

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Julio Freire Rosa Alves

**Análise de viabilidade da instalação de microturbinas
eólicas de eixo vertical em um prédio administrativo**

São Carlos

2022

Julio Freire Rosa Alves

Análise de viabilidade da instalação de microturbinas eólicas de eixo vertical em um prédio administrativo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Hernán Darío Cerón-Muñoz

São Carlos
2022

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

S856m Alves, Julio Freire Rosa
Análise de viabilidade da instalação de microturbinas eólicas de eixo vertical em um prédio administrativo / Julio Freire Rosa Alves ; orientador Hernán Darío Cerón-Muñoz. – São Carlos, 2022.
85 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2022.

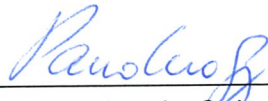
1. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. 2. VAWT. 3. Geração Distribuída. 4. Análise de Viabilidade Econômica. I. Ceron-Muñoz, H. D.. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Approval sheet

Candidato / Student: Julio Freire Rosa Alves
Título do TCC / Title : Análise de viabilidade da instalação de microturbinas eólicas de eixo vertical em um prédio administrativo
Data de defesa / Date: 19/07/2022

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / result
Professor Associado Paulo Celso Greco Júnior	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	
Pesquisador Pedro David Bravo Mosqueira	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SAA	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee:



Professor Associado Paulo Celso Greco Júnior
(assinatura / signature)

*“Education must inspire the faith that each of us
has both the power and the responsibility to
effect positive change on a global scale.”*

- 池田大作 (Daisaku Ikeda)

RESUMO

ALVES, J. F. R, **Análise de viabilidade da instalação de microturbinas eólicas de eixo vertical em um prédio administrativo**. 2022. 85p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Crescentes demandas energéticas e a persistente dependência em combustíveis fósseis ameaçam a transição sustentável da matriz elétrica global. Neste contexto, evoluções na tecnologia eólica vêm permitindo que grandes projetos de infraestrutura elétrica com turbinas eólicas sejam construídos e que, a essa escala, a geração eólica já seja economicamente viável. Em menores escalas, contudo, no contexto da geração distribuída em instalações residenciais e/ou comerciais pequenas, tecnologias eólicas possuem uma participação ínfima na capacidade total instalada. Este trabalho faz uma revisão dos principais avanços tecnológicos feitos na área, investiga os principais modelos de VAWTs existentes adequados à geração distribuída e analisa a viabilidade econômica de sua instalação em edificações de alto consumo elétrico como é o caso de prédios administrativos. Os resultados mostram que turbinas eólicas possuem severas limitações de performance em ambientes urbanos e a baixas alturas que tornam seu custo não competitivo com o preço da energia elétrica da rede ou até mesmo de outras fontes renováveis como a solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. VAWT. Geração Distribuída. Análise de Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

ALVES, J. F. R, **Viability analysis of the installation of micro vertical axis wind turbines in an administrative building**. 2022. 85p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Growing energy needs and the persistent dependence on fossil fuels threaten the sustainable transition of the global electrical matrix to green sources. In this context, developments in wind technologies have allowed large-scale electrical infrastructure to be built using wind turbines and that, at this scale, wind power already is economically viable. On small-scales, however, in the context of distributed generation on residential and small commercial installations, wind turbines only account for a negligible part of the total installed capacity. This work does a revision of the main technological advancements in the field, investigates the main existing VAWT models suitable to distributed generation, and analyzes the economic viability of their installation on buildings with high energy needs such as office buildings. Results show that wind turbines face severe performance limitations in urban environments and at low heights that makes their cost uncompetitive with grid-distributed electricity or other renewables such as photovoltaics.

Keywords: Vertical-Axis Wind Turbines. VAWT. Distributed Generation. Economic Viability Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperatura média global relativa à média em 1880-1920. Reprodução: (HANSEN; SATO; RUEDY, 2022)	23
Figura 2 – Forçamento radiativo em 2005. Reprodução: (IPCC, 2007)	25
Figura 3 – Fontes das emissões de CO_2 em 2010. Reprodução: (IPCC, 2014)	26
Figura 4 – Matriz energética mundial, em %. Comparativo. Reprodução: (IEA, 2021)	27
Figura 5 – Evolução da matriz elétrica mundial. Reprodução: (IEA, 2021)	28
Figura 6 – Matriz energética brasileira em 2021. Reprodução: (MME, 2022)	28
Figura 7 – Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Reprodução: (MME, 2022)	29
Figura 8 – Preço histórico de módulos fotovoltaicos. [USD/W]xAno. Reprodução: (IEA, 2021)	30
Figura 9 – Histórico do preço da energia eólica, em centavos de dólar (USD). Reprodução: (ZAYAS, 2016)	31
Figura 10 – Preço das plantas instaladas nos EUA 2013-2019. Reprodução: (EIA, 2021)	32
Figura 11 – Variação entre a capacidade instalada inicial e com a expansão do PDE 2030 por tecnologia –em GW. Dez. 2020 vs. Dez. 2030. Reprodução: (MME, 2021)	33
Figura 12 – Efeito do tamanho na eficiência de turbinas a gás. Reprodução: (BEJAN <i>et al.</i> , 2010)	34
Figura 13 – Localização de grandes minas de carvão (preto) e unidades produtores que utilizam carvão (laranja) na China em 2013. Reprodução: (IEA, 2021)	35
Figura 14 – Capacidade de geração distribuída instalada desde dez. 2020 e tendência.	38
Figura 15 – Distribuição da GD por setor. Fonte: (CHRISPIM, 2022)	40
Figura 16 – Estrutura de uma HAWT. Reprodução: (MAHMOUD; XIA, 2012)	41
Figura 17 – Visão frontal e lateral de uma turbina com fluxo de ar ilustrado. Reprodução: (BLACKWOOD, 2016)	42
Figura 18 – Distribuição da velocidade do vento com a altura. Reprodução: (TAR, 2007)	44
Figura 19 – Evolução do tamanho de HAWTs. Reprodução: (PADMANATHAN <i>et al.</i> , 2019)	44
Figura 20 – Estrutura de VAWTs e HAWTs. Reprodução: (MAHMOUD; XIA, 2012)	46
Figura 21 – Diferentes tipos de VAWTs. Reprodução: (CASTELLANI <i>et al.</i> , 2019)	46
Figura 22 – Aerodinâmica básica de uma turbina tipo Savonius. Reprodução: (WE-NEHENUBUN; SAPUTRAA; SUTANTO, 2014)	47

Figura 23 – Coeficiente de potência de uma turbina do tipo Savonius de perfil semicilíndrico em função do número de pás. Reprodução: (WENEHUNBUN; SAPUTRAA; SUTANTO, 2014)	48
Figura 24 – Diagrama de forças e velocidades em uma turbina H-Darrius. Visão superior. Reprodução: (JAKUBOWSKI; STAROSTA; FRITZKOWSKI, 2018)	50
Figura 25 – Exemplo da variação do ângulo de pitch, torque total e velocidade aparente em uma pá ao longo do eixo. Reprodução: (JAKUBOWSKI; STAROSTA; FRITZKOWSKI, 2018)	51
Figura 26 – Exemplo da estrutura típica de uma turbina Darrius helicoidal. Reprodução: (KUMAR <i>et al.</i> , 2019a)	52
Figura 27 – Exemplo da variação do torque em função do ângulo em uma turbina Darrius helicoidal de 4 pás. Simulação computacional. Reprodução: (CHENG <i>et al.</i> , 2017)	53
Figura 28 – Dornier Darrius, 55 kW, 25 m de altura, com cabos de apoio claramente visíveis.	54
Figura 29 – Configuração das pás simuladas. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)	55
Figura 30 – Torque nas pás de uma turbina Darrius de pá reta em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)	56
Figura 31 – Torque nas pás de uma turbina Darrius de pá curva em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)	56
Figura 32 – Torque nas pás de uma turbina Darrius helicoidal em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)	57
Figura 33 – ΔC_P em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)	58
Figura 34 – Prédio SAA EESC/USP. Créditos: Paulo Celso Greco Júnior.	62
Figura 35 – Potencial eólico a 30m do centro sul do Brasil. Localização do edifício modelo marcada em vermelho. Reprodução: (CEPEL, 2013)	66
Figura 36 – Estimativa de <i>output</i> anual da turbina Vision Air 5 em função da velocidade anual média do vento. Reprodução: (WIND, 2020)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz energética mundial. (IEA, 2021)	27
Tabela 2 – Consumo médio de eletricidade em diferentes tipos de edifícios públicos na China. [$kW.h/m^2.yr$] (MA <i>et al.</i> , 2016)	59
Tabela 3 – Consumo de eletricidade segundo tipo de edificação em diferentes países. [$kW.h/m^2.yr$] (MA <i>et al.</i> , 2016)	60
Tabela 4 – Estimativas de consumo anual de energia elétrica para o edifício-modelo.	62
Tabela 5 – Estimativa de custo da energia elétrica tradicional.	62
Tabela 6 – Estimativa de custo da instalação de energia solar fotovoltaica.	63
Tabela 7 – Especificações de sistemas de armazenamento comercialmente disponíveis.	64
Tabela 8 – Especificações de baterias disponíveis no mercado nacional	64
Tabela 9 – Custos de baterias disponíveis no mercado nacional	65
Tabela 10 – Estimativa de custo das turbinas tipo Vision Air 5.	67
Tabela 11 – Estimativa de custos da instalação de turbinas Aeolos.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGD	Associação Brasileira de Geração Distribuída
AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use (Agricultura, Exploração Florestal e Outros Usos do Solo, em tradução livre)
DG	Distributed Generations (Geração Distribuída, em tradução livre)
EIA	U.S Energy Information Administration (Administração de Informação Energética dos Estados Unidos, em tradução livre)
GD	Geração Distribuída
HAWT	Horizontal-Axis Wind Turbine (Turbina Eólica de Eixo Horizontal)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas)
MME	Ministério de Minas e Energia
PDE30	Plano Decenal de Expansão de Energia 2030
TSR	Tip-Speed Ratio (Razão de Velocidade de Ponta de Pá, em tradução livre)
VAWT	Vertical-Axis Wind Turbine (Turbina Eólica de Eixo Vertical)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área Transversal
C_D	Coefficiente de Arrasto
C_L	Coefficiente de Sustentação
C_P	Coefficiente de Potência
D	Arrasto
E	Energia
F	Força
L	Sustentação
m	Massa
P	Potência
Re	Número de Reynolds
S	Área Superficial de Referência
T	Torque
v	Velocidade
yr	Ano
η	Eficiência
θ	Ângulo em torno do eixo
λ	Razão de Velocidade de Ponta de Pá
ρ	Densidade
Ψ	Ângulo de revolução

