

REVISÃO DO ESTADO DA ARTE EM DESENVOLVIMENTO DE MAPA DO POTENCIAL EÓLICO DE REGIÕES URBANAS

Bruna Juliane Vieira (UTFPR) - brunajv06@gmail.com

Ohara Kerusauskas Rayel (UTFPR) - oharakr@utfpr.edu.br

Guilherme de Santi Peron (UTFPR) - peron@utfpr.edu.br

Resumo:

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis segue uma tendência crescente nas últimas décadas, impulsionada inclusive pela concessão de incentivos à micro e minigeração e distribuída em diversos países. Esta modalidade de geração pode proporcionar importantes benefícios ao sistema elétrico: postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; baixo impacto ambiental; redução de perdas e diversificação da matriz energética. Apesar dos incentivos, observa-se que a área de micro e minigeração eólica em regiões metropolitanas não apresenta crescimento compatível, principalmente quando comparada à geração eólica em regiões rurais. A falta de estudos mais detalhados do potencial eólico em regiões metropolitanas pode ser um fator determinante para o pequeno desenvolvimento econômico do setor. Neste sentido, este trabalho tem como proposta apresentar o estado da arte do mapeamento do fluxo eólico em áreas rural e urbana. Foi realizado um levantamento das principais técnicas utilizadas para este fim tais como modelos físicos, estatísticos, numéricos e classificadores. Os modelos numéricos são as técnicas mais utilizadas apesar de possuírem maior custo computacional. Observou-se ainda que o emprego de técnicas híbridas pode aumentar a precisão do mapeamento obtido. Em especial, uma extensa pesquisa da caracterização do recurso eólico no ambiente metropolitano é apresentada e concluiu-se que o comportamento da velocidade do vento neste cenário é distinto quando comparado à região rural, sendo necessária a adaptação das técnicas convencionais para obtenção resultados adequados.

Palavras-chave: *Mapeamento eólico, áreas metropolitanas, energias renováveis, minigeração, microgeração*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

REVISÃO DO ESTADO DA ARTE EM DESENVOLVIMENTO DE MAPA DO POTENCIAL EÓLICO DE REGIÕES URBANAS

Bruna Juliane Vieira - brunavieira@alunos.utfpr.edu.br

Ohara Kerusauskas Rayel - oharakr@utfpr.edu.br

Guilherme de Santi Peron - peron@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

Resumo. A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis segue uma tendência crescente nas últimas décadas, impulsionada inclusive pela a concessão de incentivos à micro e minigeração e distribuída em diversos países. Esta modalidade de geração pode proporcionar importantes benefícios ao sistema elétrico: postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; baixo impacto ambiental; redução de perdas e diversificação da matriz energética. Apesar dos incentivos, observa-se que a área de micro e minigeração eólica em regiões metropolitanas não apresenta crescimento compatível, principalmente quando comparada à geração eólica em regiões rurais. A falta de estudos mais detalhados do potencial eólico em regiões metropolitanas pode ser um fator determinante para o pequeno desenvolvimento econômico do setor. Neste sentido, este trabalho tem como proposta apresentar o estado da arte do mapeamento do fluxo eólico em áreas rural e urbana. Foi realizado um levantamento das principais técnicas utilizadas para este fim tais como modelos físicos, estatísticos, numéricos e classificadores. Os modelos numéricos são as técnicas mais utilizadas apesar de possuírem maior custo computacional. Observou-se ainda que o emprego de técnicas híbridas pode aumentar a precisão do mapeamento obtido. Em especial, uma extensa pesquisa da caracterização do recurso eólico no ambiente metropolitano é apresentada e concluiu-se que o comportamento da velocidade do vento neste cenário é distinto quando comparado à região rural, sendo necessária a adaptação das técnicas convencionais para obtenção resultados adequados.

Palavras-chave: Mapeamento eólico, áreas metropolitanas, energias renováveis, minigeração, microgeração

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a energia eólica passou a atrair atenção da comunidade, pois além de ser complementar em relação a fontes renováveis tradicionais, é sustentável e ecológica [1]. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA do inglês *International Energy Agency*), em 2018 a geração eólica cresceu cerca de 12%, mantendo-se como a segunda maior matriz energética renovável, perdendo apenas para a geração hidrelétrica [2].

De acordo com o relatório *Global Wind Statistics 2017* [3], elaborado pelo Conselho Global de Energia Eólica (GWEC, do inglês *Global Wind Energy Council*), a indústria de energia eólica mundial cresceu vertiginosamente no início do século XXI, em 2017 o aumento da capacidade global instalada foi de 52,57 GW, sendo a capacidade total instalada de 539,58 GW [4]. A Fig. 1 apresenta o aumento anual de capacidade e o crescimento da capacidade total no início deste século.



Figura 1: Aumento anual de capacidade eólica e evolução da capacidade eólica total instalada em todo o mundo no início do século XXI. Adaptada de [3].

Analisando o cenário nacional, verifica-se que a produção de energia eólica no Brasil atingiu a marca de 14 GW de capacidade instalada em 2018 [4], enquanto em 2011 a capacidade instalada era de apenas 1 GW, representando um crescimento expressivo de 1.300% em apenas 7 anos.

Em média, a energia gerada pelas usinas eólicas brasileiras equivale atualmente ao consumo residencial médio de cerca de 26 milhões de habitações, o que significa fornecer energia elétrica limpa a 80 milhões de pessoas [5]. Em

2018 o Brasil instalou 1,9 GW em turbinas eólicas, sendo o quinto país que mais instalou novas turbinas em terra (*onshore*) [4].

No âmbito da micro e minigeração distribuída (MMGD) regulamentadas no Brasil em 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da Resolução Normativa nº 482 (REN482/12), a Empresa de Pesquisa energética (EPE) destaca no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), que até 2027 haverá 1,35 milhão consumidores com sistemas de micro ou minigeração distribuída, totalizando 11,9 GW de capacidade gerada no país e investimentos de quase R\$ 60 bilhões ao longo do período [6].

No entanto, dentre as tecnologias compreendidas no conjunto de MMGD (fotovoltaica, térmica, eólica e Central Geradora Hidrelétrica (CGH)), a energia eólica apresenta pouco destaque, com uma projeção da capacidade instalada para 2027 que não ultrapassa 5% [6]. Ainda de acordo com o documento, a matriz que mais se destaca nesse campo é a solar fotovoltaica, a qual se mantém em liderança por todo o período projetado, como pode ser observado na Fig. 2.

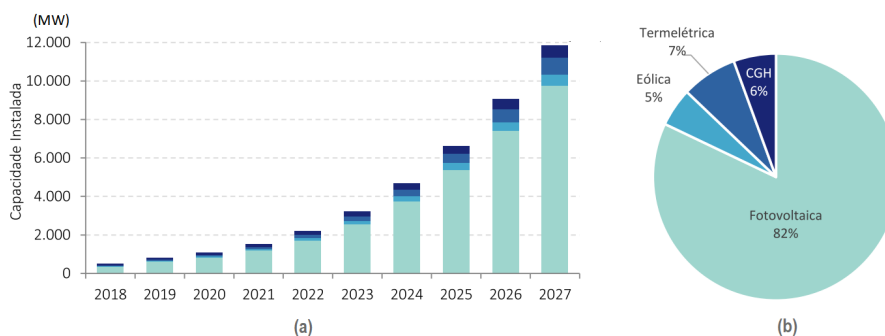


Figura 2: Projeção da Micro e Minigeração Distribuída até 2027 (a), Capacidade Instalada das MMGD em 2027 (b). Adaptada de [6].

