

VIABILIDADE DE PROJETOS DE GERAÇÃO EÓLICA EM ÁREAS URBANAS: ANÁLISE DO POTENCIAL DE VENTO E ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

George Lucas da Silva Cruz¹

Stênio de Sousa Coelho²

RESUMO: Este trabalho tem como propósito analisar a viabilidade da geração eólica em áreas urbanas brasileiras, considerando o potencial de vento, aspectos econômicos e impactos ambientais. A pesquisa busca investigar o comportamento anemológico em centros urbanos, avaliar tecnologias de micro e minigeração adequadas ao ambiente urbano e examinar a viabilidade econômica desses sistemas. A metodologia adotada consiste em revisão bibliográfica sistemática de estudos publicados entre 2020 e 2025, análise de documentos institucionais da ANEEL, EPE, ABDI e REN21, além de avaliação comparativa de dados sobre velocidades de vento, custos de implantação e desempenho tecnológico. Os resultados indicam que cidades brasileiras apresentam microzonas com velocidades entre 3,5 m/s e 5,5 m/s, adequadas para turbinas de eixo vertical, com potencial de redução de demanda energética entre 10% e 40%, payback entre 6 e 12 anos e redução de emissões de CO₂ superior a 95% em comparação com fontes convencionais. Assim, o estudo evidencia que a 9166 microgeração eólica urbana representa uma estratégia viável e promissora para conciliar eficiência energética, sustentabilidade ambiental e diversificação da matriz elétrica distribuída no contexto urbano brasileiro.

Palavras-Chave: Energia eólica urbana. Microgeração distribuída. Turbinas de eixo vertical. Eficiência energética. Sustentabilidade urbana.

1 INTRODUÇÃO

A urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas tem intensificado a busca global por fontes alternativas de energia, especialmente aquelas que promovam baixo impacto ambiental e elevada eficiência. Nesse cenário, a energia eólica se consolidou como uma das soluções mais relevantes para diversificação da matriz elétrica mundial, destacando-se pela elevada disponibilidade e reduzida emissão de poluentes. No Brasil, observa-se avanço significativo na instalação de parques eólicos, sobretudo nas regiões Nordeste e Sul, porém ainda há lacunas importantes em relação ao aproveitamento desse potencial dentro dos centros

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Santo Agostinho, Teresina – Piauí.

² Mestre em Engenharia Elétrica - Controle e Automação de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal do Piauí, docente no Centro Universitário Santo Agostinho, Teresina – Piauí.

urbanos (Tolmasquim, 2016; Lucena Santos; Araújo, 2023).

A aplicação da energia eólica em ambientes urbanos apresenta desafios técnicos decorrentes da complexa morfologia das cidades. Edifícios, vias e obstáculos naturais intensificam a turbulência e reduzem a previsibilidade dos fluxos de vento, dificultando o desempenho de turbinas convencionais. Estudos apontam que turbinas de eixo vertical (VAWT), devido à sua tolerância a variações de direção e baixa velocidade do vento, podem oferecer melhor desempenho nesses ambientes. Assim, compreender o comportamento dos ventos urbanos é etapa essencial para a correta avaliação da viabilidade de geração distribuída eólica (Duarte; Lacerda, 2022; Barra; Teixeira, 2022; Oliveira, 2024).

Pesquisas aplicadas em grandes cidades brasileiras revelam que edificações elevadas podem formar “corredores de vento”, concentrando fluxos capazes de gerar energia suficiente para micro ou minigeração (Borges, 2020; Silva; Abreu-Harbich, 2017). Estudos realizados em São Paulo demonstram que velocidades médias entre 3,9 e 5,0 m/s, mesmo inferiores às observadas em parques tradicionais, podem resultar em produções anuais superiores a 4.000 kWh, confirmando o potencial da energia eólica urbana. Tais dados reforçam a relevância de investigações voltadas à mensuração precisa do potencial eólico em espaços edificados (Hussni, 2020). 9167

No campo econômico, embora a instalação de turbinas urbanas envolva custos iniciais expressivos devido à necessidade de adaptações estruturais e à importação de equipamentos, análises de longo prazo apontam que a redução das perdas de distribuição e a proximidade entre geração e consumo contribuem para compensar esses investimentos. Além disso, edificações com sistemas integrados de energia renovável tendem a aumentar seu valor comercial, fortalecendo o caráter estratégico da geração eólica urbana (Costa, 2024).

Do ponto de vista ambiental, a adoção de turbinas em áreas já urbanizadas reduz significativamente o impacto sobre ecossistemas naturais, evitando processos de desmatamento, interferência em rotas de fauna e ocupação de grandes áreas (Moreira et al., 2020; Vian et al., 2021). A combinação de energia solar e eólica em sistemas híbridos torna-se ainda mais interessante, ampliando a autonomia energética e contribuindo para a construção de cidades mais sustentáveis. Nesse sentido, experiências internacionais demonstram que políticas adequadas facilitam a integração estética, sonora e estrutural das turbinas ao ambiente urbano (Lucena Santos; Araújo, 2023).

Dessa forma, o estudo busca responder à seguinte questão central: quais são os desafios técnicos, econômicos e ambientais que influenciam a viabilidade da geração eólica em áreas urbanas, e como superá-los para permitir sua aplicação prática? Parte-se da hipótese de que a adoção de turbinas adequadas ao ambiente urbano, aliada a incentivos regulatórios e ao mapeamento preciso do potencial de vento, torna a geração eólica urbana viável, proporcionando ganho energético significativo sem comprometer a segurança, o conforto ou a paisagem arquitetônica das cidades.

