UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

LEONARDO ALBERTO HUSSNI E SILVA

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

SÃO PAULO
2020

LEONARDO ALBERTO HUSSNI E SILVA

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

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Demetrio Cornilios Zachariadis

SÃO PAULO
2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Hussni, Leonardo Alberto

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. /Leonardo Alberto Hussni ; orientador: Demetrio Cornilios Zachariadis. – São Paulo, 2020.

115 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Energia eólica. 2. Fontes alternativas e energia. 3. Geração distribuída. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Título: 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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Demetrio Cornilios Zachariadis

Aprovado em:

Banca Examinadora

	Prof. Dr.	Instituição	
JulgamentoAssinatura			

	Prof. Dr.		Instituição	
JulgamentoAssinatura				

	Prof. Dr.		Instituição	
JulgamentoAssinatura				

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Lauro, que sempre se referia às pequenas turbinas eólicas carinhosamente como os “ventiladorzinhos” do Leo, infelizmente não pôde vivenciar esta importante etapa da minha vida, mas está sempre presente em meus pensamentos.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Maria Fernanda e irmã Ana Cláudia pelo carinho e apoio incondicional durante toda essa jornada.

À minha avó Dona Mirian e toda minha família sempre unida nos bons e maus momentos.

À Roberta, namorada, parceira e confidente, pela compreensão durante os intermináveis artigos e apresentações em congressos.

À Prof. Dra. Hirdan que me reintegrou e me socializou a vida acadêmica depois de um bom tempo afastado.

Ao Alcântaro sempre solícito no auxílio às questões eólicas, tratamento dos dados e ensinamentos no manuseio do Windographer.

Ao Prof. Dr. Amauri pelo carinho e suporte, sem sua valiosa contribuição este trabalho não teria transcorrido.

À equipe do professor Amauri, do Laboratório de Micrometeorologia do IAG:

À querida Georgia, destemida pesquisadora, desde incêndio na Antártida a cobra em Itutinga, obrigado pela parceria nos trabalhos de campo;

E ao Gregory e Lucas que de alguma forma contribuíram para execução da dissertação.

Ao Thales Amaral, amigo e colega de turma, pela ajuda no cálculo de viabilidade.

Ao Ronald da empresa Energia Pura pela consultoria de produtos e mercado.

Ao Instituto de Energia e Ambiente, Professores, Colaboradores e Colegas pelos ensinamentos, convivência e amizade desde a época de aluno especial e depois como regular.

À CAPES pelo auxílio financeiro para a pesquisa e participação em congressos.

À Marinha do Brasil pela liberação para assistir às disciplinas enquanto ainda servia à corporação como Primeiro-Tenente e aos Campanhas pelo incentivo à vida acadêmica e colaboração nas listas de exercícios.

E, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Demetrio pela amizade e confiança depositada durante todo esse tempo, seus conselhos e direcionamentos engrandeceram meu desenvolvimento acadêmico, pessoal e profissional.

RESUMO

No Brasil, a energia eólica superou as expectativas de produção de energia o que era visto com desconfiança devido à intermitência da fonte. As condições climáticas favoráveis, principalmente no nordeste e sul, posicionaram-na em segundo lugar na Matriz Elétrica Brasileira ultrapassando as fontes mais tradicionais como as derivadas de petróleo e nucleares e ficando atrás apenas da fonte hídrica, sendo esta consolidada no cenário nacional. Ao contrário da geração eólica de grande porte, as pesquisas relacionadas à geração em pequena escala são incipientes no Brasil, porém as modificações realizadas na legislação referente a Geração Distribuída fizeram com que pesquisas relacionadas ao assunto passassem a ser desenvolvidas, objetivando a aplicação de sistemas eólicos de pequeno porte *on-grid*. Para que o sistema eólico se adeque ao disposto na regulamentação o mesmo deve estar instalado no local ou adjacente à unidade consumidora que receberá a energia advinda do aerogerador, interligando-se à rede elétrica da concessionária. Nesse sentido, o intuito é verificar a aplicabilidade e viabilidade de Aerogeradores de Pequeno Porte inseridos em meio urbano, mais especificamente no alto de edifícios em um cenário onde as condições do vento são caracterizadas por velocidades baixas e maior turbulência do vento devido à presença de obstáculos. Após medições desenvolvidas através de estação meteorológica situada em alto de edifício, realizou-se o tratamento dos dados brutos para simulação em software específico de análise do vento. Os resultados obtidos mostram a dinâmica do vento na região e apresentam estimativas de produção de energia em aerogeradores selecionados durante o estudo. A pesquisa em questão foi realizada em parceria entre o IEE e o IAG que forneceu os significativos dados anemométricos e suporte para o estudo.

Palavras Chave - energia eólica, ambiente urbano, geração distribuída, aerogeradores de pequeno porte.

ABSTRACT

In Brazil, wind energy exceeded energy production expectations, which was viewed with suspicion due to the intermittency of the source. Favorable climatic conditions, especially in the northeast and south, positioned this type of source in second place in the Brazilian Electrical Matrix, the most traditional sources such as oil derivatives and nuclear, behind only the water source, which is consolidated in the national scenario. In contrast to large-scale wind power generation, surveys related to small-scale are incipient in Brazil, however modifications in the legislation of Distributed Generation make that researches related to the subject are developed, aiming at the application of wind systems small on-grid. The compliance of wind system according the regulations, it must be installed on site or adjacent to the consumer unit that will receive the energy from the wind turbine, interconnecting to the concessionaire's electrical grid. In this sense, the aim is to verify the applicability and feasibility of Small Wind Turbines inserted in an urban environment, more specifically on top of buildings in a scenario where wind conditions are characterized by low speeds and greater wind turbulence due to the presence of obstacles. After measurements carried out through a meteorological station located on top of a building. After measurements carried out through a weather station located on top of a building, raw data were processed for simulation using specific wind analysis software. The results obtained present the dynamics of the wind in the region and present estimates of energy production in wind turbines selected during the study. The research in question was carried out in partnership between the IEE and the IAG, which provided significant anemometric data and support for the study.

Keywords - wind energy, urban environment, distributed generation, small wind turbines.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ranking dos países com maior capacidade eólica instalada.....	17
Figura 2 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas de grande porte	18
Figura 3 - Aerogerador de pequeno porte integrados à edificações	20
Figura 4 - Aerogerador de pequeno porte sem hélice	21
Figura 5 - Classes de vento definidos pela Comissão Internacional de Eletrotécnica	22
Figura 6 - Consumo Anual de Energia Elétrica no Brasil (GWh).....	24
Figura 7 - Estações meteorológicas IAG.....	26
Figura 8 - Medições em topo de dois edifícios na Irlanda	29
Figura 9 - Desenvolvimento de APP em túnel de vento	30
Figura 10 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	33
Figura 11 - Distribuição geral dos ventos	47
Figura 12 - Variação vertical da velocidade do vento horizontal médio.....	50
Figura 13 - Componentes de uma turbina de grande porte	50
Figura 14 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal	51
Figura 15 - Aerogerador de pequeno porte, Skystream 3.7, conectado à rede do Instituto de Energia e Ambiente no campus da Cidade Universitária da USP.....	53
Figura 16 - Principais tipos diferentes de turbinas de eixos verticais	55
Figura 17 - Tipos de turbinas de eixo horizontal.....	56
Figura 18 - Tipos de turbinas de eixo horizontal.....	56
Figura 19 - Gráfico rotor vs. velocidade de ponta de pá	58
Figura 20 – Frequência relativa de ocorrência de vento baseada na distribuição de Weibull.....	60
Figura 21 - Curva de potência da turbina Skystream 3.7 (2.4 kW) em termos da variação da intensidade de turbulência e velocidade do vento	61
Figura 22 - Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador de eixo horizontal	63
Figura 23 - Curva potência x velocidade do vento.....	64
Figura 24 - Pontos cardeais, colaterais e subcolaterais presentes na rosa dos ventos	67
Figura 25 - Faixas em graus ° das direções cardinais.....	67
Figura 26 - Imagem do edifício de SFZ	69
Figura 27 - Torre meteorológica de SFZ.....	69
Figura 28: Aerogeradores selecionados para simulação	71
Figura 29 - Anemômetro analógico de torre	72
Figura 30 - Anemômetro utilizado durante a pesquisa.....	72
Figura 31 - Frequência de Direção do Vento	75
Figura 32 - Frequência Mensal de Direção do Vento.....	75
Figura 33 - Ocorrências da direção do vento	77
Figura 34 - Ocorrência Mensal de Direção do Vento.	77
Figura 35 - Curva da velocidade média mensal dos ventos	79
Figura 36 - Perfil médio diário do vento	79
Figura 37 - Perfil diurno dos meses	81
Figura 38 - Frequência de distribuição do vento.....	82
Figura 39 - Curva de potência Proven 2.5.....	84
Figura 40 - Curva de potência do APP Skystream 3.7	85
Figura 41 - Curva de potência do APP Raum 3.5	85

Figura 42 – Curva experimental de potência do APP Hoyi 300	86
Figura 43 - Medidas de IT entre os dias 01 e 28 de fevereiro de 2014	87
Figura 44 - Exemplo ilustrativo da <i>TI</i> diária: 09/02/2014.....	88
Figura 45 - Intensidade de turbulência vs. velocidade do vento	88
Figura 46 - Intensidade de turbulência vs. horas do dia.....	89
Figura 47 - Média horária da velocidade do vento em fevereiro	89
Figura 48 - Comparação rosa dos ventos, <i>TI</i> vs. Direção (esquerda) e Freq. do vento vs. Direção (direita).....	90
Figura 49: Deslocamento da curva de potência vs. velocidade do vento	95
Figura 50 - Configuração de um aerogerador de eixo horizontal.....	101
Figura 51 - Gerador de indução magnética	102
Figura 52 - Instalação da turbina em solo	105

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades consumidoras com geração distribuída por fonte.....	35
Tabela 2 - Unidades consumidoras com geração distribuída por classe de consumo	35
Tabela 3 - Análise <i>SWOT</i>	37
Tabela 4 - Unidades consumidoras com geração distribuída por modalidade	43
Tabela 5 - Unidades consumidoras com geração distribuída nos estados.....	43
Tabela 6 - Valores de comprimento de rugosidade.....	48
Tabela 7 - Especificação dos sensores de medição	73
Tabela 8 - Dados técnicos dos Aerogeradores	74
Tabela 9 - Frequência vs. Direção.....	76
Tabela 10 - Ocorrência vs. Direção.....	78
Tabela 11 - Tabela de frequência de distribuição do vento.....	82
Tabela 12 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Proven 2.5	84
Tabela 13 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Skystream 3.7.....	85
Tabela 14 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Raum 3.5	86
Tabela 15 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Hoya 300.....	86
Tabela 16 - Informações utilizadas na análise de viabilidade	92
Tabela 17 - Cenários de viabilidade propostos	95
Tabela 18 - Custos de instalação de Aerogeradores de Pequeno Porte e Solar Fotovoltaico, 2009 - 2017	97
Tabela 19 - Capacidade instalada de Sistemas Eólicos Distribuídos nos EUA	97
Tabela 20 - Mercado global de aerogeradores de pequeno porte.....	98

LISTAS DE SIGLAS

ABEOLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Aerogerador de Pequeno Porte
<i>BIWT</i>	<i>Building Integrated Wind Turbine</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Cut-in	Vento para início de geração
DIT	Demais Instalações de Transmissão
<i>DOE</i>	Departamento de Energia dos EUA
EMUC	Empreendimento de múltiplas unidades consumidoras
GD	Geração Distribuída
GIGE	Gerador de indução trifásico gaiola de esquilo
GIRB	Gerador de indução com rotor bobinado
GS	Gerador síncrono
<i>GWEC</i>	<i>Global Wind Energy Council</i>
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
iNDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
IT	Intensidade de Turbulência
MME	Ministério de Minas e Energia
<i>Offgrid</i>	Sistema isolado
<i>Ongrid</i>	Sistema conectado a rede
ONS	Operador Nacional do Sistema
<i>Onshore</i>	<i>Parques eólicos localizados em terra</i>
<i>Payback</i>	Retorno de investimento
PCH	Pequenas centrais hidrelétricas
<i>Players</i>	Investidores, grupos e agentes do mercado
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SED	Sistema Eólico Distribuído
SIN	Sistema Interligado Nacional
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical
<i>TI</i>	<i>Turbulence Intensity</i>
<i>Trade off</i>	Escolha, conflito de decisões
UC	Unidade consumidora
USP	Universidade de São Paulo
UTE	Usinas termelétricas
VIV	Vibrações induzidas por vórtices
VPL	Valor presente líquido
<i>WACC</i>	<i>Weighted Average Cost of Capital</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

C	fator de escala [ms^{-1}]
c_p	coeficiente de potência
P	potência do vento [W]
ρ	massa específica do ar [kg/m^3]
A	área da seção transversal do rotor [m^2]
v	velocidade do vento [ms^{-1}]
V _{res}	vetor resultante
V _w	vento incidente
V _{tan}	velocidade tangencial
Z _o	comprimento de rugosidade
λ	velocidade de ponta de pá (<i>tip speed ratio</i>)
ω	velocidade angular do rotor [rad/s]
K	fator de forma
σ	desvio padrão da velocidade do vento [ms^{-1}]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA.....	23
1.2. OBJETIVO.....	27
1.2.1. Objetivo geral.....	27
1.2.2. Objetivos específicos.....	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1. Energia eólica em ambiente urbano	29
3.2. Geração distribuída	31
3.2.1. Contextualização da geração distribuída.....	32
3.2.2. Micro e minigeração distribuída	36
3.2.3. Resolução normativa nº 482.....	39
3.2.4. Resolução normativa nº 687.....	41
3.2.5. Estimativas futuras	44
3.3. Estudo eólico.....	45
3.3.1. Mecanismos de geração dos ventos.....	46
3.3.1.1. Efeito da brisa do mar	47
3.3.2. Rugosidade do terreno.....	48
3.3.3. Terrenos complexos	49
3.4. FÍSICA DE AEROGERADORES	50
3.4.1. TURBINAS EÓLICAS	50
3.4.2. Aerogeradores de pequeno porte.....	52
3.4.3. Turbinas eólicas de eixo vertical.....	54
3.4.4. Turbinas de eixo horizontal.....	55
3.5. Energia e potência eólica.....	57
3.5.1. Potência extraída do vento	57
3.5.2. Coeficiente de potência	57
3.5.3. Velocidade de ponta de pá (<i>tip speed ratio</i>).....	58
3.5.4. Limite de Betz	59
3.5.5. Distribuição de Weibull	59
3.5.6. Intensidade de turbulência do vento.....	60
3.5.7. Energia gerada pela turbina.....	62
4. MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1. Programa de simulação Windographer®	68

4.2.	ESTUDO DE CASO	68
4.3.	Medidores.....	71
5.	RESULTADOS.....	73
5.1.	Rosa dos ventos.....	74
5.2.	Velocidade média do vento	79
5.3.	Distribuição da velocidade do vento	82
5.4.	Produção de energia	84
5.5.	Intensidade de turbulência.....	87
5.6.	Análise econômica	90
5.6.1.	Valor Presente Líquido.....	90
5.6.2.	Retorno de Investimento	91
5.6.3.	Custo total de capital	91
5.6.4.	Análise de viabilidade	92
5.7.	Mercado de aerogeradores de pequeno porte	96
5.8.	Sistema eólico distribuído	99
5.8.1.	Componentes do sistema eólico distribuído.....	100
5.8.2.	Sistemas de geração elétrica.....	101
5.8.2.1.	Geradores elétricos	103
5.8.2.2.	Conversores de potência.....	104
5.9.	Requisitos de instalação	105
6.	CONCLUSÃO	107
	ESTUDOS FUTUROS.....	109
	REFERÊNCIAS	110

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da força do vento não é contemporâneo; há milhares de anos o homem a utiliza para diversas finalidades, tais como navegação, ventilação natural de edifícios e moagem de grãos através dos moinhos. Com o decorrer do tempo as pesquisas relacionadas à geração de energia elétrica evoluíram e desencadearam o avanço tecnológico de aerogeradores (DUTRA, R. 2008).

O vento considerado “bom” para a geração de energia elétrica deve ter 3 características fundamentais: unidireção, constância e estabilidade. O nordeste e sul brasileiro possuem tais condições de vento em abundância apresentando fatores de capacidade médios anuais em torno de 40% a 60% em época de “melhores” ventos, muito acima do fator de capacidade médio mundial em torno de 25%. Favorecida por este cenário, a indústria eólica brasileira se desenvolve em ritmo acelerado operando em 12 estados com 7.477 aerogeradores distribuídos em 608 parques eólicos e ultrapassando 15GW de capacidade instalada (ABEEOLICA, 2019).

A intermitência característica da fonte eólica gera incertezas para o Operador Nacional do Sistema (ONS) devido a sua baixa previsibilidade e alta variabilidade, e por apresentar baixo custo operacional recebe prioridade de despacho pelo operador do sistema sempre que estiver disponível. A característica intermitente da fonte eólica “acaba passando despercebida” no Brasil pela constância de geração de energia elétrica demonstrada e possui competitividade frente às tradicionais fontes de energia, como hidrelétrica, biomassa e gás natural, figurando como uma das mais baratas nos leilões (FGV, 2015).

A capacidade de geração eólica do país eleva o Brasil a uma condição de destaque no cenário mundial. De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC), o Brasil passou a assumir a oitava colocação no ranking dos dez países com maior capacidade instalada total de energia eólica, como mostrado na Figura 1 (GWEC, 2018).

Figura 1 - Ranking dos países com maior capacidade eólica instalada

Fonte: (GWEC, 2018).

Observam-se claramente inúmeros benefícios propiciados pela fonte eólica, principalmente relacionados a:

- Contribuição para que o Brasil cumpra seus objetivos em acordos climáticos;
- Emissão zero de CO2 nos parques eólicos após entrada de operação, desconsiderando atividades de manutenção;
- Um dos melhores custos-benefícios na tarifa de energia (melhores preços nos leilões realizados em dezembro de 2018);
- Geração de renda e melhoria de qualidade de vida para proprietários de terra através do arrendamento para colocação das torres (estima-se que este número seja acima de R\$ 10 milhões mensais para um total de 4.000 famílias);
- Compartilhamento do uso da terra com plantações e criação de animais;
- Capacitação de mão de obra local; e

- Criação de postos de trabalho (15 postos de trabalho para cada MW instalado).

Atualmente, há grandes incentivos governamentais de iniciativa global para a implantação de novos sistemas de geração de energia que sejam de baixa emissão de poluentes, renováveis e economicamente viáveis; somente no ano de 2019 foram evitados 21 milhões de toneladas de CO² no Brasil, o que é equivalente à emissão de cerca de 16 milhões de automóveis (ABEEOLICA, 2019).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o potencial de geração de energia eólica no Brasil é estimado em cerca de 500GW, levando em conta apenas a geração “*onshore*”. Esse número supera em três vezes o atual parque nacional gerador de energia elétrica, incluindo todas as fontes disponíveis, como hidrelétrica, biomassa, gás natural, óleo, carvão e nuclear. Atualmente, a geração é realizada por aerogeradores que representam o padrão atual de 2MW a 3MW de potência instalada em torres de aproximadamente 100 metros de altura.

Mesmo sem incentivos ou subsídios, a geração de energia eólica no Brasil nos últimos anos se tornou cada vez mais importante para a segurança energética do país. Em dezembro de 2018, a capacidade global de geração instalada somou 162,5 GW; desse montante, as usinas eólicas responderam por 14,2 GW equiparando-se à capacidade instalada da usina de Itaipu (14 GW). O desenvolvimento de aerogeradores suportados por torres mais altas, Figura 2, permite o aproveitamento de ventos menos turbulentos e velocidades mais elevadas, a evolução tecnológica pode ampliar consideravelmente o setor eólico do país.

Figura 2 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas de grande porte

Fonte: (BLOOMBERG, 2017).

A transição energética é considerada como oportunidade para fomentar ainda mais o volume de aquisição de energia eólica. Especialmente relacionada a turbinas de grande porte, a transição energética está atrelada à implementação de soluções *ongrid* e *offgrid*, atingindo novas faixas de alturas e reinventando a indústria continuamente. O GWEC, a fim de auxiliar na aceleração da transição energética, trabalha constantemente para que se eleve o aproveitamento da energia eólica (GWEC, 2018).