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	21
1.2	Visão geral do documento	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Contexto	23
2.1.1	Temperatura global	23
2.1.2	Forçamento radiativo	24
2.1.3	Emissões de carbono	25
2.1.4	As matrizes mundiais e brasileiras	26
2.1.5	A evolução das fontes renováveis	29
2.2	Geração distribuída	32
2.2.1	Geração centralizada vs. distribuída	33
2.2.1.1	Desvantagens do sistema distribuído	36
2.2.1.2	Vantagens do sistema distribuído	36
2.2.2	Um sistema híbrido	37
2.2.2.1	A matriz da geração distribuída	39
2.3	Turbinas eólicas	40
2.3.1	Turbinas de eixo horizontal	40
2.3.1.1	Maximizando a eficiência	42
2.3.1.2	Pequena escala	45
2.3.2	Turbinas de eixo vertical	45
2.3.2.1	Turbinas tipo Savonius	47
2.3.2.1.1	Aerodinâmica das turbinas tipo Savonius	47
2.3.2.1.2	Aplicações das turbinas tipo Savonius	49
2.3.2.2	Turbinas tipo Darrieus	49
2.3.2.2.1	H-Darrieus	49
2.3.2.3	Turbinas Darrieus Helicoidais	52
2.3.2.4	Turbinas Darrieus de Pá Curva	53
2.3.2.5	Comparativo da performance aerodinâmica	55
3	DESENVOLVIMENTO	59
3.1	Estimativa das necessidades elétricas de edificações	59
3.2	Mapeamento de equipamentos disponíveis comercialmente	60
3.2.1	Aeolos	60
3.2.2	Vision Air Wind	60

3.2.3	Windside	61
3.3	Componentes adicionais	61
3.4	Viabilidade	61
3.4.1	Modelo de edificação	61
3.4.2	Estimativas iniciais	62
3.4.3	Comparativo com solar	63
3.4.4	Sistema de armazenamento	63
3.4.4.1	Estado da arte	63
3.4.4.2	Mercado nacional	64
3.4.5	Inversores e controladores de carga	65
3.4.6	Potencial Eólico	66
3.4.7	Turbinas necessárias	67
3.4.7.1	Windside	67
3.4.7.2	Vision Air	67
3.4.7.3	Aeolos	68
4	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	77
	APÊNDICE A – WINDSIDE	79
	APÊNDICE B – VISION AIR	81
	APÊNDICE C – AEOLOS	83

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um dos maiores e mais complexos desafios enfrentados pela humanidade no século XXI. Décadas de progresso e avanços científicos e tecnológicos que se intensificaram a partir da Segunda Revolução Industrial, no final do século XIX, e possibilitaram o desenvolvimento de diversos países e a melhoria da qualidade de vida de bilhões de pessoas em todo o globo. A partir da segunda metade do século XX, contudo, efeitos desse progresso começam a mostrar seu outro lado, e impactos nas dinâmicas climáticas decorrentes principalmente da utilização generalizada de combustíveis fósseis começam a ser denunciadas.

Avançando até o presente, na terceira década do século XXI, impactos antropogênicos sobre o clima foram observados em todos os continentes. Ecossistemas inteiros ameaçados, cadeias produtivas à mercê de padrões climáticos cada vez mais imprevisíveis e milhões de pessoas - especialmente em países mais pobres - vivendo em regiões vulneráveis a desastres climáticos cada vez mais próximos (IPCC, 2022).

Diante disso, a Ciência e a Engenharia assumem papel pivotal como agentes capazes de promover um desenvolvimento sustentável, que seja capaz de aliar o progresso econômico com interesses comuns da humanidade e da preservação ambiental, e é nesse contexto que a geração eólica, como peça chave na transição verde da matriz energética mundial, desponta como campo de interesse dentro da Engenharia Aeronáutica.

1.1 Objetivos

Enquanto trabalho de conclusão de curso, o presente documento visa atingir uma série de objetivos, dentre os quais:

- Contextualizar a geração eólica e seu papel frente às mudanças climáticas.
- Explorar os avanços nas turbinas eólicas (em especial as de pequena escala e de eixo vertical) possibilitados por progressos no campo da engenharia, inclusive a aeronáutica.
- Situar a viabilidade de sua utilização em um contexto prático.

1.2 Visão geral do documento

O trabalho está estruturado em dois blocos principais. No primeiro deles, faz-se uma revisão bibliográfica acerca do contexto global atual no qual está inserida a geração de energia elétrica por uma fonte renovável de baixo carbono como a eólica; são feitas

considerações acerca da questão da geração centralizada versus distribuída de energia; e exploradas as principais turbinas eólicas existentes, seu funcionamento, suas vantagens e limitações. A segunda parte do trabalho se dedica a estudar o caso da implementação de microturbinas eólicas de eixo vertical em um prédio de alta demanda energética: são mapeados mercados e estimados custos que possibilitem a situação da geração eólica frente a outras alternativas e competidores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Contexto

2.1.1 Temperatura global

Desde o advento da era industrial, estima-se que a atividade humana tenha aumentado a temperatura global entre 1.0°C e 1.2°C , quando comparada com a temperatura média do final do século XIX (GISTEMP, 2022). Os efeitos das mudanças climáticas causadas por esse aumento são um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade, e oferecem riscos à estabilidade de ecossistemas terrestres e marinhos em todo o globo. Perturbações nesses ecossistemas ameaçam diversas áreas, que vão desde a sobrevivência de espécies vegetais e animais, até atividades humanas essenciais que estão intimamente ligadas a ciclos climáticos, como a agricultura. De fato, até a própria habitabilidade de regiões inteiras do planeta vulneráveis a desencadeamentos das mudanças climáticas como o aumento do nível do mar, o avanço da desertificação e a maior incidência (e intensidade) de desastres climáticos está ameaçada (IPCC, 2007).

Essas preocupações levaram mais de 190 países do mundo a assinar o Acordo de Paris desde 2015, comprometendo-se a limitar a elevação da temperatura global em até 2.0°C - e preferencialmente em até 1.5°C - como forma de conter e mitigar as mudanças climáticas. Evidências atuais sugerem, contudo, que caso medidas drásticas não sejam tomadas, essas metas não serão atingidas e os limites serão ultrapassados durante a metade do século atual (HANSEN; SATO; RUEDY, 2022).

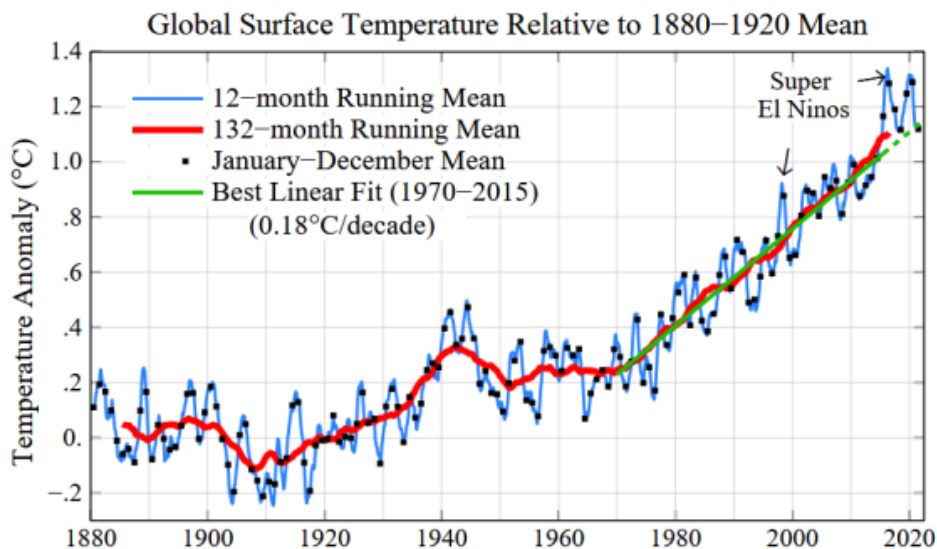


Figura 1 – Temperatura média global relativa à média em 1880-1920. Reprodução: (HANSEN; SATO; RUEDY, 2022)

2.1.2 Forçamento radiativo

Os fatores que contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas são muitos. Eventos naturais como erupções vulcânicas dispersam partículas de aerossol na atmosfera que bloqueiam a luz solar e ciclos solares periódicos alteram a quantidade de energia que a Terra recebe de sua estrela (como os ciclos de Schwabe, associados às manchas solares, que têm um período de aproximadamente 11 anos, sendo possível existir outros ciclos, de período muito mais longo, cujo efeito ainda não é descrito). É consenso, contudo, que o maior impacto venha de atividades antropogênicas, dentre as quais a emissão de gases do efeito estufa - principalmente o dióxido de carbono - seja a maior delas. Devido às interações complexas que esses fatores podem ter, não é tarefa simples (ou sequer atingível) quantificar exatamente todo o escopo de influência que uma ação pode ter. Um clássico exemplo é o *loop* de *feedback* positivo entre o aumento da temperatura e o derretimento de calotas polares: quando derretem, as calotas (brancas e altamente reflexivas) são substituídas por mar aberto (escuro) que absorve uma quantidade muito maior de energia solar, contribuindo para um aumento ainda maior da temperatura que irá causar um maior derretimento de calotas polares.