De modo geral, o segmento de energia eólica de grande porte no Brasil caminha em direção à sua consolidação no mercado energético. O segmento de pequeno porte, no entanto, cujas turbinas estão instaladas em áreas urbanas, ainda é embrionário no país, contendo, atualmente, apenas experiências pontuais [7]. Com base nisto, conclui-se que a energia fotovoltaica, no que diz respeito à geração distribuída, se destaca em detrimento à energia eólica.

Uma característica relevante associada à energia fotovoltaica é a maior facilidade de ser integrada em áreas urbanas, tendo seus equipamentos instalados em telhados e fachadas de edifícios. Apesar disso, os painéis solares possuem algumas limitações técnicas severas, tais como, improdutividade de energia durante a noite e diminuição da produção de energia quando o céu está totalmente coberto por nuvens. Assim, o uso de microturbinas eólicas pode ser considerado para preencher as lacunas do fornecimento de energia solar [8].

Ainda que, a projeção eólica no ambiente urbano não apresente resultados de crescimento considerável no país [6], estudos recentes [9]–[11] indicam que a energia eólica urbana tem elevado potencial energético. De acordo com a *World Wind Energy Association*, o segmento de turbinas de pequeno porte internacional, possui crescimento a taxa entre 19% e 35% ao ano desde 2009, conforme apresentado em 2014. A proximidade da geração em relação aos locais de consumo é uma das vantagens de sua utilização, além de propiciar um custo reduzido da distribuição da energia [11], o retorno do investimento de capital está dentro da vida útil do dispositivo [12].

Diante disso, turbinas eólicas urbanas (UWTs do inglês *Urban Wind Turbines*) começaram a surgir nas últimas décadas [13]. As UWTs têm o potencial de aproveitar o vento em cidades onde não há espaço para a instalação de grandes turbinas eólicas, podendo ser instaladas no topo de edifícios [14]. Segundo [9], a integração de sistemas de conversão de energia eólica em edifícios é uma tendência crescente.

No entanto, o potencial dessas turbinas pode ser prejudicado se houver seleção inadequada do local. Uma das razões para isto é porque os padrões dos ventos no ambiente urbano são denominados complexos. A alta turbulência desencadeada pelos edifícios vizinhos [15] dificulta a reorientação do gerador [12]. Por esse motivo deve ser realizada uma avaliação adequada do recurso eólico disponível nos locais urbanos, bem como, elaborar a modelagem do perfil do vento e estimar com precisão o potencial eólico na área desejada. Por fim realiza-se instalação de turbinas nos locais apropriados para assim, garantir o máximo desempenho energético [16].

A aplicação de UWTs requer avaliação do potencial eólico a partir de medições experimentais. Esta mensuração, no entanto, apresenta custos que, na maioria dos casos, são mais dispendiosos do que o próprio valor das turbinas, levando os desenvolvedores a instalarem as pequenas turbinas sem realizar as estimativas adequadas, de acordo com o potencial eólico da região. Por esta negligência, assumem o risco de não atingirem a rentabilidade do empreendimento [8] e, consequentemente, prejudicam a reputação em se empregar turbinas eólicas em áreas urbanas [13].

Como forma de solucionar a ausência de medições anemométricas em ambientes urbanos, adequados à avaliação de recursos eólicos [17], estudos podem ser realizados utilizando outras fontes de dados [8]. Em muitos países, como é o caso do Brasil, existem atlas nacionais e regionais do potencial eólico [18], os quais podem ser utilizados como indicadores da existência de vento para a instalação de pequenas turbinas eólicas. No entanto, segundo [19], essas soluções são geralmente baseadas na aplicação de modelos de mesoescala (WRF) e microescala (por exemplo, WASP)

tradicionais, que apesar de sua validade, não são capazes de explicar os efeitos de turbulência ocorridos em terrenos urbanos. Em ambos os métodos, o potencial eólico é frequentemente superestimado.

Por esse motivo, deve ser realizada uma avaliação adequada do recurso eólico disponível nos locais urbanos, bem como, realizar a modelagem do perfil do vento e estimar com precisão o potencial eólico no local desejado, a fim de, posteriormente, instalar turbinas em locais apropriados, para assim, garantir o máximo desempenho energético [10].

Portanto, para que o sistema eólico em ambiente urbano se torne mais amplamente implantado e atinja todo o seu potencial, é vital que sejam desenvolvidos métodos precisos e acessíveis para estimar a velocidade do vento em áreas urbanas [16]. Neste contexto, modelos numéricos voltados para energia eólica vêm sendo, cada vez mais, aplicados em diversos estudos para estimar de forma mais precisa o comportamento do vento para um determinado local ou região [20], [21].

Desta forma, o objetivo deste artigo é apresentar o estado da arte em mapeamento eólico, principalmente em áreas urbanas. O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta uma breve introdução sobre o recurso eólico, abordando as características do vento no ambiente urbano. Na Seção 3 são apresentados os modelos utilizados para estimar o potencial eólico, tanto para a região urbana quanto para rural. Na Seção 4 os métodos são comparados através das principais conclusões apresentadas pelos respectivos autores. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo.

2. RECURSO EÓLICO

De forma geral, a ocorrência de ventos é causada pelo aquecimento diferenciado da atmosfera [22]. O aquecimento da atmosfera é não-uniforme e está relacionado, dentre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra [23]. Uma análise mais detalhada é apresentada nas Subseções 2.1 e 2.2.

2.1. Origem do Vento

As regiões tropicais, que recebem os raios solares com incidência aproximadamente perpendicular, são mais aquecidas. Desta forma, nestas regiões o ar, mais quente, se torna menos denso que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes, regiões tropicais, tende a subir. Assim, o ar quente passa a ser substituído por uma massa de ar mais frio, mais densa, deslocada das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos [23].

A diferença de temperatura entre a camada próxima da superfície da terra, aquecida pelos raios solares, e as camadas superiores da atmosfera gera correntes convectivas. No entanto, as correntes ascendentes do equador são mais intensas do que qualquer outra zona da terra, por isso produzem ventos de 30km/h a 50km/h. Já o movimento de rotação da Terra influencia na direção dos ventos, entre os polos e o equador, provocando uma resultante inclinada em relação à perpendicular pelo equador [23].

2.2. Parâmetros que Influenciam nas Condições dos Ventos

Além dos fatores relacionados à origem dos ventos, existem diversos parâmetros que influenciam nas condições do vento, dentre os quais os mais relevantes são: presença de obstáculos nas redondezas, rugosidade do terreno, orografia e altura [22].