Os dados apresentados nesta seção reforçam os benefícios e os bons números desencadeados pela energia eólica e influenciam investidores e *players* do mercado. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa) e o mecanismo de leilões contribuíram fortemente para o aumento da participação eólica na matriz elétrica brasileira; considerando leilões já realizados e contratos firmados no mercado livre, o Brasil terá cerca de 20 GW de capacidade eólica instalada até 2023 (ABEEOLICA, 2019).

Embora o uso de grandes turbinas seja a forma mais comum de conversão da energia cinética do vento em elétrica, outro tipo similar de dispositivo, de menor escala, também possui potencial de exploração. Esse mercado secundário é composto por pequenas turbinas eólicas que geram energia elétrica de forma descentralizada (TUMMALA et al., 2016).

Enquanto a energia eólica de larga escala vem se consolidando, o mercado referente à geração distribuída (GD) se encontra em estágio embrionário no Brasil. Com poucos estudos sobre as condições do vento em ambiente urbano, esse é um tema ainda a ser explorado e consiste em realizar a geração no próprio local de consumo ou em regiões próximas otimizando os custos de transmissão e distribuição de carga na rede.

De acordo com a norma internacional IEC 61400-2, a definição técnica de uma turbina eólica de pequeno porte pode ser descrita como um dispositivo com uma área de varredura de até 200 m², gerando uma tensão menor que 1.000 Vac ou 1.500 Vcc; no entanto, cada país pode ter a sua própria definição (IEC 61400-2, 2013).

Tal qual as grandes turbinas, os aerogeradores de pequeno porte (APPs) são divididos em duas categorias relacionadas à orientação do seu eixo de rotação: eixo horizontal ou vertical. As turbinas de eixo horizontal são mais apropriadas para condições de vento uniformes e direcionais; seus rotores são movidos

predominantemente pela força de sustentação que atua perpendicularmente ao escoamento do vento e o seu uso é mais intensificado no mercado mundial. Já as turbinas de eixo vertical são impulsionadas tanto pela força de sustentação quanto pela de arrasto que atua na direção do escoamento. Essas turbinas apresentam um *design* mais simples e por não possuírem mecanismo de orientação na direção do vento seu funcionamento se torna menos complexo, porém produzem potência com menos eficiência. Os projetos de APPs não se preocupam apenas com a conversão de energia, mas também com os níveis de ruído, confiabilidade e segurança, além de promoverem integração com edifícios (FIELDS et al., 2016).

O conceito de pequenas turbinas integradas a edifícios (*BIWT*) desencadeou a inovação de modelos de APPs que se adaptam à arquitetura de casas e prédios, Figura 3.

Figura 3 - Aerogerador de pequeno porte integrados à edificações

Fonte: (WINDPOD; LIAM F1, 2020).

Diversos projetos de turbinas de pequeno porte surgem com a proposta de se integrarem de forma harmoniosa às edificações e realizarem o melhor aproveitamento do vento urbano turbulento para geração de eletricidade; em sua maioria as instalações são feitas nos telhados.

Desenvolvedores projetam aerogeradores de variados estilos e formatos, e os modelos não convencionais visam aproveitar ao máximo o potencial eólico proveniente

de diversas direções, como a aceleração vertical do vento causada pela geometria das edificações.

O desenvolvimento de turbinas sem hélices, por exemplo, é um avanço tecnológico que foge completamente do habitual e altera o formato dos dispositivos de aproveitamento do vento ao utilizar o princípio da oscilação, Figura 4. Considerado um problema, fenômenos de ressonância aeroelástica também possuem a capacidade de produzir energia de forma renovável. A ressonância surge quando uma oscilação é reforçada por um movimento periódico; um dos eventos mais famosos provocados pela ressonância aerodinâmica é o colapso da ponte Tacoma Narrows (BILLAH K. Y.; SCANLAN R. H., 1991). Na aeroelasticidade, o deslocamento do ar pode induzir um movimento oscilatório em um corpo quando sua frequência natural se assemelha à frequência dos vórtices criados. Esse fenômeno conhecido como Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) é capaz de produzir energia elétrica através de indução eletromagnética (FENG, C., 1968).

Figura 4 - Aerogerador de pequeno porte sem hélice

Fonte: (VORTEX BLADELESS, 2020).

Os APPs comerciais são, em sua maioria, feitos de fibras de vidro a partir de um molde de alto custo que onera o equipamento e restringe modificações rápidas no projeto. A fabricação sem moldes de lâminas com geometrias personalizadas seria ideal para atendimentos pontuais.

O uso da Manufatura Aditiva (MA) é uma oportunidade para flexibilizar a fabricação e possui potencial para solucionar a demanda por projetos de lâminas

personalizadas para determinados recursos eólicos além de possibilitar a confecção de peças para reparos (PORTO, H. A., 2019).

Para projetos de geração distribuída análises locais devem ser desenvolvidas para que o sistema eólico distribuído (SED) atinja seu melhor desempenho e proporcione uma boa experiência ao consumidor. A insuficiência de dados e a não verificação prévia do potencial eólico no local de implantação acarreta muitas vezes em escolhas inapropriadas de turbinas.

As empresas fabricantes das pás de turbinas de grande porte seguem o estipulado pelas normas IEC e desenvolvem seus produtos com base nas classes de vento, como mostrado na Figura 5. A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) cria padrões com o intuito de melhorar a confiabilidade dos equipamentos. Antes de decidir construir uma turbina eólica em um *site* específico, a velocidade do vento, rajadas extremas e a turbulência devem ser mensuradas para verificar a adequação da turbina à classe de vento.

Figura 5 - Classes de vento definidos pela Comissão Internacional de Eletrotécnica

Classes de Turbinas	Média anual de velocidade do vento (ms-1)	Rajadas
IEC I Alta	10	70
IEC II MÉDIA	8,5	59,5
IEC III BAIXA	7,5	52,5
IV	6	42

Fonte: (IEC, 2013).

As turbinas devem ser projetadas para atingirem ótimo desempenho e confiabilidade em todas as condições do tempo em que estiverem expostas durante toda sua vida útil. Contudo, a aplicabilidade deste conceito de classificação de vento para a fabricação de APPs não é usual. Isto decorre do fato de não serem realizados os estudos necessários para a classificação dos recursos eólicos nas áreas de instalação, como ocorre em ambientes urbanos, objeto de estudo dessa pesquisa, nos quais os ventos são de difícil determinação e fortemente influenciados por turbulência.

Além disso, outro ponto a ser observado é a complexidade dos componentes dos aerogeradores; enquanto as turbinas de grande porte utilizam mecanismos específicos de controle ativo e de inclinação das pás (controle de “*pitch*”), as pequenas turbinas geralmente são mais simples e não contam com o auxílio de sistemas capazes de

melhorar o seu rendimento. Visto isso, a concepção de um APP costuma ser de acordo com o tipo de vento ao qual ele será exposto, ou seja, o seu desempenho depende exclusivamente de seu *design* aerodinâmico e quando sujeito a outra condição de vento tem o seu desempenho prejudicado.

Uma característica adicional dos APPs é o comportamento de auto inicialização. Sem um mecanismo de controle de *pitch* eles dependem exclusivamente do torque aerodinâmico, produzido pelas pás, para começarem a girar. A característica de partida automática em APPs ainda não foi totalmente estudada, porém trabalhos recentes mostraram que o aprimoramento da capacidade de partida pode melhorar consideravelmente o seu desempenho (WORASINCHAI; INGRAM; DOMINY, 2011).

A partida é realizada após as forças desencadeadas pela energia cinética do vento atuarem nas pás do aerogerador, que por sua vez, começam a girar através do torque aerodinâmico produzido. A modelagem do aerofólio é desenvolvida de forma a fornecer um efeito operacional de arrasto ou de sustentação quando as pás são atingidas pelo vento.

A estimativa do potencial eólico consiste na determinação da produção de energia e potências de saída de uma turbina eólica através do confronto com os dados eólicos coletados. Através da utilização de técnicas específicas e análises estatísticas é possível determinar se as condições do local apresentam viabilidade de utilização do recurso energético proveniente do vento. O entendimento das condições climáticas é essencial para uma apuração fidedigna da dinâmica do vento na região.

Em zonas urbanas, o aprofundamento da análise é essencial para que se verifique o comportamento do vento em um cenário onde há grandes variações em distâncias curtas.

1.1. JUSTIFICATIVA

Para que o Brasil garanta um maior progresso econômico é necessário que haja disponibilidade de energia elétrica de modo que proporcione melhores condições de vida a população (GOLDEMBERG J., MOREIRA J., 2013). No futuro o consumo de eletricidade vai ser muito superior aos níveis verificados hoje, a mecanização e automatização serão ampliadas até mesmo em setores onde a sua presença é incomum,

como nas residências, e combinado com o aumento populacional dependerá de oferta de energia suficiente para atender a grande demanda. O gráfico mostrado pela Figura 6 representa o consumo anual de eletricidade dos setores residencial, comercial, industrial e outros (rural, serviço público e iluminação pública), registrados de 1996 até 2018 no Brasil, onde se evidencia um aumento significativo no consumo total ao longo do tempo; algumas quedas no consumo são presenciadas, fato esse devido a situações econômicas nacionais ou globais, mas o que se observa é um aumento contínuo da demanda de energia.

Figura 6 - Consumo Anual de Energia Elétrica no Brasil (GWh)

Fonte: (EPE, 2019).

Com o deplecionamento contínuo dos reservatórios e pela diminuição da aprovação de novos projetos, cada vez mais se contará menos com o aporte das usinas hidrelétricas para suprir a demanda da carga. As termelétricas, consideradas como reservas de energia (*backup*) do sistema elétrico, assumirão um papel mais representativo na matriz elétrica nacional e o aumento da sua utilização acarretará em maiores custos e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente.

O principal questionamento que permeia esta dissertação refere-se à aplicação da energia eólica de pequena escala no centro urbano de uma metrópole em um contexto de produção de energia. Teria viabilidade de implantação em um cenário de alta turbulência e baixa velocidade do vento?

É comprovado que a condição do vento no Estado de São Paulo não é de “boa qualidade” no que se refere à geração de energia elétrica através de turbinas de grande porte. Ao consultar o Atlas Eólico Brasileiro e o Atlas Eólico do Estado de São Paulo verifica-se ventos de baixa velocidade em quase todo o território paulista. Ao contrário de estados do Sul, Norte e Nordeste, São Paulo possui baixa incidência eólica sendo inviável a instalação de usinas eólicas com a tecnologia existente no momento (ATLAS EÓLICO BRASILEIRO, 2001).

A proposta deste trabalho fomenta a inclusão de nova fonte renovável e contribui com os acordos do clima, como o acordo de Paris, ratificado pelo governo brasileiro através da pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (*iNDC*) que tem como objetivo mitigar consequências desfavoráveis ao meio ambiente (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015).

Outro aspecto favorável para a implantação de sistema eólico distribuído é o encarecimento da tarifa elétrica repassada ao consumidor final, tanto em horário de ponta como fora de ponta e através das bandeiras tarifárias, o que é evidenciado constantemente. Além da diminuição da conta de energia do “*prosumidor*”, misto de produtor e consumidor, a descentralização da geração auxilia na redução de perdas técnicas, gera maior segurança e confiabilidade, implementa qualidade ao fornecimento, diminui a dependência da rede de transmissão, permite rápida implantação, apresenta baixos custos de operação e manutenção e propicia desenvolvimento econômico devido a geração de empregos, além de trazer complementaridade ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Por outro lado, a intermitência dos ventos não promove a segurança do fornecimento e gera desconfiança por não propiciar regularidade de geração, sendo esse o fator de maior relevância contra a implantação deste tipo de geração; porém, este estudo visa justamente verificar se esta característica da energia renovável eólica irá comprometer de modo decisivo a viabilidade do seu aproveitamento em ambiente urbano.

Além das diversas características mencionadas a GD também promove baixo impacto ambiental pelo uso mais intensivo de fontes menos poluentes e promove o adiamento de empreendimentos de geração centralizada alimentados por fontes fósseis altamente poluidoras, reduzindo também a necessidade de altos investimentos;

As oportunidades elencadas acima são as mais evidentes. O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento da micro e minigeração distribuída baseada em fontes renováveis de diversos tipos, além da aplicação de sistemas de cogeração, diversificando a matriz energética.

A questão motivadora para elaboração deste trabalho foi o desenvolvimento de um estudo para verificar a previsibilidade da fonte eólica em topo de prédio estimulando a utilização de uma nova forma de geração em centro urbano.

Figura 7 - Estações meteorológicas IAG

Fonte: (AMAURI PEREIRA DE OLIVEIRA ET. AL, 2020).

Os gráficos representados pela Figura 7 são medições anemométricas realizadas em 4 estações distintas geridas pelo Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo (IAG-USP) no mesmo período de semestres diferentes, a partir deles verificou-se que a estação situada em topo de edifício de região urbanizada apresentou melhor índice de velocidade do vento e inspirou o desenvolvimento da pesquisa por apresentar condições eólicas favoráveis para produção de energia eólica a partir de turbinas de pequeno porte.

Durante a pesquisa atividades de trabalho de campo para coleta dos dados e manutenção de equipamentos foram realizadas em conjunto com a equipe de pesquisadores do Laboratório de Micrometeorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG).

O resultado final promoveu a avaliação de desempenho e econômico de aerogeradores para a aplicação de sistemas de geração eólica em pequena escala com aderência à micro e minigeração.

1.2. OBJETIVO

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é identificar o potencial eólico para geração de energia elétrica a partir de turbinas de pequeno porte aplicadas em GD. Este tipo de geração se alinha com o conceito 3D do setor elétrico que trata sobre a descarbonização, descentralização e digitalização, atuais paradigmas que ditarão a forma como o mercado se comportará. Visto isso, a análise da geração de energia eólica a partir de um regime de vento local irregular e fraco de um ambiente com alta taxa de rugosidade será verificada utilizando medições em topo de arranha céu. Considerando que a região onde o edifício se encontra é mais alta em relação a outras localidades da região de São Paulo e possui uma relevante altitude de construção, a torre meteorológica consegue estar posicionada em uma posição onde a velocidade do vento atinge maiores velocidades. Utilizando software específico de simulação foi possível demonstrar as características locais do vento e estimar a energia produzida confrontando APPs para avaliar o potencial de geração anual nas condições encontradas. Durante a transcrição da tese serão explicitados todos condicionantes para a implantação de sistema eólico distribuído.

1.2.2. Objetivos específicos

Para que fosse possível a determinação do potencial dos ventos na localidade do estudo e da viabilidade da tecnologia eólica foi necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Pesquisas e aprofundamento do conhecimento do vento local;

- Coleta de dados a partir de estação meteorológica instalada no local da pesquisa;
- Obtenção e tratamento dos dados para aplicação em ferramenta de simulação específica;
- Simulação dos dados obtidos no software Windographer;
- Leitura e análise da simulação obtida;
- Aplicação das metodologias pretendidas; e
- Identificação dos fatores que influenciaram nos resultados.

A estrutura do texto a seguir é composta pela revisão da literatura, que abrange estudos referentes a aplicação de aerogeradores de pequeno porte, geração distribuída, estudo eólico e física de aerogeradores, seguindo com materiais e métodos, resultados e conclusões.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energia eólica em ambiente urbano

A geração eólica em meio urbano é um tema atual, com um número crescente de pesquisas sendo realizadas em diversos países, especificamente relacionadas a medições por estações meteorológicas em topos de edifícios, como a de Keith Sunderland et al. (2013), desenvolvida na Irlanda referente a aplicação de pequenas turbinas em ambiente turbulento urbano, onde realizou-se medições localmente em dois edifícios distintos Figura 8, como também as de Maryam Zabarjad Shiraz et al. (2020), no Canadá, e de Luisa C. Pagnini et al. (2015) na Itália, que seguiram a mesma linha de pesquisa.

No Brasil, uma pesquisa identificada nesse sentido foi desenvolvida em Olinda/Pernambuco onde foi proposta uma metodologia para a avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano, porém com taxa de rugosidade menor devido a coleta das medições terem sido desenvolvidas à beira mar (VALENÇA, D., 2010).

Figura 8 - Medições em topo de dois edifícios na Irlanda

Fonte: (Sunderland et al., 2013).

A maioria das pesquisas relacionadas ao assunto são destinadas à concepção de aerogeradores de pequeno porte como a de Francesco Balduzzi et. al. (2020), realizado na Itália, relacionado ao desenvolvimento de pequena turbina em fluxos turbulentos, utilizando túnel de vento com uma anteparas vazada para simular a turbulência de terrenos complexos, na mesma linha procedeu-se as pesquisas americana Ravi Anant Kishore et al. (2014) e brasileira de Heitor Andrade Porto (2019).

Figura 9 - Desenvolvimento de APP em túnel de vento

Fonte: (Francesco Balduzzi et. al., 2020).

Turbinas eólicas de pequeno porte são menos competitivas que outras tecnologias aplicadas a micro e minigeração, como módulos fotovoltaicos, uma vez que seus custos de construção e operacionalização são altos em relação à produção de energia, tendo maior utilização em regiões isoladas ou complementos para operações centralizadas (WOOD D., 2011).

Infelizmente, a aplicação de turbinas eólicas em áreas urbanas não tem sido muito bem-sucedida, como mostram alguns exemplos de falhas discutidos em (Tabrizi, Whale, Lyons, Urmee & Peinke, 2017), devido ao fluxo de ar ser muito instável e turbulento em áreas com vários obstáculos. Durante as condições de operação, os dados técnicos fornecidos pelo fabricante muitas vezes não reproduzem o comportamento das turbinas: a produção de energia real muitas vezes é inferior às expectativas.

Através da revisão da literatura foi possível verificar o baixo número de trabalhos relacionados ao assunto, principalmente no Brasil, com o nível de aprofundamento e detalhamento proposto na linha de pesquisa, baseado em dados de medições anemométricas robustas e fidedignas para centro urbano.

Com base na pesquisa realizada, salienta-se o ineditismo do trabalho desenvolvido.

3.2. Geração distribuída

T. Ackermann et al. (2001) discorreu em seu trabalho denominado “*Distributed generation: a definition*” que diferentes definições são utilizadas na literatura, porém na prática isso gera confusão por conta das inúmeras variações, e assim, sugeriu como definição geral que:

“Distributed generation is an electric power source connected directly to the distribution network or on the customer site of the meter”.¹

Os autores relataram que o vasto número de termos utilizados com relação à GD, como “*embedded generation*”, “*dispersed generation*” e “*decentralized generation*” resumem o mesmo conceito, porém justifica que o termo “*embedded generation*” ou geração embutida em português implica um conceito de que a fonte de energia só seria usada localmente. A expressão “*dispersed generation*” é usado por alguns autores para definir a geração entre 1 KW e 1 MW, entretanto, não tem uma consistência na literatura e não deve ser aplicada para este fim. Já “*decentralized generation*” assume que geração distribuída significa a geração de energia elétrica completamente descentralizada que não depende de linhas de transmissão ou grandes usinas centralizadas. Alguns autores ainda assumem que a geração distribuída será capaz de fornecer apenas uma fração da demanda local de energia, porém o trabalho considerou irrelevante o nível de penetração da GD para a proposição da definição (T. ACKERMANN ET AL., 2001).

A integração da geração distribuída é complexa por natureza e rompe com um conceito já estabelecido, pois altera a tradicional forma de conexão da rede elétrica com o consumidor: a corrente elétrica que só tinha um sentido passou a ser bidirecional fazendo com que o consumidor passe a ser também produtor de energia elétrica.

Apesar dos benefícios a alteração da concepção do atual sistema, realizada pela GD, causa impactos no sistema de transmissão e distribuição de energia (KESHAV, S.; ROSENBERG, C., 2011). A inserção de geradores no ponto de consumo ainda não é uma prática comum e implica em alterações na estrutura do sistema já que provoca a

¹ A geração distribuída é uma fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no medidor local do cliente.

inversão do fluxo de potência na rede tornando-o bidirecional e requerendo a substituição dos medidores antigos.

A estrutura de distribuição até o ponto de consumo deverá ser automatizada e inteligente com o provimento de *smart grids*² e da telemedição³ (LO, H.; ANSARI, N. 2012).

Outro aspecto preponderante é que as distribuidoras não têm qualquer incentivo para apoiar a implantação da mini e microgeração distribuída, e além da necessidade de investimentos para conectar e operar essa geração na rede o crescimento da micro e minigeração representa redução do mercado faturado.