Apesar disso, algumas métricas podem fornecer uma estimativa do impacto individual de cada um dos fatores. Uma delas é o forçamento radiativo, definido como a diferença entre a energia recebida pela Terra sob a forma de radiação solar e a refletida em um determinado período (em $[W.m^{-2}]$). Em 2005, o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) estimava que o cenário global do forçamento radiativo era:

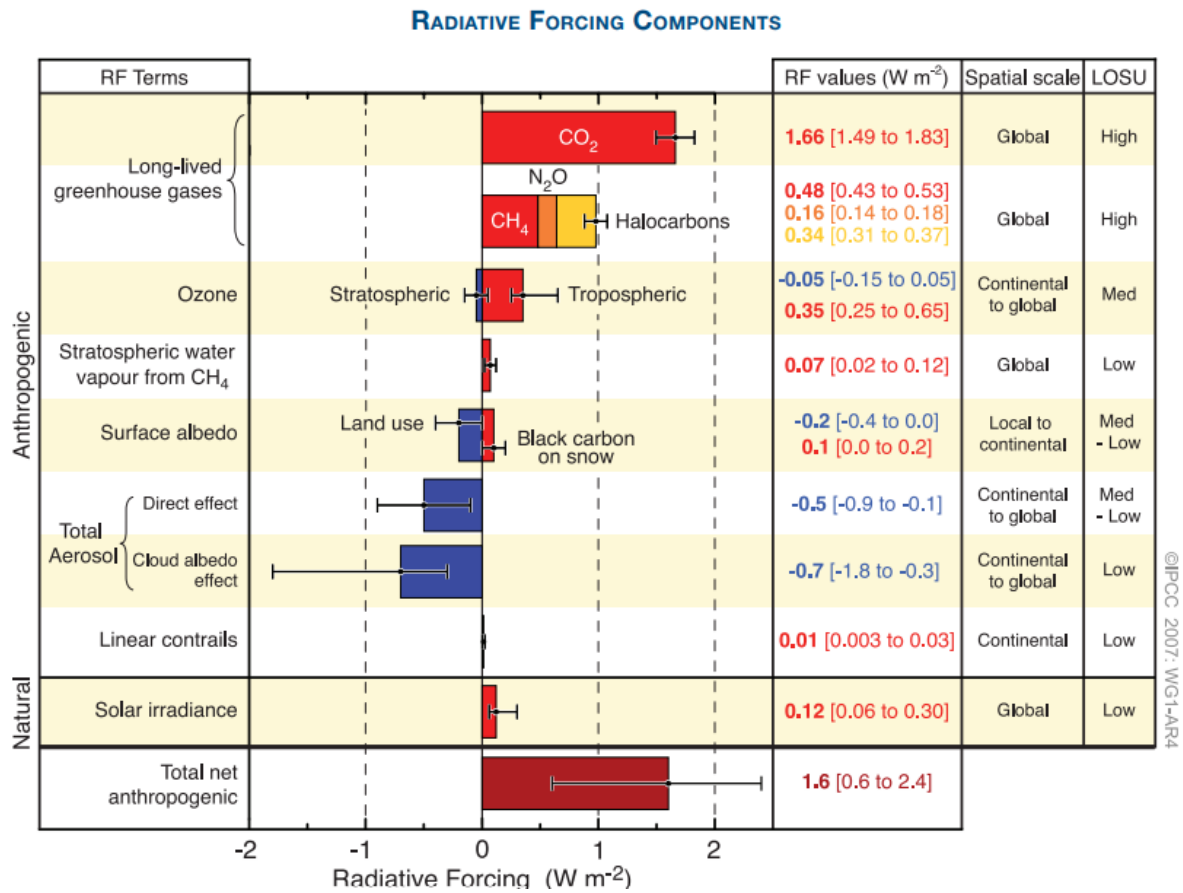


Figura 2 – Forçamento radiativo em 2005. Reprodução: (IPCC, 2007)

É possível observar na figura 2 que a emissão de dióxido de carbono se destaca claramente como a maior contribuidora para o aquecimento do planeta e, portanto, faz sentido que esforços sejam direcionados a mitigar as fontes responsáveis por essas emissões.

2.1.3 Emissões de carbono

As indústrias e setores responsáveis pela emissão global de CO_2 são inúmeras, e esse é justamente o maior obstáculo à sua redução: como virtualmente qualquer atividade de desenvolvimento econômico gera impactos negativos sobre o clima, governos nacionais são resistentes em adotar medidas que colocariam em risco o crescimento econômico de seus países em favor de reduzir emissões globais. O relatório do IPCC de 2014 estimava que, em 2010, a distribuição das fontes de emissão de dióxido de carbono eram:

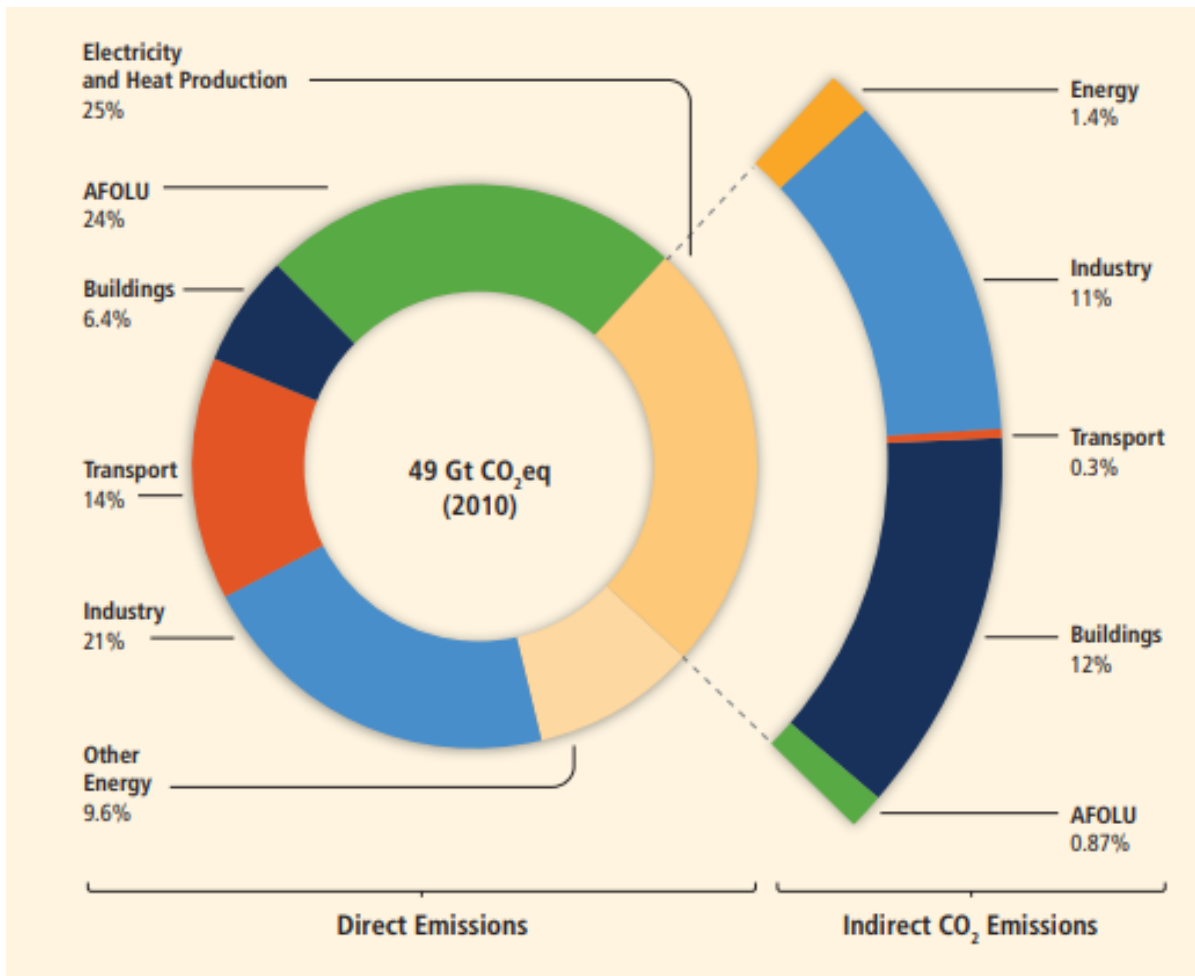


Figura 3 – Fontes das emissões de CO_2 em 2010. Reprodução: (IPCC, 2014)

No gráfico, na figura 3, observa-se que os dois maiores setores responsáveis são AFOLU (Agriculture, Forestry and other Land Use - Agricultura, Exploração Florestal e outras Utilizações do Solo, em tradução livre) e a produção de eletricidade e aquecimento. Este último ocupando a primeira posição, sendo responsável sozinho por um quarto de todas as emissões de CO_2 diretas do planeta. Investigar a matriz energética (e elétrica) do mundo, e buscar maneiras de transicioná-la para fontes mais sustentáveis e menos intensivas em carbono é um passo importante na redução das emissões globais e na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

2.1.4 As matrizes mundiais e brasileiras

Historicamente, desde a primeira revolução industrial, que foi possibilitada pelo uso do carvão mineral, a matriz energética mundial é dominada por combustíveis fósseis. Em 2019, segundo a IEA (International Energy Agency, ou Agência de Energia Internacional), carvão, petróleo e gás natural somados representavam mais de 80% de todas as fontes de energia do planeta (IEA, 2021). A distribuição completa está representada abaixo na figura 4 e tabela 1.