Presença de obstáculos. A presença de obstáculos influencia significativamente na diminuição da velocidade do vento e é fonte de turbulência em sua vizinhança. Exemplo disso, são os edifícios, os quais, muitas vezes, causam separação de fluxo, redução da velocidade do vento e provocam elevada turbulência no topo e ao seu redor [19]. Na Fig. 3 pode ser observado o modelo da turbulência criada por um obstáculo. Conforme ilustrado, a intensidade da turbulência depende do tamanho e do formato do obstáculo. A zona de turbulência pode alcançar até duas vezes a altura do obstáculo e distâncias entre 10 a 20 vezes da altura do obstáculo. Devido a este efeito, os obstáculos presentes em uma área próxima à instalação de uma turbina precisam ser levados em consideração [22].

Assim, para analisar a influência de um obstáculo no perfil da velocidade deve-se considerar: sua posição relativa ao ponto de interesse, suas dimensões (altura, largura, comprimento) e sua porosidade, porém pode-se aferir que um edifício tem porosidade nula e as árvores apresentam porosidade variáveis, entre o verão e inverno, de acordo com a quantidade de folhas [22].

Rugosidade e Orografia do Terreno. A rugosidade se caracteriza pela influência da superfície do terreno e dos obstáculos, que resultam num retardo da velocidade do vento próximo ao solo. Assim como os obstáculos, a rugosidade do terreno influencia no desenvolvimento do perfil de velocidade de vento no interior da camada limite, que por sua vez é definida como a região que é diretamente afetada pela superfície terrestre. O efeito causado pelo tipo de superfície, combinado com a presença de obstáculos próximos, causa uma redução na velocidade do vento, alterando seu perfil logarítmico [23]. Tal fato pode ser observado na Fig. 4. Nota-se que os obstáculos reduzem a velocidade do vento significativamente, regiões que possuem construções elevadas, como prédios, só atingem velocidade razoáveis de vento após uma elevada altura.

A orografia, por sua vez, é o estudo das nuances do relevo de uma região e das características do relevo terrestre [22], diferindo da rugosidade que mede as variações ocorridas nesse relevo. Portanto, o estudo de ambas apresenta um papel fundamental na escolha do local mais adequado para a instalação de turbinas eólicas.

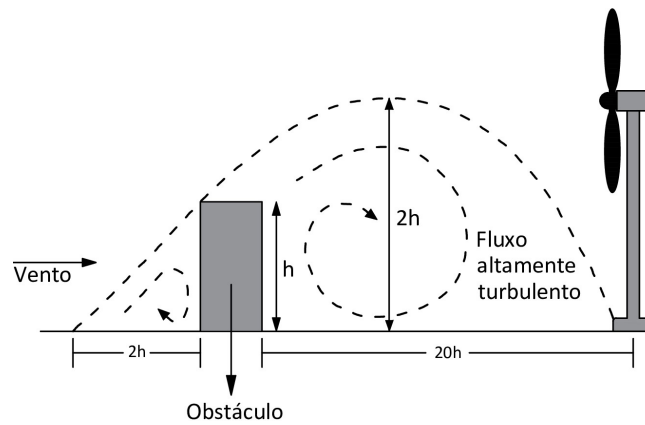


Figura 3: Modelo do efeito de turbulência causada por um obstáculo. Adaptada de [22].

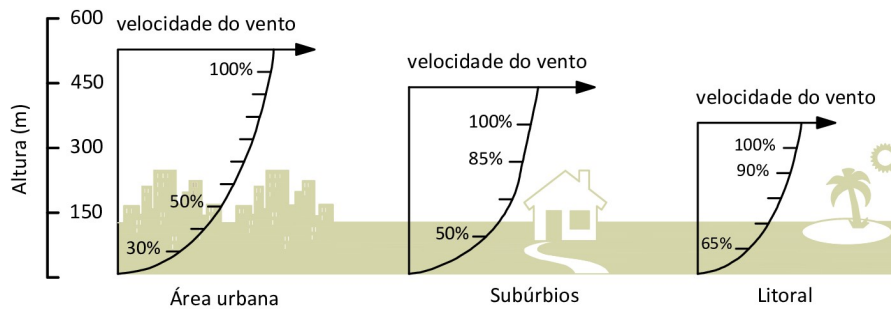


Figura 4: Relação logarítmica entre a velocidade do vento e altura. Adaptada de [23].

A rugosidade do terreno é determinada pelo tamanho e distribuição dos elementos de rugosidade que a compõe e é parametrizada em uma escala de comprimento, chamada de comprimento de rugosidade z_0 . Este comprimento tem influência direta na camada limite [24]. Uma relação empírica determina que o comprimento da rugosidade é dado por [22]

$$z_0 = 0,5 \left(\frac{hS}{A} \right), \quad (1)$$

em que h é a altura da rugosidade (m), S é a seção transversal do elemento de rugosidade (m) e A é a área média da rugosidade (m^2) [22]. É importante ressaltar, que o comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero [25].

A redução do fluxo do vento, geralmente acima de 20%, o aumento da tensão de cisalhamento e os desvios das linhas de fluxo são exemplos do que geralmente ocorre quando o vento passa de uma região homogênea e com baixa rugosidade para outra com alto valor de rugosidade, por exemplo, área urbana [8].

Camada limite Atmosférica. Em grandes altitudes, o ar se move ao longo de linhas que possuem a mesma pressão, denominadas isóbaras. Esse movimento das massas de ar a uma altitude de mais de 600 m é chamado de vento geostrófico. Considera-se que a superfície não tem influência nesse fluxo. Em baixas altitudes, as influências da superfície da Terra podem ser sentidas a partir de uma região de camada limite.

A área da camada limite próxima ao solo é chamada de camada de Prandtl, ilustrada na Fig. 5. As condições de fluxo nessa área são dominadas pelo atrito do fluxo do ar contra a superfície terrestre. A altura da camada de Prandtl varia com as condições meteorológicas, durante o dia pode possuir valores distintos devido às condições ambientais naturais [22]. Essa camada também apresenta um perfil vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento [25], como pode ser observado na Fig. 5.

Na camada superficial, o vento se comporta de modo exponencial ou logarítmico, de acordo com o modelo estudado. Sendo assim, há uma expressão logarítmica empírica para a variação da velocidade do vento na vertical em uma camada limite turbulenta, dada por [25]

$$v(h) = \frac{v_a}{k} \log \left(\frac{h}{z_0} \right), \quad (2)$$

onde v_a é a velocidade de fricção, k é a constante de Von Karmán e $\log$ é o logaritmo natural. A partir dessa equação é possível determinar a velocidade do vento na altura desejada utilizando-se os valores de velocidade de atrito do vento e o comprimento da rugosidade do solo z_0 [22].

