	Após O&M anual de R\$ 606,00; não incorpora valor da confiabilidade.
Payback simples bruto	26,0 anos	Antes de O&M e reposição.
Payback simples líquido	42,5 anos	Superior ao horizonte de 20 anos.
LCOE	R\$ 3,16/kWh	Com taxa de desconto de 8% e depreciação de 0,5% a.a.
ROI em 20 anos	-71,1%	Retorno negativo na comparação exclusiva com a tarifa declarada.
Emissões evitadas anuais	63,1 kgCO ₂ e	Energia atendida × 0,0385 kgCO ₂ e/kWh.
Emissões evitadas em 20 anos	1.203,7 kgCO ₂ e	Com depreciação anual da geração.

Fonte: Elaboração própria (2026).

Nota: Parâmetros ilustrativos; cotações e dados locais são necessários antes de uma decisão de investimento.

A comparação exclusiva com a tarifa de R\$ 0,95/kWh indica inviabilidade financeira nos parâmetros adotados: o LCOE de R\$ 3,16/kWh supera a tarifa, o payback líquido é 42,5 anos e o ROI acumulado em 20 anos é -71,1%. Esse resultado não invalida a tecnologia; mostra que a base de comparação define a decisão. Em área sem rede, devem entrar o custo de extensão, perdas produtivas, transporte e combustível do diesel, manutenção, ruído e risco de desabastecimento.

O benefício climático calculado com fator médio do Sistema Interligado Nacional foi modesto: 63,1 kgCO₂e por ano. O valor é coerente com uma matriz elétrica relativamente baixa em carbono e não deve ser transferido para substituição de diesel. Se a fonte evitada for um gerador local, o inventário deverá usar fator específico, consumo real e fronteiras declaradas.

Assim, a viabilidade do sistema eólico rural tende a depender de valor além da energia: confiabilidade, autonomia, habilitação de atividade produtiva, ausência ou precariedade da rede e aproveitamento do excedente. O framework impede que esses benefícios sejam usados de modo implícito; exige que sejam descritos, quantificados quando possível e submetidos a cenário.

Os resultados respondem à questão de pesquisa ao demonstrar que o framework permite articular, em uma mesma estrutura causal e quantitativa, recurso eólico, demanda, armazenamento, custo, impacto e decisão. A utilidade não está em produzir uma classificação automática isolada, mas em revelar a causa da classificação e indicar a próxima ação gerencial.

A principal contribuição teórica é a tradução de achados dispersos de controle, armazenamento e dimensionamento para uma hipótese dinâmica voltada à gestão rural. A contribuição metodológica é a separação entre dado medido, valor de catálogo e hipótese. A contribuição prática é um protocolo que permite interromper cedo uma proposta frágil, identificar dados faltantes e comparar alternativas antes do projeto executivo.

A principal ressalva é igualmente clara: o experimento não valida desempenho em Santo Ângelo ou em propriedade específica. Sem

série anemométrica local, curva do equipamento, cargas registradas e cotações, o resultado é demonstração de funcionamento. A aplicação de campo, a calibração e a validação com especialistas permanecem etapas necessárias para uso decisório definitivo.

6. PROTOCOLO DE APLICAÇÃO DO FRAMEWORK

O produto deste estudo é o Framework Eólico Rural Off-grid (FERO), um protocolo parametrizável de apoio à decisão associado a um modelo de Dinâmica de Sistemas. Seu propósito é organizar a pré-viabilidade, registrar premissas, executar cenários e comunicar recomendações sobre geração eólica de pequeno porte com armazenamento.

O FERO não é software de projeto executivo e não prescreve marca ou fornecedor. Ele integra cinco componentes reutilizáveis: instrumento de coleta; dicionário de dados; arquitetura modular e equações; biblioteca mínima de cenários e testes; e painel de indicadores com regras de classificação. Esses componentes podem ser implementados no Vensim ou em outro ambiente que preserve unidades, limites e sequência lógica.

O fluxo de aplicação transforma a arquitetura em sequência operacional com portas de decisão. O Quadro 2 apresenta oito etapas, suas saídas verificáveis e os critérios mínimos para avançar, de modo que problemas de dados ou segurança sejam tratados antes da simulação detalhada.