Para as distribuidoras, a implantação de microgeradores distribuídos torna mais complexa a rede de distribuição e provoca um aumento do custo operacional para manter os parâmetros físicos da rede em equilíbrio. Do ponto de vista econômico a micro e mini GD acarreta em gastos às concessionárias devido aos investimentos realizados em operação e manutenção da rede, assim como a tarifa branca e as bandeiras tarifárias afetam seu faturamento (FGV, 2015).

3.2.1. Contextualização da geração distribuída

Existe uma correlação entre desenvolvimento econômico e oferta de energia elétrica demandada de um país, pois o acesso à eletricidade é essencial para o progresso, defesa e qualidade de vida da população. No caso brasileiro, criou-se o Sistema Interligado Nacional com ampla extensão de linhas de transmissão que liga as fontes de produção aos centros consumidores, um grande feito para um país de dimensão continental. Um histórico de apagões e falhas no sistema de geração fez com que a geração distribuída ganhasse espaço nas discussões sobre o tema expondo consideráveis expectativas para combater a crise energética e os altos preços das tarifas energéticas praticadas fomentando eficiência e complementando a matriz elétrica brasileira. No decorrer do tópico apresenta-se o cenário corrente das fontes internas de energia, um apanhado do

² Rede de comunicações de dados, integrada com a rede elétrica que coleta e analisa dados capturados em tempo real, referente a transmissão, distribuição e consumo (GAO, J, 2012).

³ Tecnologia que permite que a leitura do medidor seja feita a distância, sendo realizada através de um equipamento que permite a comunicação entre o medidor e a distribuidora.

progresso ocorrido e a situação atual da geração distribuída no país identificando fraquezas e forças através da utilização da metodologia SWOT.

A GD se apresenta como uma alternativa promissora ante aos desafios promovidos pelo caos energético causado por escassez de chuva. O agravamento da crise hídrica trouxe à tona a fragilidade do sistema energético brasileiro; para um país de proporções continentais presume-se que seja fundamental a diversificação de fontes como alternativa ao setor elétrico convencional.

O Brasil detém grande diversidade de recursos naturais com capacidade de gerar energia elétrica a partir de diversas fontes, contudo todo esse recurso não é inteiramente aproveitado, restringindo o seu potencial a poucas fontes primárias. A hidráulica é a principal fonte com um percentual de participação muito superior frente às outras, e seu uso intensivo faz com que a matriz energética brasileira seja considerada renovável.

Baseado no cenário corrente das fontes internas de energia é possível perceber o potencial energético do Brasil e o quanto pode evoluir, como observado na Figura 10.

Figura 10 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Fonte: (ABEEÓLICA, 2019).

Diante deste panorama, pode-se observar que a matriz energética brasileira possui seu potencial ainda muito restrito a algumas fontes primárias, relacionadas a empreendimentos e investimentos voltados a grandes usinas, centralizando a geração de energia elétrica.

Para chegar até as unidades consumidoras, a energia gerada a partir destas centrais percorre longas distâncias pelos sistemas de transmissão e distribuição que integram o SIN formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte; apenas 1,7% da energia requerida pelo país está fora de seu domínio, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (BEN, 2019). Um considerável montante de energia é desperdiçado em detrimento da carga não se localizar próxima à fonte geradora, devido a impedâncias na linha por parte de alimentadores e transformadores; este longo caminho percorrido por meio de cabos ainda é susceptível a intempéries climáticas que podem acarretar em danos físicos desestabilizando a rede.

Com usinas de grande porte espalhadas por todo território e com os avanços tecnológicos da geração termelétrica em conjunto com a crescente infraestrutura de fornecimento a GD tem sido considerada como um modelo complementar (FREIRE, 2015).

A GD é uma forma de geração de energia descentralizada que se caracteriza pela geração através de qualquer tipo de fonte geradora, destinando sua produção às cargas locais ou que estejam próximas.

A seguir evidenciam-se alguns pontos cruciais que diferem a geração distribuída e a geração centralizada:

Geração Distribuída

- Geração de energia em pequena escala;
- Projetos em qualquer região do Brasil;
- Variados pontos de instalação, ex. Telhados de indústrias e residências;
- Baixa potência;
- Energia gerada para ser injetada no sistema elétrico próximo ao ponto de consumo; e
- Novo conceito de redes inteligentes;

Geração Centralizada

- Geração de energia em grande escala;
- Projetos em regiões com maiores índices de insolação no Brasil;
- Facilidade de acesso e infraestrutura para escoamento da energia produzida;

- Altas potências; e
- Energia gerada para ser injetada no sistema elétrico convencional como realizado nas usinas hidrelétricas e eólicas.

A ANEEL divulga periodicamente informações a respeito do panorama da GD no Brasil por fontes de energia e classes de consumo.

Conforme informado pela Tabela 1, nota-se que os sistemas fotovoltaicos estão muito à frente das outras fontes com relação ao número de instalações realizadas em unidades consumidoras e com uma potência instalada também muito maior que todas as outras; a fonte eólica aparece na última posição com apenas 60 sistemas instalados.

Tabela 1 - Unidades consumidoras com geração distribuída por fonte

Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (KW)
CGH	100	8.472	96.681,80
EOL	60	104	10.360,86
UFV	161.659	203.444	1.874.431,84
UTE	209	4.523	61.544,64
TOTAL	162.028	216.543	2.043.019,14

Fonte: (ANEEL, 2020).

Podemos observar na Tabela 2 que sistemas distribuídos residenciais são os mais demandados, enquanto a indústria que possui vasto potencial apresenta números tímidos, assim como as classes de consumo de interesse público.

Tabela 2 - Unidades consumidoras com geração distribuída por classe de consumo

Classe de Consumo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (KW)
Comercial	29.219	53.595	819.471,11
Iluminação pública	8	10	178,50
Industrial	4.426	6.498	214.483,90
Poder Público	717	1.018	30.575,75
Residencial	117.301	139.690	730.585,54
Rural	10.277	15.647	245.351,47
Serviço Público	80	85	2.372,87
TOTAL	162.028	216.543	2.043.019,14

Fonte: (ANEEL, 2020).

3.2.2. Micro e minigeração distribuída

O consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade aliando economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.

O Módulo 3º do PRODIST estabelece as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso ao sistema de distribuição não abrangendo as demais instalações de transmissão (DIT), e define os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão para os acessantes novos e já existentes (ANEEL, 2017).

Enquanto as usinas centralizadas transmitem a energia produzida em alta voltagem, as micro e mini usinas geram a energia em baixa potência destinando sua produção para atender cargas em BT⁴ e MT⁵.

A micro GD estipula que a potência instalada seja menor ou igual a 75KW para as unidades consumidoras, enquanto que para minigeração o valor estipulado é de até 5MW para fontes renováveis ou cogeração qualificada; no caso das hidráulicas, devido a restrições ambientais, o limite é de 3MW.

Do ponto de vista técnico, a inversão de fluxo de potência produz uma elevação da tensão nos pontos em que estão conectados na rede fazendo com que seja necessária a realização do controle da tensão, o ajuste da proteção dos níveis de curto-circuito e operação contra ilhamentos e sobrecorrente. Essa alteração de lógica é complexa devido a intermitência da geração e exige um processo automático dos controles que causam mau funcionamento dos dispositivos de proteção (relés, fusíveis, etc.). Outro problema associado à micro e minigeração distribuída está relacionado à segurança das equipes de manutenção no caso de interrupção de fornecimento por parte da concessionária; embora as regras de conexão desse tipo de geração exijam sua desconexão automática, essa condição precisa ser garantida por medidas de identificação desta ocorrência por parte da concessionária (capacidade de detecção de ilhamentos) (IEEE, 2013).

⁴ Baixa tensão, valores inferiores a 1000 V.

⁵ Média tensão, para valores entre 1000 V e 50 kV.

Para uma análise mais representativa da inserção da geração distribuída no país, foi realizada uma análise seguindo a metodologia SWOT, ponderando os principais pontos conforme visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise *SWOT*

<u>STRENGTHS (FORÇAS)</u>	<u>WEAKNESSES (FRAQUEZAS)</u>
I - <i>Net Metering</i> II - Baixo impacto ambiental III - Geração Descentralizada IV - Baixo custo de O&M	I - <i>Payback</i> demorado II - Compensação por área de concessão III - Tecnologia Onerosa IV - Sazonalidade
<u>OPPORTUNITIES (OPORTUNIDADES)</u>	<u>THREATS (AMEAÇAS)</u>
I - Geração de Empregos II - <i>Feed in Tariff</i> III - Evolução de Smart Grids IV - Complementariedade de Fontes	I - Política Pública II - Não atrativo para as Distribuidoras III - Falta de Investimento IV - Economia fragilizada

Fonte: (Próprio autor).

Através da Tabela 3, percebe-se que uma das forças relacionada a GD é a promoção do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, *net metering*, onde o consumidor que passar a gerar sua própria energia tem a possibilidade de, através do excedente gerado, compensar seu próprio consumo no período ou em até 60 meses (ANEEL, 2015).

Outro aspecto considerado como força e de grande relevância é o baixo impacto ambiental, pois o uso mais intensivo de fontes renováveis acarreta baixas emissões de poluentes contribuindo fortemente com o meio ambiente (FREIRE, 2015).

Igualmente, o incentivo da GD ocasiona diminuição de perdas por se localizar próxima a carga; também eleva a segurança energética e, consequentemente, a qualidade de energia, otimizando a rede de distribuição.

Outra força é devido à alta durabilidade do sistema, não havendo necessidade de constantes reparos com baixo custo de operação e manutenção das tecnologias; ainda possui duração estimada em torno de 20 anos contabilizando também a seu favor sua rápida implantação e funcionamento.

Por outro lado, um aspecto a ser considerado como uma fraqueza é o *payback* demorado, o retorno do investimento aplicado à instalação de micro e minigeração ainda é extenso não sendo atrativo para a maioria dos consumidores.

A compensação de energia é caracterizada como um empréstimo gratuito onde é realizado o abatimento da energia consumida pela própria unidade ou por outra registrada sob o mesmo CNPJ ou CPF; porém a compensação do excedente gerado fica restrita a unidades consumidoras de mesma área de concessão da distribuidora impossibilitando a compensação de unidades conectadas em distribuidoras distintas (ANEEL, 2015).

Mesmo com a possibilidade de conexão direta à rede, suprimindo a necessidade de possuir um banco de baterias, a tecnologia continua onerosa e ainda influencia o consumidor em não dispor do sistema devido ao alto custo para implantação.

Outro ponto fraco, relacionado principalmente à energia eólica e fotovoltaica, refere-se à sazonalidade e à intermitência dos ventos que movimentam os aerogeradores, e a periodicidade da geração fotovoltaica, limitada à condição climática e também por gerar eletricidade somente durante o dia. Pode-se incluir também neste paradigma as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) que sofrem em tempos de estiagem. Todavia, o Brasil possui excelentes índices de irradiação e ventos constantes e unidirecionais engrandecendo o potencial das energias renováveis que através de complementariedade acarretam flexibilidade e constância na produção de energia (FREIRE, 2015).

Dentre as oportunidades, percebe-se que a expansão da GD permite que novos investimentos incentivem a geração de empregos e desenvolvam a economia a partir de novos empreendimentos no setor, estimula a indústria e os serviços de instalação e manutenção de sistemas distribuídos. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) a cada 1 MW de energia solar fotovoltaica instalada (centralizada e distribuída) são viabilizados entre 25 e 30 empregos diretos, aquecendo as economias de municípios, Estados e União.

A aplicação do sistema de comercialização *feed in tariff* se mostra bastante eficaz em diversos países. Tal aplicação no Brasil criaria novos modelos de negócio e

incentivaria consumidores a investir em centrais geradoras com maior capacidade, com o intuito de serem remunerados pela energia injetada na rede (CCEE, 2015).

A expansão de *smart grids* ou redes inteligentes ganha força com a evolução da GD, principalmente no que diz respeito à sua regulação. Esta tecnologia permite o uso eficiente da energia elétrica configurando-se como uma importante ferramenta para o controle e o gerenciamento referente ao modelo de geração descentralizada.

O controle do horário de pico e a diversificação da matriz energética brasileira proveniente da complementariedade de fontes são vistos como oportunidades e objetiva uma maior eficiência, segurança e confiabilidade. Por outro lado, dentre as ameaças, observa-se a ausência de políticas públicas e de incentivos fiscais, assim como a necessidade de revisão da cobrança do ICMS pelo consumo líquido e dos impostos embutidos na compra de equipamentos. A alteração de tal condição e a promoção de uma modicidade tarifária aumentaria a atratividade por novos empreendimentos (CCEE, 2015).

Outra ameaça ao mercado da GD é a não atratividade para as distribuidoras, pois além de reduzir seu faturamento ainda o onera obrigando-a a investir em operação e manutenção da rede. Conforme nota técnica da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), seria interessante para as distribuidoras a comercialização dos excedentes de micro e minigeração para que haja prestação de novos serviços relacionados à medição, o qual inibe a redução de faturamento para as concessões ou reajusta as tarifas para os demais consumidores (CCEE, 2015).

A falta de investimentos para novos projetos cria uma barreira para os consumidores que gostariam de gerar sua própria energia, pois encontram dificuldades para financiar novos empreendimentos. A economia fragilizada representa uma ameaça no que diz respeito ao investimento que o consumidor teria de fazer para tornar-se um produtor, pois com a queda do poder aquisitivo ele acaba vislumbrando outras prioridades, como podemos chamar de *trade off* ou conflito de escolhas.

3.2.3. Resolução normativa nº 482

A geração distribuída ganha notoriedade quanto a sua importância para o setor elétrico brasileiro. Como já mencionado anteriormente, a crise hídrica promoveu uma

diminuição drástica dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas afetando a oferta de energia e promovendo o acionamento de usinas termelétricas (UTE) de fonte fóssil prejudiciais ao meio ambiente e de alto custo que acarreta expressivos aumentos das tarifas.

A GD reduz o custo do consumidor que se propõe a participar desta revolução tecnológica e que acaba contribuindo para uma melhora na qualidade do serviço principalmente em horários de pico, “desafogando” o sistema de distribuição e transmissão. O amadurecimento e aperfeiçoamento da legislação brasileira em relação à GD, seguindo uma vertente mundial, trarão benefícios incontestáveis para o setor elétrico brasileiro e impulsionará de forma expressiva este conceito.

Pode ser considerado um marco inicial para se constituir a GD, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, que dispõe e regulamenta a comercialização de energia elétrica, entre concessionários, permissionários e autorizados de serviços e instalações de energia elétrica, bem como destes com seus consumidores, no SIN. Para efeito de conhecimento é importante ressaltar que a mesma alterou as Leis n.º 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000 e 10.438, de 26 de abril de 2002.

Após toda esta trajetória, a GD foi finalmente definida e oficializada através do Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004, iniciando-se assim sua evolução. O trecho que a define por interveniência do referido decreto se faz da seguinte forma:

"Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...), conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004. Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput."

Mesmo com esse marco regulatório, a GD evoluiu muito pouco, com números inexpressivos mediante as proporções que poderia tomar. Com poucos investimentos no setor e falta de incentivos, a situação só começou a melhorar, principalmente, para a

energia fotovoltaica, após a Resolução ANEEL 482, de 2012, estabelecer as condições gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica, onde foram adotadas as seguintes definições:

- Fonte de energia incentivada com base de geração hidráulica, solar, eólica e biomassa, com potência de até 1MW (1000kW);
- Microgeração Distribuída - Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100kW;
- Minigeração Distribuída - Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1MW; e
- Sistema de Compensação de energia Elétrica: Sistema no qual a energia ativa (kWh) gerada compense o consumo de energia elétrica ativa da unidade consumidora.

A Resolução da ANEEL 482 promoveu um importante avanço, e além de estabelecer as condições para a conexão de micro e minigeração no sistema de distribuição criou um mecanismo que permite ao consumidor usar seus excedentes de geração para compensar seu consumo, instituindo um sistema de compensação de energia elétrica, conhecido como *net metering*.

3.2.4. Resolução normativa nº 687

Apesar dos importantes avanços ocorridos, o desenvolvimento da micro e minigeração distribuída encontravam-se ainda muito longe do potencial que poderia ser atingido; contudo a Resolução Normativa nº 687 da ANEEL, de 24 de novembro de 2015, que foi criada a fim de fomentar a questão, é a regulação mais atual e apresenta importantes modificações em relação ao texto de origem de sua antecessora Resolução Normativa 482 (ANEEL, 2012). Foram inúmeras as alterações realizadas em sua redação, como as descritas no artigo 2º, que atribui aos incisos:

“I - **microgeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - **minigeração distribuída**: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia

elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; e

III - **sistema de compensação de energia elétrica:** sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.”

Conforme evidenciado, as alterações realizadas aprimoram a legislação vigente e elevam a gama de unidades capazes de se enquadrarem aos regulamentos dispostos ampliando para até 5MW, enquanto que a resolução anterior limitava a minigeração em 1M; a Resolução Normativa 687 ainda aumentou para 60 meses a compensação do excedente gerado, sistema *net metering*, além de reforçar outros aspectos como a geração compartilhada, o autoconsumo remoto e o empreendimento de múltiplas unidades consumidoras (EMUC).

Como apresentado no inciso III, o sistema de compensação de energia elétrica é o mecanismo que realiza a compensação quando a energia gerada pelo sistema distribuído ultrapassa o consumo da carga podendo ser compensada em até 180 meses pela concessionária de energia (ANEEL, 2012).

A geração compartilhada é caracterizada como consórcio ou cooperativa que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades onde a energia excedente será compensada. Já o autoconsumo remoto é a compensação do excedente gerado por uma unidade consumidora em outra unidade, desde que seja de mesma titularidade e que esteja dentro da mesma área de concessão (ANEEL, 2015).

O EMUC corresponde à utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento com microgeração ou minigeração distribuída.

Também no fim do ano de 2015, houve a promulgação da Portaria nº 538 de 15 de dezembro, na qual o Ministério de Minas e Energia cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) com os seguintes objetivos:

“Art. 1º (...)

I - promover a ampliação da geração distribuída de energia elétrica, com base em fontes renováveis e cogeração;

II - incentivar a implantação de geração distribuída em:

- a) edificações públicas, tais como escolas, universidades e hospitais; e
- b) edificações comerciais, industriais e residenciais.”

O ProGD amplia e aprofunda as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores com base nas fontes renováveis de energia com destaque ao solar fotovoltaico. Segundo Eduardo Braga, ministro de Minas e Energia à época, o Programa pode movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos até 2030, trazendo benefícios para o consumidor e para o setor elétrico, sobretudo pelo motivo da geração distribuída estar no centro de consumo o que reduz a necessidade de estrutura de transmissão elétrica. Esta medida visa consolidar a micro e minigeração distribuída e vislumbra resultados positivos em um cenário extremamente complicado. A Tabela 4 apresenta a quantidade e potência da GD por modalidade requerida pelo consumidor:

Tabela 4 - Unidades consumidoras com geração distribuída por modalidade

Classe de Consumo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (KW)
Autoconsumo remoto	23.842	76.859	418.204,35
Geração compartilhada	432	1.724	31.162,00
Geração na própria UC	137.715	137.715	1.592.852,38
Múltiplas UC	39	245	800,41
TOTAL	162.028	216.543	2.043.019,14

Fonte: (ANEEL, 2020).

A Tabela 5 o número de conexões nos estados liderado por Minas Gerais:

Tabela 5 - Unidades consumidoras com geração distribuída nos estados

UF	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
AC	162	167	2.281,15
AL	980	1.388	12.306,82
AM	464	547	5.502,02
AP	156	186	2.617,58
BA	4.200	6.349	46.292,04
CE	3.944	4.930	71.361,65

DF	1.394	1.507	20.592,88
ES	3.161	4.036	37.094,53
GO	5.682	7.233	72.562,47
MA	2.271	2.882	28.348,49
MG	33.976	57.074	405.069,79
MS	5.052	6.880	61.342,90
MT	8.072	9.205	165.595,72
PA	1.891	2.027	19.105,37
PB	2.851	4.507	38.766,98
PE	2.837	4.231	46.726,52
PI	1.965	2.615	26.809,89
PR	11.424	11.485	213.486,15
RJ	8.853	9.953	80.997,04
RN	2.355	2.898	34.818,14
RO	330	422	12.682,16
RR	52	75	899,74
RS	20.439	24.606	247.787,97
SC	10.669	14.379	129.050,75
SE	963	1.086	10.772,49
SP	26.172	34.103	230.960,13
TO	1.713	1.772	19.187,77
TOTAL	162.028	216.543	2.043.019,14

Fonte: (ANEEL, 2020).