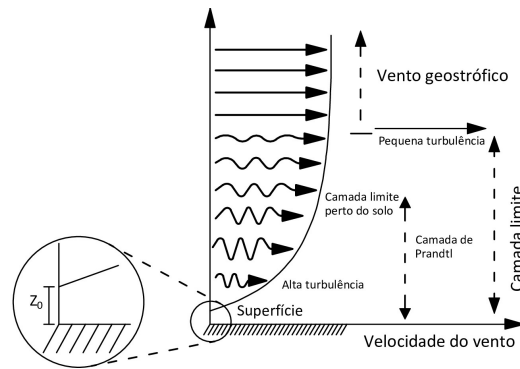


Figura 5: Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. Adaptada de [22], [25].

3. TÉCNICAS DE MAPEAMENTO

A modelagem atmosférica e a previsão do vento aplicadas ao setor energético possuem dois enfoques principais: a estimativa dos ventos médios levando em conta dados climatológicos; e a previsão de vento para instantes futuros em curto e médio prazos. O primeiro enfoque tem como finalidade selecionar locais que apresentam melhores condições de geração eólica e prover os dados necessários para avaliar a viabilidade econômica. Já o segundo visa facilitar o planejamento da operação de parques eólicos e unidades geradoras. As previsões de curto prazo são úteis na identificação de períodos de maior ocorrência de ventos prejudiciais ao sistema, já as previsões de médio prazo são utilizadas no gerenciamento dos recursos de energia elétrica [25].

Existem diversas técnicas na literatura para avaliar o potencial eólico de uma região: modelos físicos, estatísticos e computacionais, que serão detalhados a seguir.

3.1. Modelos Físicos

Os modelos físicos utilizam modelos de edifícios com escala reduzida e outras características da área e um túnel de vento da camada limite atmosférica. Este modelo é ilustrado na Fig. 6. O modelo é inserido em um túnel de vento, e a camada limite a montante é criada usando geradores de vórtices [14].

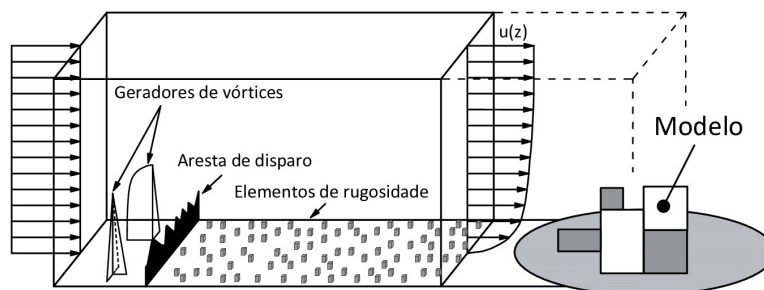


Figura 6: Modelo físico em um túnel de vento. Adaptada de [26].

A principal vantagem de um modelo físico é seu ambiente reprodutível com um controle geral sobre os parâmetros individuais [26]. Isso permite estudar o efeito da variação de parâmetros específicos no desempenho geral do modelo, tornando-o adequado para o planejamento do ambiente urbano.

Para modelar o fluxo de vento sobre áreas urbanas a solução mais adequada é a utilização de modelos físicos de uma cidade ou partes dela inseridas em um túnel aerodinâmico de vento [8]. Este tipo de modelagem minimiza a probabilidade de erros e, conseqüentemente, os resultados são precisos e confiáveis [8].

No entanto, a construção de modelos físicos em 3D e o uso de túneis de vento muitas vezes não são economicamente viáveis, o que pode levar à seleção de outros tipos de modelagem [8].

3.2. Modelo Estatístico

Os parâmetros meteorológicos sofrem diversas variações ao longo de um dia. Para compreender como estes parâmetros se comportam sazonalmente se faz necessário o estudo de dados coletados ao longo de no mínimo um ano de observações. Uma vez em posse destes dados, filtros e análises estatísticas devem ser aplicados para que padrões de comportamento possam ser corretamente visualizados [27].

A Rede de Institutos de Medição de Energia Eólica (MEASNET, do inglês *Measuring Network of Wind Energy Institutes*) desenvolveu a diretriz intitulada Avaliação das Condições de Vento em um Local Específico (do inglês

Evaluation of Site-Specific Wind Conditions) [28]. Esta diretriz descreve o processo de avaliação do local, incluindo a coleta, avaliação e a interpretação dos dados. Segundo a norma, as observações de velocidade, direção do vento, pressão atmosférica, temperatura, umidade do ar, valores médios, mínimos e máximos, para cada mês de observação, devem ser calculados, assim como os respectivos valores para todo o período de observação. Em específico para os dados de velocidade do vento, é necessário o cálculo do desvio padrão e da distribuição de Weibull.

A função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *probability density function*) de Weibull é a mais adequada para descrever o regime do vento em uma região [18], [20], [29]–[34]. É a função mais utilizada para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos. Além disso, é amplamente utilizado pela maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia [27]. A PDF de Weibull é dada por

$$f(U) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{U}{\lambda} \right)^{(k-1)} \exp \left[- \left(\frac{U}{\lambda} \right)^k \right], \quad (3)$$

em que k é o fator de forma da distribuição dos ventos, λ é o fator de escala que depende da velocidade média dos ventos e U a velocidade do vento [27].

Os parâmetros k e λ são aceitos como os melhores dentre os diferentes modelos de distribuição de velocidade do vento, utilizados na literatura, pois é possível ajustá-los para se adequar a um período de tempo. Por consequência estes parâmetros são utilizados na predição da velocidade do vento e na análise de potencial eólico [9].

Os resultados apresentados em [30] levam em conta os dados de velocidade do vento reais disponíveis em diversas áreas urbanas/semiurbanas no Reino Unido. Demonstrou-se que a distribuição de Weibull pode ser utilizada para estimar a produção de energia anual de turbinas eólicas selecionadas. No entanto, o trabalho não leva em consideração as variações excessivas de curto prazo na velocidade do vento, conhecidas como turbulências, o que pode ocasionar conclusões diferentes.

A rosa dos ventos é frequentemente utilizada para avaliar a intensidade e direção do vento, muitas vezes utilizando como referência os parâmetros de uma distribuição de Weibull [9].

Este tipo de análise estatística, em geral, fornece informações úteis para a macrolocalização de turbinas eólicas, mas falta a precisão para a microlocalização. Portanto, são necessárias medições de alta resolução e estatísticas de campo de vento mais precisas para a microlocalização, de modo a melhorar a produção de energia de turbinas eólicas em áreas urbanizadas [11].

3.3. Modelos Numéricos

Modelos Numéricos são métodos que utilizam computadores para realizar um grande número de cálculos de fluxo de fluidos e simulações de padrões de fluxo e estrutura de fluidos [14]. Para estudo do perfil eólico, há diversos tipos de modelos numéricos, desde modelos lineares simples até modelos não-lineares mais complexos.

Os modelos lineares têm precisão limitada com baixo tempo computacional, porém apresentam facilidade de aplicação. Já modelos não-lineares, complexos, apresentam maior precisão às custas de esforço computacional extenso [35].

Os modelos numéricos ou computacionais, são utilizados para prever e avaliar a potência que pode ser gerada e indicar os melhores locais para instalação das turbinas eólicas [36].

Nesta seção serão abordados com mais detalhe os modelos numéricos para análise do potencial eólico, tanto para a região rural quanto para a região urbana.