Quadro 2. Etapas do protocolo FERO

Etapas	Ação	Saída verificável	Critério de avanço
---------------	-------------	--------------------------	---------------------------

1. Enquadrar	Definir finalidade, fronteira, horizonte, cargas críticas e alternativa de referência.	Termo de escopo.	Objetivo e decisão claramente formulados.
2. Qualificar	Realizar triagem de recurso, obstáculos, acesso, segurança e capacidade de manutenção.	Registro de impedimentos e lacunas.	Ausência de impedimento crítico não tratado.
3. Medir	Coletar série de vento na altura adequada e perfil de demanda; inventariar equipamentos.	Base temporal e inventário reconciliados.	Cobertura, resolução e qualidade documentadas.
4. Parametrizar	Inserir curva da turbina, perdas, bateria, custos, fonte substituída e limites.	Arquivo de parâmetros versionado.	Unidades e fontes completas.
5. Simular	Executar base, conservador, favorável, expansão e eficiência.	Resultados horários e anuais.	Conservação e limites respeitados.
6. Testar	Aplicar extremos, sensibilidade e comparação manual.	Checklist de validação.	Comportamento plausível ou ressalvas abertas.
7. Avaliar	Interpretar cobertura, déficit, excedente, autonomia, custos e emissões.	Painel comparativo.	Critérios e pesos explícitos.
8. Recomendar	Classificar e propor ajuste, medição adicional ou projeto executivo.	Relatório de decisão.	Responsável, data e condicionantes registrados.

Fonte: Elaboração própria (2026).

As etapas formam portas de decisão. O protocolo pode encerrar a análise antes da simulação quando a triagem identifica vento insuficiente, obstáculo intransponível, ausência de local seguro para torre ou incompatibilidade regulatória. Esse encerramento não é fracasso: evita custos de modelagem e compra sobre uma alternativa sem condições básicas.

Quando o dado obrigatório para recomendação não estiver disponível, o FERO permite simular faixas, mas a saída deve ser denominada triagem ou análise condicional. Valores de catálogo não podem ser apresentados como medições locais, e médias anuais não substituem séries na avaliação de confiabilidade.

A recomendação segue uma hierarquia. Primeiro, verifica-se segurança e disponibilidade de dados. Depois, avaliam-se energia e potência; em seguida, cargas críticas e armazenamento; por fim, economia e ambiente. Uma configuração tecnicamente insegura não se torna recomendável por apresentar retorno financeiro favorável.

A classe subdimensionado indica que pelo menos uma meta obrigatória não foi cumprida. A recomendação precisa distinguir causa: recurso insuficiente, rotor pequeno, limite de potência, bateria insuficiente, demanda excessiva ou gestão inadequada. A classe adequado exige cumprimento das metas, desempenho robusto no cenário conservador definido pelo usuário e custos compatíveis. A classe superdimensionado indica excesso ou custo persistente sem uso previsto; não é sinônimo de alta qualidade.

Os limiares não são universais. Uma residência com iluminação e comunicação pode aceitar poucas horas de déficit; refrigeração de

leite, ventilação animal ou equipamentos médicos podem exigir disponibilidade muito maior. O FERRO registra meta, justificativa, responsável e data, preservando o julgamento contextual.

Cada aplicação deve produzir um conjunto mínimo: formulário preenchido; séries brutas; registro de tratamento; curva do aerogerador; cotações; arquivo do modelo; conjunto de parâmetros; resultados; checklist de testes; e relatório de decisão. Os arquivos recebem identificador de propriedade, versão e data. Alterações em equações e limiares exigem nova versão.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo partiu do problema de integrar variáveis técnicas, econômicas, ambientais e organizacionais na decisão sobre energia eólica off-grid em pequenas propriedades rurais. O projeto inicialmente híbrido foi delimitado à fonte eólica, decisão que permitiu aprofundar a relação cúbica com o vento, a curva de potência, a intermitência e o papel do armazenamento.

A questão de pesquisa foi respondida por meio do desenvolvimento do FERRO, framework fundamentado em Dinâmica de Sistemas que conecta seis módulos: geração eólica; demanda; balanço e bateria; resultado financeiro; impacto ambiental; e indicadores e decisão. O produto organiza dados, equações, cenários, validação e recomendações em um processo auditável.

A pré-validação computacional confirmou a capacidade do modelo de diferenciar situações. No cenário conservador, a cobertura de 75,3% caracterizou subdimensionamento. No provável, a cobertura de 99,8%, com déficit de 3,7 kWh, caracterizou adequação à meta ilustrativa. No favorável, a ausência de déficit acompanhada de

1.102,7 kWh de excedente caracterizou superdimensionamento para a demanda representada. O cenário de expansão mostrou que crescimento de 40% da carga reduz a cobertura para 85,3%, enquanto eficiência e deslocamento de cargas eliminaram o déficit no cenário específico.

O experimento também mostrou retornos marginais decrescentes do armazenamento e a inadequação de médias agregadas para avaliar confiabilidade. O balanço mensal positivo coexistiu com déficit horário. A bateria de 7,2 kWh elevou a cobertura, mas duplicá-la para 14,4 kWh proporcionou pequeno ganho adicional. Assim, a decisão deve localizar a causa do déficit antes de ampliar ativos.