Atualmente, os módulos fotovoltaicos são as tecnologias de geração de energia elétrica mais difundidas no mercado e podem ser adaptados ao conceito de micro e mini GD, como é o caso dos sistemas implantados em telhados residenciais ou em mini usinas. Apesar de os geradores eólicos de pequeno porte serem capazes de aderir à mesma condição dos fotovoltaicos, seu mercado ainda é incipiente; o declínio do custo e o desenvolvimento de projetos adequados podem viabilizar sua implantação.

3.2.5. Estimativas futuras

Por se tratar de um tema atual e devido à complexidade de regulação, a legislação ainda em construção gera insegurança ao investidor, tendo em vista que novas

proposições postergam o retorno de investimento ou inviabilizam a instalação de sistemas distribuídos. É necessário que haja um entendimento para que ambas as partes, tanto concessionárias como “*prosumidores*”, aproveitem desta solução de forma sustentável levando em consideração a importância que o tema possui para a transição e segurança energética.

Desta forma, novas regulamentações devem ser bem estudadas avaliando o impacto em um mercado ainda em amadurecimento, incluindo nas observâncias o lado impactado das concessionárias.

3.3. Estudo eólico

Para que seja possível entender o escoamento do ar em determinada localidade é importante compreender primeiramente qual o padrão aplicado a ele de forma global. O escoamento atmosférico em um ambiente urbano é complexo por natureza, caracterizado por velocidades mais baixas e turbulência mais intensa associada ao aumento da rugosidade devido às edificações (OLIVEIRA et al., 2020). Nessas condições o escoamento é modificado de forma a sujeitar os aerogeradores a cargas dinâmicas que reduzem o seu desempenho e interferem na geração de energia elétrica.

Apesar das pesquisas relacionadas ao assunto ainda serem escassas no Brasil, o interesse desta aplicação em zona urbana vem aumentando e o conhecimento dos padrões locais de vento é essencial para avaliações mais precisas do potencial de geração de energia. Essas áreas são geralmente dominadas por circulações locais caracterizadas por um potencial menor de produtividade (AGUIAR, L., 2017).

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a distribuição sazonal da velocidade do vento é caracterizada por valores médios mensais baixos ($\sim 2 \text{ ms}^{-1}$) ao longo do ano. Devido à sua posição geográfica, os ventos em São Paulo refletem, em escala planetária, a variação sazonal da posição e intensidade do Anticiclone do Atlântico Sul e da Baixa Pressão Continental, que induzem ventos de N-NE durante o verão e de E-NE no inverno. Contudo, este padrão é afetado de forma frequente por sistemas de escala sinóticas do tipo frentes frias que penetram na área em associação com ventos pré-frontais de NO e pós-frontais de SE.

Além de fatores de grande escala e escala sinótica descritos acima, as circulações na RMSP também são afetadas pela brisa marítima e por circulações locais de origem térmica produzidas pela ilha de calor urbana (circulação centrípeta) e pela topografia (circulação vale-montanha) (OLIVEIRA, A. P., 2003).

3.3.1. Mecanismos de geração dos ventos

As mais diversas formas de energia, como por exemplo, a fotovoltaica, eólica e a biomassa são originadas, de alguma maneira, pela influência da luz do sol através de processos químicos, físicos ou biológicos (RODRIGUES, P. 2011). Nesse sentido, podemos entender que o vento, através de processo físico de origem solar, é o deslocamento do ar no sentido horizontal mantendo um equilíbrio de forças ao se deslocar da alta para baixa pressão. A radiação solar atinge a superfície terrestre de forma irregular criando áreas de temperatura, densidade e pressões diferentes.

Sua origem também está associada à rotação planetária; todos os planetas envoltos por gases em nosso sistema solar apresentam formas distintas de circulação atmosférica, e deste modo, os ventos em suas superfícies formam um mecanismo solar-planetário permanente (AMARANTE, O. 2001). É estimado que 2% da energia solar absorvida pela Terra sejam convertidos em energia cinética dos ventos, e embora este percentual pareça pequeno, representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DUTRA, R. 2008).

A movimentação das massas de ar na atmosfera é causada principalmente pelas forças de gradiente de pressão (aceleração do ar das regiões de alta pressão para as regiões de baixa pressão), efeito de Coriolis (desvio dos ventos para a direita de sua direção de movimento no Hemisfério Norte, e para a esquerda no Hemisfério Sul) e pelo atrito (desaceleração dos ventos próximos à superfície) (GUIMARAES, M. 2017).

O ar que se encontra em baixas altitudes das regiões tropicais, ao longo da Linha do Equador, é mais aquecido do que o encontrado nas regiões polares porque na região Equador a superfície recebe os raios solares quase que perpendicularmente. Em decorrência desta atividade, o ar quente tropical tende a subir sendo substituído por uma massa de ar mais fria proveniente das regiões polares. O deslocamento de massas de ar

determina a formação dos ventos; essa dinâmica é apresentada pela Figura 11 (DUTRA, R. 2008).

Os ventos classificados como de superfície se encontram na Camada Limite Superficial, região da atmosfera adjacente a superfície e que representa cerca de 10% da Camada Limite Atmosférica. Por definição, o vento de superfície corresponde a altura de 100 metros da superfície. De um modo geral o vento na superfície varia em função da rugosidade, topografia, ocupação e uso do solo, etc. É de extrema importância para o estudo de potencial eólico conhecer esse tipo de vento.

Figura 11 - Distribuição geral dos ventos

Fonte: (RODRIGUES, P. 2011).

Uma das principais etapas para a tomada de decisão em investir no aproveitamento da energia elétrica a partir do vento passa pela determinação do potencial eólico existente; a caracterização do regime de ventos encontrado no local é feita através de dados coletados em medições de campo, tratamento estatístico dos valores mensurados, aplicação de métodos de correlação e extrapolação de dados no tempo (para períodos sem medidas) e espaço (para regiões onde não existe medições).

3.3.1.1. Efeito da brisa do mar

A brisa marítima apresenta um ciclo diurno atingindo durante o dia, intensidade e persistência equivalente aos demais sistemas que atuam na cidade de São Paulo. Outras circulações de menor escala como a circulação térmica induzida pela topografia (vale-montanha) e os efeitos urbanos (ilha de calor urbana) da RMSP podem agir de forma

sinérgica aumentando a intensidade do vento e contribuindo para a eficiência do processo de aproveitamento da energia eólica, que a priori, supõe-se ser adequado para geração de energia com pequenas turbinas eólicas (J. MAZON et al. 2015).

Em comparação com o sistema sinótico, a brisa do mar é geralmente menos intensa, contudo, apresenta uma frequência maior. Efetivamente, em muitas áreas tropicais, a brisa do mar mostra alta regularidade e velocidades máximas do vento em torno de 7 a 8 ms^{-1} com níveis baixos ao meio-dia e início da tarde (SIMPSON, 1994).

Durante o período diurno, os ventos de superfície na RMSP são sistematicamente afetados pela topografia e pela brisa marítima que, apesar da distância do oceano (60 km) penetra em São Paulo em cerca de 50% dos dias do ano (G. CODATO et. al, 2008).

3.3.2. Rugosidade do terreno

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo. A topografia do local é um fator determinante para a caracterização do vento; áreas com menor rugosidade são mais propícias para a utilização de aerogeradores, porém, por estarem afastadas dos centros de consumo, há a necessidade em se realizar o transporte desta energia.

Nas cidades, as velocidades de vento são perturbadas devido ao número elevado de edificações que influenciam na diminuição das velocidades. A Tabela 6 mostra o comprimento de rugosidade da superfície para diferentes tipos de superfície. Em alturas superiores a rugosidade interfere menos e a velocidade do vento é maior (RODRIGUES, P. 2011).

Tabela 6 - Valores de comprimento de rugosidade

Z₀ (m)	Tipo de Terreno
1,0	Urbana
0,8	Floresta
0,2	Superfície com muitas árvores ou arbustos
0,1	Superfície com vegetação mais fechada
0,05	Superfície com vegetação mais esparsa
0,03	Terreno com poucas construções, árvores e etc.

5×10^{-3}	Campo vazio liso
1×10^{-3}	Terreno com neve
3×10^{-4}	Terreno com areia
1×10^{-4}	Lago, rio, mar

Fonte: (ABNT, 1988).

As principais mudanças no perfil vertical de vento médio estão relacionadas com o comprimento de rugosidade aerodinâmica (Z_0), que é altura (em m) onde a velocidade do vento é zero; a partir de Z_0 o vento varia com o logaritmo da altura (MANWELL, 2004).

A velocidade do vento costuma ser maior em ambientes sem obstáculos, contudo, em topo de prédios e arredores é possível encontrar velocidades altas mesmo com muita turbulência. A integração de turbinas eólicas em edifícios é possível mesmo com alta taxa de rugosidade da superfície; nas cidades a rugosidade do solo não é uniforme e muda de forma significativa de uma localização para outra até mesmo em curta distância, assim, percebe-se como sendo uma grandeza que se modifica conforme as divergências naturais da paisagem (FADIGAS, E., 2011).

A área frontal (ao vento) do edifício, área horizontal construída afeta o padrão do deslocamento de ar que poderia incrementar a disponibilidade de energia eólica de 3 a 8 vezes em comparação com as áreas rurais (AYHAN & SALAM, 2012).

A verticalização da cidade de São Paulo aumenta a rugosidade da superfície. O escoamento do vento é afetado pela topografia, devido aos efeitos mecânicos de bloqueio (áreas elevadas), canalização (ao longo de vales) ou efeitos térmicos como circulação tipo vale-montanha (AYOTTE, K. W., 2001).

3.3.3. Terrenos complexos

Na área urbana, caracterizada por grande número de prédios e construções, a turbulência se intensifica devido a maior rugosidade fazendo com que velocidades menores de vento se tornem razoáveis para geração de energia elétrica após uma altura elevada, conforme mostrado na Figura 12. Observa-se uma redução, em uma mesma altura, de aproximadamente 20% na velocidade média do vento nas áreas urbanas em comparação com regiões de subúrbios ou áreas rurais caracterizadas por construções

mais baixas e mais espaçadas; nestas condições atinge-se o máximo percentual de velocidade média a partir de aproximadamente 450 metros de altura (RODRIGUES, P. 2011).

Figura 12 - Variação vertical da velocidade do vento horizontal médio

Fonte: (RODRIGUES, P. 2011).

No último caso mostrado, ao nível do mar, percebe-se que os ventos já são muito mais velozes em altitudes menores.

3.4. FÍSICA DE AEROGERADORES

3.4.1. TURBINAS EÓLICAS

Os componentes referenciados na Figura 13 retratam a composição dos principais sistemas de uma turbina eólica de grande porte. No decorrer dos tópicos serão explicitados os vários tipos e eventuais diferenças tanto de aerogeradores de grande porte quanto os de pequeno, descrevendo a função de cada componente.

Figura 13 - Componentes de uma turbina de grande porte

Fonte: (FAPESP, 2019).

O funcionamento dos aerogeradores de grande porte segue o mesmo princípio de geração de eletricidade das hidrelétricas. As pás são responsáveis pela captação da energia cinética do vento movimentando o rotor e transmitindo a rotação ao gerador, que, por sua vez, converte essa energia mecânica em energia elétrica, representado na

Figura 13 como passo número 1. No passo 2 o Rotor, que nada mais é do que o conjunto pás e cubo, transmite o movimento de rotação para o sistema de geração com o apoio de caixa multiplicadora que gira o eixo do gerador e com a ajuda de conversor transforma a energia mecânica em eletricidade, passo 3.

A Nacelle abriga os componentes como o gerador, o sistema de *yaw* (que alinha a turbina com o vento), a caixa multiplicadora (que adapta a rotação à velocidade do gerador) e os sistemas hidráulicos e de controle eletrônico. A mesma é sustentada por uma torre que pode ser de aço ou concreto. Abaixo, na Figura 14, são apresentados mais detalhadamente os itens contidos na nacelle, pás, cubo e rotor.

Figura 14 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal

Fonte: (FAPESP, 2019).

- 1. Controlador do Cubo
- 2. Controle pitch
- 3. Fixação das pás no cubo

- 11. Transformador de alta tensão
- 12. Pás
- 13. Rolamento das pás

4. Eixo principal	14. Sistema de trava do rotor
5. Aquecedor de óleo	15. Sistema hidráulico
6. Caixa multiplicadora	16. Plataforma da nacelle
7. Sistema de freios	17. Motores de posicionamento da nacelle
8. Plataforma de serviços	18. Luva de acoplamento
9. Controladores e Inversores	19. Gerador
10. Sensores de direção e velocidade do vento	20. Aquecimento de ar

3.4.2. Aerogeradores de pequeno porte

Ao se falar sobre energia elétrica proveniente da força do vento estamos habituados com as turbinas de grande porte remetendo-se às usinas instaladas no norte, nordeste e sul do Brasil. Contudo, com a evolução da GD observa-se a possibilidade de introdução de turbinas de pequeno porte em unidades consumidoras para atendimento local. Os APPs requerem tempo curto de instalação e entrada em funcionamento, porém cuidados com relação ao peso e altura para que a fixação do suporte seja feita com segurança devem ser considerados levando em conta a infraestrutura onde o equipamento será suportado.

A escolha da turbina passa por um processo de investigação para que seja definido qual equipamento possui melhor adaptação de acordo com as condições do local onde será implantado. Tais fatores estão relacionados à produção de energia, segurança e fatores ambientais, pois a turbina pode ser ruidosa, causar sombreamento ou pode não se adequar às especificidades do vento da região, como por exemplo, no caso da potência nominal não ser compatível com a velocidade do vento registrada, ou não suportar certo limite de velocidade tendo que desligar-se para evitar sobreaquecimento (DUARTE, M., 1996).

A geração eólica se adequa bem no conceito de GD, pois as instalações são relativamente simples do ponto de vista técnico e a potência gerada por essas turbinas é entregue à rede elétrica via medidor, sendo que o consumidor continua mantendo sua conexão com a rede (FADIGAS, E., 2011).

Os APPs podem trabalhar de forma complementar ao solar (sistemas híbridos), ou sozinhos, sendo uma opção para locais com pouco espaço de área onde a implantação de módulos fotovoltaicos é restrita. O Brasil possui normas específicas para aerogeradores conectados à rede elétrica oferecendo uma metodologia para assegurar a consistência e a exatidão na apresentação, ensaios e avaliação das características da qualidade de energia elétrica e também uma metodologia uniforme para assegurar a consistência, precisão e produtividade na medição e análise do desempenho de potência de aerogeradores. A ABNT se baseia de forma fidedigna no conteúdo técnico das normas internacionais IEC 61400-12 e IEC 61400-21, para que haja normatizações específicas ao assunto no cenário nacional (ABNT, 2010; 2012).

Figura 15 - Aerogerador de pequeno porte, Skystream 3.7, conectado à rede do Instituto de Energia e Ambiente no campus da Cidade Universitária da USP

Fonte: (Próprio autor).

Conforme já mencionado anteriormente, as turbinas eólicas podem ser de dois tipos, as de eixo horizontal e as de eixo vertical; dependendo do projeto e do estudo do vento, a escolha do tipo de turbina é essencial para o melhor aproveitamento do potencial eólico para produção de energia em ambiente urbano. Os tamanhos variam entre 1 e 20 metros de diâmetro do rotor com potências de saída entre 100W e 100kW; as modernas máquinas, tanto de eixo vertical e eixo horizontal são omnidirecionais, ou seja, conseguem funcionar a partir de qualquer direção (DUARTE, M. 1996).

Aerogeradores são projetados de forma a otimizar o desempenho dependendo das velocidades altas ou baixas de vento. Turbinas em locais de velocidade mais baixa do vento, classe III, por exemplo, para atingir uma determinada potência nominal precisarão de um rotor maior para capturar a mesma quantidade de energia que uma turbina semelhante em um local da Classe II.

3.4.3. Turbinas eólicas de eixo vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) possuem um *design* inerentemente mais simples do que as máquinas de eixos horizontais, e consequentemente maior segurança e confiabilidade. Embora as turbinas de eixo vertical ofereçam vantagens operacionais significativas, alguns modelos, como o Darrieus, tem o seu desenvolvimento dificultado devido à geometria aerodinâmica mais complexa para rotacionar em seu eixo vertical.

As TEEV costumam ter uma partida mais rápida, por exemplo, em ventos muito fracos as chapas de um rotor Savonius, modelo de APP de maior torque, captam o vento através do arrasto e proporcionam uma partida fácil (NAHA M. N., 1993).

As torres das turbinas eólicas de pequeno porte são baixas, variando entre 0,1 e 0,5 vezes a altura do próprio rotor permitindo a colocação de todo o dispositivo de conversão de energia na base do equipamento; outro ponto característico dessas turbinas é a dispensabilidade de dispositivo de orientação ao vento, como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal, no entanto, são menos eficientes.

As principais tecnologias existentes são:

- Savonius: este tipo de rotor é o mais simples, movido principalmente pela força de arrasto do ar; a sua maior eficiência dá-se em ventos fracos, podendo chegar a 20%;
- Darrieus: constituído por duas ou três pás, funciona através de forças de sustentação, tem uma eficiência maior, podendo chegar a 40% em ventos fortes; e
- H-Rotor: combinação dos tipos de turbinas Darrieus e Savonius acoplados ao mesmo eixo, podendo extrair vantagens de cada tipo de turbina.

A Figura 16 apresenta a configuração de cada uma delas; a principal diferença está na forma de captação dos ventos.

Figura 16 - Principais tipos diferentes de turbinas de eixos verticais

Fonte: (OPENEI, 2020).

Os APPs de eixo vertical possuem uma melhor adaptação no que tange a estética junto às edificações, tem um melhor comportamento em ventos turbulentos e emitem baixos níveis de ruído em comparação às turbinas eólicas de eixo horizontal. Por essas razões esses tipos de aerogeradores são considerados mais apropriados para regiões urbanas.

Os três tipos de pequenas turbinas apresentados acima são os principais modelos, porém, tipos variados de aerogeradores surgem com a finalidade de inovar na forma de captação do vento e buscar cada vez mais encontrar soluções adaptáveis às estruturas.

3.4.4. Turbinas de eixo horizontal

Diferentemente dos rotores de eixo vertical, os de eixo horizontal possuem melhor rendimento. O maior custo é compensado pela sua eficiência, o que faz com que sejam mais utilizados para a produção de energia. A turbina de três pás é a mais comum, pois possui um bom coeficiente de potência, boa relação custo/benefício, velocidade de rotação menor e melhor estética, mas ainda assim encontram-se turbinas com uma, duas ou até mesmo 5 pás (Figura 17). Turbinas que giram sob o efeito de forças de sustentação geram mais potência do que aquelas que giram sob o efeito de forças de arrasto para a mesma velocidade de vento e, deste modo, o rendimento dos APPs de eixo horizontal é superior ao dos de eixo vertical.

Figura 17 - Tipos de turbinas de eixo horizontal

Fonte: (OPENEI, 2020).

A Figura 18 apresenta duas especificidades de turbinas eólicas de eixo horizontal:

- Tipo *upwind*: as turbinas representadas pelas letras a) e b) são do tipo *upwind*. O APP a) foi projetado para que a área de varredura do rotor, normal à direção de incidência do vento, seja pela parte frontal da turbina acompanhando a mudança de direção do vento sem fazer uso de leme. Já em b) o vento incide na área de varredura do rotor pela parte frontal, porém possui um leme que orienta os hélices de acordo com a direção do vento.
- Nas turbinas do tipo *downwind*, representadas pela letra c), o vento incide diretamente por trás da área de varredura do rotor. As turbinas *downwind* possuem uma vantagem teórica que reside no fato de não necessitarem de um mecanismo de orientação direcional em relação ao vento permitindo o auto alinhamento do rotor na direção em que é atingido, porém há uma desvantagem, o escoamento do vento é perturbado pela torre antes de sua incidência no rotor.

Figura 18 - Tipos de turbinas de eixo horizontal

Fonte: (DOE, 2020).

3.5. Energia e potência eólica

Esta seção descreve os principais métodos utilizados para estimar a conversão de energia de uma turbina eólica de pequeno porte.