Modelo WASP. O *software* WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) desenvolvido pelo Laboratório Risø, na Dinamarca, em 1987, é um dos modelos lineares mais utilizados [14]. Este é um modelo numérico, de baixo processo computacional, que estima o potencial eólico com baixa resolução, recomendado para uso em terrenos com topografia de declives baixos ou suavizados [31].

A maioria dos modelos lineares baseia-se na teoria de Jackson e Hunt [37], a qual não leva em consideração a modelagem do escamento de vento, afetando os resultados em terrenos complexos [38]. Por este motivo, o método numérico WASP é utilizado para estimar o potencial eólico em parques eólicos, cuja área apresenta topografia plana e sem a presença de obstáculos.

Este método foi utilizado para simular a localização de turbinas em parques eólicos e para calcular a produção anual de energia em [31], [39], [40]. Vale ressaltar que a utilização de modelos lineares para modelagem de terrenos complexos leva à superestimação do potencial eólico na região [19], [38].

Modelo CFD. A alternativa para solucionar as não-linearidades do vento em terreno complexo, de forma mais adequada, é a utilização da equação de conservação de momento [38]. O método de cálculo para conservação de momento é obtido através do modelo Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) [41], para o qual é necessário o uso de uma modelagem para a turbulência. Esse tipo de modelagem é conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) [38], [41]. O modelo RANS pode ser representado por

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4)$$

$$U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\vartheta \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) (\overline{u_i u_j}) \right), \quad (5)$$

onde U_i representa a velocidade média na direção i , u_i é a flutuação de velocidade, x_i é o componente de posição, ambos na direção i . Já P , ρ , ν representam pressão, massa específica e viscosidade cinemática, respectivamente.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional pode ser utilizada para modelar e analisar os fluxos de vento sobre os prédios e localizar as turbinas ao redor dos mesmos [15], [42]. Este tipo de modelagem pode ser encontrado atualmente em alguns softwares comerciais, entre eles o WindSim e MeteodynWT [19], [38].

Em [42] a técnica CFD é utilizada para simular o fluxo do vento em determinados ambientes e para encontrar os locais ideais de montagem da turbina. O objetivo é apresentar um estudo numérico das características do fluxo de vento do telhado em três paisagens suburbanas, caracterizadas por casas com diferentes perfis de telhado, nomeadamente: telhados inclinados, telhados piramidais e telhados planos.

Em [11] o modelo CFD é aplicado com o objetivo de realizar uma análise da turbulência do vento no topo de diversos edifícios. A técnica é chamada de *Integrated Technology Complex Building* (ITCB), e foi desenvolvida na Universidade Nacional de Tecnologia de Taipei. Como resultado, foi identificado o local mais apropriado para instalação de microturbinas no topo do ITCB.

Na mesma linha de pesquisa, os trabalhos [11], [15] realizam um estudo para modelar os fluxos anuais de vento sobre os edifícios, visando identificar a melhor localização e *design* das microturbinas. Em [15] é realizada a análise da velocidade e turbulência gerada por dois edifícios de mesmo tamanho, por três edifícios de tamanhos diferentes e por várias casas agrupadas.

Apesar do modelo CFD apresentar ótimos resultados comparado a outros modelos [35], [38], o CFD tem a desvantagem de apresentar alto esforço computacional e difícil aplicação para uma área grande, como uma metrópole, por exemplo [14], [19].

Modelo de Mesoescala e Microescala. Modelos em mesoescala são capazes de realizar previsões de vento para regiões maiores. Embora possam fornecer uma visão geral da velocidade do vento para uma área inteira, não podem ser usados para fins de posicionamento de turbinas, pois têm resolução baixa e não incluem os efeitos topográficos locais [14]. Os modelos eólicos de microescala incluem os efeitos de características topográficas, como obstáculos, orografia e rugosidade do terreno. Por consequência, os modelos de microescala apresentam uma maior resolução, o que os tornam mais adequados para fins de posicionamento de turbinas [14].

Os modelos de mesoescala amplamente utilizados são o WRF (*Weather Research and Forecasting Model*), MASS (*Mesoscale Atmospheric Simulation System*) e NWP (*Numerical Weather Prediction*).

O modelo atmosférico de mesoescala WRF é um modelo de tempo e clima de mesoescala que contém uma gama de parâmetros físicos, capazes de descrever a totalidade dos processos atmosféricos [34], [43]. Esse tipo de modelo é classificado como não-hidrostático de previsão numérica de tempo e clima. Seus conceitos físicos são baseados na conservação de massa, que considera a variação temporal em um ponto específico, resolvendo as equações do estado da atmosfera de forma completa adicionando os efeitos das acelerações na vertical [43], [44]. A descrição sobre a arquitetura e o desempenho do WRF pode ser encontrada em [45].

A aplicação de modelos numéricos de mesoescala também pode ser utilizada para a previsão em curto e médio prazo do regime de vento, imprescindíveis para o planejamento da operação dos parques eólicos e do sistema de distribuição de energia [20], [21], [25].

Nos trabalhos [43], [44], [46] o modelo de mesoescala WRF é utilizado para avaliar e identificar as áreas promissoras no estado de Alagoas para instalação de parques eólicos. Em [46] um estudo mais detalhado utilizando modelos de microescala é realizado, o qual incorpora em suas simulações variações locais dos padrões do vento (topografia, rugosidade e obstáculos).

Outro *software* muito utilizado é o Openwind, pois acopla os modelos de mesoescala (NWP) e microescala (WindMap) em uma única plataforma [38], [47]. Trata-se de uma otimização para minimizar a diferença entre as componentes da velocidade medida e a velocidade estimada, usando como restrição a equação da conservação da massa, na forma de multiplicadores de Lagrange. Essa formulação evita a solução das equações de Navier-Stokes [41], o que reduz o tempo computacional, resultando em excelentes resultados, principalmente para terrenos planos [38].

3.4. Modelos Híbridos

Em [8], [19] os autores utilizam em uma primeira fase do método um modelo de mesoescala com alta resolução de grade (ex: 1 km $\times$ 1 km) e depois, dentro da área de uma célula, são realizadas simulações de CFD considerando os resultados de mesoescala. A finalidade é gerar mapas de velocidade e densidade de potência da área estudada.

A justificativa para a junção dos dois modelos é que o modelo CFD apresenta alto esforço computacional [19]. Para solucionar esse problema, em [19] os autores consideram a construção de uma superfície digital do ambiente urbano (U-DTM), para que a área de edifícios possa ser tratada como um mapa topográfico simplificado, para finalmente selecionar áreas adequadas para instalação de pequenas turbinas eólicas. De acordo com o trabalho, esta superfície pode ser facilmente gerada usando como entrada a descrição dos edifícios na forma de um mapa CAD, desde que os contornos possuam valores de descrição de altura. Estes últimos são então sujeitos a um método de interpolação, neste caso o método Kriging, para gerar a superfície. Para realizar a avaliação do potencial eólico, podem ser utilizados várias tipologias de modelos e ter como entrada o mapa de contorno.