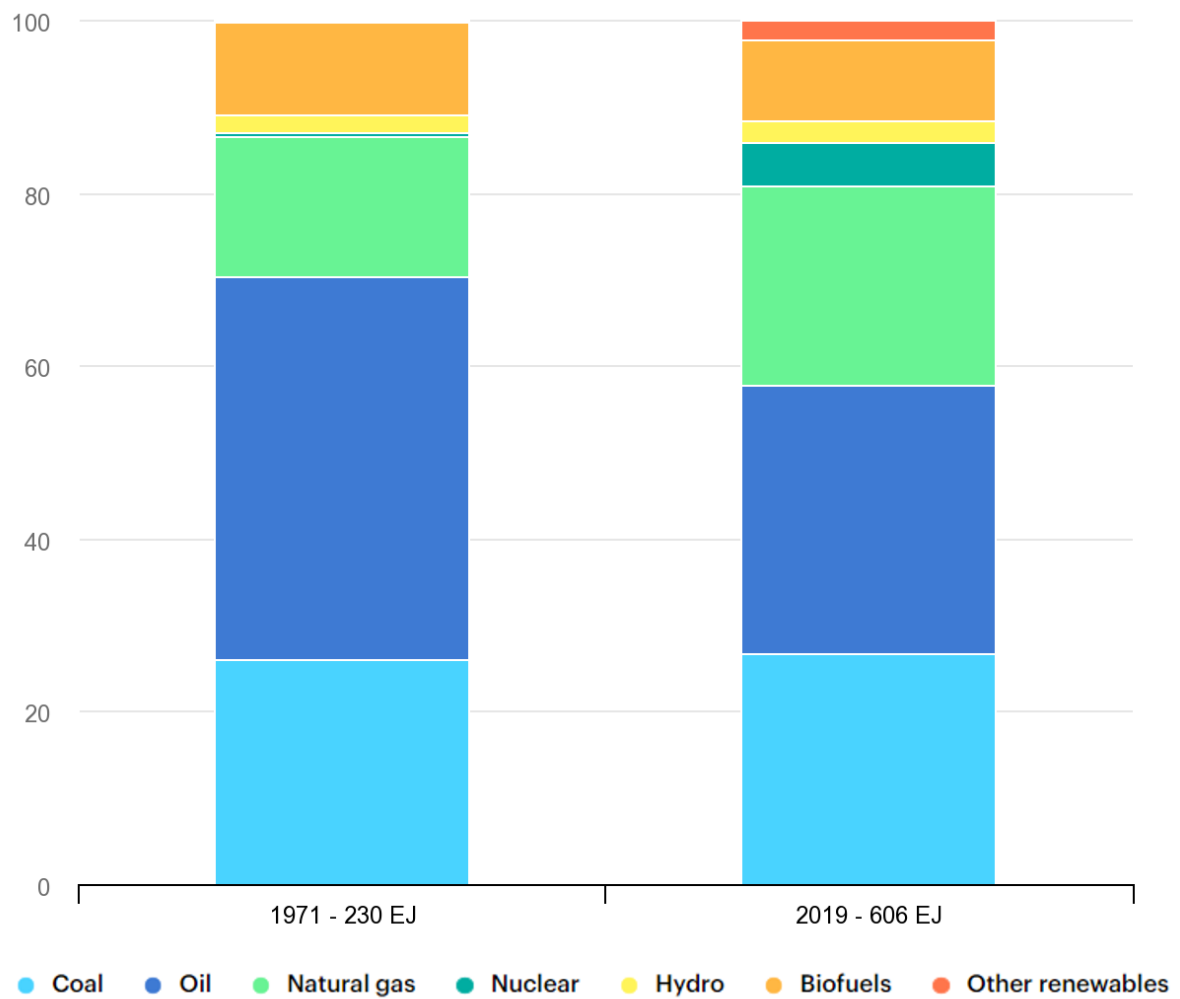


Figura 4 – Matriz energética mundial, em %. Comparativo. Reprodução: (IEA, 2021)

	Carvão	Petróleo	Gás Natural	Nuclear	Hidrelétrica	Biocombustíveis	Outros renováveis
1971	26.1%	44.3%	16.2%	0.5%	1.9%	10.8%	0.2%
2019	26.8%	30.9%	23.2%	5.0%	2.5%	9.4%	2.2%

Tabela 1 – Matriz energética mundial. (IEA, 2021)

No contexto da produção elétrica em específico (que se difere da matriz energética que inclui energia utilizada diretamente em transportes, aquecimento e outras formas que não a geração de energia elétrica direta), o cenário é ligeiramente diferente.

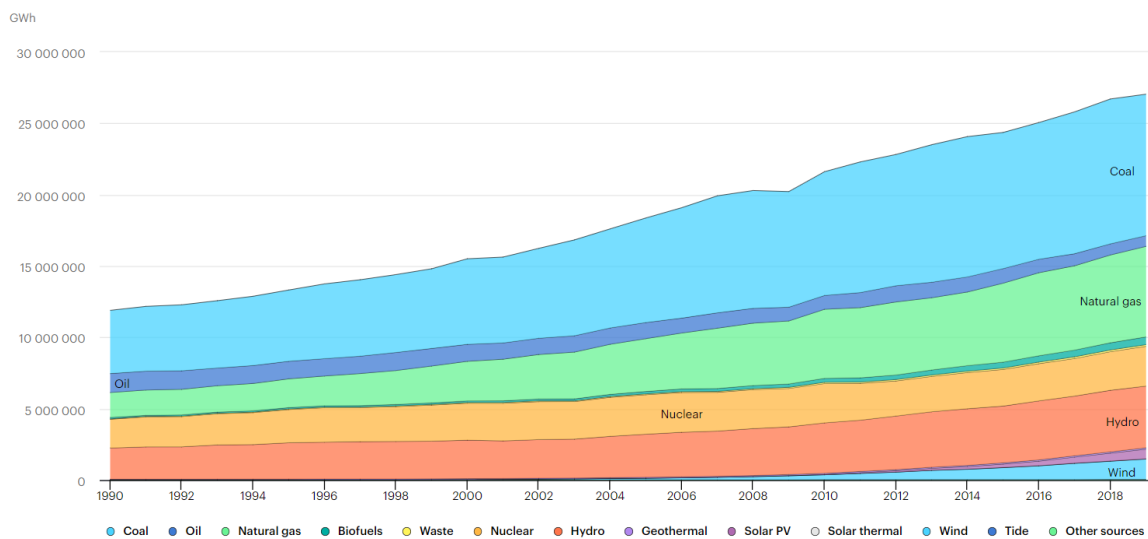


Figura 5 – Evolução da matriz elétrica mundial. Reprodução: (IEA, 2021)

Ainda assim, o cenário é também dominado por combustíveis fósseis, com carvão mineral, petróleo e gás representando mais de 63% da produção de energia elétrica mundial.

Como pode ser observado na figura 5, essa distribuição, a nível global, é muito parecida com a de 40 atrás. No Brasil, a situação é um pouco diferente. Quando estamos falando da matriz energética, os combustíveis não renováveis de fato predominam, embora haja uma participação significativa da biomassa decorrente da utilização do etanol feito a partir da cana-de-açúcar como combustível automotivo.

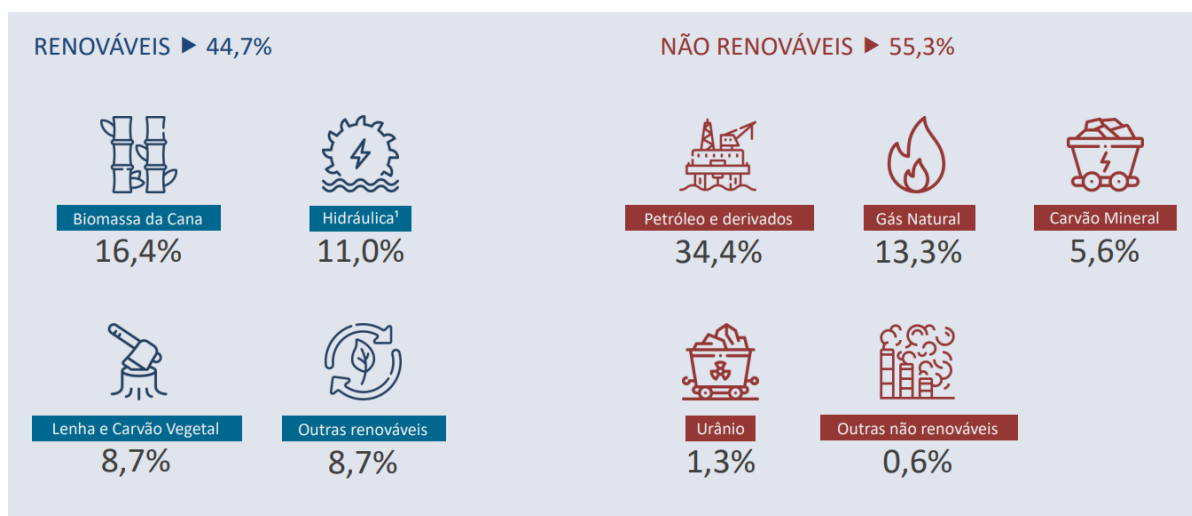


Figura 6 – Matriz energética brasileira em 2021. Reprodução: (MME, 2022)

Quando analisamos apenas a matriz elétrica, contudo, o Brasil se mostra um claro ponto fora da curva quando comparada à média global. Devido à abundância de recursos

hídricos e ao relevo de planalto que predomina no centro sul do país, a região onde está a maior parte de sua população, a energia hidrelétrica sempre foi (e ainda é) muito relevante.