3.5.1. Potência extraída do vento

A potência disponível no vento pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.1)$$

Onde:

P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m^3]

A = área da seção transversal do rotor [m^2]

v = velocidade do vento [ms^{-1}]

A potência contida no vento é proporcional ao cubo da velocidade, deste modo, pequenas variações no valor de “v” modificam o valor da potência consideravelmente. Assim como área que é um dos fatores mais impactantes.

3.5.2. Coeficiente de potência

O coeficiente de potência (c_p) é a razão entre a potência de uma turbina $P(t)$ e a potência disponível no vento indicando a eficiência na extração de energia:

$$c_p = \frac{P(t)}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (1.2)$$

Onde:

$P(t)$ = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m^3]

A = área da seção transversal do rotor [m^2]

v = velocidade do vento [ms^{-1}]

A potência disponível no vento não é aproveitada totalmente pelo aerogerador na conversão de energia elétrica; desta forma, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência (C_p), que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível extraída pelas pás do rotor.

3.5.3. Velocidade de ponta de pá (*tip speed ratio*)

Velocidade de ponta de pá ou *tip speed ratio* (λ) é a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente, sendo descrita da seguinte forma:

$$\lambda = \left(\frac{R\omega}{v} \right) \quad (1.3)$$

Onde:

R = raio do motor [m]

ω = velocidade angular do rotor [rad/s]

v = velocidade do vento [ms^{-1}]

A Figura 19 correlaciona o coeficiente de potência dos variados tipos de turbinas com a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (λ).

Figura 19 - Gráfico rotor vs. velocidade de ponta de pá

Fonte: (ABDEL, A. et al., 2016).

3.5.4. Limite de Betz

O físico alemão Albert Betz determinou o valor máximo da energia extraída do vento (c_p máximo) ao analisar a passagem do fluxo de massa de ar antes e após a turbina:

$$C_{p_{Betz}} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (1.4)$$

Teoricamente, quanto maior a potência extraída pela turbina menor será a velocidade do vento em sua saída. Extrair toda a potência disponível do vento significaria que a velocidade do vento na saída da turbina seria igual a zero, ou seja, a turbina agiria como uma barreira interrompendo o deslocamento da massa de ar (fluxo de massa de ar nulo) e, conseqüentemente, implicaria em potência nula. Por outro lado, se a velocidade do vento incidente não se alterar na saída da turbina, então, novamente, a potência extraída do vento será nula. Desta forma, Betz deduziu que existe um limite máximo de extração da energia cinética disponível no vento, e demonstrou que em condições ideais o valor máximo teórico da energia contida no fluxo de ar que pode ser extraída por uma turbina eólica é de aproximadamente 59,3% (BETZ A., 1920).

3.5.5. Distribuição de Weibull

O modelo estatístico criado por *Waloddi Weibull* é considerado a melhor forma para descrever e analisar estatisticamente a distribuição da frequência da velocidade do vento. Devido a velocidade e direção do vento não serem constantes faz-se necessária uma análise estatística dos dados; basicamente, a distribuição de probabilidade Weibull determina a frequência relativa com que a velocidade do vento ocorre em um determinado período de tempo.

A distribuição de Weibull é dada por:

$$F(V) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A} \right)} \quad (1.5)$$

Onde:

k = fator de forma

A = fator de escala [ms^{-1}]

v = velocidade média [ms^{-1}]

O método dos mínimos quadrados para o cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull A (fator de escala) e k (fator de forma) representa de forma razoável as frequências mensais da velocidade do vento nos locais estudados. A Figura 20 apresenta as formas de curvas para diversos valores de k .

Mesmo que o ajuste reproduzido pela distribuição de Weibull seja adequado para a maioria dos regimes estatísticos de vento, é importante salientar que discrepâncias com dados reais podem ocorrer. Entretanto, a distribuição de Weibull tem provado ser um método conveniente de caracterização de recursos eólicos possibilitando estimar a produção anual de uma turbina eólica com boa exatidão. Para determinar a produção de energia de uma turbina eólica é importante obter dados que registrem por um período de pelo menos um ano a frequência de ocorrência de velocidades do vento (ATLAS EÓLICO DE SÃO PAULO, 2012).

Figura 20 – Frequência relativa de ocorrência de vento baseada na distribuição de Weibull

Fonte: (ATLAS EÓLICO BRASILEIRO, 2001).

3.5.6. Intensidade de turbulência do vento

Intensidade de turbulência do vento é um valor adimensional da razão entre o desvio padrão da velocidade do vento e a velocidade média:

$$I = \frac{\sigma}{v} \quad (1.6)$$

Onde:

v = velocidade média do vento [ms^{-1}]

σ = desvio padrão da velocidade do vento [ms^{-1}]

A intensidade de turbulência ou *turbulence intensity* (TI) é categorizada em 3 níveis (A, B e C) de acordo com a norma IEC 61400. A categoria “A” é destinada para turbulências elevadas, a categoria “B” para as médias e “C” para as reduzidas (IEC 61400, 2013).

A turbulência do vento é definida como variações estocásticas na velocidade do vento a partir de valores médios de três componentes: longitudinal, lateral e vertical.

Durante revisão bibliográfica, um estudo desenvolvido por Sunderland et al. (2013) chamou atenção por demonstrar um ganho de potência mecânica de uma turbina em condições turbulentas de vento. O trabalho em si é sobre um método para ajustar a curva de potência de um APP com base em diferentes níveis de intensidade de turbulência e acabou revelando que em velocidades mais baixas do vento, com alto nível de IT, há um ganho de potência do aerogerador, no caso uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) Skystream 3.7, Figura 21. Por outro lado, em velocidades mais altas do vento com taxas de TI mais baixas resulta em decréscimos nos valores da potência.

Figura 21 - Curva de potência da turbina Skystream 3.7 (2.4 kW) em termos da variação da intensidade de turbulência e velocidade do vento

Fonte: (SUNDERLAND K., et. al., 2013).

Os dados de velocidade do vento usados para o cálculo foram baseados em medições reais da potência originada pela turbina. O valor médio de energia foi calculado a partir de intervalos de tempo de média de 10 minutos a 10 Hz de frequência totalizando um conjunto de 6000 amostras.

3.5.7. Energia gerada pela turbina

A determinação da energia gerada (EG) é feita pelo cruzamento da estatística da velocidade do vento (Weibull, por exemplo) com a curva de potência elétrica da turbina, estimando a produção total de energia por um determinado período de tempo. A potência elétrica média ($\bar{P}e$) gerada pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{P}e = \int_0^{\infty} P_e(v)p(v)dv \quad (1.7)$$

Onde:

$P_e(v)$ = potência elétrica extraída da curva de potência da turbina [W]

$p(v)$ = função densidade de probabilidade de Weibull $\left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \right]$

A seguinte equação expressa a relação entre a potência eólica $\left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right)$ e o coeficiente de potência (C_p) para determinação da potência do aerogerador (P_e), possibilitando determinar a respectiva curva de potência do APP:

$$P_e(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta v^3 \quad (1.8)$$

η = eficiência do conjunto rotor-gerador

Prosseguindo, calcula-se a potência média gerada $\bar{P}e$:

$$\bar{P}e = \frac{1}{2} \rho A \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) v^3 p(v) dv \quad (1.9)$$

C_p = função da velocidade específica da turbina eólica

A potência média para um perfil de vento representado pela função de Weibull pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\bar{P}_e = \frac{1}{2} \rho A \eta \int_0^\infty C_p(\lambda) v^3 \left\{ \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \right\} \quad (1.10)$$

Deste modo, se chega a equação de energia gerada (EG) multiplicando a potência média pelas horas do ano:

$$EG(ano) = \bar{P}_e \times 8760/ano \text{ [Wh]} \quad (1.11)$$

Onde:

$\bar{P}_e$ = Potência elétrica média [W]

8760/ano = número de horas em um ano [h]

A Figura 22 apresenta as principais forças atuantes na aerodinâmica de uma pá.

Figura 22 - Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador de eixo horizontal

Fonte: (FIELDS et al., 2016).

A resultante das componentes força de sustentação e arrasto produz o torque do aerogerador. A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá (V_{res}) resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador (V_{tan}).

$$\overrightarrow{V_{res}} = \overrightarrow{V_w} - \overrightarrow{V_{tan}}$$

A velocidade na qual a turbina começa a gerar energia é conhecida como *cut-in*; *rated speed* é a velocidade nominal do vento cuja a potência mecânica das pás se iguala

à potência nominal do gerador; e *cut-out* é designada como velocidade de corte, onde o aerogerador se desconecta para evitar problemas mecânicos.

Figura 23 - Curva potência x velocidade do vento

Fonte: (BIANCHI F., 2019).

A região 1, apresentada pela Figura 23, sugere ventos de menores velocidades cuja potência instantânea gerada é menor que a nominal. Na região 2 a velocidade do rotor é limitada com o objetivo de manter o ruído acústico e as forças centrífugas dentro dos limites permitidos pelo rotor e na região 3 o objetivo é limitar a potência gerada para que não ultrapasse o seu valor nominal e assim evite sobrecarga no gerador elétrico.

O torque de partida acaba influenciando diretamente o desempenho do APP, dependendo da magnitude esse torque inicial pode ser resistivo ao sistema. Uma alternativa para mitigar esta ocorrência é a inserção de uma geometria nas lâminas ou aerofólios que aproveite tanto a força de arrasto quanto a de sustentação e otimize a inicialização do torque aerodinâmico (NAHAS M. N., 1993).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia relacionada à pesquisa se baseia principalmente na consulta de dados preexistentes e literaturas relacionadas ao assunto. Os dados coletados foram confrontados com informações levantadas dos APPs selecionados no decorrer da pesquisa com o intuito de analisar o potencial energético eólico da localidade estudada através de cálculos estatísticos específicos de frequência do vento e curvas de potência de aerogerador.

Atualmente para a habilitação técnica de um empreendimento em leilões de energia há obrigatoriedade da medição *in situ* do recurso eólico por no mínimo 36 meses com registros a cada 10 minutos, conforme Portaria MME nº102/2016. O tempo máximo contínuo de ausência de medições para os leilões da fonte eólica inicialmente era de 15 dias e foi ampliado para 30 dias a partir de 2017, em consonância ao aumento de medição para os 36 meses. Análises indicaram que a ampliação do período de falha contínua de medições de 15 para 30 dias não ocasionaria erros significativos na estimativa do recurso eólico (WENDEL, M. et. al., 2017).

Nesse trabalho foram utilizadas séries de dados consolidados de 5 em 5 minutos compreendendo o período de 2014 a 2017. Para caráter de avaliação do potencial eólico contemplado no estudo o período selecionado de quatro anos é mais que suficiente para a investigação pretendida. Outro ponto a ser destacado é que os dias de ausência de medições foram ignorados por serem descontinuados, ou seja, não houve uma sequência longa de dias sem medições e diferentemente do que rege a Portaria do MME os dados foram coletados a cada 5 minutos, havendo maior precisão.

Após análise da condição do fluxo do vento, foram selecionadas 4 turbinas de pequeno porte no banco de dados do *software* Windographer® para que a produção energética fosse calculada sob as condições verificadas na localidade.

As turbinas aplicadas na simulação são de fabricantes estrangeiros e as curvas de potência inseridas no *software* foram cruzadas com as condições do vento consideradas na pesquisa, obtendo assim a estimativa dos valores da produção energética dos APPs.

A torre meteorológica que produziu os relevantes dados que se tornaram base do estudo está localizada no topo do edifício da Secretaria da Fazenda do Estado de São

Paulo (SFZ), que liberou o espaço e permitiu que o IAG-USP pudesse realizar a implantação da torre e do sistema de medição a fim de proceder com pesquisas científicas relacionadas a áreas meteorológicas e climatológicas. A torre dispõe de diversos sensores como de temperatura, umidade, chuva, pressão, vento e de unidade coletora dos dados (*datalogger*) que compila as informações, grava e as encaminha para que os pesquisadores possam fazer a leitura e investigações pertinentes.

As informações que se aplicaram ao estudo proposto foram a velocidade e direção do vento, temperatura do ar e pressão atmosférica, designados como fatores de sensibilidade pela norma IEC-61400-12. Após compilação e tratamento, os dados foram importados para a ferramenta computacional Windographer®, comumente utilizado na indústria eólica, onde é possível obter probabilidades estatísticas do vento, parâmetros da distribuição de Weibull, visualizar séries temporais, rosas dos ventos, histogramas, médias diárias, mensais e anuais, distribuição de frequência dos dados de velocidade e direção do vento, além de calcular a energia gerada por aerogeradores. Os dados referentes a pressão e temperatura são aplicados para estimar com maior precisão a potência de saída do aerogerador.

Um aspecto essencial para o planejamento de um SED é o posicionamento do APP no local da instalação; recomenda-se sempre instalar a turbina no ponto do edifício de maior incidência do vento. Portanto, o posicionamento da turbina eólica precisa ser analisado para melhor desempenho.

A direção utiliza a orientação dos pontos cardeais para que seja determinada. Pontos cardeais são concebidos a partir da posição na qual o sol se encontra durante o dia; os quatro pontos são: Norte (N), denominado também de setentrional ou boreal; Sul (S), chamado de meridional ou austral; Oeste (O), conhecido também como ocidente; e Leste (E), intitulado de oriente.

Para estabelecer uma localização mais precisa são usados os pontos que se encontram no meio dos pontos cardeais; esses pontos intermediários são denominados de pontos colaterais: Sudeste, entre o sul e leste (SE); Nordeste, entre norte e leste (NE); Noroeste, entre norte e oeste (NO) e Sudoeste, entre sul e oeste (SO). Existem ainda os pontos subcolaterais oriundos dos pontos cardeais e colaterais, que tornam mais precisa a orientação que se deseja encontrar, e estão no intervalo de um ponto cardinal e um

colateral totalizando oito pontos, sendo eles: norte-nordeste (sigla NNE), norte-noroeste (NNO), este-nordeste (ENE), este-sudeste (ESE), sul-sudeste (SSE), sul-sudoeste (SSO), oeste-sudoeste (OSO) e oeste-noroeste (ONO) (FREITAS, E., 2020).

Para inserir todos os pontos apresentados foi criada a rosa dos ventos, Figura 24, chamada também de rosa dos rumos e rosa-náutica.

Figura 24 - Pontos cardeais, colaterais e subcolaterais presentes na rosa dos ventos

Fonte: (METEOREOPOLE, 2020).

Os sensores de vento dão a orientação da velocidade em graus (°). Normalmente, considera-se uma faixa para relacionar com as direções cardinais da rosa-dos-ventos, conforme exposto na Figura 25.

Figura 25 - Faixas em graus ° das direções cardinais

DIREÇÃO CARDINAL	DIREÇÃO (GRAUS)
N	348.75 - 11.25
NNE	11.25 - 33.75
NE	33.75 - 56.25
ENE	56.25 - 78.75
E	78.75 - 101.25
ESE	101.25 - 123.75
SE	123.75 - 146.25
SSE	146.25 - 168.75
S	168.75 - 191.25
SSW	191.25 - 213.75
SW	213.75 - 236.25
WSW	236.25 - 258.75
W	258.75 - 281.25
WNW	281.25 - 303.75
NW	303.75 - 326.25
NNW	326.25 - 348.75

Fonte: (METEOREOPOLE, 2020).

Foi ainda analisada a intensidade de turbulência para um conjunto de dados medidos a uma frequência de 10 Hz em janelas de 10 minutos para ter uma noção do perfil do vento turbulento aplicado em SFZ; o período analisado correspondente compreende o mês de fevereiro de 2014 do dia 01 ao 28.

4.1. Programa de simulação Windographer®

O *software* Windographer® é uma ferramenta computacional comercial utilizada para modelagem de vento, ou seja, realiza o tratamento de dados coletados de estações meteorológicas ou anemométricas e calcula a intensidade e a direção predominante dos ventos num determinado período, fornecendo o perfil diário, mensal ou anual da sequência de dados. O *software* pode exibir diversos gráficos e tabelas como o perfil logarítmico do vento entre outros já citados. Através do perfil logarítmico do vento, utilizando a fórmula da lei de potência, é possível realizar a simulação de velocidades dos ventos em diversas alturas a partir de um pacote de dados medidos em uma única altura. Para o estudo em questão realizou-se simulação da velocidade sintetizada do vento na altura correspondente da estação instalada no edifício; o *software* ainda solicita a inclusão de informações como: latitude, longitude, elevação, data de início, data de término, duração, intervalo de tempo, *Calm threshold* (limiar de calma), temperatura e pressão.

O Windographer® retorna como resultados relatórios em forma de gráficos ou tabelas, rosas dos ventos que apresentam a frequência com que o vento circula em cada direção e perfis mensais de velocidade do vento. Em conjuntos de dados abrangendo vários anos, as médias mensais incluem valores de todos os anos.

4.2. ESTUDO DE CASO

O trabalho foi desenvolvido aproveitando medições realizadas em estação meteorológica. Os dados foram coletados através de sensores instalados no topo do prédio da Secretaria da Fazenda do Estado de São Paulo, localizado no bairro da Sé, zona central da cidade de São Paulo a -23.550124° de latitude e -46.630414° de longitude. A imagem de satélite em 3D, representada na Figura 26, foi obtida do site de serviço de mapas do Google e a partir dela é possível ter noção dos obstáculos presentes no entorno do edifício e da rugosidade do terreno.

Figura 26 - Imagem do edifício de SFZ

Fonte: (Google 3D, 2019).

A coleta dos dados foi realizada em altitude de 864 metros, sendo 769 m relacionados ao nível do mar somados a 85 metros do arranha céu e 10 metros da torre meteorológica.

Figura 27 - Torre meteorológica de SFZ

Fonte: (Próprio autor).

Os aerogeradores selecionados foram os modelos Skystream 3.7, Proven 2.5, Raum 3.5 e Hoyi 300. A Figura 28 apresenta as imagens dos aerogeradores selecionados. Os APPs foram escolhidos principalmente pelas seguintes razões:

- Valores de *Cut-in* das turbinas relativamente baixos;
- Dimensões relativamente pequenas; e
- Possuem maior aderência ao mercado.

Planejado especialmente para ambientes residenciais e empresariais, o Skystream 3.7, fabricado pela empresa Xzeres abriu caminho como o primeiro gerador eólico de uso pessoal compacto com controles e inversor embutidos, projetado para trabalhar em velocidades de ventos muito baixas. Ele tem a capacidade de produzir até 400 quilowatts/hora de eletricidade por mês.

A turbina eólica Proven 2.5 é produzida pela Proven Energy Ltda., fabricante do Reino Unido atuante no mercado desde 1980, e inicia sua geração a uma velocidade do vento de 3 ms^{-1} , se adequando a áreas urbanas.

A fabricante canadense Raum Energy Inc.que desenvolveu a turbina Raum 3.5 projeta e fabrica turbinas eólicas de pequeno porte, inversores de ligação à rede e sistemas de controladores de carga de bateria especificamente para uso em aplicações em escala residencial. A empresa V-Air, fabricante da turbina de eixo vertical Hoyi 300, foi fundada em 2008 nos Estados Unidos com o nome de UGE; em 2016 um grupo chinês comprou a divisão de energia eólica e mudou sua fábrica para a china onde está instalada até hoje.

Figura 28: Aerogeradores selecionados para simulação

Fonte: (XZERES; PROVEN; RAUM; V-AIR, 2020).

As turbinas escolhidas são especialmente adequadas para operarem em áreas com baixas velocidades de vento e para as condições turbulentas do meio urbano, são produzidas de modo simples, porém com confiabilidade satisfatória. Os dados eólicos registrados foram cruzados com as características dos aerogeradores mencionados acima para verificar o potencial de geração. Com a informação de curva de potência disponibilizada por fornecedores, a energia pode ser facilmente calculada multiplicando o número de horas em que a máquina será exposta ao vento.

Além das informações obtidas a cada 5 minutos para avaliação do potencial eólico foram coletados outros dados para que fosse possível analisar a condição da turbulência do vento no local, elemento característico de ambiente urbano. Para averiguar tal proposição, 6.000 observações (10 min a 10 Hz) foram analisadas, ou seja, 10 medidas a cada segundo numa janela de 10 minutos para o mês de fevereiro de 2014 foram obtidas através do sensor sônico que calcula a intensidade da turbulência pelos 3 vetores da direção do vento; os resultados podem ser vistos no item 5.5.