Portanto, este trabalho justifica-se pela necessidade de integrar inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e planejamento energético, contribuindo para a expansão de modelos urbanos mais resilientes e inteligentes. O estudo visa fornecer subsídios para engenheiros, pesquisadores, formuladores de políticas públicas e gestores do setor elétrico, de modo a fortalecer a transição para cidades que utilizem fontes renováveis de maneira eficiente, economicamente viável e ambientalmente responsável. Assim, espera-se colaborar para o avanço científico e social no campo da energia eólica urbana e da engenharia elétrica.

2 DESENVOLVIMENTO

9168

Este estudo configura-se como uma pesquisa bibliográfica qualitativa, conduzida por meio de uma análise crítica e interpretativa da literatura acerca da viabilidade da geração eólica em áreas urbanas. A abordagem foi escolhida por permitir a compreensão integrada das múltiplas dimensões que influenciam a adoção da micro e minigeração eólica, contemplando aspectos anemológicos, tecnológicos, econômicos, ambientais e regulatórios.

Para isso, foram selecionados livros, artigos científicos e dissertações disponíveis em bases como *Scopus*, *Google Scholar*, *ScienceDirect* e *SciELO*, priorizando publicações entre 2020 e 2025. Complementarmente, foram analisados documentos institucionais oriundos de órgãos estratégicos, como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial), REN21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*) e EPE (Empresa de Pesquisa Energética), além da legislação pertinente à Geração Distribuída, com destaque para a Lei nº 14.300/2022. A seleção do material buscou garantir relevância, atualidade e aderência ao tema.

Após a coleta, os conteúdos foram organizados em categorias temáticas: potencial anemológico, tecnologias de micro e minigeração, custos e viabilidade econômica, impactos

ambientais e urbanísticos, bem como barreiras regulatórias e oportunidades futuras. Essa categorização permitiu identificar convergências e lacunas na literatura, possibilitando a realização de uma síntese interpretativa baseada na comparação entre evidências empíricas, recomendações técnicas e diretrizes normativas. O rigor metodológico empregado assegura que as conclusões apresentadas estejam fundamentadas em bases sólidas, contribuindo para o avanço científico e para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de geração distribuída.

2.1 Potencial Anemológico em Áreas Urbanas Brasileiras

O estudo do comportamento do vento em ambientes urbanos tem adquirido grande relevância nos últimos anos, sobretudo devido ao crescimento das demandas energéticas e à busca por fontes renováveis de baixo impacto. Pesquisas recentes mostram que o regime de ventos nas cidades é profundamente influenciado pela morfologia urbana, pela rugosidade do terreno e pelo sombreamento aerodinâmico causado por edificações altas, o que resulta em padrões complexos de turbulência e aceleração de fluxos (Silva; Abreu-Harbich, 2017; Borges, 2020).

Em levantamentos realizados em capitais brasileiras, velocidades médias entre 3,5 m/s e 5,2 m/s foram registradas em regiões com corredores de vento e topo de edifícios, valores considerados adequados para aerogeradores de pequena escala (Tabela 1). O Atlas Eólico Brasileiro de 2017, publicado pelo CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), reforça que mesmo em zonas densamente construídas existem microáreas com potencial subaproveitado (Duarte; Lacerda, 2022).

9169

Tabela 1. Velocidades médias de vento em áreas urbanas brasileiras

Cidade	Velocidade Média (m/s)	Localização de Medição	Potencial
São Paulo	3,8 - 4,5	Topos de edifícios (>40m)	Moderado
Belo Horizonte	3,5 - 4,2	Corredores de vento	Moderado
Florianópolis	4,5 - 5,2	Áreas litorâneas	Alto
Fortaleza	5,0 - 6,8	Fachadas voltadas ao mar	Muito Alto
João Pessoa	4,8 - 5,5	Orla e edifícios costeiros	Alto

Fonte: Adaptado de Duarte e Lacerda (2022), Silva e Abreu-Harbich (2017), Borges (2020).

Entretanto, o potencial urbano apresenta grande variabilidade espacial, exigindo estudos específicos de *micrositing* antes da implantação. Trabalhos como o de Hussni (2020), realizado no centro de São Paulo, demonstram que a heterogeneidade do tecido urbano gera "ilhas de vento" que podem concentrar velocidades até 40% superiores às áreas ao redor. Essa característica abre possibilidades estratégicas para projetos de microgeração distribuída, principalmente em edifícios comerciais e institucionais.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022) destaca que a geração descentralizada será uma das principais alternativas para aliviar a carga sobre as redes de distribuição, tornando os centros urbanos mais resilientes diante do aumento da demanda elétrica. A REN₂₁ (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*), em seus relatórios de 2021 e 2023, reforça que a energia eólica urbana integra o conjunto de tecnologias essenciais para cidades sustentáveis e de baixo carbono. No Brasil, o avanço regulatório proporcionado pelo Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) fortaleceu a inserção de fontes renováveis no espaço urbano, embora a energia solar ainda domine o setor.

Ferramentas avançadas como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tornaram-se essenciais para mapear padrões de escoamento em microescala urbana. Pesquisas recentes aplicadas em edifícios de São Paulo, Belo Horizonte e Florianópolis demonstram que simulações tridimensionais permitem identificar zonas de aceleração que não seriam detectadas apenas com anemômetros convencionais (Silva *et al.*, 2023). Assim, compreender o comportamento dos ventos urbanos é fundamental para diversificar as fontes renováveis, possibilitando complementariedade sazonal e reduzindo a dependência de grandes centrais geradoras. O potencial eólico urbano, apesar de limitado em comparação aos parques de grande porte, apresenta viabilidade real quando analisado de forma localizada e técnica.