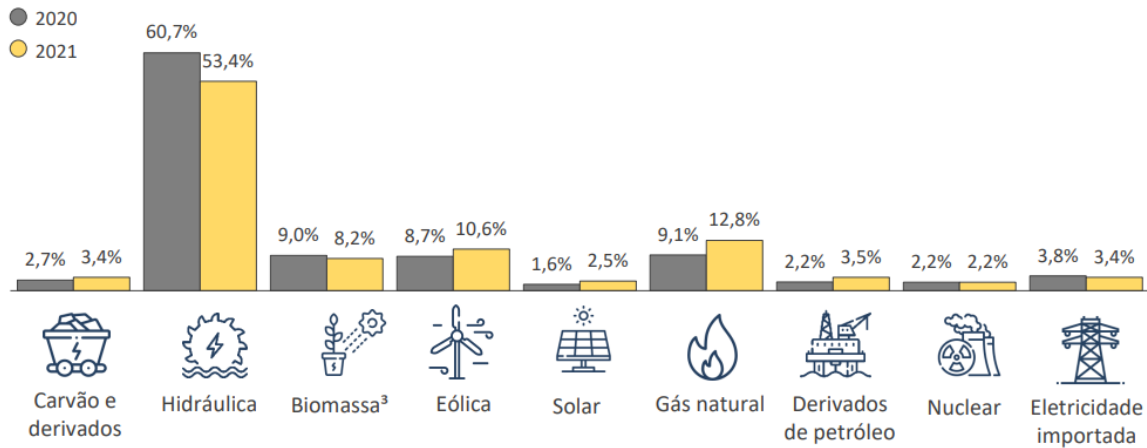


Figura 7 – Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021. Reprodução: (MME, 2022)

Apesar de ser uma fonte renovável de energia, a energia hidrelétrica enfrenta fortes críticas devido ao impacto ambiental que causa durante a construção de suas plantas. Esses impactos envolvem a alteração do curso de rios, o que causa perturbações profundas nos ecossistemas fluviais; e a inundação de imensas áreas (que podem ser de floresta nativa, agricultura e até habitações humanas). Além disso, ela é vulnerável ao ciclo de chuvas (que tende a ficar mais irregular com as mudanças climáticas (IPCC, 2007)). Essa vulnerabilidade pode ser claramente vista na figura 7, que compara a matriz elétrica brasileira entre 2020 e 2021: em 2021, um ano que observou baixos volumes de chuvas e escassez hídrica, a participação deste tipo de geração na matriz nacional diminuiu em mais de 10%.

Ainda assim, embora a situação da matriz elétrica brasileira seja muito mais sustentável que a do resto do mundo, o consumo de energia no Brasil é crescente. Segundo o ODE 2030 (Plano Decenal de Expansão de Energia 2030) do Ministério de Minas e Energia (MME, 2021), o consumo de energia elétrica no Brasil deve crescer entre 2.9% e 3.0% por ano entre 2021 e 2030, o que representa um acumulado entre 29.3% e 30.5% na década. Dadas todas as considerações sobre a necessidade de reduzir emissões de carbono e os entraves que acompanham novos projetos de construção de hidrelétricas, espera-se que grande parte dessa nova demanda seja suprida com a instalação de fontes renováveis.

2.1.5 A evolução das fontes renováveis

Apesar de todo o impacto que a produção de energia tem sobre o aquecimento global, a matriz energética mundial segue praticamente inalterada nas últimas décadas. Uma série de fatores há de ser culpada por isso. O primeiro deles são as limitações técnicas:

fontes de energia renováveis, embora existam há muito tempo, só agora estão entrando em estágios de maturidade tecnológica e escala de produção que permitam sua competitividade econômica com métodos tradicionais de geração de energia de alta emissão de carbono. É o caso da energia eólica *onshore* e dos painéis fotovoltaicos, que viram nos últimos anos grandes reduções no seu custo.

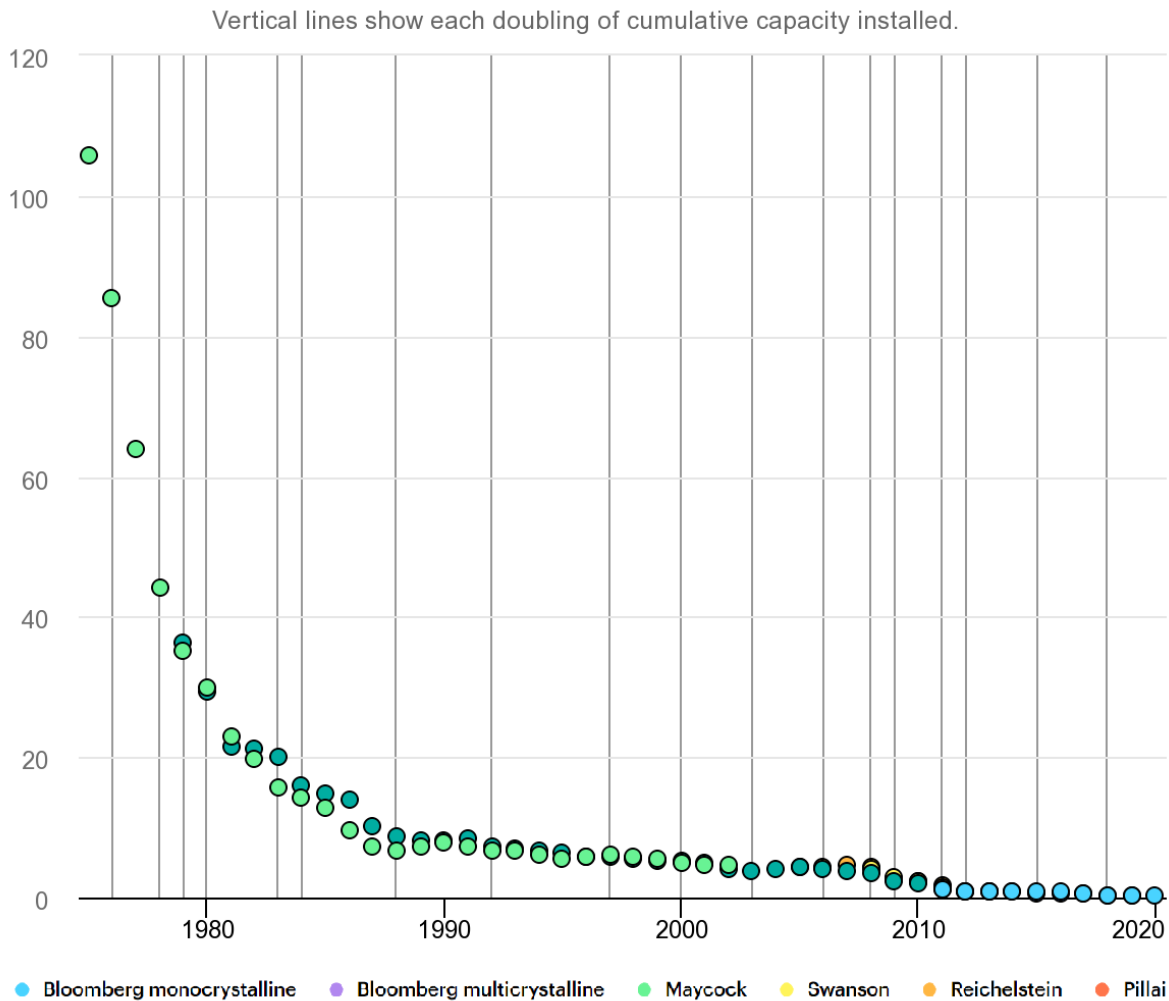


Figura 8 – Preço histórico de módulos fotovoltaicos. [USD/W]xAno. Reprodução: (IEA, 2021)

O caso dos módulos fotovoltaicos talvez seja o exemplo mais dramático deste desenvolvimento. Nos últimos 40 anos, a tecnologia viu seus preços caírem exponencialmente, partindo de mais de 105 dólares por watt em 1975 para 0.20 dólares por watt em 2020 com painéis monocristalinos, e acredita-se que ainda haja mais espaço para desenvolvimento, com a expectativa que esse preço caia ainda mais nos próximos anos. Para a energia eólica, o cenário é parecido, mas com algumas diferenças. Primeiro, há uma maior variação do custo efetivo devido aos diferentes padrões de vento em cada região, que são maiores e mais imprevisíveis que as diferenças em incidência solar. Além disso, nota-se

uma maior maturidade da tecnologia, com os preços já estáveis há alguns anos, e embora vislumbre-se possíveis avanços nas áreas de *offshore* e em turbinas maiores, com materiais mais modernos, estima-se que o custo deste tipo de energia deva variar menos que o da energia solar.