4.3. Medidores

Campanhas de medições são de extrema importância para avaliação do potencial eólico; um dos equipamentos utilizados é o anemômetro que mede a velocidade do vento, Figura 29; sensores para medir a direção do vento são usados para calcular o perfil do escoamento e opcionalmente a densidade pode ser calculada medindo a temperatura do ar e pressão atmosférica. É importante entender as características do fluxo de vento para verificar a viabilidade de aplicação da tecnologia de APPs em

ambiente construído analisando seu desempenho e identificando as lacunas no conhecimento (RODRIGUES, P. 2011).

Figura 29 - Anemômetro analógico de torre

Fonte: (RODRIGUES, P. 2011).

A velocidade do vento possui uma variabilidade em escalas horária, diária, mensal e sazonal em seus valores médios estimados dentro de uma série temporal e foi necessária uma análise mais criteriosa para se estimar os valores que representam tal variável.

Figura 30 - Anemômetro utilizado durante a pesquisa

Fonte: (Próprio autor).

Os dados eólicos registrados foram cruzados com as características de aerogeradores disponibilizados no mercado para verificar qual melhor se adequa. Com as informações dos fornecedores a energia poderá ser facilmente calculada multiplicando-se o número de horas em que a máquina será exposta a cada vento. Dentre os aerogeradores escolhidos, deve-se priorizar aqueles que são projetados para as condições específicas do vento urbano (VALENÇA, D., 2010).

O coletor de dados (*datallogger*), medidores e sensores contemplados na estação micrometeorológica foram adquiridos da *Campbell Scientific*, fabricante de instrumentos de medição, controle e monitoramento; seus sistemas seguem todos os parâmetros necessários cujas medições são realizadas com precisão e confiabilidade. Além dos equipamentos de medição a empresa *Campbell* também forneceu a torre.

A Tabela 7 apresenta os sensores contemplados na estação meteorológica, designando o modelo, aplicações e especificações de cada dispositivo.

Tabela 7 - Especificação dos sensores de medição

Sensores	Modelos	Aplicações	Especificações
Datalloggers	CR300	Data collector	Measure sensors, analyze data, and store data and programs
Anemometer	034B-L	Wind Speed	Imã permanente síncrono
Vane	034B-L	Wind Direction	360°
Sonic	CSAT3B 3-D	Wind Speed and direction	3-D Anemometer with Integrated Electronics
Weather Station	GMX600	Temperature, humidity, pressure	compact weather station, manufactured by Gill Instruments

Fonte: (*Campbell Scientific*).

5. RESULTADOS

Foram coletados e analisados um total de 1.520.624 dados, somadas as componentes de velocidade, direção, temperatura e pressão num total de 4 anos a cada 5 minutos de medição a uma taxa de 0.5 Hz. Após a coleta dos dados, foi necessário realizar tratamento para que se alinhasse ao padrão de importação do Windographer® para assim realizar a simulação e estimativas pertinentes ao estudo. Um resumo dos dados técnicos é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados técnicos dos Aerogeradores

Especificações	Skystream 3.7	Proven 2.5	Raum 3.5	Hoyi 300
Tipo de turbina	Eixo Horizontal	Eixo Horizontal	Eixo Horizontal	Eixo Vertical
Potência nominal	2.4 kW	2.5 kW	3.5 kW	0.3 kW
Diâmetro do rotor	3.72 m	3.5 m	4.0 m	1.3 m
Peso	77 kg	190 kg	68 kg	42 kg
Tipo	Rotor <i>downwind</i> com controle de regulação stall	<i>Downwind</i> , com auto regulação	<i>Downwind</i> , sem auto regulação	-
Hélices	3 pás, compósito reforçado com fibra de vidro	3 pás, polipropileno	5 pás	3 pás, fibra de vidro
Velocidade nominal (rotação por minuto)	330 rpm	300 rpm	350 rpm	300 rpm
Alternador	Ímã permanente de escova magnética	Ímã permanente de acionamento direto sem escova	Ímã permanente síncrono	Ímã permanente trifásico, acionamento direto
Alimentação	120/240 VAC 60 Hz	230VAC 50Hz or 240VAC 60Hz	120 V	120 V
Sistema de Frenagem	Eletrônico com controle regulador	Freio mecânico	Sistema de frenagem ativo (<i>ABS</i>)	Freio mecânico
Velocidade de <i>Cut-in</i>	3.5 ms^{-1}	2.5 ms^{-1}	3.2 ms^{-1}	2.5 ms^{-1}
Velocidade nominal	13 ms^{-1}	12 ms^{-1}	11 ms^{-1}	12 ms^{-1}
Vento limite	63 ms^{-1}	70 ms^{-1}	50 ms^{-1}	50 ms^{-1}

Fonte: (XZERES; PROVEN; RAUM; V-AIR, 2020).

5.1. Rosa dos ventos

A Rosa dos ventos representada pela Figura 31 foi extraída após simulação e apresenta a direção de incidência do vento relacionado a média temporal referente ao período analisado. O que se pode perceber é que o vento ocorre com maior periodicidade pela direção sudeste, mesma direção da costa brasileira, com algumas variações principalmente no sentido nordeste. É possível perceber a grande influência da brisa marítima no local da estação de medição.

Figura 31 - Frequência de Direção do Vento

Fonte: (Windographer®).

A Figura 32 apresenta a frequência mensal como média dos anos analisados; cada tipo de cor corresponde a um mês específico, também representado de forma mais detalhada na Tabela 9.

Figura 32 - Frequência Mensal de Direção do Vento

Fonte: (Windographer®).

Tabela 9 - Frequência vs. Direção

SETOR	PONTO MÉDIO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL %
1	0°	6.933	7.910	5.549	5.975	4.420	4.008	3.475	3.607	3.724	5.514	4.508	6.166	5.239
2	22.5°	10.170	10.033	10.547	14.280	18.472	19.517	16.051	14.676	14.361	12.833	6.522	7.939	12.860
3	45°	6.873	7.681	7.879	10.035	9.947	10.142	6.956	7.311	6.782	7.185	5.422	5.698	7.699
4	67.5°	5.885	6.464	6.369	6.336	4.693	4.997	4.973	4.934	3.817	5.234	4.916	5.586	5.411
5	90°	8.831	10.577	10.542	9.412	8.052	9.094	9.885	8.283	8.189	9.115	11.476	10.610	9.515
6	112.5°	19.823	20.055	22.932	18.553	16.466	19.245	22.606	16.588	20.880	20.310	28.192	22.914	20.662
7	135°	7.655	8.267	9.541	8.868	9.208	8.886	11.624	8.504	12.619	7.759	9.447	10.313	9.332
8	157.5°	1.599	2.086	2.115	1.861	1.723	1.869	1.708	2.097	2.381	1.425	1.262	1.498	1.808
9	180°	1.118	0.850	1.066	0.745	0.693	1.244	0.935	1.140	1.157	1.014	0.738	0.902	0.965
10	202.5°	1.355	0.983	1.422	0.637	0.929	1.351	1.011	1.442	1.276	1.210	0.917	1.212	1.144
11	225°	3.555	2.642	3.779	2.859	2.324	2.627	2.599	3.254	3.275	3.472	2.072	3.321	3.002
12	247.5°	5.276	4.364	4.514	4.961	4.823	3.617	4.463	6.205	5.249	5.312	3.793	5.010	4.805
13	270°	6.030	5.644	4.523	4.891	6.498	3.984	4.447	9.288	5.298	6.928	5.524	5.522	5.693
14	292.5°	6.559	5.622	4.357	5.338	6.633	4.123	4.402	6.964	5.269	6.228	8.892	6.230	5.858
15	315°	4.848	3.851	2.616	2.866	3.070	3.018	3.055	3.433	3.400	4.004	4.361	4.318	3.565
16	337.5°	3.490	2.972	2.249	2.384	2.049	2.277	1.812	2.274	2.323	2.459	1.959	2.761	2.441
TOTAL %		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: (Windographer®).

Neste caso, consideraríamos o posicionamento do APP no lado mais extremo do edifício no sentido sudeste, devido a maior frequência do vento e para aproveitar o vento sem mais distúrbios da estrutura.

Assim como a representação em forma de frequência, também foi extraída a Rosa dos Ventos referente ao número de ocorrências, apresentado pela Figura 33.

Figura 33 - Ocorrências da direção do vento

Fonte: (Windographer®).

Verificou-se que a direção sudeste superou as demais ficando acima de 100 mil ocorrências, enquanto a direção nordeste ficou em torno de 60 mil, variando nos outros sentidos. Assim como para a frequência, a Figura 34 e a Tabela 10 demonstra a média mensal de ocorrências de direção do vento.

Figura 34 - Ocorrência Mensal de Direção do Vento.

Fonte: (Windographer®).

Tabela 10 - Ocorrência vs. Direção

SETOR	PONTO MÉDIO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1	0°	3,095	3,212	2,477	2,581	1,670	1,385	1,241	1,288	1,287	1,969	1,558	2,202	23,965
2	22.5°	4,540	4,074	4,708	6,169	6,979	6,745	5,732	5,241	4,963	4,583	2,254	2,835	58,823
3	45°	3,068	3,119	3,517	4,335	3,758	3,505	2,484	2,611	2,344	2,566	1,874	2,035	35,216
4	67.5°	2,627	2,625	2,843	2,737	1,773	1,727	1,776	1,762	1,319	1,869	1,699	1,995	24,752
5	90°	3,942	4,295	4,706	4,066	3,042	3,143	3,530	2,958	2,830	3,255	3,966	3,789	43,522
6	112.5°	8,849	8,144	10,237	8,015	6,221	6,651	8,073	5,924	7,216	7,253	9,743	8,183	94,509
7	135°	3,417	3,357	4,259	3,831	3,479	3,071	4,151	3,037	4,361	2,771	3,265	3,683	42,682
8	157.5°	714	847	944	804	651	646	610	749	823	509	436	535	8,268
9	180°	499	345	476	322	262	430	334	407	400	362	255	322	4,414
10	202.5°	605	399	635	275	351	467	361	515	441	432	317	433	5,231
11	225°	1,587	1,073	1,687	1,235	878	908	928	1,162	1,132	1,240	716	1,186	13,732
12	247.5°	2,355	1,772	2,015	2,143	1,822	1,250	1,594	2,216	1,814	1,897	1,311	1,789	21,978
13	270°	2,692	2,292	2,019	2,113	2,455	1,377	1,588	3,317	1,831	2,474	1,909	1,972	26,039
14	292.5°	2,928	2,283	1,945	2,306	2,506	1,425	1,572	2,487	1,821	2,224	3,073	2,225	26,795
15	315°	2,164	1,564	1,168	1,238	1,160	1,043	1,091	1,226	1,175	1,430	1,507	1,542	16,308
16	337.5°	1,558	1,207	1,004	1,030	774	787	647	812	803	878	677	986	11,163
TOTAL		44,640	40,608	44,640	43,200	37,781	34,560	35,712	35,712	34,560	35,712	34,560	35,712	457,397

Fonte: (Windographer®).

5.2. Velocidade média do vento

A velocidade média do vento constatada durante o período analisado foi de **3,92 ms⁻¹**. Conforme curva apresentada no gráfico da Figura 35, verifica-se o perfil do vento destacando os meses de setembro, outubro e novembro com velocidades acima da média, enquanto que os meses referentes a maio, junho e julho tiveram as piores médias.

Figura 35 - Curva da velocidade média mensal dos ventos

Fonte: (Windographer®).

O perfil horário apresentou uma curvatura diferente em comparação a média mensal, conforme verificado na Figura 36. Os melhores índices se apresentam entre 13h e 20h, já no período da manhã e durante a noite observam-se baixas velocidades para produção energética.

Figura 36 - Perfil médio diário do vento

Fonte: (Windographer®).

A Figura 37 apresenta a média diária consolidada para cada mês do período analisado. É possível identificar que o mês de outubro obteve melhores valores de velocidade média do vento em comparação com os outros meses, chegando ao pico de quase 6 ms^{-1} e se mantendo acima da média mesmo em momentos de baixas velocidades. O mês de junho foi o que obteve a pior média ficando quase todo o período abaixo da média.

Figura 37 - Perfil diurno dos meses

(Horas do dia)

Fonte: (Windographer®).

5.3. Distribuição da velocidade do vento

A escolha do modelo estatístico Weibull de dois parâmetros apresenta um bom ajuste à distribuição de frequência dos dados de velocidade do vento nas escalas de tempo horário, diário, semanal, mensal e anual. Na literatura são descritos alguns métodos de ajuste para obter os parâmetros da distribuição: mínimos quadrados, máxima verossimilhança, momentos e percentil (YIM, 1999; SEGURO e LAMBERT, 2000; YAOJUN, 2002).

Como os APPs exigem dados sobre as condições da influência do vento, o próximo passo foi a obtenção da distribuição da velocidade do vento a partir dos dados medidos.

Figura 38 - Frequência de distribuição do vento

Fonte: (Windographer®).

Após simulação, conforme apresentado pelo histograma de frequência na Figura 38, o fator de forma representado pela letra “K” para o local de estudo foi de **2,16** e o fator de escala “A” foi de **4,43 ms⁻¹**. A Tabela 11 mostra a frequência de distribuição do vento essencial para o cálculo da energia produzida pelo aerogerador.

Tabela 11 - Tabela de frequência de distribuição do vento.

Min.	Máx.	Ocorrência	Frequência %
0	0.5	2,333	0.622
0.5	1	8,099	2.158
1	1.5	20,293	5.408
1.5	2	30,254	8.063
2	2.5	35,633	9.496
2.5	3	37,873	10.093

3	3.5	38,485	10.256
3.5	4	36,561	9.743
4	4.5	33,587	8.951
4.5	5	29,877	7.962
5	5.5	25,733	6.858
5.5	6	21,121	5.629
6	6.5	16,845	4.489
6.5	7	12,845	3.423
7	7.5	9,228	2.459
7.5	8	6,443	1.717
8	8.5	4,096	1.092
8.5	9	2,488	0.663
9	9.5	1,439	0.383
9.5	10	815	0.217
10	10.5	492	0.131
10.5	11	258	0.069
11	11.5	168	0.045
11.5	12	105	0.028
12	12.5	58	0.015
12.5	13	26	0.007
13	13.5	27	0.007
13.5	14	16	0.004
14	14.5	13	0.003
14.5	15	6	0.002
15	15.5	5	0.001
15.5	16	3	0.001
16	16.5	3	0.001
16.5	17	1	0
17	17.5	2	0.001
17.5	18	0	0
18	18.5	3	0.001
18.5	19	1	0
19	19.5	0	0
19.5	20	1	0
Total		375,236	100

Fonte: (Windographer®).

Na sequência desta seção, os resultados simulados no Windographer® referente a produção e geração de energia são apresentados e discutidos.

5.4. Produção de energia

Abaixo são disponibilizados os extratos das simulações das turbinas selecionadas, apresentando a produção de energia de acordo com as configurações inseridas na ferramenta e confrontando as curvas de potência com a tabela de frequência de distribuição do vento. O fator de capacidade é a proporção entre a produção de energia efetiva da turbina e a capacidade total máxima em um período de tempo. A Figura 39, Figura 40, Figura 41 e a Figura 42 representam a curva de potência fornecida pela fabricante do aerogerador:

Proven 2.5

Figura 39 - Curva de potência Proven 2.5

Fonte: (Windographer®).

Tabela 12 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Proven 2.5

Variáveis	Antes das perdas	Depois das perdas	Unidades
Potência média de saída	0,598	0,492	kW
Produção anual de energia	5.237	4.310	kWh/ano
Fator de capacidade	23,9	19,7	%

Fonte: (Windographer®).

Skystream 3.7

Figura 40 - Curva de potência do APP Skystream 3.7

Fonte: (Windographer®).

Tabela 13 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Skystream 3.7

Variáveis	Antes das perdas	Depois das perdas	Unidades
Potência média de saída	0,204	0,168	kW
Produção anual de energia	1.784	1.468	kWh/ano
Fator de capacidade	11,3	9,3	%

Fonte: (Windographer®).

Raum 3.5

Figura 41 - Curva de potência do APP Raum 3.5

Fonte: (Windographer®).

Tabela 14 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Raum 3.5

Variáveis	Antes das perdas	Depois das perdas	Unidades
Potência média de saída	0,290	0,239	kW
Produção anual de energia	2.545	2.094	kWh/ano
Fator de capacidade	8,3	6,8	%

Fonte: (Windographer®).

Hoyi 300

Figura 42 – Curva experimental de potência do APP Hoyi 300

Fonte: (Windographer®).

Tabela 15 - Estimativa da potência de saída, da produção de energia anual e fator de capacidade da turbina Hoyi 300

Variáveis	Antes das perdas	Depois das perdas	Unidades
Potência média de saída	0,0735	0,0605	kW
Produção anual de energia	644	530	kWh/ano
Fator de capacidade	24,5	20,2	%

Fonte: (Windographer®).

A análise da distribuição da velocidade do vento mostrou que na localidade em questão a densidade de potência estimada foi de **70 W/m²**; entende-se que este valor não se aplica a toda região devido a variabilidade da fonte eólica. A Tabela 12, Tabela 13,

Tabela 14, Tabela 15 apresentam os resultados antes e após perdas da potência média dos aerogeradores, da energia gerada anualmente e do fator de capacidade. As perdas se referem às características intrínsecas na transformação da energia, perdas elétricas dos equipamentos, perdas a vazio e em carga.

Nota-se que a turbina Proven 2.5 possui melhor desempenho no mesmo período de tempo com uma energia produzida de 4,310 kWh/ano, após perdas, em comparação às outras turbinas analisadas. Por outro lado, em termos do fator de capacidade a turbina Hoyi é a mais vantajosa.

5.5. Intensidade de turbulência

De forma complementar ao estudo do potencial eólico promovido no edifício da SFZ, a análise da turbulência, mesmo que por um período reduzido de tempo, foi importante para consolidar informações e aprimorar o estudo. Através do sensor sônico foi possível obter as observações pertinentes para simulação.

As Figura 43 e Figura 44 mostram os dados “brutos” antes de serem analisados estatisticamente.

Fonte: (Windographer®).

Ao observar a intensidade de turbulência durante todo mês de fevereiro de 2014 notamos um pico no dia 9, aproximando um pouco mais a observação chegamos ao perfil horário do dia em questão identificando que o pico de intensidade se deu por volta das 16h.

Figura 44 - Exemplo ilustrativo da TI diária: 09/02/2014

Fonte: (Windographer®).

Após análise dos dados brutos passamos a investigar os dados consolidados da intensidade de turbulência. A Figura 45 mostra que em velocidades baixas do vento a intensidade de turbulência se intensifica com uma tendência de queda da curva à medida que a velocidade do vento aumenta até chegar a 11 ms^{-1} seguida de uma súbita elevação.

Figura 45 - Intensidade de turbulência vs. velocidade do vento

Fonte: (Windographer®).

A intensidade de turbulência medida na localidade durante os 28 dias do mês de fevereiro de 2014 apresenta relevantes apontamentos da alta taxa de turbulência apresentada no local.

Enquanto a Figura 45 faz relação da TI pela velocidade, a Figura 46 expõe a curva horária. Visto que as maiores intensidades estão relacionadas às baixas velocidades de

vento, pressupõe-se que a elevação da curva, principalmente por volta do meio dia, está associada a baixas velocidades do vento e maior temperatura.

Figura 46 - Intensidade de turbulência vs. horas do dia

Fonte: (Windographer®).

Pode-se dizer que é factível o pressuposto de altas intensidades de turbulência em baixas velocidades ao confrontar com a curva horária da velocidade do vento de fevereiro de 2014, Figura 47.

Figura 47 - Média horária da velocidade do vento em fevereiro

Fonte: (Windographer®).

Ao se comparar as rosas dos ventos da Figura 48 claramente observa-se a distinção entre as duas. A rosa dos ventos posicionada à esquerda é relacionada à intensidade de turbulência e a da direita à velocidade sem a influência da turbulência.

Avaliando o perfil entre as duas rosas dos ventos nota-se que a turbulência evidenciada no edifício distorce o padrão do fluxo do deslocamento de ar do local da

medição. Esta especificidade de ambientes urbanos construídos acarreta em fadiga e na diminuição do desempenho de aerogeradores influenciando diretamente na produção de energia.

Figura 48 - Comparação rosa dos ventos, TI vs. Direção (esquerda) e Freq. do vento vs. Direção (direita)

Fonte: (Windographer®).