De acordo com [8] este método pode ser facilmente inserido como entrada em quase todos os tipos de modelos: modelos de micro e mesoescala, modelos CFD e construção de modelo 3D para experimentos em túnel.

Em [17] os autores têm como objetivo fornecer orientações para otimizar desenvolvimento de pequenas turbinas eólicas em áreas urbanas, desenvolvendo um método aprimorado para estimar os recursos eólicos através de uma vasta área urbana. Já [48] possui o objetivo de aplicar e avaliar uma estrutura integrada para selecionar, em nível regional, os locais mais apropriados para o desenvolvimento de projetos de parques eólicos. Para isso, foi desenvolvido um procedimento de análise de decisão multicritério com base em GIS (Sistemas de Informação Geográfica).

No trabalho [48] dados referenciados espacialmente (entradas) são combinados em um mapa de decisão comum. Basicamente, a metodologia consiste em 4 etapas: (a) a exclusão de locais inviáveis (restrições de planejamento) usando camadas de exclusão individuais e critérios booleanos (verdadeiro / falso); (b) a seleção (identificação) de critérios de avaliação; (c) a representação de os critérios de avaliação como conjuntos fuzzy para gerar um conjunto de mapas padronizados para cada critério; e (d) a aplicação de um modelo multicritério de tomada de decisão (MCDM).

A metodologia de [10] é desenvolvida para prever as velocidades médias do vento em áreas urbanas acima do telhado. A metodologia utiliza dados geométricos detalhados, que descrevem edifícios e vegetação, para calcular as características aerodinâmicas das superfícies urbanas e é responsável pela influência da heterogeneidade da altura do edifício e da direção do vento sobre os perfis de vento. Posteriormente, é realizada uma avaliação preliminar do potencial acumulado em escala urbana para geração de energia eólica.

4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Como pode ser observado na Seção 3, há diversos métodos para avaliar e caracterizar o potencial eólico em uma região, seja ela no meio urbano ou rural. Nesta seção será apresentada uma comparação entre os artigos revisados através da Tab. 1. O objetivo é resumir a finalidade e o principal ponto de cada artigo revisado, apontando as técnicas utilizadas e as principais conclusões abordadas pelos autores.

Tabela 1: Comparação entre técnicas utilizadas e finalidades de cada um dos artigos que representam o estado da arte em previsão de potencial eólico.

Trabalho	Finalidade	Técnica	Conclusões
[10]	Desenvolver uma metodologia para prever as velocidades médias do vento acima do telhado de uma construção	Modelo digital de elevação (DEM) e ArcGIS	Erro médio percentual e absoluto de 11, 7% e 0, 41 m/s, respectivamente; A densidade de potência acima de alguns edifícios podem ser comparada a locais rurais; Sugere que as incertezas nos dados de altura do edifício pode aumentar a imprecisão da previsão.
[11]	Desenvolver um procedimento para determinar possíveis locais de montagem de UWTs e obter estimativas de energia	CFD	Erro médio das velocidades calculadas com as medidas menores que 10%; O procedimento proposto: útil para realização de densidade de potência, intensidade de turbulência, otimizar possíveis locais de montagem e estimar a energia eólica; Telhados arredondados aumentam a densidade de potência em 86, 5% em relação aos telhados retangulares
[14]	Desenvolver uma metodologia de mapeamento de recursos eólicos urbanos	Híbrido: WASP e superfície sintética da área urbana	A partir da geração do mapa com 25 m de resolução: áreas onde estão os edifícios altos e conjuntos de edifícios (cânions das ruas) apresentam as maiores velocidade do vento; No mapa de vento é possível analisar maior velocidade do vento em áreas de baixa densidade de edifícios e menor velocidade do vento em áreas altamente densas
[15]	Analisar a viabilidade da utilização de turbinas eólicas em áreas urbanas	CFD	O efeito de concentração entre edifícios pode aumentar significativamente a geração de energia eólica; A velocidade do vento pode ser ~1, 5 a 2 vezes maior que a do nível do solo, dependendo da altura do edifício; Quanto menor a distância de construção, maior é a velocidade do vento
[17]	Identificar os melhores locais para instalação de pequenas UWTs	Baseado no Modelo Mesoescala NOABL	Análise Objetiva Numérica da Camada Limite (NOABL, do inglês <i>Numerical Objective Analysis of Boundary Layer</i>) ferramenta para calcular a velocidade do vento; Resultado utilizado para identificar os melhores bairros para instalação de pequenas turbinas eólicas; Bairros mais afastados do centro da cidade tendem a ter maior fator de capacidade de geração; Para cada bairro existe grande variabilidade no desempenho de diferentes tipos de turbinas; Turbinas com eixo de rotação na horizontal (HAWTs, do inglês <i>Horizontal Axis Wind Turbines</i>) geralmente apresentam melhores desempenhos do que turbinas com eixo na vertical (VAWTs, do inglês <i>Vertical Axis Wind Turbines</i>); Fator de capacidade média: HAWTs > 6, 4% e VAWTs ≤ 6, 4%
[19]	Estimar o potencial eólico urbano de uma grande área	CFD-Complex e CFD-Urban e U-DTM	Fator de correção para o novo mapa gerado: 6, 65% da velocidade do vento e 10% da densidade de potência; Vantagem: Realizando o U-DTM o esforço computacional diminui; Metodologia replicável para outras regiões urbanas; Identificação de áreas adequadas para instalação de pequenas turbinas eólicas
[34]	Avaliar as condições de vento no Estado da Paraíba, utilizando dois métodos	Modelo de Mesoescala: WRF e BRAMS	Ambos os modelos conseguem reproduzir bem a variação média mensal da velocidade registrada para o período analisado; Dificuldade em reproduzir as variações de pequena escala de tempo; Correção do modelo com a utilização de modelo de microescala
[35]	Comparar os modelos em terreno plano e complexo	WASP, CFD, SiteWind e NWP-LES	Os quatro modelos apresentam melhor desempenho em terrenos planos quando comparados a terrenos complexos; RMSE: SiteWind 0, 45 m/s (5, 4%), NWP-LES 0, 48 m/s (5, 8%), WASP 0, 62 m/s (8, 0%) e CFD 0, 76 m/s (9, 4%)
[38]	Comparar os modelos	WASP, CFD e OpenWind	Este estudo realiza simulações em diferentes alturas, 80, 100 e 120 m; Quanto maior a altitude, mais os modelos WASP e OpenWind superestimam a velocidade do vento.
[39]	Realizar uma análise da densidade de energia eólica	Híbrido: NWP, classificação Fuzzy e WASP	Área com elevado potencial eólico acima de 80 m acima do solo; Densidade de potência máximo e mínimo 8.115 W/m ² sudeste de Duqm e 206 W/m ² leste de Duqm, respectivamente
[40]	Comparar dois métodos na geração de mapas eólicos	Modelo de Mesoescala: KAMM e WRF	Em relação aos dados medidos e simulados: KAMM (Modelo de Mesoescala Atmosférico de Karlsruhe, do inglês <i>Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model</i>) subestima e WRF superestima a velocidade média do vento; Erro médio WRF < KAMM; WRF é mais adequado para solucionar problemas de vento complexo
[42]	Analisar a característica do vento em diferentes perfis de telhado	CFD	As características do fluxo dependem fortemente do perfil dos telhados; A densidade de potência acima do telhado plano é maior e mais consistente do que acima dos outros tipos de telhado (inclinado e piramidal)