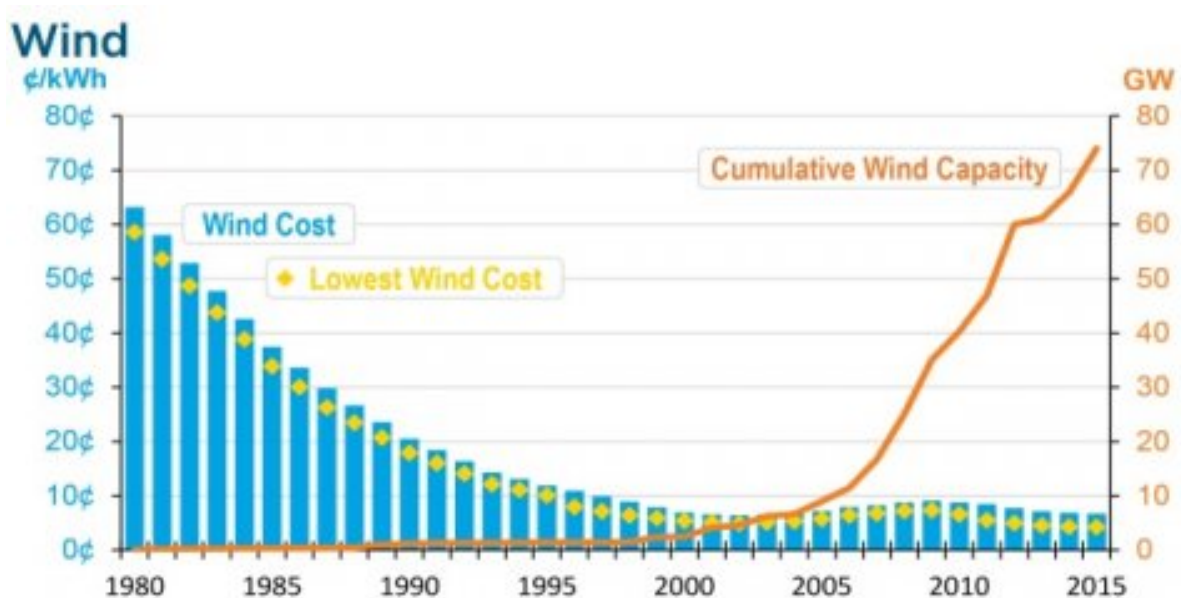


Figura 9 – Histórico do preço da energia eólica, em centavos de dólar (USD). Reprodução: (ZAYAS, 2016)

Percebe-se na figura 9 o amadurecimento da tecnologia, com pouca variação nos preços na última década, em oposição à energia solar. Apesar disso, nota-se o enorme avanço em termos de capacidade instalada, que cresceu exponencialmente no período. Ilustrando esse cenário, temos o comparativo do preço médio das plantas instaladas (e sua capacidade) nos Estados Unidos entre os anos de 2013 e 2019.

Capacity-weighted average construction costs, by technology type (2013–2019)

dollars per kilowatt

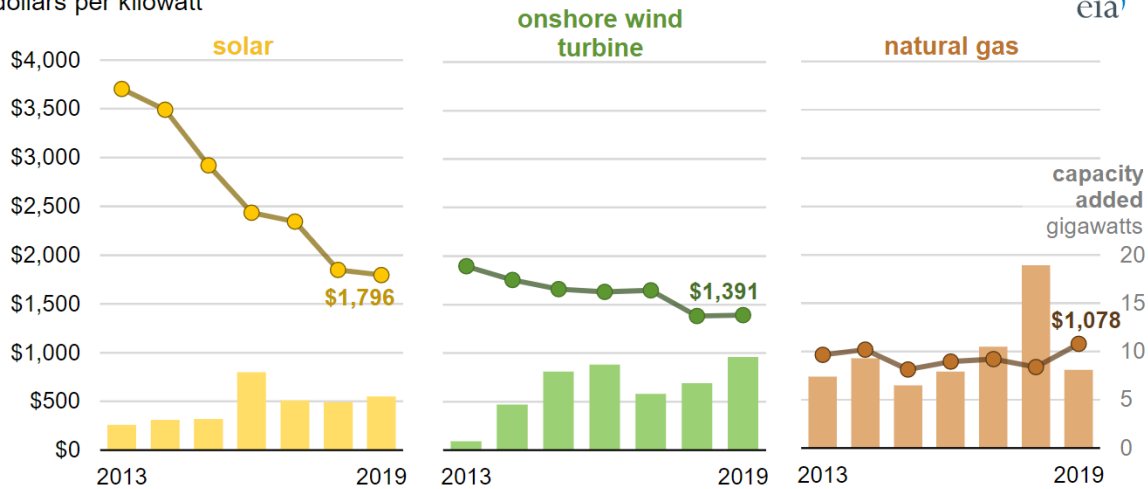


Figura 10 – Preço das plantas instaladas nos EUA 2013-2019. Reprodução: (EIA, 2021)

É clara, na figura 10, a evolução nos preços de ambas tecnologias, seja a queda acelerada da energia solar ou o avanço moderado da energia eólica. Destaca-se nessa figura, contudo, que o preço dos métodos tradicionais, neste caso plantas de gás natural, segue menor que o das energias renováveis e, apesar da pressão ambiental, este tipo de empreendimento foi o que mais teve capacidade instalada no período.

Isso acontece pois mesmo considerando que há tecnologias alternativas de energia renovável disponíveis e a preços competitivos (que não é verdade para todos os casos e em todos os contextos), diversas questões fazem com que essa transição, no escopo de grandes plantas produtoras de eletricidade, seja lento. Infraestrutura desta magnitude é cara, e as grandes plantas custam milhões (e bilhões) e são construídas e projetadas para se pagar em décadas. Assim, plantas já existentes não podem ser desativadas sem que haja prejuízos financeiros enormes e que encareceriam ainda mais a construção de novas plantas sustentáveis para substituí-las. Além disso, a tendência do consumo de energia elétrica é crescente, e a busca por suprir essa crescente demanda é frequentemente feita com novas plantas de combustíveis fósseis.

2.2 Geração distribuída

Apesar desse cenário, a geração centralizada de energia em grandes plantas produtoras não é a única opção. Existe um movimento crescente da geração distribuída, onde a energia elétrica é gerada em pequena escala próxima ao (ou até mesmo no) lugar onde será consumida. De fato, de acordo com o PDE 2030, a geração distribuída (em todas suas formas) é a tecnologia que mais deve crescer em termos relativos no Brasil na década, devendo sair de 4.2 GW em dezembro de 2020 para 24.5 GW em dezembro de 2030, um crescimento previsto de mais de 430%.

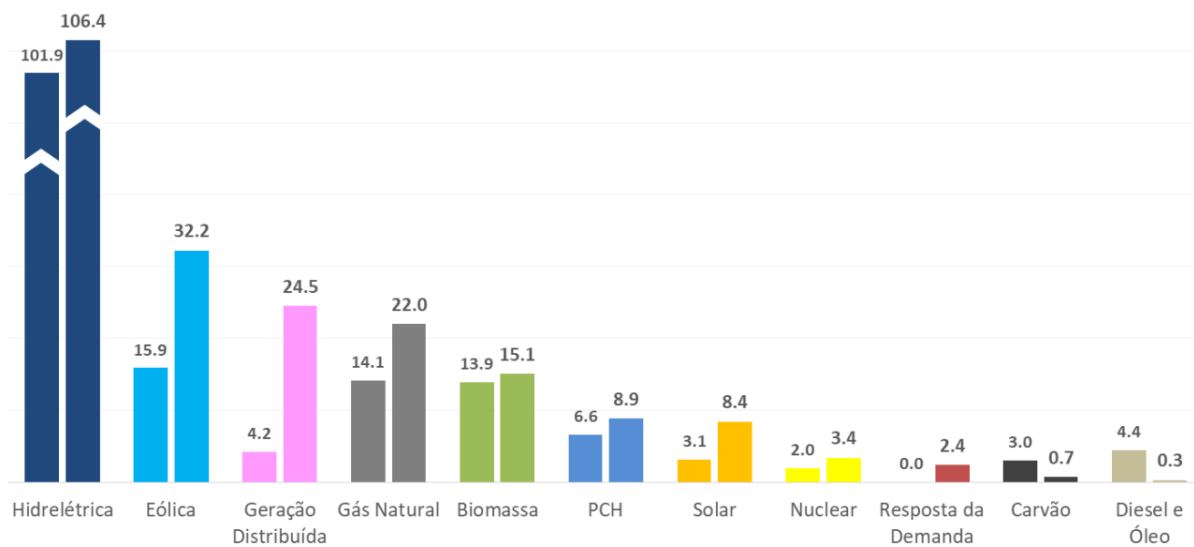


Figura 11 – Variação entre a capacidade instalada inicial e com a expansão do PDE 2030 por tecnologia –em GW. Dez. 2020 vs. Dez. 2030. Reprodução: (MME, 2021)

Nesse contexto, tecnologias de geração distribuída, notadamente solar fotovoltaica e eólica, se mostram áreas de extremo interesse no desenvolvimento energético e na transição sustentável da matriz elétrica.

2.2.1 Geração centralizada vs. distribuída

Historicamente, devido ao caráter majoritariamente fóssil da matriz elétrica global, uma infraestrutura de produção de energia elétrica centralizada faz muito sentido. Plantas termoelétricas se beneficiam de escala, e usinas com capacidades de produção da ordem de várias centenas de megawatts tendem a ser mais eficientes quanto maior seja seu tamanho.