9170

2.2 Tecnologias de Micro e Minigeração Eólica para Uso Urbano

O desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas de pequeno porte tem avançado de forma significativa a partir de 2018, impulsionado pela demanda por soluções energéticas descentralizadas e mais acessíveis. Aerogeradores verticais, como os modelos *Darrieus* e *Savonius*, tornaram-se particularmente adequados para ambientes urbanos por apresentarem melhor desempenho em fluxos turbulentos e multidirecionais. Estudos recentes indicam que turbinas de eixo vertical podem operar com eficiência em velocidades entre 2 m/s e 6 m/s,

típicas de grandes centros urbanos brasileiros, apresentando baixa emissão sonora e maior segurança estrutural (Duarte; Lacerda, 2022).

Tabela 2. Comparação entre tecnologias de microturbinas para uso urbano

Característica	VAWT Darrieus	VAWT Savonius	HAWT Pequeno Porte
Velocidade de partida	2,5 - 3,5 m/s	2,0 - 3,0 m/s	3,0 - 4,0 m/s
Eficiência (%)	35 - 40	25 - 30	40 - 45
Ruído (dB)	35 - 40	30 - 35	45 - 55
Adequação urbana	Alta	Muito Alta	Média
Custo relativo	Médio	Baixo	Médio-Alto
Captação multidirecional	Sim	Sim	Não

Fonte: Adaptado de Duarte e Lacerda (2022), ABDI (2022).

A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2022) também destaca a importância dessas tecnologias no contexto da Indústria 4.0, sobretudo devido à integração com sensores, monitoramento remoto e sistemas inteligentes de controle. Além das turbinas tradicionais, surgem propostas inovadoras que combinam design arquitetônico e geração de energia. Exemplos incluem fachadas ativas, microturbinas integradas a parapeitos e sistemas instalados em topo com efeito túnel de vento, inspirados em edificações internacionais como a Pearl River Tower (Duarte; Lacerda, 2022).

9171

No Brasil, pesquisas conduzidas por Hussni (2020) e Silva e Abreu-Harbich (2017) analisam modelos híbridos que integram painéis solares e microturbinas, maximizando a produção ao longo do dia. Tais soluções têm sido consideradas economicamente atrativas para condomínios, edifícios corporativos e instituições públicas, permitindo autossuficiência parcial da demanda elétrica. A integração com sistemas fotovoltaicos produz um perfil complementar de geração: enquanto a solar concentra-se durante o dia, a eólica pode operar continuamente, inclusive no período noturno, reduzindo oscilações e aumentando a confiabilidade do sistema híbrido (Moreira *et al.*, 2022).

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), por meio de normas atualizadas entre 2021 e 2023, estabelece padrões de segurança, certificação e conexão para aerogeradores de até 75 kW, garantindo que as tecnologias implantadas atendam às regulamentações de

qualidade e proteção. Relatórios técnicos de 2022 apontam um crescimento expressivo no número de equipamentos homologados para microgeração. Outro avanço importante está no uso de materiais compostos mais leves, resistentes e com baixo desgaste, permitindo maior durabilidade e menor custo de manutenção (Duarte; Lacerda, 2022). Assim, as tecnologias micro e minieólicas representam não apenas uma alternativa viável para geração em cidades, mas também um elemento estratégico para o avanço da transição energética, alinhando inovação, segurança e eficiência.

2.3 Custos, Benefícios e Viabilidade Econômica da Geração Eólica Urbana

Os custos de implantação de micro e mini aerogeradores urbanos variam conforme a tipologia da turbina, a altura da instalação e o sistema de integração elétrica. Em média, investimentos entre R\$ 15 mil e R\$ 40 mil têm sido registrados em instalações residenciais e comerciais de pequeno porte no Brasil, conforme relatórios recentes da EPE (2022) e análises de mercado publicadas entre 2021 e 2024. Embora o custo inicial ainda represente uma barreira significativa, a redução gradativa no preço dos equipamentos e a maturidade da indústria nacional apontam para maior competitividade nos próximos anos (Duarte; Lacerda, 2022).

9172

Tabela 3 – Análise comparativa de viabilidade econômica

Parâmetro	Sistema Residencial	Sistema Comercial	Sistema Híbrido
Investimento inicial	R\$ 15.000 - R\$ 25.000	R\$ 30.000 - R\$ 50.000	R\$ 40.000 - R\$ 70.000
Redução de demanda anual	10% - 15%	15% - 25%	25% - 40%
Payback estimado (anos)	10 - 12	6 - 9	8 - 10
Economia anual (R\$)	R\$ 1.800 - R\$ 2.500	R\$ 4.500 - R\$ 7.000	R\$ 5.500 - R\$ 9.000
Vida útil (anos)	15 - 20	15 - 20	15 - 20

Fonte: Elaborado com base em EPE (2022), Duarte e Lacerda (2022), Moreira *et al.* (2020).

De acordo com a REN21 (2023), o custo nivelado de energia (LCOE) de turbinas urbanas tem se aproximado de valores atrativos, especialmente quando a produção é destinada ao autoconsumo. Estudos recentes mostram que sistemas de microgeração eólica podem reduzir entre 10% e 25% da demanda elétrica anual de residências, e até 30% em edifícios

comerciais, dependendo das condições locais de vento (Moreira *et al.*, 2020; Hussni, 2020). Em cenários de tarifas elevadas — especialmente em capitais brasileiras — o retorno do investimento estimado situa-se entre 6 e 12 anos.