Sob parâmetros exclusivamente ilustrativos e comparação com tarifa da rede, a alternativa apresentou LCOE de R\$ 3,16/kWh, payback simples líquido de 42,5 anos e ROI negativo em 20 anos. A evidência recomenda cautela, não rejeição genérica. Em local isolado, a referência econômica correta pode ser diesel, extensão da rede, perda de produção ou valor da autonomia. A contribuição do modelo é obrigar que essa referência seja declarada.

No plano científico, a pesquisa combina Dinâmica de Sistemas e energia eólica rural em uma hipótese integrada, aproximando campos de engenharia, gestão e desenvolvimento rural. No plano metodológico, estabelece rastreabilidade entre fonte do dado, variável, equação, indicador e decisão, além de separar verificação estrutural, pré-validação computacional e validação externa.

A principal limitação é a ausência de dados primários preenchidos. A série de vento e o perfil de demanda utilizados são sintéticos e os custos são hipóteses. Consequentemente, os números não devem

ser generalizados para Santo Ângelo, para o Rio Grande do Sul ou para uma propriedade específica.

O modelo simplifica curvas elétricas e mecânicas, temperatura, envelhecimento, degradação por ciclos, falhas, qualidade da energia, controle transitório, ruído, estrutura e licenciamento. O módulo ambiental restringe-se a emissões operacionais evitadas e não constitui avaliação de ciclo de vida. O módulo econômico depende da alternativa de referência e não monetiza todos os benefícios ou riscos.

Recomenda-se aplicar o instrumento a propriedades com perfis distintos, coletar vento e demanda, calibrar o modelo e comparar previsões a resultados observados. Entrevistas com produtores, extensionistas e projetistas podem validar linguagem, critérios e utilidade da classificação.

Também se recomenda construir uma interface web ou aplicativo local com importação de séries, rastreabilidade de parâmetros, painel de incerteza e geração automática de relatório. A otimização multicritério poderá ser adicionada depois que dados de campo permitirem calibrar objetivos e restrições. Por fim, análises de ciclo de vida e estudos de justiça energética podem ampliar a avaliação ambiental e social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBEY, C.; JOOS, G. Coordination of distributed storage with wind energy in a rural distribution system. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 2007. Conference Record [...]. New Orleans: IEEE, 2007. p. 1087-1092. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2007.169>.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída [...]. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 18 ago. 2026.

CROOK, P.; PÉREZ, P.; LAURENCE-CHASEN, J. D.; PODGORNÝ, S.; LOCKSHIN, J.; PHILLIPS, C. Evaluating opportunity for distributed wind energy in rural and agricultural areas. Environmental Research Letters, v. 20, n. 11, art. 114055, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae13bc>.

DHAR, P.; CHAKRABORTY, N. Operation of two mechanically driven gravity energy storage systems using one wind turbine for uninterrupted energy supply in an isolated microgrid. International Journal of Energy Research, v. 46, n. 13, p. 18866-18878, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.8446>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). EPE publica o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2026. Rio de Janeiro, 3 jun. 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico-nacional-2026>. Acesso em: 18 ago. 2026.

ESMAEILIAN, H. R.; FADAEINEDJAD, R. Resolving power quality issues raised by aerodynamic aspects of wind turbine in isolated microgrids using fuel cell/electrolyzer system. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 7, n. 3, p. 1274-1283, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2544102>.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.

FORRESTER, J. W. System dynamics, systems thinking, and soft OR. System Dynamics Review, v. 10, n. 2-3, p. 245-256, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1002/sdr.4260100211>.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GRISALES-NOREÑA, L. F.; VEGA, H. P.; MONTOYA, O. D.; BOTERO-GÓMEZ, V.; SANIN-VILLA, D. Cost optimization of AC microgrids in grid-connected and isolated modes using a population-based genetic algorithm for energy management of distributed wind turbines. Mathematics, v. 13, n. 5, art. 704, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13050704>.

HEMMATI, R.; AZIZI, N.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. S. Decentralized frequency-voltage control and stability enhancement of standalone wind turbine-load-battery. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 102, p. 1-10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.04.021>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable capacity statistics 2026. Abu Dhabi: IRENA, 2026. Disponível em: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2026/Apr/Near-700-GW-Surge-in-2025-Proves-Renewable-Energy-Resilience>. Acesso em: 18 ago. 2026.