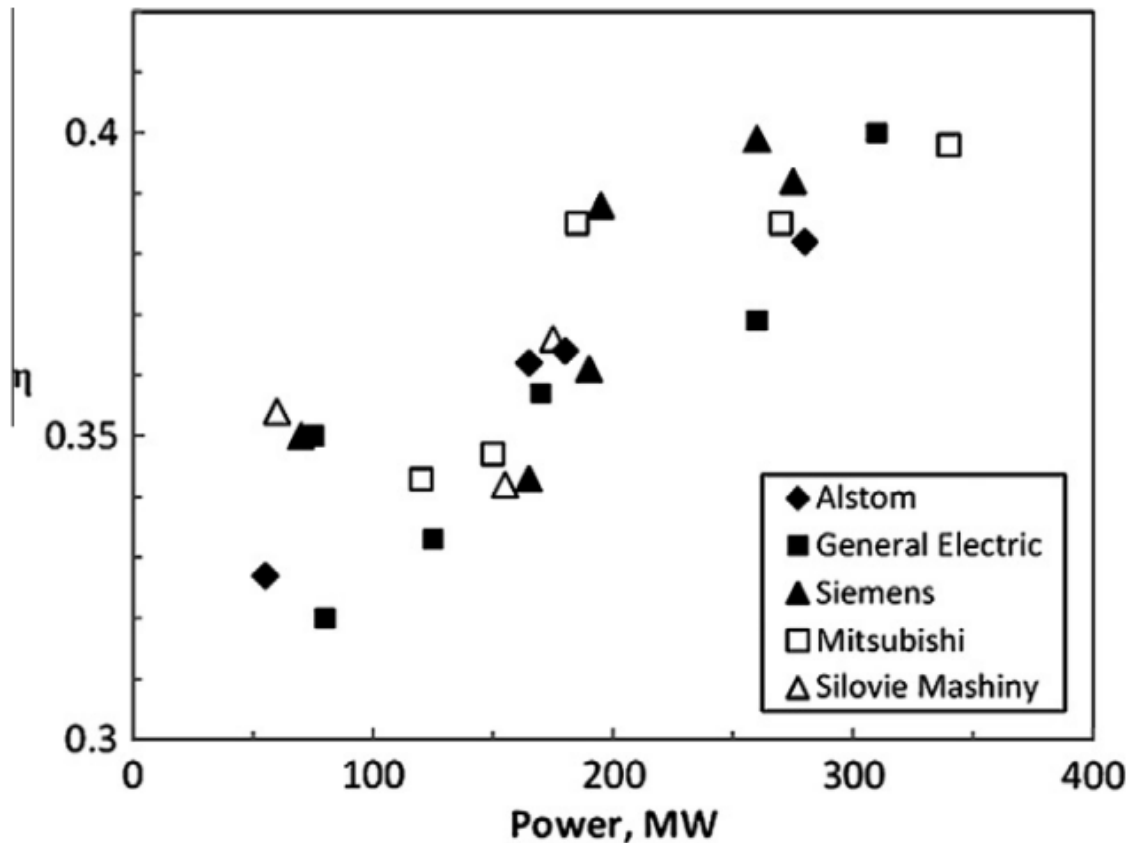


Figura 12 – Efeito do tamanho na eficiência de turbinas a gás. Reprodução: (BEJAN *et al.*, 2010)

Há vários motivos que explicam esse comportamento. O primeiro deles é da ordem econômica: quanto maior seja a capacidade produtiva de uma unidade, mais sentido faz, financeiramente, integrar a ela sistemas mais sofisticados (e caros), visto que o custo deles será mais facilmente compensado com a grande quantidade de combustíveis economizada. Em unidades menores, o custo adicional de combustível extra consumido devido a baixas eficiências pode ser menor que o custo inicial de um sistema mais eficiente.

Além disso, no caso de turbinas a gás que operam ciclos termodinâmicos, existem questões técnicas intrínsecas ao seu funcionamento que beneficiam maiores escalas. De fato, foi demonstrado por Bejan *et al.* (2010), que, em um sistema operando ciclos termodinâmicos onde haja 1) a fricção de fluidos e 2) trocas de calor, sua eficiência deve crescer e se aproximar da eficiência máxima de Carnot com um fator proporcional a M^α , onde M é a massa que flui no sistema e α um número menor que 1.

Por fim, como tais plantas dependem de um combustível - seja ele carvão mineral, derivados do petróleo ou gás natural - transportar a energia sob a forma de eletricidade até os locais de consumo é mais eficiente que transportar o combustível até unidades distribuídas para produção (e subsequente consumo). Isso também explica porque, não

raramente, tais plantas se concentram em torno de fontes de combustível. Isso pode ser muito claramente observado no caso da China, um país marcado pela intensa utilização do carvão mineral, cujo transporte - devido a sua natureza sólida - é caro e complicado. Devido a isso, como pode ser visto na figura 13, plantas tendem a se concentrar em torno de grandes minas.

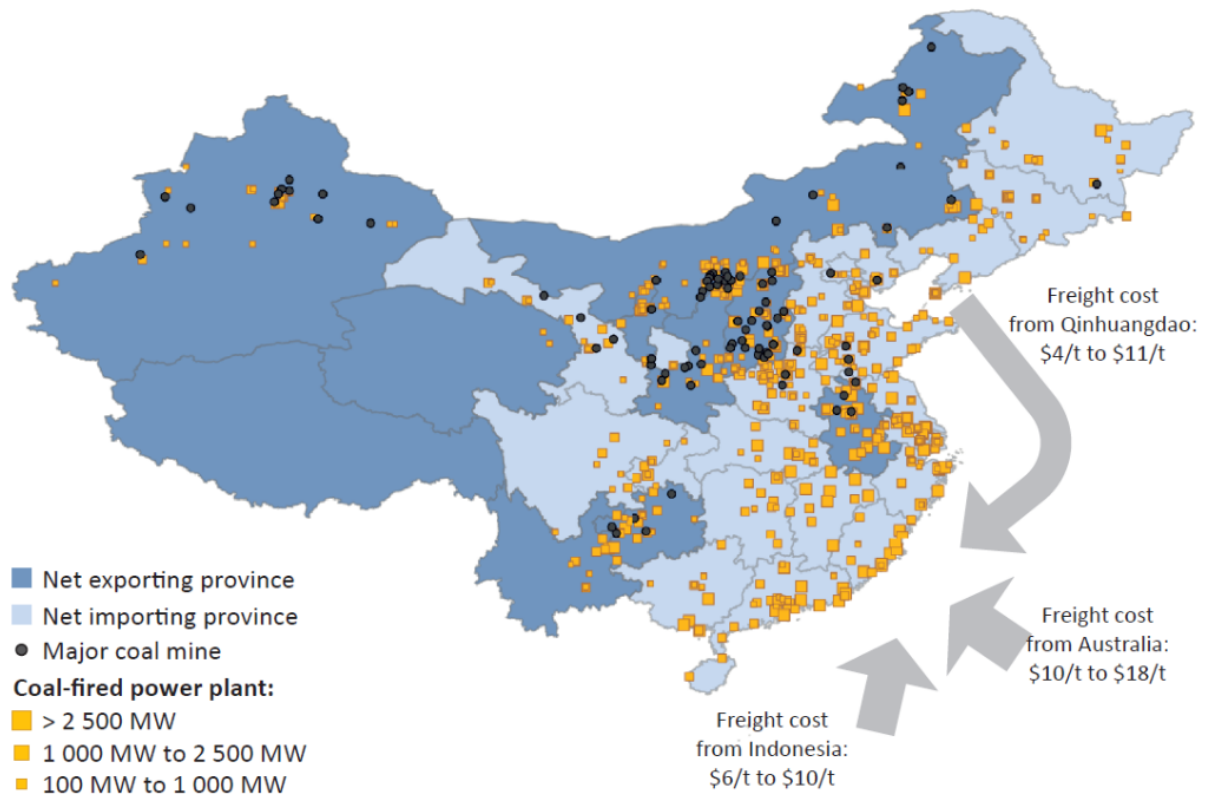


Figura 13 – Localização de grandes minas de carvão (preto) e unidades produtoras que utilizam carvão (laranja) na China em 2013. Reprodução: (IEA, 2021)

No caso do Brasil, cuja energia elétrica vem majoritariamente de usinas hidrelétricas, essa centralização é ainda maior, visto que este tipo de planta é restrito às condições geográficas específicas onde seja viável construir uma usina, e projetos desse tipo frequentemente superam o ordem dos Gigawatts. Para usinas nucleares, que representam a maior parte da parcela restante da matriz elétrica mundial, um sistema centralizado também é necessário dado o nível de segurança e monitoramento que tais plantas requerem, e construir diversas unidades menores, para as quais seria inviável dedicar recursos financeiros e humanos para seu constante monitoramento e operação, traria mais problemas que soluções.

No caso das energias solar fotovoltaica e eólica, o cenário é bem diferente. Tais tecnologias não requerem nenhum tipo de combustível (e portanto nenhuma infraestrutura de abastecimento de tais combustíveis) e sua própria natureza é modular, isto é, mesmo grandes plantas que utilizem tais tecnologias tendem a ser um agrupamento de di-

versos módulos individuais menores, fatores que favorecem muito o argumento de geração distribuída.

2.2.1.1 Desvantagens do sistema distribuído

Naturalmente, existem diversas desvantagens de se utilizar um sistema distribuído de geração de energia quando comparado a um sistema centralizado. Além das questões de eficiência das plantas discutidas anteriormente para o caso de certas tecnologias específicas, existem em todos os casos questões organizacionais que devem ser consideradas. Um sistema centralizado oferece a vantagem de concentrar em poucas unidades a maior parte de sua produção, o que permite que essas unidades sejam equipadas com equipes altamente qualificadas, e um contingente relativamente pequeno é necessário. Elas também podem ser efetivamente monitoradas e supervisionadas por agências regulatórias, responsabilizadas pela qualidade do serviço prestado, e a uniformidade das características da rede como um todo pode ser observada (ALANNE; SAARI, 2004). Todas essas vantagens são perdidas (ou ao menos dificultadas) em um sistema distribuído, onde as unidades são fragmentadas, não há garantia de uniformidade e a tarefa de observar códigos e regulamentações é tão extensa quanto mais o sistema for descentralizado, o que adiciona custos e esforços no gerenciamento da rede. Como a responsabilidade pelas unidades produtoras distribuídas é em muitos casos individual (ou de pequenas organizações), a questão da confiabilidade do sistema também se torna importante. Assegurar a conformidade de um grande número de unidades com os mesmos níveis de segurança que podem ser atingidos em grandes sistemas centralizados não é uma tarefa simples sem que grandes esforços sejam empregados.