A Lei nº 14.300/2022, que regulamenta a geração distribuída, preservou benefícios tarifários para sistemas conectados à rede até 2045, fortalecendo a viabilidade econômica no médio prazo. A regulamentação garante segurança jurídica ao consumidor e incentiva a expansão da geração distribuída, embora ainda não existam normas específicas para microturbinas urbanas (ANEEL, 2023). Além disso, mecanismos de apoio governamental e programas de incentivo industrial, como os relatórios ABDI de 2022, aponta para oportunidades de expansão da cadeia produtiva nacional.

Outra dimensão econômica relevante é o impacto ambiental positivo, que gera valor agregado em empreendimentos imobiliários. Pesquisas recentes demonstram que edifícios equipados com sistemas de geração renovável apresentam aumento de valorização entre 6% e 12%, além de redução significativa dos custos operacionais ao longo da vida útil (Duarte; Lacerda, 2022). Relatórios da REN21 (2023) ressaltam que empresas alinhadas às metas ESG (*Environmental, Social and Governance*) tendem a investir em tecnologias limpas, criando demanda crescente por soluções eólicas urbanas.

Contudo, a viabilidade econômica deve ser analisada de forma individualizada, considerando fatores como regime de ventos, sombreamento aerodinâmico e disponibilidade de espaço. A literatura destaca que projetos mal dimensionados podem apresentar baixo desempenho e prolongar o retorno econômico, especialmente em áreas urbanas de baixa velocidade média de vento (Silva; Abreu-harbich, 2017). Assim, para assegurar resultados satisfatórios, recomenda-se a realização de estudos preliminares de vento, análise de simulações computacionais (CFD) e inspeções *in loco*. Quando adequadamente planejados, os sistemas eólicos urbanos podem representar excelente alternativa para reduzir custos energéticos, valorizar imóveis e fomentar práticas sustentáveis no meio urbano.

2.4 Impactos Ambientais, Urbanísticos e Sociais

O uso da energia eólica em áreas urbanas contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo cidades mais sustentáveis e alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU. Estudos recentes, especialmente os

relatórios REN₂₁ (2022; 2023), demonstram que a diversificação da matriz elétrica urbana fortalece a resiliência climática e diminui a pressão sobre usinas termoelétricas. A inserção de turbinas de pequeno porte também promove ganhos ambientais indiretos, como diminuição da demanda de pico e estímulo à cultura do consumo consciente.

Tabela 4 – Comparação de impactos ambientais entre fontes energéticas urbanas

Aspecto	Microeólica	Solar Fotovoltaica	Rede Convencional
Emissões CO ₂ (g/kWh)	5 - 15	20 - 50	450 - 800
Área ocupada (m ² /kW)	0,5 - 2,0	6 - 10	N/A
Impacto visual	Moderado	Baixo	Variável
Ruído operacional (dB)	30 - 45	< 5	N/A
Vida útil (anos)	15 - 20	25 - 30	N/A
Reciclagem de materiais	85% - 90%	90% - 95%	N/A

Fonte: Elaborado com base em REN₂₁ (2023), EPE (2023), Duarte e Lacerda (2022).

A EPE (2023) aponta que, em cenários urbanos densos, o uso combinado de solar e eólica é capaz de reduzir até 40% do impacto anual de carbono em edificações corporativas. Por utilizar estruturas já existentes, como telhados, varandas e fachadas, a microgeração eólica evita a necessidade de áreas destinadas exclusivamente à geração e reduz emissões relacionadas à construção civil. Além disso, turbinas de pequeno porte operam com baixas rotações, o que minimiza impactos sobre aves e morcegos, diferentemente de turbinas de grande porte.

Além dos benefícios ambientais, projetos de energia eólica urbana impactam positivamente a dinâmica social, promovendo educação ambiental e fortalecendo a inovação tecnológica local. Instituições públicas e universidades têm instalado turbinas de pequeno porte para fins didáticos e de pesquisa, ampliando a formação técnica e fomentando novos mercados. A integração de turbinas com sistemas de monitoramento digital baseados em IoT (Internet das Coisas) permite que autogestão energética seja realizada em tempo real, otimizando o fluxo de potência, reduzindo desperdícios e ampliando a segurança operacional (Marengo, 2024).

Entretanto, o planejamento urbano deve considerar fatores importantes como impacto visual, vibração e ruído, ainda que microturbinas modernas apresentem níveis inferiores a 40 dB, conforme estudos mais recentes do setor (Duarte; Lacerda, 2022). A participação da

comunidade no processo decisório também é fundamental para evitar rejeição social e promover aceitação da tecnologia. Questões como sombreamento do vento por edifícios, áreas de turbulência severa e riscos estruturais em instalações inadequadas são amplamente discutidas pela ANEEL em documentos regulatórios desde 2021.

A adoção de normas de certificação, avaliação técnica e manutenção periódica é essencial para garantir segurança e desempenho. Municípios precisam estabelecer regras claras para altura, ruído, vibração e estética urbana (ANEEL, 2023). Ao incorporar sistemas de microgeração eólica a escolas, hospitais, prédios públicos e conjuntos habitacionais, municípios podem reduzir custos de operação e demonstrar o potencial da tecnologia para a sociedade. Assim, a geração eólica urbana deve ser tratada como parte de um planejamento integrado, capaz de harmonizar estética, sustentabilidade e funcionalidade no ambiente urbano contemporâneo.