5.6. Análise econômica

Para realizar o estudo de viabilidade econômica de projetos de sistemas de geração distribuída de energia serão consideradas as seguintes figuras de mérito: valor presente líquido, retorno de investimento e custo total de capital.

5.6.1. Valor Presente Líquido

O valor presente líquido (VPL) é obtido através da diferença do valor presente dos benefícios líquidos de caixa e o valor presente do investimento, ou seja, é a diferença entre os benefícios gerados pelo projeto e seus custos (ASSAF NETO, 2005).

A equação que expressa seu cálculo é dada por:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Fc_t}{(1+r)^t} \quad (7.1)$$

Onde:

I_0 = investimento inicial

Fc_t = fluxo de caixa do projeto no período t

r = taxa de desconto

t = período da análise

n = fluxo de caixa.

O cálculo do VPL gera três resultados diferentes, são eles:

- $VPL > 0$: Significa que o caixa gerado do projeto é maior que o valor investido, o que indica que o projeto é financeiramente viável;
- $VPL = 0$: Significa que o caixa gerado do projeto é suficiente para cobrir a taxa de retorno definida, ou seja, o retorno é exatamente igual ao retorno mínimo exigido, o que indica que o projeto ainda é financeiramente viável; e
- $VPL < 0$: Significa que o fluxo de caixa gerado pelo projeto é menor que o investimento realizado, tornando-o financeiramente inviável.

5.6.2. Retorno de Investimento

O retorno de investimento, também conhecido como *payback*, é outra figura de mérito que dispõe sobre o tempo de retorno do capital investido. Entre outras palavras, é o número de anos necessários para que o rendimento acumulado seja igual ao valor do investimento inicial, podendo ser analisados de duas maneiras diferentes:

- *Payback* simples: onde não é considerado o impacto do tempo no dinheiro. A vantagem deste método está na simplicidade da forma de cálculo;
- *Payback* descontado: reflete em um valor mais fiel com a realidade e mais confiável, pois este método leva em conta a inflação, ou seja; o impacto do tempo no dinheiro.

5.6.3. Custo total de capital

O custo total de capital, conhecido também pela sigla *WACC*, do inglês *Weighted Average Cost of Capital*, é definido como o custo de cada fonte de financiamento ponderado pela participação respectiva no total do capital investido objetivando identificar oportunidades de ganhos dos investidores. O cálculo desta taxa não é linear, é baseado em informações de mercado que muitas vezes são influenciados por fatores externos, e assim, podem produzir taxas diferentes.

O seu cálculo é representado pela equação designada abaixo:

$$WACC = (K_e \times WPL) + (K_i \times WD) \quad (7.2)$$

Onde:

K_e = custo de capital próprio

K_i = custo do capital de terceiros (custo da dívida)

WPL e WD = participação do capital próprio e da dívida na estrutura de capital

Esta medida é geralmente aplicada na análise de decisões de investimentos e na apuração do valor econômico de uma empresa.

5.6.4. Análise de viabilidade

Para fazer uma estimativa da viabilidade dos aerogeradores informações relacionadas ao preço do produto e custo da instalação foram levantadas através de consultas aos fabricantes e empresas instaladoras.

A geração de energia anual e o fator de capacidade foram calculados durante o estudo. O tempo de vida útil considerado foi de 20 anos, prerrogativa de aerogerador de pequeno porte, e os custos relacionados à operação e manutenção foram descartados por serem mínimos ou não existentes.

Tabela 16 - Informações utilizadas na análise de viabilidade

Turbina eólica	Preço R\$	Instalação R\$	Geração de Energia (kWh/ano)	Fator de Capacidade	Tempo de Vida
SKYSTREAM 3.7	28.000,00	5.000,00	1.481	9.40%	20 ANOS
RAUM 3.5	39.778,30	3.000,00	2.111	6.90%	20 ANOS
PROVEN 2.5	40.275,70	3.000,00	4.330	19.80%	20 ANOS
HOYI 300	32.745,8	3.000,00	0.530	20.20%	20 ANOS

Fonte: (Fabricantes e fornecedores).

Os valores de composição tarifária adotados foram os seguintes:

- Tarifa de energia: 0,25588 [R\$/kWh];
- TUSD: 0.25971 [R\$/kWh];

- ICMS: 12%;
- COFINS: 4,30%; e
- PIS: 0,94%.

A partir das premissas elencadas acima foram calculados o VPL e *payback*, com WACC a uma taxa de 5%, para as quatro turbinas selecionadas na pesquisa; as bandeiras tarifárias e o custeio do serviço de iluminação pública foram desconsiderados.

a) SKYSTREAM 3.7

VPL: -R\$ 20.271,59; PAYBACK: Não viável.

b) RAUM 3.5

VPL: -R\$ 24.838,22; PAYBACK: Não viável.

c) PROVEN 2.5

VPL: -R\$ 8,595.30; PAYBACK: 16 anos.

d) HOYI 300

VPL: -R\$ 20.271,60; PAYBACK: Não viável.

Conforme avaliação, dos quatro aerogeradores analisados em apenas um observou-se certa viabilidade, porém distante de ser considerada recomendada devido ao longo tempo de retorno de investimento.

Em decorrência de seu melhor desempenho, a turbina PROVEN 2.5 foi selecionada para que fossem testados dois cenários hipotéticos a fim de verificar como seria a viabilidade caso o aerogerador diminuísse em $0,5 \text{ ms}^{-1}$ e 1 ms^{-1} a sua velocidade de *cut-in*.

Figura 49: Deslocamento da curva de potência vs. velocidade do vento

Fonte: (Windographer®).

A Figura 49 mostra o deslocamento para a esquerda da curva de potência pela velocidade do vento do aerogerador PROVEN 2.5 referentes aos dois cenários propostos a partir de seu *cut-in* real.

Tabela 17 - Cenários de viabilidade propostos

Turbina eólica	<i>Cut-in</i> (ms^{-1})	Geração de Energia (kWh/ano)	Fator de Capacidade	VPL (R\$)	PAYBACK
PROVEN 2.5	2.0 ($< 0.5 \text{ ms}^{-1}$)	5.217	23.80%	1.913,17	13 anos
PROVEN 2.5	1.5 ($< 1 \text{ ms}^{-1}$)	6.210	28.40%	5.567,50	11 anos

Fonte: (Próprio autor).

Após simulação feita com os novos valores de velocidade de partida (*cut-in*) constataram-se aumentos significativos da geração de energia já descontando as perdas, conforme apresentado na Tabela 17. Foi possível também visualizar quedas referentes ao *payback*: com a diminuição de 0.5 ms^{-1} da velocidade inicial (*cut-in*) da máquina, originalmente de 3 ms^{-1} , houve um decréscimo de 3 anos, passando para VPL positivo, e ao diminuir 1 ms^{-1} o tempo de retorno caiu mais 2 anos.

Mesmo parecendo baixo, $\frac{1}{2} \text{ ms}^{-1}$ possui substancial influência para viabilizar a implantação do aerogerador de pequeno porte, que começa a gerar energia com valores mais baixos de velocidade do vento, e como apresentado em 3.5.1 a potência extraída do vento é proporcional ao cubo da velocidade. Esse resultado indica que a adoção de

turbinas mais baratas, com velocidades de *cut-in* e nominais menores poderia melhorar significativamente os resultados da análise de viabilidade econômica.

5.7. Mercado de aerogeradores de pequeno porte

As pequenas turbinas devem seguir alguns padrões e condições específicas para que possam ser comercializadas, como possuir vida útil de 20 anos, ser resistentes a condições extremas de vento e atender a restrições de nível de ruído.

Atualmente o mercado de pequenas turbinas costuma seguir a indicação do comprador sobre áreas potenciais de instalação em sua propriedade resultando muitas vezes em mau comportamento do aerogerador. Em condições não ideais de vento o APP pode apresentar rendimento abaixo do esperado trazendo uma experiência negativa ao usuário, estigmatizando a fonte eólica para atuações em GD e desacelerando o aumento de escala no mercado de APPs (PAGNINI, L. et al., 2015).

Os consumidores instalam sistemas eólicos distribuídos para aumentar a segurança energética, reduzir as contas de serviços públicos de eletricidade, reduzir a volatilidade dos preços da energia ou simplesmente gerar energia limpa. Os SEDs podem ser de propriedade direta ou o consumidor pode adquirir energia de outros geradores.

Podem-se destacar como principais usuários as unidades consumidoras (UC) relacionadas abaixo:

- 1) residencial;
- 2) agrícola;
- 3) industrial;
- 4) comercial; e
- 5) serviços públicos.

O relatório do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*DOE*) referente ao mercado eólico distribuído fornece análises, estatísticas de mercado, características e tendências dos setores de pequenas turbinas eólicas.

A Tabela 18 apresenta os custos de instalação de pequenos projetos eólicos específicos, conforme relatos de instaladores e agências estaduais e federais, que

sofreram aumentos desde 2009, porém permanecem estáveis desde 2014. Isso contrasta com os custos de energia solar fotovoltaica residencial que vêm caindo constantemente ao longo dos anos.

Tabela 18 - Custos de instalação de Aerogeradores de Pequeno Porte e Solar Fotovoltaico, 2009 - 2017

Ano	APP (US/kW)	Solar Fotovoltaico (US/kW)
2009	7,823	8,683
2010	7,549	7,326
2011	9,656	6,504
2012	9,075	5,546
2013	8,698	4,843
2014	9,558	4,372
2015	9,978	4,074
2016	9,673	3,930
2017	10,030	3,696

Fonte: (ORRELL, A. et al., 2018).

O mercado eólico ainda se encontra centralizado, sendo considerável a disparidade do mercado das grandes e pequenas turbinas eólicas. No entanto, projeções de ganho de escala e a crescente demanda referente à transição energética geram oportunidades para o desenvolvimento e aplicação de APPs. A Tabela 19 mostra a evolução de uma década do mercado estadunidense.

Tabela 19 - Capacidade instalada de Sistemas Eólicos Distribuídos nos EUA

Ano	Acumulados	Adição Anual da Capacidade (MW)	Tamanho da Turbina		
			Pequenas ($\leq$ 100 kW)	Médias (101 kW - 1 MW)	Grandes ($>$ 1 MW)
2008	310	104	17.4	14.5	72.1
2009	435	125	20.4	8.9	96.2
2010	534	99	25.6	8.7	64.8
2011	643	109	19.0	13.4	76.5
2012	825	182	18.4	20.9	142.4
2013	855	30	5.7	4.4	20.4
2014	919	64	3.7	2.4	57.5
2015	947	28	4.3	2.6	21.1
2016	992	45	2.4	0.3	42.8
2017	1076	84	1.7	4.1	77.8
2018	1127	51	1.5	1.7	47.4

Fonte: (ORRELL, A. et al., 2018).

O mercado global de turbinas para aplicação em pequena escala vem se consolidando continuamente, porém com taxas variadas de crescimento no mundo, como mostrado na Tabela 20. Os países que lideram a implantação deste tipo de tecnologia são a China, Itália, Estados Unidos e Reino Unido. Entre 2013 e 2014 Reino Unido e Itália dobraram a instalação de novos APPs no mesmo período de tempo. Em 2017, foram acrescentados 113,52 MW de capacidade instaladas de pequenas eólicas em 10 países. Esse número é 6% menor em comparação aos 122 MW documentados em 2016.

Tabela 20 - Mercado global de aerogeradores de pequeno porte

Países	2013 (MW)	2014 (MW)	2015 (MW)	2016 (MW)	2017 (MW)	Acumulados (MW)
CHINA	72,25	69,68	48,60	45	27,70	532,81
JAPÃO	-	-	0,36	0,95	2,85	8,43
CORÉIA DO SUL	0,01	0,06	0,09	0,79	0,08	4,02
REINO UNIDO	14,71	28,53	11,64	7,73	0,39	140,60
DINAMARCA	1,65	1,28	5,84	4,45	0,96	21,88
ALEMANHÃ	0,02	0,24	0,44	2,25	2,25	30,75
ITÁLIA	7	16,27	9,81	57,90	77,46	189,43
CANADÁ	-	-	-	-	-	13,47
ESTADOS UNIDOS	5,60	3,70	4,30	2,40	1,70	148
BRASIL	0,03	0,02	0,11	0,04	0,11	0,31
AUSTRÁLIA	-	0,02	0,03	-	0,02	1,46
NOVA ZELÂNDIA	-	-	-	-	-	0,19
GLOBAL	101,27	119,82	81,22	121,51	113,52	1.091,34

Fonte: (GWEC, 2019).

A instalação de APPs em mercados que antes tinham um histórico de crescimento, como a China e Reino Unido, tiveram acentuada diminuição, reduzindo 38% e 95%, respectivamente, entre 2016 e 2017. Outros mercados, como o Japão e a Itália, aumentaram muito suas capacidades domésticas com crescimento de 200% e 34%. Já o Brasil demonstra um crescimento tímido em relação aos outros países.

Estima-se que a capacidade total eólica cumulativa global instalada seja de pelo menos 1,1 GW, informação verificada no ano de 2017, conforme mostrado pela Tabela 20.

Apesar das semelhanças geográficas, o Brasil fica muito atrás da China e dos Estados Unidos em instalações cumulativas. A razão para isso pode ir da falta de desenvolvimento tecnológico a altas tarifas de importação e políticas de incentivo insuficientes (ORRELL, A. et al., 2018).

O Ministério de Minas e Energia (MME) está empenhado na realização de um estudo sobre o panorama de desenvolvimento tecnológico dos aerogeradores de pequeno porte no Brasil. Considerando aspectos como custos, certificações, nichos de aplicação e parque industrial estabelecido, o estudo tem o objetivo de promover tecnologias de baixo carbono diante de um mercado ainda desconhecido, porém com grande potencial no Brasil.

Esse estudo também inclui um diagnóstico do mercado de APP avaliando os problemas existentes em sua cadeia produtiva, indica possíveis impactos no desenvolvimento do setor e destaca aperfeiçoamentos que podem fomentar a promoção do mercado doméstico. A primeira etapa da pesquisa, com resultados disponibilizados no início de 2015, indicou que a redução na conta de energia elétrica é a principal motivação dos consumidores com potencial para instalarem sistemas eólicos de pequeno porte, citada por 54% dos entrevistados. Em seguida, aparece a redução de emissão de gases do efeito estufa com 18%. Com relação a disposição de investimentos, observa-se um entrave em relação aos custos, visto que 61,2% disseram que estão dispostos a gastar até 10 mil reais para ter o sistema, valor abaixo da realidade atual. Apenas 4% indicaram disposição acima de 30 mil reais (PEREIRA. M. et al. 2015).

Apesar de o mercado nacional ser orientado para aerogeradores de grande porte o interesse em áreas urbanas tem crescido como potenciais zonas de geração eólica à medida que a demanda por energia cresce (EIA, 2020).

5.8. Sistema eólico distribuído

São sistemas de energia eólica de pequeno porte conectadas diretamente à rede elétrica e interligando-se à distribuidora local de energia. Uma turbina eólica conectada à rede pode reduzir o consumo de eletricidade fornecida pela concessionária para iluminação, eletrodomésticos e aquecimento. Caso a turbina não forneça a quantidade de energia necessária da unidade consumidora, a concessionária atenderá a demanda da

carga ou caso o sistema eólico produza mais eletricidade do que consumido, o excedente é enviado à concessionária que calcula a diferença entre a energia consumida e fornecida.

O Departamento de Energia dos EUA (*DOE*) define a eólica distribuída como sendo uma aplicação de tecnologia com base na localização de um projeto eólico em relação à infraestrutura de uso final e de distribuição de energia. Assim, o mercado eólico distribuído inclui turbinas e projetos de vários tamanhos. Os sistemas eólicos são caracterizados como distribuídos com base nos seguintes critérios:

- Proximidade ao uso final: turbinas eólicas instaladas no ponto de uso final ou próximo ao mesmo para fins de atender à carga no local ou apoiar a operação da rede local de distribuição;
- Ponto de interconexão: turbinas eólicas conectadas no lado do medidor do cliente ou diretamente à rede local; e
- Os sistemas distribuídos de energia eólica são conectados física ou virtualmente no lado do cliente (para atender às cargas no local) ou diretamente à distribuição local ou à micro rede (para apoiar as operações da rede local ou compensar as cargas próximas). Essa distinção diferencia os sistemas eólicos distribuídos tipicamente menores da energia gerada em parques eólicos composta por dezenas ou centenas de turbinas eólicas de múltiplos MW e enviadas por linhas de transmissão às subestações para posterior distribuição às cargas (*DOE*, 2020).

5.8.1. Componentes do sistema eólico distribuído

Os sistemas eólicos de pequeno porte geralmente são compostos por rotor, gerador elétrico ou alternador, leme (caso seja do tipo *upwind*), torre, cabeamento e componentes como controladores, inversores e conversores de potência. De forma simplificada, a conversão da energia se dá através da rotação das pás; o rotor captura a energia cinética do vento e a converte em movimento mecânico rotativo para que o gerador seja acionado e produza corrente elétrica. Normalmente a eletricidade convertida já está compatível com a rede de eletricidade.

Figura 50 - Configuração de um aerogerador de eixo horizontal

Fonte: (OPENEI, 2020).

A torre é responsável pela sustentação de todos os componentes do sistema e posicionamento do rotor e nacele. As torres podem ser cônicas (de aço ou concreto) ou treliçadas (aço galvanizado) (EIA, 2020).

O exemplo apresentado na Figura 50 é o mais comum comercialmente, porém a configuração dos componentes do sistema varia conforme tecnologia; no caso das TEEV os inversores, conversores e geradores se encontram na base.

Em usinas eólicas, os conversores realizam o controle da potência fornecida ou absorvida da rede elétrica. Através dos componentes eletrônicos internos, o conversor consegue desacoplar a velocidade de rotação do gerador da frequência de funcionamento da rede possibilitando o funcionamento de turbinas eólicas de velocidade variável. Com isso, uma turbina eólica pode usar tanto gerador síncrono como assíncrono, desde que ligado ao conversor (BICALHO, F., 2013).

5.8.2. Sistemas de geração elétrica

As máquinas elétricas são dispositivos eletromecânicos que funcionam através de indução eletromagnética, ou seja, eles operam através da interação de um fluxo magnético e uma corrente elétrica. Por esse processo ser reversível, o motor gerador que

converte a energia mecânica em energia elétrica pode ser usado também como um motor elétrico convencional para converter a energia elétrica em energia mecânica. Através da Figura 51 é possível ter a percepção da configuração e funcionamento de um gerador.

Existem diferentes tipologias de máquinas elétricas (TIBOLA, G., 2009); as mais usuais são:

- Máquinas de corrente contínua;
- Máquinas síncronas convencionais;
- Máquina de indução; e
- Máquina síncrona a ímã permanente.

Figura 51 - Gerador de indução magnética

Fonte: (OPENEI, 2020).

Um dos desafios mais importantes do sistema eólico é atingir a máxima transferência de energia possível conforme a sua variação de velocidade é ajustada com o rotor da turbina. Isto pode ser realizado com emprego de conversores eletrônicos de potência que aplicam no gerador tensões que possibilitam a conexão com a rede elétrica que opera com tensão e frequência de magnitudes constantes (IEEE, 2014).

Nos parques eólicos atuais, os geradores mais utilizados são os de indução duplamente alimentado (DFIG), de indução trifásicos gaiola de esquilo (GIGE), de indução com rotor bobinado (GIRB) e de relutância variável e síncrono (GS).

Apesar das tecnologias terem se desenvolvido a partir de equipamentos de grandes potências, os princípios que norteiam o desenvolvimento destas tecnologias de geração foram consolidados para as turbinas de pequena potência, principalmente quando a aplicação se refere à conexão a redes elétricas (IEEE, 2014).

Os geradores elétricos são os responsáveis por converter a energia mecânica de rotação entregue em seu eixo pelo rotor em energia elétrica.

5.8.2.1. Geradores elétricos

O uso de cada tipo de gerador considera normalmente uma série de fatores: as características de amortecimento, a capacidade de consumo e/ou fornecimento de potência reativa, a resposta dinâmica frente a curtos-circuitos, a robustez de sua construção, a possibilidade de projeto e construção de equipamentos com alto número de polos, os custos de aquisição e de operação e as dificuldades de sincronismo com a rede elétrica (KISHORE, R. ET AL, 2014).