Nota-se que para analisar e extrair o potencial eólico de uma determinada região a maioria das técnicas são baseadas em métodos de mesoescala, tais como WRF, NWP, WASP e KAMM. Estes modelos utilizam dados climatológicos de

grandes períodos, na ordem de 10 a 20 anos, o que corrobora para uma vantagem em realizar a análise histórica do fluxo do vento de uma determinada região. A desvantagem é que sua modelagem obtém melhores resultados apenas quando o local analisado apresenta periodicidade no fluxo do vento. Uma forma de melhorar os resultados obtidos através dessas técnicas seria utilizar em conjunto outras técnicas, como uma superfície sintética do local de estudo, casos dos artigos [10], [14], [17] ou realizar a união de diversos outros métodos [39].

Tendo as considerações em vista, para obtenção do potencial eólico de um ponto específico em ambiente urbano, o método escolhido deve ser baseado em CFD, pois esta técnica permite modelar o fluxo do vento sujeito a turbulências. A desvantagem em seu uso é o seu elevado custo computacional, além de não se aplicar a grandes áreas. A aplicação fica restrita a pequenas áreas como um topo de edifício, telhado ou no máximo uma rua. Para a obtenção do mapa do potencial em uma área metropolitana é necessária a utilização em conjunto de métodos de mesoescala e microescala.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado abordou algumas técnicas utilizadas para estimar e avaliar o potencial eólico em uma determinada região. Observou-se que muitos estudos exploram o recurso eólico em áreas planas, voltados para localização de parques eólicos. Para esta aplicação a técnica mais utilizada é o modelo numérico computacional WAsP, pois é um método simples com custo computacional baixo, quando comparado aos métodos mais robustos, como o CFD.

Concluiu-se que o vento apresenta uma característica peculiar no ambiente urbano. A presença de obstáculos, provoca um fluxo turbulento ao redor de casas e edifícios, o qual dificulta a instalação de aerogeradores no ambiente urbano. Para realizar a análise do potencial eólico dessas áreas, o modelo mais adequado é o CFD. No entanto, a desvantagem deste modelo é que ele apresenta elevado esforço computacional, por este motivo não é recomendado aplicá-lo em áreas grandes, como na escala de cidade, apenas em dimensões de ruas e bairros.

Para avaliar o potencial eólico em grandes áreas, o recomendado é utilizar em conjunto os modelos de mesoescala e microescala. Esse modelo apresenta ótimos resultados, tanto para regiões planas como para regiões com relevo complexo.

A técnica de modelos físicos é uma ótima opção para avaliar parâmetros específicos no desempenho geral do modelo, tornando-o adequado para o planejamento do ambiente urbano. A desvantagem deste modelo é o custo elevado.

O método estatístico, em geral, fornece informações mais apropriadas para estimar a produção energética em áreas rurais. Visando fornecer resultados adequados para a produção energética no ambiente urbano, no entanto esta técnica necessita de medições em alta resolução e com alto grau de precisão dos ventos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL)* pelo suporte e financiamento na realização do projeto de pesquisa PD ANEEL 2866-0464/2017 (Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da Geração Distribuída por Fontes Incentivadas).

REFERÊNCIAS

- [1] N. Nguyen-hong, H. Nguyen-Dc, and Y. Nakanishi, "Optimal Sizing of Energy Storage Devices in Isolated Wind-Diesel Systems considering Load Growth Uncertainty," *IEEE Transactions on Industry applications*, vol. 54, no. 3, pp. 1983–1991, 2018.
- [2] "Global Energy e CO2 Status Report," <https://www.iea.org/geco/renewables/>, International Energy Agency, Tech. Rep., 2019.
- [3] "Global Wind Statistics 2017," https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf, Global Wind Energy Council (GWEC), Tech. Rep., Fev. 2018.
- [4] "Global Wind Report 2018," <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>, Global Wind Energy Council (GWEC), Tech. Rep., Abr. 2019.
- [5] L. Nascimento, "Produção de energia eólica no país atinge marca de 14 gigawatts," 2018. [Online]. Available: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-11/producao-de-energia-eolica-no-pais-atinge-marca-de-14-gigawatts>
- [6] "Plano Decenal de Expansão de Energia 2027," http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Ministério de Minas e Energia, Tech. Rep., 2018.
- [7] D. T. Cruz, "Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: Propostas para desenvolvimento do setor," Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2015.
- [8] A. Estanqueiro, P. Costa, and T. Simões, "A first methodology for wind energy resource assessment in urbanised areas in Portugal," *EWEC 2009*, 2009.
- [9] S. Carcangiu and A. Montisci, "A building-integrated eolic system for the exploitation of wind energy in urban areas," in *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*. IEEE, 09 2012, pp. 172–177.
- [10] J. T. Millward-Hopkins, A. S. Tomlin, L. Ma, D. B. Ingham, and M. Pourkashanian, "Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model," *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 701–710, 2013.
- [11] A. S. Yang, Y. M. Su, C. Y. Wen, Y. H. Juan, W. S. Wang, and C. H. Cheng, "Estimation of wind power generation in dense urban area," *Applied Energy*, vol. 171, pp. 213–230, 2016.
- [12] A. S. Bahaj, L. Myers, and P. A. B. James, "Urban energy generation : Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, pp. 154–165, 2007.
- [13] J. Cace, E. ter Horst, K. Syngellakis, M. Niel, P. Clement, R. Heppener, and E. Peirano, "Urban Wind Turbines: Guidelines for Small Wind Turbines in the Built Environment," 2007.
- [14] F. M. Yemer, "Urban Windmap for Delft, Rotterdam and Zoetermeer," Master's thesis, Delft University of Technology, 2010.
- [15] D. Ayhan and S. Saglam, "A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1040–1049, 2012.
- [16] J. T. Millward-hopkins, A. S. Tomlin, L. Ma, D. B. Ingham, and M. Pourkashanian, "Mapping the wind resource over UK cities," *Renewable Energy*, vol. 55, pp. 202–211, 2013.
- [17] D. R. Drew, J. F. Barlow, and T. T. Cockerill, "Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for Greater London, UK," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 115, pp. 104–111, 2013.