2.5 Barreiras, Desafios Regulatórios e Oportunidades Futuras

A expansão da energia eólica urbana enfrenta algumas barreiras estruturais, incluindo custos iniciais elevados, baixa padronização tecnológica e lacunas regulatórias específicas para pequenos aerogeradores. Embora a Lei nº 14.300/2022 tenha representado grande avanço para a geração distribuída, ainda não há regulamentação detalhada voltada exclusivamente para micro e minigeração eólica urbana. A ANEEL (2023) reconhece a necessidade de normas mais claras sobre certificação, padrões de ruído, requisitos de instalação e interface com a rede, especialmente em regiões metropolitanas com elevada densidade de construções.

Além disso, a falta de mão de obra especializada e empresas certificadas para instalação reduz a confiança e a expansão da tecnologia no mercado nacional. A ABDI (2022) destaca a necessidade de programas de capacitação profissional e fortalecimento da cadeia produtiva nacional. Outro desafio é a adequação das estruturas prediais: muitos edifícios antigos não foram projetados para suportar cargas dinâmicas geradas por turbinas, exigindo reforços estruturais que elevam custos e limitam a aplicabilidade da tecnologia.

Outros desafios importantes envolvem a variabilidade do vento urbano, que ainda é pouco estudada no Brasil em escala microclimática. Apesar de avanços como os estudos de Hussni (2020) e Borges (2020), a literatura nacional carece de mapeamentos mais extensos e atualizados. Pesquisadores da EPE (2022) apontam que simulações computacionais urbanas

(CFD) são essenciais, mas ainda pouco utilizadas devido ao custo e à complexidade técnica. Estudos recentes apontam que turbinas mal dimensionadas podem sofrer desgaste prematuro ou desempenho muito inferior ao esperado (Oliveira, 2024). Do ponto de vista econômico, a competição direta com a energia solar — mais barata e amplamente difundida — também dificulta a adoção da microeólica, exigindo políticas de incentivo específicas.

Apesar desses entraves, as oportunidades são promissoras, pois relatórios da REN21 (2023) mostram que a microgeração eólica urbana deve crescer globalmente impulsionada pela digitalização, por dispositivos inteligentes e pela busca por cidades de baixo carbono. A integração com redes inteligentes, sensores IoT e inteligência artificial amplia o potencial de eficiência e monitoramento. No Brasil, a ampliação dos incentivos para eficiência energética, novos editais de pesquisa e a possibilidade de integração híbrida (solar + eólica) tornam a tecnologia cada vez mais atraente.

Cidades de médio e grande porte já adotam metas de carbono zero e buscam soluções sustentáveis para edifícios públicos, mobilidade e infraestrutura urbana. A combinação entre políticas públicas, incentivos econômicos, redução de custos de tecnologias renováveis e crescente consciência ambiental cria terreno fértil para a expansão da eólica urbana no país.

A EPE (2022) projeta forte crescimento da geração distribuída renovável até 2032, especialmente com o alinhamento do Brasil às metas climáticas internacionais e à Lei 14.300/2022. Com planejamento técnico adequado, regulamentação robusta e participação ativa do setor público, a energia eólica urbana tende a ocupar papel estratégico na transição energética brasileira.

9176

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise sistemática da literatura identificou cinco dimensões centrais relacionadas à viabilidade da microgeração eólica urbana no Brasil: potencial anemológico, tecnologias disponíveis, viabilidade econômica, impactos ambientais e urbanísticos, além de desafios regulatórios. Os resultados sintetizam as principais evidências encontradas, estabelecendo conexões entre aspectos técnicos, econômicos, ambientais e normativos que determinam a aplicabilidade dessa tecnologia no ambiente urbano brasileiro.

A análise anemológica evidenciou que, embora o vento urbano apresente elevada variabilidade espacial, existem microzonas com potencial significativo para microgeração

eólica. A síntese dos estudos revelou velocidades médias entre 3,5 m/s e 5,5 m/s em grandes centros brasileiros, especialmente em topo de edifícios acima de 40 metros, corredores de vento e regiões litorâneas, valores que se alinham ao desempenho mínimo exigido para turbinas de eixo vertical e pequeno porte (Silva; Abreu-Harbich, 2017; Borges, 2020). As pesquisas demonstram a formação de "ilhas de vento", com acelerações até 40% superiores à média local, fenômeno documentado por Hussni (2020) no centro de São Paulo, onde a heterogeneidade do tecido urbano gera microambientes com concentrações significativas de velocidade.

Nesse sentido, cidades litorâneas como Florianópolis, Fortaleza e João Pessoa apresentam potencial particularmente elevado, com médias superiores a 4,8 m/s em áreas costeiras, enquanto São Paulo e Belo Horizonte registraram entre 3,8 m/s e 4,5 m/s em localidades específicas, indicando viabilidade técnica quando aplicadas metodologias adequadas de *micrositing* (Duarte; Lacerda, 2022; Borges, 2020). A utilização de modelagem CFD consolidou-se como ferramenta essencial, permitindo prever padrões tridimensionais de escoamento e identificar zonas de aceleração não detectáveis por anemômetros convencionais (SILVA et al., 2023). Fatores como orientação de ruas, vegetação, altura de edificações e ilhas de calor podem ampliar fluxos noturnos, fortalecendo a complementaridade temporal com energia solar e a relevância estratégica para sistemas híbridos de geração distribuída (Hussni, 2020; Borges, 2020; EPE, 2022).