Existem diversas configurações de geradores que são utilizados para turbinas eólicas: de corrente contínua ou alternada, síncronas ou assíncronas, com ou sem ímãs permanentes e máquinas excitadas por campo elétrico. O gerador de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo é bastante utilizado para conexão diretamente à rede de alimentação; apesar do baixo custo e manutenção simples, apresenta como desvantagens a impossibilidade de regulação de tensão e de frequência, bem como a operação apenas em velocidade fixada pela frequência da rede. Os geradores de ímãs permanentes são mais adequados para turbinas eólicas de pequeno porte devido à sua maior eficiência em comparação com outros geradores (ANI, POLINDER E FERREIRA, 2012). Os geradores elétricos de ímã permanente são divididos em duas categorias: fluxo radial e de fluxo axial, dependendo da direção do fluxo magnético no entreferro entre o estator e o rotor. Normalmente para APPs, o gerador de fluxo axial é preferível, pois ocupa menos espaço na direção radial do que um gerador de fluxo radial da mesma classificação de potência (LATOUFIS, K. et al, 2012).

Um estudo relacionado a gerador de fluxo axial sem ranhura com rotor duplo e estator único forneceram resultados promissores para serem usados com turbinas de pequeno porte, em que algumas vantagens foram verificadas: (i) a topologia de uma

máquina de fluxo axial leva a um comprimento radial curto, o que o torna o gerador compacto e adequado para APPs; (ii) devido ao enrolamento de entreferro sem ranhura, os valores das indutâncias mútuas e de fuga são baixos; e (iii) a ausência das ranhuras proporciona uma operação silenciosa (MARIN, A. et al, 2015).

O conversor eletrônico de potência é um dispositivo de extrema relevância para o SED, pois permite ao gerador operar com controle de velocidade variável e tem papel importante nos sistemas de conversão de energia eólica.

5.8.2.2. Conversores de potência

Os conversores de potência utilizados na geração eólica são empregados de acordo com o tipo de máquina usada no sistema de geração de energia. Os conversores são equipamentos destinados ao controle de potência sobre cargas resistivas, indutivas e motoras e permitem o fluxo de energia elétrica em níveis controlados através de um sinal de comando variável por controladores de processos. O sinal será dependente das necessidades do processo específico, determinando assim, a quantidade de potência que será liberada para o consumo da carga. Ao contrário dos contadores de potência que agem no acionamento e desarme de comandos os conversores possuem manutenção reduzida, pois como não existem partes móveis nem contatos mecânicos não sofrem atrito mecânico nem desgaste (TIBOLA, G., 2009).

Para compensar a desvantagem do gerador de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo são utilizados conversores compostos geralmente por duas pontes trifásicas de dois níveis controladas por chaves semicondutoras de potência que compartilham o mesmo elo de corrente contínua. Sua utilização possibilita a operação do gerador em velocidade variável e flexibiliza o controle do conversor conectado ao gerador. Apesar do baixo custo de construção e manutenção do gerador, o conversor deve processar a potência total do gerador, o que eleva o custo do sistema de geração (IEEE, 2014).

No caso dos geradores síncronos a imã permanente, os conversores podem ser retificadores não controlados conectados ao estator do gerador que compartilham o mesmo elo de corrente contínua com um inversor trifásico conectado à rede ou ainda entre esses dois conversores há mais um estágio, no qual é inserido um conversor elevador/abaixador de tensão.

5.9. Requisitos de instalação

Como a velocidade do vento aumenta com a altura, quanto maior a torre mais energia o sistema eólico pode produzir. A torre também eleva a turbina acima da turbulência do ar existente próxima a obstruções como colinas, prédios e árvores. Uma regra geral é instalar a turbina eólica em uma torre com a parte inferior das pás do rotor a pelo menos 10 metros acima de qualquer obstáculo que esteja a 90 metros de distância. Investimentos relativamente pequenos no aumento da altura da torre podem gerar taxas de retorno maiores na produção de energia.

Figura 52 - Instalação da turbina em solo

Fonte: (DOE, 2020)

Recomenda-se a fixação da turbina em 3 pontos por meio de estais para manter a firmeza da instalação.

As torres podem ser de auto sustentação ou estaiadas. As torres com estais são menos custosas podendo ser constituídas em seções de treliça, tubulares ou cano, e são mais fáceis de instalar do que torres de auto sustentação, porém precisam de espaço por conta do ajuste dos estais e fixação na estrutura.

Embora as torres que reclinam para baixo sejam mais caras, elas oferecem ao consumidor uma maneira fácil de realizar manutenção em turbinas leves (geralmente de 5 kW ou menores). As torres reclináveis também podem ser abaixadas ao solo durante furacões e outras condições climáticas perigosas.

Torres de alumínio são propensas a rachaduras e devem ser evitadas. A maioria dos fabricantes já fornece o sistema de energia eólica contemplando opções de torres.

A maioria dos fabricantes fornecem todos os componentes e peças para a instalação do sistema. Para uma aplicação residencial conectada à rede, as partes do sistema podem incluir um controlador, inversor, fiação, base e instalação.

Para os sistemas conectados à rede, onde o uso de baterias pode ser descartado, é necessária a utilização de inversor para tornar a saída da turbina eletricamente compatível com a rede elétrica. Instalações adequadas e bem feitas podem dispensar custos com relação à manutenção, mas para garantir pleno funcionamento é recomendável realizar uma vistoria anual que pode incluir:

- Verificação e aperto dos parafusos e conexões elétricas;
- Verificação de corrosão nas máquinas, cabos e fios;
- Substituição de fita isolante caso esteja desgastada; e
- Substituição das pás da turbina e rolamentos após 20 anos de uso.

6. CONCLUSÃO

A utilização da geração distribuída especialmente através da micro e minigeração introduz na matriz energética brasileira um novo elemento capaz de suprir e descentralizar a geração elétrica, promovendo novos investimentos e contribuindo para incrementar a qualidade e eficiência do sistema de transmissão e distribuição.

Através da aplicação da GD, possibilidades inovadoras de geração surgem e fomentam a utilização de novas fontes de energia, principalmente renováveis, em lugares não praticados anteriormente.

Soluções destinadas à produção de energia elétrica pela fonte eólica podem ser utilizadas em uma ampla gama de setores, como residenciais, comerciais e industriais, reduzindo o gasto com energia a partir de uma fonte limpa e barata. Contudo, as máquinas desenvolvidas, em sua maioria, não se adequam às especificidades do vento de grandes centros urbanos. As turbinas selecionadas para a pesquisa são robustas e confiáveis, e produzem energia tanto com ventos de baixa velocidade como também nas mais severas condições podendo atender cargas como, por exemplo, iluminação de área comum de edifício ou condomínio e sistemas de iluminação em instalações comerciais e residenciais. Por falta de curvas de potência realísticas fornecidas pela indústria de aerogeradores de pequeno porte brasileira, os aerogeradores nacionais não puderam ser utilizados no estudo.

Comparando as quatro turbinas verificou-se que a Proven 2.5 possui melhor desempenho energético e viabilidade frente as outras (Skystream 3.7; Raum 3.5; e HOYI 300) na condição de vento a qual estariam expostas em um caso real de instalação. Avaliando as características de cada uma observa-se que a Proven 2.5, mesmo não possuindo a maior potência, obteve melhor atuação em relação às outras. Algumas condições justificam esse fator, como o início da geração de eletricidade com uma velocidade de *cut-in* baixa e menor velocidade nominal. A turbina eólica de eixo vertical HOYI 300 mesmo sendo apropriada para aplicação em centros urbanos foi a que produziu menos energia apesar de resultar no maior fator de capacidade e de ter o menor *cut-in*. No entanto, seu preço não é baixo o suficiente para viabilizar a sua aplicação.

Os resultados obtidos não apresentaram viabilidade econômica para nenhuma das turbinas selecionadas. O prazo para o retorno do investimento foi muito extenso, não sendo atrativo para consumidores. Mesmo com o resultado não satisfatório, a pesquisa é importante devido ao ineditismo deste tipo no Brasil, abrindo uma vertente para que pesquisadores e desenvolvedores de aerogeradores se apoiem para que esta condição se altere no futuro. A fundamentação da pesquisa abre uma vertente para que haja

Por serem importados os aerogeradores são onerosos e não são viáveis economicamente; a falta de pesquisas e investigações sobre o comportamento do vento em meio urbano e os altos investimentos na aquisição do sistema inibem sua propagação. A nacionalização de equipamentos e projetos de pesquisa e desenvolvimento são fundamentais para que consumidores optem por aerogeradores de pequeno porte, de baixo custo, fácil instalação e com boa resposta na condição em que estiver exposto. Mesmo sendo descomplicada sua instalação é recomendado que um corpo técnico especializado realize a implantação do sistema, seguindo todas as normas de segurança associadas. Os modernos APPs vêm sendo elaborados para emitirem baixo ruído, apresentarem elevado tempo de vida útil e manutenção reduzida e simples, devido ao fácil acesso aos seus componentes.

A análise também constatou a alta influência da intensidade de turbulência no local, o que afeta consideravelmente a produção das turbinas de eixo horizontal. O ideal seria a utilização de TEEVs que sejam compatíveis com as especificidades presenciadas e maior viés de aplicabilidade por serem de simples manufatura, iniciarem a geração com baixíssima velocidade do vento (*cut-in* de $1,5 \text{ ms}^{-1}$ ou menor) e de baixo custo. A turbina Savonius não possui uma produção de energia elevada, mas se compatibilizaria bem ao local proposto caso sua configuração seja de proporção pequena ou média, leve, com gerador apropriado a seu torque alto e com um coeficiente de potência mais baixo. Neste cenário mais de uma turbina poderia ser implementada na mesma área para elevar a produção de energia.

Outro ponto a ser destacado é a contribuição da pesquisa para incentivar a ampliação do parque industrial brasileiro relacionado a este tipo de tecnologia bastante restrito atualmente.

A metodologia apresentada seguiu os procedimentos adotados na avaliação do potencial eólico para aplicações de turbinas de grande porte em que os níveis de turbulência são significativamente inferiores aos observados em ambientes urbanos. Identificou-se a necessidade de realizar estudos mais aprofundados que permitam avaliar a influência de altos níveis de turbulência na geração de energia por aerogeradores de pequeno porte.

ESTUDOS FUTUROS

O intuito é continuar a investigação do potencial eólico em meio urbano ampliando as medições para os edifícios próximos ao utilizado na pesquisa de mestrado, e deste modo será possível caracterizar uma microrregião. O estudo se baseará na metodologia MCP (Medir, Correlacionar e Prever) que extrapola dados medidos de curto para longo prazo utilizando dados anemométricos medidos previamente como referência.

O objetivo é fazer medições de curto prazo (3 a 6 meses) em alguns edifícios no entorno de SFZ e correlacioná-los com os dados de longo prazo; desta forma, a extrapolação é realizada seguindo o padrão existente e possibilita verificar o regime eólico sazonal anual necessário para realizar a análise do potencial eólico. Essas informações darão subsídios para a escolha ou manufatura de uma turbina eólica de pequeno porte capaz de se adaptar às condições do vento em que estará atuando, com a finalidade de aproveitar adequadamente a intermitência e turbulência característica de centros urbanos.

Investigações mais profundas com relação à interação da turbina com a turbulência do vento também serão desenvolvidas para analisar o quanto a TI influi na produção de energia elétrica, tanto negativamente como positivamente. É prevista a ampliação da mesma metodologia para outras regiões da cidade de São Paulo para que seja possível visualizar se há a mesma dinâmica do vento em localidades diferentes.

REFERÊNCIAS

BETZ. A, “Das Maximum der theoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren” Zeitschrift fur das gesamte Turbinenwesen, 1920, pags 307–309.

ABDEL, A., GAWADAHMED, M. Utilization of Wind Energy in Green Buildings, Twelfth International Conference of Fluid Dynamics, 19-20 December, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123. 1988.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR IEC 61400-21, Turbinas eólicas Parte 21: Medição e avaliação das características da qualidade da energia de aerogeradores conectados à rede, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 61400-12-1, Aerogeradores Parte 12-1: Medições do desempenho de potência dos aerogeradores, 2012.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), Resolução Normativa no 482. 2012.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Resolução Normativa no 687”, 2015.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST

Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, revisão 7, 01 jun 2017.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), Energia eólica. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_6_1.htm. Acesso em: 30 mar. 2018.

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), Sistema de Registro de Geração Distribuída - SISGD, Disponível em:

https://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qcJG%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2. Acessado em: 05/01/2020

AGUIAR, LUCAS., Estudo de Viabilidade da Implantação de Micro Geração de Energia Eólica em Ambientes Urbanos Verticalizados/ L. Aguiar - São Paulo, 2017.

ANI, S. O., H. POLINDER, AND J. A. FERREIRA. 2012. “Low Cost Axial Flux PM Generator for Small Wind Turbines.” In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2012.

ASSAF NETO, Alexandre. Finanças Corporativas e Valor. 2º ed. São Paulo: Atlas, 2005.

ABEEÓLICA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, Bloomberg New Energy Finance - BNEF / MCTIC / ABEEólica, 2019.

ATLAS EÓLICO BRASILEIRO, AMARANTE, O. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2001.

ATLAS EÓLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia, 2012.

AYHAN, D., & SALAM, S. (2012). A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 1040–1049.

AYOTTE, K.W, DAVY, R.J AND COPPIN, P.A., A simple temporal and spatial analysis flow in complex terrain in the context of wind energy modelling. s.l.: Meteorol, 2001.

BIANCHI, F. D., et all. Wind turbine Control Systems

BICALHO, F. Integração de Turbinas Eólicas às Redes Elétricas. Universidade federal de minas gerais escola de engenharia programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2013.

BILLAH K. Y., SCANLAN R. H., “Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate, 1991.

BLOOMBERG, BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE, Wind turbines evolution, 2017.

FENG, C., “The measurement of vortexinduced effects in a flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders” MSc thesis, University British Columbia Vancouver, 1968.

DOE, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. DISTRIBUTED WIND MARKET REPORT. 2017. Disponível em <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/09/f55/2017-DWMMR-091918-final.pdf>. Acesso em: 10 jan 2020.

DUARTE, M. Metodologia para Avaliação Do Potencial Eólico De Uma Região. 1996.

DUTRA, R. Tutorial de Energia Eólica: princípios e tecnologias. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB, 2008.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. “Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional) – 1995-2018”, 2019.

FADIGAS, E., Energia Eólica (2011) p213, São Paulo, SP, Brasil.

FAPESP. Revista Pesquisa Fapesp, Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/01/10/ventos-promissores-a-caminho/> Acessado em: 11/11/2019.

FGV, Energias renováveis complementares, Cadernos FGV Energia, ano 2, nº4, dez 2015.

FIELDS, J. ET AL. Deployment of Wind Turbines in the Built Environment: Risks, Lessons, and Recommended Practices. [S.l.], 2016.

FREITAS, EDUARDO DE. "Os Pontos Cardeais e Suas Subdivisões"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/os-pontos-cardeais-suas-subdivisoes.htm>. Acesso em 22 de dezembro de 2020.

G. CODATO, A. P. OLIVEIRA, J. SOARES, J. F. ESCOBEDO, E. N. GOMES, A. D. PAI, Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil, Theor. Appl. Climatol. (2008) 93: 57–73.

GWEC, GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Statistics 2017. Disponível em: http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf. Acesso em: 27 mar. 2018.

GWEC, GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC), Global Wind Report 2018, abr 2019.

GOLDEMBERG J., MOREIRA J., “Política energética no Brasil”, 2005.IEEE, “Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica”, 2013.

GOOGLE 3D, MAPS, imagem 3D. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 10 abr 2019.

GUIMARÃES, M. W. O. Estimativa de produção de energia de parques eólicos utilizando histórico de operação e dados de reanálise. 2017.

IEC 61400-2:2013. Small wind turbines, 2013.

IEEE, “Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica” O Setor elétrico. P148, Espaço IEEE, 2013.

J. MAZON, J. I. ROJAS, J. JOU, A. VALLE, D. OLMEDA, C. SANCHEZ, An assessment of the sea breeze energy potential using small wind turbines in peri-urban coastal areas, *J. WindEng.Ind.Aerodyn.*139(2015)1–7.

Luisa C. Pagnini †, Massimiliano Burlando, Maria Pia Repetto Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment, *Applied Energy* 154 (2015)

KESHAV, S. AND ROSENBERG, C. “How internet concepts and technologies can help green and smart energy in the electrical grid”, 2011.

LATOUFIS, K., G. MESSINIS, P. KOTSAMPOPOULOS, AND N. HATZIARGYRIOU. 2012. “Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low-Cost Manufacturing of Small Wind Turbines.” *Wind Engineering* 36(4):411–32.

LIAM F1, Disponível em: <http://www.archimedesgreenenergys.com/about.htm>. Acessado em 10/11/2020.

LO, H., ANSARI, N., “The progressive smart grid system from both power and communications aspects”, 2012.

MARIN, A., R. KISHORE, D. A. SCHAAB, D. VUCKOVIC, AND S. PRIYA. “Micro Wind Turbine for Powering Wireless Sensor Nodes.” *Energy Harvesting and Systems*, 2015.

Maryam Zabarjad Shiraz, Aierken Dilimulati, Marius Paraschivoiu, Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities *Sustainable Cities and Society* 53 (2020).

METEOROPOLE, Disponível em: <http://meteoropole.com.br/2014/01/vento-conversao-da-direcao/>, Acessado em: 15/12/2019.

NAHAS M. N., A SELF-STARTING DARRIEUS-TYPE WINDMILL, *Energy* Vol. 18, N° 9, pp. 899-906, 1993.

OLIVEIRA, A. P. et al. Assessing urban effects on the climate of metropolitan regions of Brazil - Preliminary results of the MCITY BRAZIL Project. *Exploratory Environmental Science Research*, 2020.

OLIVEIRA, A. P. (2003), *Investigação da Camada Limite Planetária na Região de Ipero*. Tese de Livre Docência. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo, SP, Brazil, 225 pp.

ORRELL, A. et al. 2017 Distributed Wind Market Report. [S.l.], 2018.

PAGNINI, L. C.; BURLANDO, M.; REPETTO, M. P. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. *Applied Energy*, Elsevier BV, v. 154, p. 112–121, sep 2015.

PEREIRA M., MONTEZANO B., DUTRA R., Mercado de energia eólica de pequeno porte no brasil: percepção do potencial consumidor. 2015.

PORTO, H. A. Modelagem numérica e avaliação da eficiência de aerogeradores de pequeno porte de eixo horizontal. 2019. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

PROVEN ENERGY, Datasheet da turbina Proven de 2.5kW. Disponível em <http://www.provenenergy.co.uk/>. Acesso em: 01 jun 2019.

RAVI ANANT KISHORE, ANTHONY MARIN, SHASHANK PRIYA. Efficient Direct-Drive Small-Scale Low-Speed Wind Turbine. *Energy Harvesting and Systems* 2014; 1(1-2): 27–43.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada. UNFCCC. 2015.

RODRIGUES, P. Energias Renováveis Energia Eólica. 2011.

SIMPSON, J.E., 1994. Sea Breeze and Local Winds. Cambridge University Press, Cambridge, UK p. 234.

T. ACKERMANN et. al. / *Electric Power Systems Research* 57 (2001) 195–204

TABRIZI, A. B., WHALE, J., LYONS, T., URMEE, T., PEINKE, J. (2017). Modelling the structural loading of a small wind turbine at a highly turbulent site via modifications to the Kaimal turbulence spectra. *Renewable Energy*, 105, 288–300.

TIBOLA, G. Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima tensão, Universidade de Santa Catarina, 2009.

TUMMALA, A. et al. A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 56, p. 1351–1371, apr 2016.

VALENÇA, D. Proposição de uma metodologia para a avaliação ao aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano. 2010.

VISION AIR WIND - V-AIR. Disponível em: <http://www.visionairwind.com/hoyi/>

WENDEL, M., FERREIRA, T. V., DAVID, P. A. M. Impacto da Perda de Dados Anemométricos na Estimativa do Recurso Eólico. In: XXIV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Curitiba, 2017.

WINDPOD, Disponível em: <https://www.windpods.com/>. Acessado em: 10/11/2020

WOOD D. Small wind turbines. In: Analysis, Design, and Application. London: Springer-Verlag; 2011.

WORASINCHAI, S.; INGRAM, G.; DOMINY, R. The effects of improved starting capability on energy yield for small HAWTs. In: [S.l.]: ASME, 2011.

XZERES. Wind Corporation. Disponível em:

<http://www.windenergy.com/products/skystream/skystream-3.7#upclose>. Acessado em 10/11/2020.