- [18] O. Amarante, M. Brower, J. Zack, A. L. Sá, E. E. Schubert, S. TrueWind, and C. d. p. d. E. E. CEPEL, “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro,” p. 44, 2001.
- [19] T. Simões and A. Estanqueiro, “A new methodology for urban wind resource assessment,” *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 598–605, 2016.
- [20] C. Mattar and D. Borvar, “Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile,” *Renewable Energy*, vol. 94, no. 0960-1481, pp. 22–31, 2016.
- [21] L. I. C. Pinto, F. J. L. Lima, F. R. Martins, and E. B. Pereira, “Análise de agrupamento na otimização de futuras aplicações de modelagem numérica na estimativa e previsão de recurso eólico,” *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 10, no. 6, pp. 1698–1711, 2017.
- [22] M. d. O. Pinto, *Fundamentos de Energia Eólica*, 2014.
- [23] P. R. Rodrigues, J. B. S. O. Guerra, and Y. A. Youssef, *Energia Eólica em Energias Renováveis*, January 2011.
- [24] d. S. R. Custódio, *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Eletrobrás, 2009.
- [25] F. R. Martins, R. A. Guarnieri, and E. B. Pereira, “O aproveitamento da energia eólica,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, pp. 1–1304, 2008.
- [26] C. Beller, *Urban Wind Energy- State of the Art 2009*, riso-r-1668 ed. Roskilde, Denmark: Riso DTU, National Laboratory for Sustainable Energy, 2009.
- [27] L. de Sousa Oliveira, “Regras e boas práticas para instalação de torres anemométricas voltadas para estudo de potencial eólico,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [28] MEASNET Procedure, “Evaluation of Site-Specific Wind Conditions,” p. 56, 2016.
- [29] J. V. Seguro and T. W. Lambert, “Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85, no. 1, pp. 75–84, 2000.
- [30] J. L. Acosta and S. Ž. Djokić, “Assessment of renewable wind resources in UK urban areas,” 2010, pp. 1439–1444.
- [31] T. P. de Oliveira, R. S. da Silva Junior, R. F. F. Lyra, and S. C. Holanda, “Estudo Da Produção De Energia Eólica a Partir De Medições Anemométricas Da Estação De Craibas/Al E Simulações Com O Modelo Wasp,” *Ciência e Natura*, vol. 38, pp. 477–483, 2016.
- [32] C. P. d. E. COPEL, I. d. T. p. o. D. LACTEC, and C. SCHUBERT, *Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólico-Elétricos*, 2007.
- [33] Q. Hernández-Escobedo, R. Saldaña-Flores, E. R. Rodríguez-García, and F. Manzano-Agugliaro, “Wind energy resource in Northern Mexico,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 890–914, 2014.
- [34] S. S. D. Oliveira and E. P. D. Souza, “Análise de Modelos de Mesoescala para Caracterização do Potencial Eólico do Estado da Paraíba,” *Revista Brasileira De Meteorologia*, vol. 32, no. 2, pp. 277–291, 2017.
- [35] P. Beaucage, M. C. Brower, and J. Tensen, “Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping,” *Wind Energy*, vol. 17, no. 2, pp. 197–208, 2014.
- [36] M. P. Pes, “Estudo do impacto das mudanças climáticas no potencial eólico do estado do rio grande do sul. para os períodos de 2010 a 2040 e 2070 a 2100,” Master’s thesis, Dissertação de Mestrado em Meteorologia, São José dos Campos (SP): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2010.
- [37] P. S. Jackson and J. C. R. Hunt, “Turbulent wind flow over a low hill,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 101, no. 430, pp. 929–955, 1975.
- [38] D. A. Ramos, V. G. Guedes, R. R. Pereira, T. A. Valentim, and W. A. Netto, “Further considerations on WAsP, OpenWind and WindSim comparison study: Atmospheric flow modelling over complex terrain and energy production estimate,” in *Brazil WindPower*, 2017.
- [39] S. Al-Yahyai and Y. Charabi, “Assessment of large-scale wind energy potential in the emerging city of Duqm (Oman),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 438–447, 2015.
- [40] C. Lennard, A. N. Hahmann, J. Badger, N. G. Mortensen, and B. Argent, “Development of a Numerical Wind Atlas for South Africa,” *Energy Procedia*, vol. 76, pp. 128–137, 2015.
- [41] T. Wallbank, “WindSim validation study,” p. 89, 2008.
- [42] L. Ledo, P. B. Kosasih, and P. Cooper, “Roof mounting site analysis for micro-wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1379–1391, 2011.
- [43] B. R. G. Jatobá, R. da Salustiano, S. Junior, R. F. da Lyra, Fonseca, R. L. Rocha, and L. Y. Costa, “Avaliação do Potencial eólico para a cidade de Craibas-AL utilizando o modelo meteorológico WRF em alta resolução,” *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 6, no. 4, pp. 787–810, 2017.
- [44] D. N. d. S. Ramos, R. F. d. F. Lyra, and R. S. da Silva Júnior, “Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o Estado de Alagoas,” *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 28, no. 2, pp. 163–172, 2013.
- [45] J. Michalakos, J. Dudhia, D. Gill, T. Henderson, J. B. Klemp, W. Skamarock, and W. Wang, “The Weather Research and Forecast Model : Software Architecture and Performance,” in *11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology*, no. January, 2004.
- [46] R. S. Silva Junior, R. F. F. Lyra, D. N. d. S. Ramos, M. A. L. Moura, H. B. Gomes, and S. C. Holanda, “Prognóstico Do Vento Para O Estado De Alagoas Utilizando O Modelo Wrf Em Alta Resolução: Avaliação Da Melhoria Da Topografia, Uso Do Solo E Velocidade De Fricção,” *Ciência e Natura*, vol. 38, p. 137, 2016.
- [47] R. M. Dorado, L. B. Trindade, J. L. R. Luz, D. G. D. F. Filho, M. R. D. Moraes, A. P. Petry, and B. E. J. Bodmann, “Aplicação de Modelo de Mesoescala para Desenvolvimento de Projetos Eólicos,” *Brazil Windpower*, no. June 2014, p. 11, 2013.
- [48] D. Latinopoulos and K. Kechagia, “A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece,” *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 550–560, 2015.

A SURVEY ON THE DEVELOPMENT OF WIND ENERGY POTENTIAL ATLAS FOR URBAN AREAS

Abstract. The generation of electricity from renewable sources has been following a growing trend in recent decades, boosted by the incentive granting for distributed generation and micro/mini generation by several countries. This type of generation can provide important benefits to the electric grid: postponement of investments in the expansion of the distribution and transmission systems; low environmental impact; loss reduction and diversification of the energy matrix. Despite the incentives, it is observed that the area of micro and mini wind generation in metropolitan regions does not present compatible growth, especially when compared to wind generation in rural regions. The lack of more detailed studies of wind potential in metropolitan regions may be a determining factor for the small economic development of the sector. In this sense, this paper aims to present the state of the art of wind flow mapping in rural and urban areas. A survey on the main techniques used for this purpose was performed such as physical, statistical, numerical and classifier models. Numerical models are the most widely used techniques despite their higher computational cost. It was also observed that the use of hybrid techniques can increase the accuracy of the obtained wind atlas. In particular, an extensive research on the characterization of the wind resource in the metropolitan environment is presented, and it was concluded that the wind speed behavior in this scenario is different when compared to the rural region, requiring the adaptation of conventional techniques to obtain adequate results.

Keywords: Wind atlas, metropolitan areas, renewable energy, minigeneration, microgeneration