9177

Quanto às tecnologias de micro e minigeração, os resultados apontam superioridade das turbinas de eixo vertical em ambientes urbanos, principalmente pela capacidade de operar sob fluxos turbulentos e multidirecionais. A comparação entre modelos Darrieus, Savonius e turbinas horizontais revelou que as VAWT oferecem melhor relação eficiência-ruído, operando entre 30 dB e 40 dB contra 45 dB a 55 dB das HAWT, além de menores velocidades de partida (2,0 m/s a 3,5 m/s), captação multidirecional e maior segurança estrutural (Oliveira, 2021; Duarte; Lacerda, 2022). O levantamento documental identificou crescimento de aproximadamente 47% nas certificações de microturbinas pela ANEEL entre 2021 e 2023, com destaque para modelos entre 500 W e 2 kW adequados a edificações residenciais e comerciais, refletindo amadurecimento do mercado nacional e fortalecimento da cadeia produtiva (ANEEL, 2023; ABDI, 2022).

Modelos híbridos, integrando geração solar e eólica, mostraram-se especialmente vantajosos, com curva de geração complementar que reduz variabilidade energética diária e

proporciona reduções de demanda da rede de até 40% em edificações bem posicionadas (Hussni, 2020; Silva; Abreu-Harbich, 2017; Moreira *et al.*, 2020). Inovações emergentes incluem turbinas integradas ao design arquitônico, materiais compostos avançados ampliando durabilidade de 15 a 20 anos, controladores MPPT otimizando conversão energética e integração com IoT permitindo monitoramento remoto e diagnóstico preditivo (Duarte; Lacerda, 2022; ABDI, 2022).

A avaliação econômica revelou que a microgeração eólica urbana pode alcançar indicadores de viabilidade competitivos, especialmente em ambientes de tarifas elevadas e consumo contínuo. Os dados compilados mostram investimentos iniciais entre R\$ 15 mil e R\$ 40 mil para sistemas de pequeno porte, com sistemas residenciais apresentando reduções de demanda entre 10% e 15%, *payback* de 10 a 12 anos e economia anual de R\$ 1.800 a R\$ 2.500, enquanto sistemas comerciais demonstram reduções de 15% a 25%, *payback* de 6 a 9 anos e economia de R\$ 4.500 a R\$ 7.000 (EPE, 2022; Duarte; Lacerda, 2022; Moreira *et al.*, 2020).

Sistemas híbridos apresentaram os melhores resultados, com reduções de até 40%, *payback* de 8 a 10 anos e economia anual de R\$ 5.500 a R\$ 9.000, principalmente em edificações com corredores de vento favoráveis e áreas para painéis fotovoltaicos. A manutenção anual mostrou baixo impacto financeiro, entre 2% e 4% do investimento inicial, devido à durabilidade de materiais compostos modernos e simplicidade mecânica das VAWT (Moreira *et al.*, 2020; EPE, 2022; REN21, 2023).

A valorização imobiliária representa dimensão econômica relevante, com edifícios equipados com geração renovável apresentando aumento de valor entre 6% e 12%, além de redução significativa dos custos operacionais ao longo da vida útil, particularmente em edificações corporativas e institucionais alinhadas às metas ESG (Duarte; Lacerda, 2022; REN21, 2023). A Lei nº 14.300/2022, preservando benefícios tarifários até 2045, foi identificada como fator determinante para fortalecer a viabilidade econômica e proporcionar segurança jurídica (ANEEL, 2023).

Assim, os resultados evidenciaram impactos ambientais positivos significativamente superiores aos da dependência exclusiva da rede elétrica convencional. A análise comparativa demonstrou emissões de CO₂ entre 5 g/kWh e 15 g/kWh para microeólica, contra 450 g/kWh a 800 g/kWh da rede convencional em horários de pico com acionamento de termelétricas, além de ocupação de área vantajosa (0,5 m² a 2,0 m² por kW) e taxa de reciclagem entre

85% e 90% (REN₂₁, 2023; EPE, 2023). O uso combinado de solar e eólica em cenários urbanos densos pode reduzir até 40% do impacto anual de carbono em edificações corporativas, aproveitando estruturas existentes e evitando áreas exclusivas para geração (EPE, 2023; REN₂₁, 2023). Microturbinas modernas operam com níveis sonoros inferiores a 40 dB, tornando-as compatíveis com zonas residenciais, e apresentam impacto minimizado sobre fauna devido às baixas rotações (Duarte; Lacerda, 2022).

Quanto aos benefícios sociais, a análise documental revelou que instituições públicas e universidades têm instalado sistemas eólicos para fins didáticos, ampliando formação técnica e fortalecendo cultura de eficiência energética, enquanto cidades com microgeração híbrida relataram maior resiliência durante falhas na rede (ABDI, 2022; EPE, 2022). A integração com IoT permite monitoramento em tempo real, otimização de fluxo de potência e diagnóstico preditivo, ampliando segurança e vida útil dos equipamentos (Moreira *et al.*, 2020). Entretanto, barreiras sociais persistem, incluindo impacto visual negativo em contextos históricos, preocupações com vibração estrutural, resistência em áreas sem tradição em renováveis e desinformação técnica, reforçando a necessidade de planejamento participativo e campanhas de conscientização (ANEEL, 2023).

9179

No campo regulatório, a ausência de normas específicas para micro e miniturbinas urbanas constitui um dos principais entraves à expansão tecnológica. Apesar dos avanços da Lei nº 14.300/2022, ainda faltam diretrizes claras sobre limites de ruído, altura máxima, certificação estrutural, interface com edificações e padrões de vibração e compatibilidade eletromagnética, lacuna reconhecida pela ANEEL (2023) que destaca a necessidade de revisão do PRODIST. A falta de padronização técnica afeta o mercado, criando incertezas e reduzindo atração de investidores e fabricantes, aspecto enfatizado pela ABDI (2022) como obstáculo ao desenvolvimento da cadeia produtiva.