KUMAR, D.; MATHUR, H. D.; BHANOT, S.; BANSAL, R. C. Forecasting of solar and wind power using LSTM RNN for load frequency control in

isolated microgrid. International Journal of Modelling and Simulation, v. 41, n. 4, p. 311-323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/02286203.2020.1767840>.

LIU, M.; GUO, L.; WANG, C.; ZHAO, B.; ZHANG, X.; LIU, Y. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage. Automation of Electric Power Systems, v. 36, n. 15, p. 19-24, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1026.2012.15.004>.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Brasília, DF, 22 fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>. Acesso em: 18 ago. 2026.

NDIAYE, A.; ALI, M. E.; SOW, S.; KÉBÉ, C. M. F.; SAMBOU, V.; NDIAYE, P. A. Design of a low-cost wind turbine controller for decentralized rural electrification through the small wind turbine. In: Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer, 2019. v. 296, p. 116-127. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34863-2_11.

NOTTON, G.; MUSELLI, M.; POGGI, P.; LOUCHE, A. Decentralized wind energy systems providing small electrical loads in remote areas. International Journal of Energy Research, v. 25, n. 2, p. 141-164, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.670>.

PRAKASH, S. V. J.; DHAL, P. K. Cost optimization and optimal sizing of standalone biomass/diesel generator/wind turbine/solar microgrid

system. AIMS Energy, v. 10, n. 4, p. 665-694, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2022032>.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RICHARDSON, G. P. Problems with causal-loop diagrams. System Dynamics Review, v. 2, n. 2, p. 158-170, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1002/sdr.4260020207>.

SANTHOSAM, P. P.; U, S.; KARTIKEYAN, A. Multimode control of a variable-speed wind energy system coupled to standalone DC microgrid. Results in Engineering, v. 30, art. 110000, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110000>.

SCOPUS. Base bibliográfica. Amsterdam: Elsevier, 2026. Exportação de 52 registros realizada em 23 jun. 2026. Arquivo CSV fornecido pelo pesquisador.

SIMONETTO, E. de O.; TRENTIN, M. G.; COSTA, V. M. F.; SILVEIRA, A. Modelagem de sistemas de geração de eletricidade para apoiar análises de sustentabilidade energética: uma aplicação em Vensim. Exacta, v. 14, n. 3, p. 385-402, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v14n3.6404>.

STERMAN, J. D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

STERMAN, J. D. System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of

Technology, Engineering Systems Division, 2002. (ESD Working Paper Series, ESD-WP-2003-01.13-ESD Internal Symposium).

SU, J.; DEHGHANIAN, P.; VERGARA, B.; KAPOURCHALI, M. H. An energy management system for joint operation of small-scale wind turbines and electric thermal storage in isolated microgrids. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 2021. Proceedings [...]. College Station: IEEE, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAPS52732.2021.9654467>.

TANVIR, A. A.; MERABET, A. Artificial neural network and Kalman filter for estimation and control in standalone induction generator wind energy DC microgrid. *Energies*, v. 13, n. 7, art. 1743, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071743>.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Visualizing bibliometric networks. In: DING, Y.; ROUSSEAU, R.; WOLFRAM, D. (ed.). *Measuring scholarly impact*. Cham: Springer, 2014. p. 285-320. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13.

VASUDEVAN, K. R.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; VENUGOPAL, G.; EKANAYAKE, J. B.; TIONG, S. K. Hierarchical frequency control framework for a remote microgrid with pico hydel energy storage and wind turbine. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 127, art. 106666, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106666>.

WOOD, D. Small wind turbines. In: Wind Engineering, v. 34, n. 3, p. 241-254, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1260/0309-524X.34.3.241>.

ZHANG, J.; ZHANG, Z.; HU, S.; LI, Y.; LIN, J. A flexible power distribution strategy with wind turbine generator and energy storage for frequency regulation in isolated microgrid. Transactions of China Electrotechnical Society, v. 37, n. 15, p. 3767-3780, 2022. DOI: <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211032>.

¹ Doutor. Professor do Programa de Pós-Graduação em Gestão Estratégica de Organizações, URI – Santo Ângelo.

² Mestrando MESTRADO EM GESTÃO ESTRATÉGICA DE ORGANIZAÇÕES URI-Santo Angelo

³ Mestrando MESTRADO EM GESTÃO ESTRATÉGICA DE ORGANIZAÇÕES URI-Santo Angelo

⁴ Mestrando MESTRADO EM GESTÃO ESTRATÉGICA DE ORGANIZAÇÕES URI-Santo Angelo

⁵ Mestrado em Gestão de Organizações Públicas pela Universidade Federal de Santa Maria UFSM-Santa Maria

⁶ Mestrado em Gestão de Organizações Públicas pela Universidade Federal de Santa Maria UFSM-Santa Maria