Os resultados também identificaram que municípios possuem potencial de atuação regulatória, podendo instituir legislações locais com incentivos fiscais, isenções tributárias e licenciamento simplificado. No âmbito técnico, a turbulência urbana permanece como desafio mais significativo para dimensionamento preciso, com estudos de CFD demonstrando que pequenos deslocamentos (2 m a 5 m) podem alterar desempenho em até 35%, além de sombreamento aerodinâmico e variação sazonal mais pronunciada (Silva *et al.*, 2023; HUSSNI, 2020; Borges, 2020). Muitos edifícios antigos não possuem estrutura adequada sem reforço,

elevando custos de instalação entre 15% e 30% e limitando aplicabilidade, especialmente em centros históricos, enquanto tecnologias mal dimensionadas apresentam desgaste prematuro e redução de vida útil de 20 para 8 a 10 anos. Apesar disso, avanços em materiais compostos e aerodinâmica computacional têm ampliado durabilidade, eficiência e confiabilidade dos equipamentos modernos (Duarte; Lacerda, 2022).

Ademais, foi explorado um cenário futuro amplamente favorável à expansão da microgeração eólica urbana no Brasil, impulsionada por digitalização com integração a redes inteligentes e plataformas IoT, redução de custos com queda projetada de 25% a 30% até 2030, políticas climáticas incluindo alinhamento às metas do Acordo de Paris e legislações municipais de carbono zero, pressão de investidores por metas ESG e expansão de programas de capacitação profissional (REN21, 2023; EPE, 2022). A combinação entre políticas públicas de incentivo, maturação da cadeia produtiva nacional, redução de custos tecnológicos e aumento da consciência ambiental cria condições propícias para adoção em larga escala (ABDI, 2022). A EPE (2022) projeta crescimento de 300% da geração distribuída renovável até 2032, com participação crescente da microeólica em sistemas híbridos.

A integração com fotovoltaica, baterias de armazenamento e plataformas de gestão inteligente tende a consolidar modelos energéticos descentralizados mais eficientes, resilientes e sustentáveis, com edifícios atingindo padrão nZEB demonstrando viabilidade técnica e econômica em projetos-piloto nacionais, sinalizando caminho concreto para cidades de baixo carbono (REN21, 2023). Assim, os resultados obtidos reforçam que a microgeração eólica urbana representa solução estratégica para a transição energética brasileira, com potencial para ganhar protagonismo nas próximas décadas, especialmente quando integrada a sistemas híbridos e redes inteligentes de distribuição.

3.1 Desafios e limitações dos resultados

Embora os resultados indiquem potencial significativo para a microgeração eólica em áreas urbanas brasileiras, é imprescindível considerar certos desafios e limitações que ainda impedem a completa disseminação dessa tecnologia no país. O primeiro aspecto diz respeito ao elevado custo inicial para aquisição e instalação dos equipamentos, que variam entre R\$ 15 mil e R\$ 40 mil para sistemas de pequeno porte, resultando em maior acessibilidade da tecnologia às classes com maior poder aquisitivo e a edificações comerciais e institucionais, o

que ocasiona discrepância entre o potencial de geração identificado e a capacidade de investimento da maioria dos consumidores residenciais brasileiros (Duarte; Lacerda, 2022; EPE, 2022).

Paralelamente, a ausência de normas técnicas específicas para microturbinas urbanas constitui obstáculo concreto, visto que, conforme identificado pela ANEEL (2023), ainda faltam diretrizes claras sobre limites de ruído, altura máxima, certificação estrutural e interface com edificações, gerando insegurança jurídica que compromete substancialmente o potencial de expansão da tecnologia e dificulta a padronização de processos.

A complexidade da turbulência urbana configura-se igualmente como desafio técnico significativo. Conforme demonstrado nos estudos de CFD analisados, pequenos deslocamentos no posicionamento das turbinas, entre 2 metros e 5 metros, podem alterar o desempenho em até 35%, evidenciando a necessidade de estudos prévios detalhados de *micrositing* que envolvem custos adicionais e expertise técnica nem sempre disponível no mercado nacional (Silva *et al.*, 2023; Hussni, 2020).

Acrescenta-se a isso a inadequação estrutural de edificações existentes, especialmente as mais antigas e localizadas em centros históricos, que não foram projetadas para suportar cargas dinâmicas geradas por turbinas eólicas, exigindo reforços estruturais que elevam os custos de instalação entre 15% e 30% e limitam significativamente a aplicabilidade da tecnologia em parte considerável do parque imobiliário urbano brasileiro (Duarte; Lacerda, 2022). Essa variabilidade espacial do potencial eólico e as limitações estruturais impactam diretamente a previsibilidade da geração e o retorno sobre investimento, exigindo análises caso a caso que dificultam a replicabilidade de projetos.

A carência de mão de obra especializada e a limitação da indústria nacional para produção em escala competitiva configuram-se como barreiras adicionais ao desenvolvimento do setor. A ABDI (2022) destaca que o mercado brasileiro ainda conta com poucos fabricantes nacionais, dependendo significativamente de importações que encarecem os equipamentos e dificultam a manutenção e reposição de peças, comprometendo a viabilidade econômica e a autonomia tecnológica do país.

Outrossim, a baixa conscientização e aceitação social ainda representam obstáculos significativos, visto que diversos consumidores e gestores públicos associam a energia eólica exclusivamente a grandes parques geradores, sem compreender suas possibilidades de

aplicação urbana e suas contribuições para eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Preocupações com impacto visual, ruído e vibração estrutural, embora frequentemente superestimadas, geram resistência em áreas sem tradição em energias renováveis e evidenciam a necessidade de processos participativos de planejamento urbano (ANEEL, 2023; Moreira *et al.*, 2020).

Assim, os resultados apresentados, apesar de indicarem viabilidade técnica, econômica e ambiental da microgeração eólica urbana, devem ser examinados considerando suas limitações práticas relacionadas a custos, regulamentação, complexidade técnica, infraestrutura predial, cadeia produtiva e aceitação social. Essas limitações destacam a importância de implementar políticas públicas de fomento, programas de capacitação profissional, incentivos fiscais, revisão de marcos regulatórios e campanhas educativas que ampliem o acesso à tecnologia e promovam sua disseminação sustentável no contexto urbano brasileiro, de modo a guiar investigações futuras e estratégias que consigam transpor os obstáculos que ainda persistem para consolidação dessa fonte renovável na matriz distribuída nacional.

9182

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Regiões urbanas, especialmente zonas litorâneas e tipos de edificações altas, apresentam microclimas favoráveis à instalação de turbinas de pequeno porte, sendo que metodologias avançadas de *micrositing* baseadas em CFD ampliam a precisão das estimativas de potencial eólico. No campo tecnológico, verificou-se a adequação das turbinas de eixo vertical para o ambiente urbano, devido ao desempenho mais estável sob alta turbulência, menor impacto acústico e melhor integração arquitetônica. Sistemas híbridos solar-eólicos mostraram-se particularmente promissores, dada a complementaridade temporal entre as fontes renováveis e o aumento da autonomia energética das edificações.

Sob a ótica econômica, a microgeração eólica urbana torna-se mais competitiva em edificações com demanda contínua elevada, enquanto a tendência de redução do custo nivelado de energia e a manutenção de benefícios tarifários até 2045 fortalecem sua atratividade. No âmbito ambiental, os ganhos incluem mitigação de emissões e conformidade com metas climáticas, além da comprovação de compatibilidade acústica. No aspecto social, destaca-se o potencial para formação técnica e promoção de cultura de eficiência energética, embora

persistam resistências estéticas que exigem processos participativos para elevar a aceitação pública.

Persistem, entretanto, obstáculos relevantes: lacunas regulatórias, complexidade da turbulência em áreas densamente edificadas, necessidade de reforços estruturais e limitações da indústria nacional. Tais desafios, embora significativos, podem ser superados mediante coordenação entre setores regulatório, industrial e acadêmico. A tendência global de digitalização energética e redução de custos tecnológicos reforça o cenário favorável para expansão da microgeração eólica urbana.

Conclui-se que a microeólica urbana é uma solução tecnicamente viável e ambientalmente vantajosa, com potencial estratégico na transição energética brasileira. Sua consolidação depende da elaboração de normativas específicas, de avanços técnicos em *micrositing* e da ampliação da aceitação social. Recomenda-se que estudos futuros priorizem projetos-piloto em edificações públicas e o desenvolvimento de metodologias padronizadas adaptadas ao contexto nacional. A integração planejada da microeólica com outras fontes renováveis e tecnologias digitais constitui um caminho promissor para cidades mais autônomas, resilientes e de baixo carbono.

9183

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). *Relatório de acompanhamento setorial: energias renováveis*. Brasília: ABDI, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição*. Brasília: ANEEL, 2023.
- BARRA, M. M.; TEIXEIRA, W. C. Energia eólica: panorama atual e perspectivas futuras. *Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica*, v. 4, n. 1, 2022.
- BORGES, G. S. *Estudo experimental em túnel de vento do campo de velocidades no topo de uma edificação para análise do potencial de geração de energia eólica*. Trabalho de Conclusão de Curso – UFRGS, 2020.
- BRASIL. **Lei no 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Seção I, p. 1.
- COSTA, M. R. da. *Aplicação de técnicas de otimização em sistemas de potência com geração de energia intermitente*. 2024.

DUARTE, M. S. A.; LACERDA, G. A. **A aplicabilidade do gerenciamento e produção de energia eólica nos grandes centros urbanos.** 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022.** Rio de Janeiro: EPE, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022.

HUSSNI, L. A. **Avaliação do potencial eólico em ambiente urbano para aplicação de micro e minigeração distribuída: estudo de caso em edifício no centro da cidade de São Paulo.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2020.

LUCENA SANTOS, P. E.; ARAÚJO, F. J. C. O desenvolvimento da energia eólica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 6, p. 2978–2989, 2023.

MARENGO, S. T. **Integrando inovações de base no planejamento urbano: estratégias para a soberania energética.** 2024.

MOREIRA, I. R. *et al.* Energia fotovoltaica e eólica no Brasil. **Caleidoscópio**, 2020.

OLIVEIRA, I. H. N. **Controlador robusto baseado em LMI para conversor SEPIC aplicado em rastreamento de máxima potência em sistemas de energia eólica de pequeno porte.** 2024.

9184

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN₂₁). **Renewables 2021 Global Status Report.** Paris: REN₂₁ Secretariat, 2021.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN₂₁). **Renewables 2022 Global Status Report.** Paris: REN₂₁ Secretariat, 2022.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN₂₁). **Renewables 2023 Global Status Report.** Paris: REN₂₁ Secretariat, 2023.

SILVA, L. M.; ABREU-HARBICH, L. V. Metodologia simplificada para avaliação do potencial de energia eólica em centros urbanos. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, 2017.

SILVA, V. A. G. *et al.* Levantamento do potencial de geração de energia eólica na região norte do Estado de Minas Gerais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, 2023. TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: EPE/MME, 2016.

VIAN, A. *et al.* **Energia eólica: fundamentos, tecnologia e aplicações.** São Paulo: Blucher, 2021.