2.2.1.2 Vantagens do sistema distribuído

Proporcionalmente a essas desvantagens, existem diversos argumentos a favor de redes distribuídas de geração de energia. No âmbito político, o controle sobre o abastecimento de eletricidade - um serviço essencial no mundo contemporâneo - carrega imenso poder. Distribuir esse poder entre comunidades e organizações locais é uma poderosa ferramenta de empoderamento local e democratização. Há também uma maior distribuição de recursos e empregos, que não ficam restritos a poucas localidades onde se concentram as plantas tradicionais.

De um ponto de vista estratégico e também de *reliability* do sistema, uma rede distribuída é muito menos vulnerável a ataques (terroristas ou em guerras) ou desastres naturais ou acidentes que atinjam uma única unidade centralizada e poderiam comprometer o abastecimento de eletricidade de grande parte de um país. Ainda no âmbito estratégico, um sistema distribuído - especialmente se baseado em tecnologias como a eólica e solar fotovoltaica - é menos suscetível a problemas que possam atingir outras tecnologias, como

flutuações no preço (e até mesmo escassez) dos combustíveis, comuns caso de derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral; tensões políticas que acompanham a produção de combustíveis nucleares, como é o caso do enriquecimento de urânio; e regimes pluviiais irregulares afetando a disponibilidade de água disponível para a geração de energia em hidrelétricas, como o exemplo do Brasil mencionado na seção anterior. Um rede extensa e que conte com diversas fontes de energia sofrerá menores impactos caso uma (ou um pequeno número de unidades) enfrente qualquer um desses problemas, e caso haja um controle e distribuição eficientes o abastecimento dessas zonas pode ser compensado por outras unidades que estejam em operação (PEPERMANS *et al.*, 2003).

2.2.2 Um sistema híbrido

Além desses pontos feitos para um sistema exclusivamente distribuído, que seria o resultado de uma transição completa do sistema atual e portanto muito distante da realidade, existem considerações a serem feitas sobre sistemas híbridos, que contem com grandes plantas que produzam grande parte da energia consumida e com um sistema central de controle da distribuição de eletricidade, mas que também conte com diversas unidades menores que contribuam localmente com uma parcela significativa da potência. Tal cenário é o resultado mais provável dos atuais processos em curso, que incluem o gradual acréscimo de unidades distribuídas conforme as tecnologias solar fotovoltaica e eólica de pequena escala se tornam mais acessíveis ao consumidor final. De fato, o próprio PDE 2030, como ilustrado na figura 11, prevê que em 2030 a geração distribuída represente cerca de 24,5 GW ou 10,9% da capacidade instalada no país. Como referência, no final de 2020, à época da publicação do plano, esse valor era de aproximadamente 4,2GW 2.5%. Vale ressaltar que devido à granularidade das informações que concernem a geração distribuída, nem sempre é simples estimar com precisão a capacidade total instalada. Ainda assim, a tendência é que a previsão do PDE seja superada em muito, e segundos dados ABGD (Associação Brasileira de Geração Distribuída) a capacidade de geração distribuída no Brasil superou 7 GW em setembro de 2021, 8 GW em dezembro de 2021, 9 GW em janeiro de 2022 e 10 GW em março de 2022, e a previsão é que, impulsionada pelo marco legal da geração distribuída sancionado em janeiro de 2022, a capacidade instalada termine o ano com mais de 15 GW (CHRISPIM, 2022). De fato, caso a tendência atual se mantenha, a previsão inicial do PDE de 24,5 GW pode ser atingida em algum momento de 2025, na metade do prazo inicialmente prevista de 10 anos.

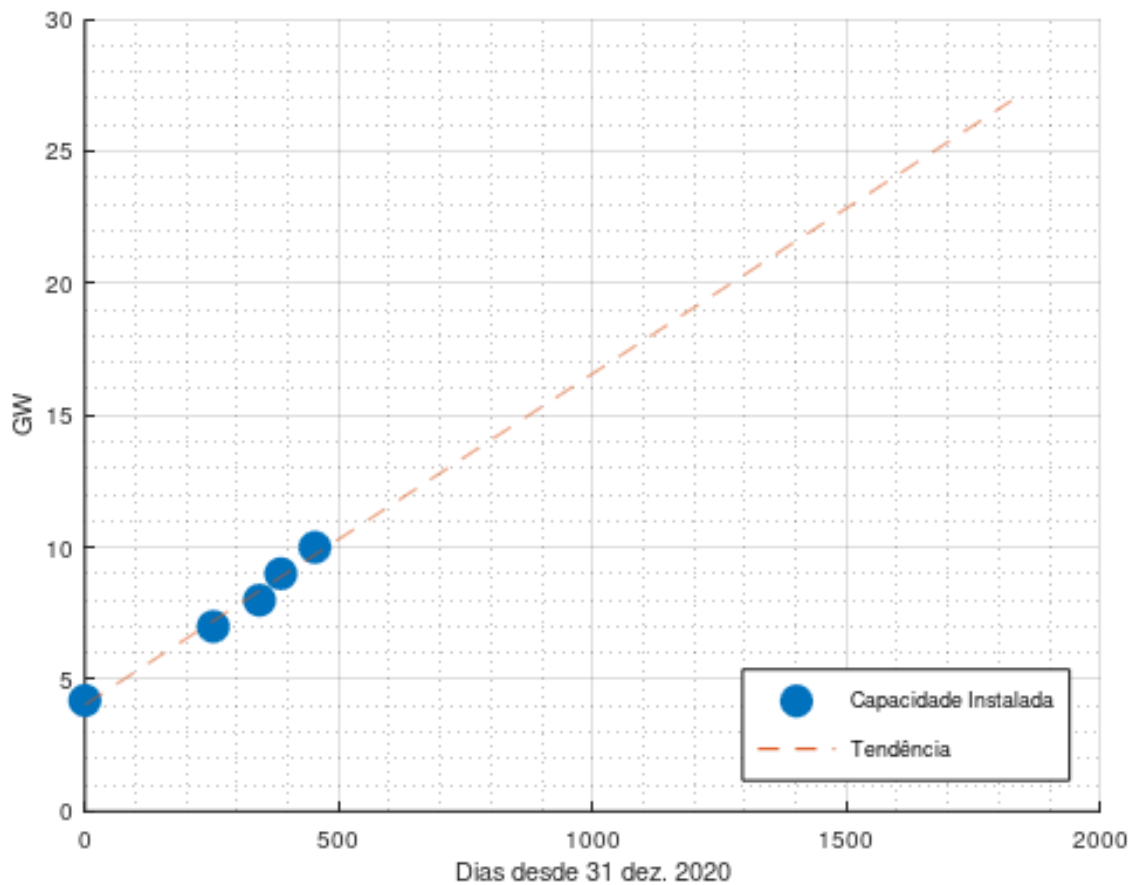


Figura 14 – Capacidade de geração distribuída instalada desde dez. 2020 e tendência.

Considerando então que um sistema híbrido já é quase uma realidade, resta serem confrontados os desafios e benefícios que tal contexto apresenta. De primeiro, vale notar que o sistema centralizado e o descentralizado se complementam em diversas formas: possuir uma infraestrutura centralizada robusta de produção age como *backup* e permite às unidades descentralizadas terem mais liberdade especialmente no que tange seus fatores de capacidade, que geralmente são mais baixos, pois estão atrelados a determinados horários do dia, no caso da fotovoltaica, e à padrões irregulares de vento, no caso da eólica. Além disso, o sistema de distribuição que já existe pode ser aproveitado pelas unidades distribuídas e garantir que elas a) recebam energia do sistema central quando não estiverem produzindo e b) consigam suprir outras áreas quando houver excesso de produção. É claro que isso também traz desafios no gerenciamento de toda essa distribuição que sai de um sistema unidirecional Usina → Consumidores e passa a contar com interações mais complexas em ambos sentidos. Integrar uma unidade produtiva à rede também insere complexidades na transformação de energia, que requer transformadores DC para AC e sistemas de controle em ambos os lados para proteger tanto a integridade da rede de distribuição como da unidade produtiva (KUANG; LI; WU, 2011).

Em locais isolados, não atendidos pela rede tradicional, a geração distribuída também pode ser uma solução mais eficiente que a construção de longos sistemas de transmissão. Há de se considerar, contudo, que nestes casos, a ausência da rede centralizada como *backup* para os momentos onde a unidade não esteja produzindo faz necessário sistemas de armazenamento, como baterias, que serão discutidos posteriormente.

O principal benefício, contudo, talvez seja a possibilidade da rápida expansão das energias renováveis. Embora grandes projetos públicos de infraestrutura elétrica (de matriz renovável ou não) levem anos para serem aprovados e construídos, unidades distribuídas podem ser muito mais rapidamente instaladas. Isso possibilita uma resposta mais rápida às crescentes demandas energéticas da população e acelera o crescimento da participação das fontes de baixo carbono na matriz nacional, uma demanda urgente caso as metas de redução de emissões devam ser cumpridas a tempo.

2.2.2.1 A matriz da geração distribuída

Um aspecto importante da geração distribuída é a fonte de energia empregada. Como foi discutido, este tipo de instalação favorece as tecnologias fotovoltaica e eólica de pequena escala. A realidade, porém, é que no Brasil este primeiro detém o monopólio absoluto do setor, enquanto o último esboça uma participação ínfima no cenário nacional. Dados da ABGD mostram que a energia solar é a mais presente no País, representando 97,7% do total, seguida pela termelétrica com 1,2%, Central Geradora Hidrelétrica (CGH) com 0,9% e eólica com apenas 0,2% (CHRISPIM, 2022). Alguns dos motivos para esta baixa penetração da tecnologia no mercado serão investigados nesse trabalho. Em termos de classes de consumo, a geração distribuída se divide entre os seguintes setores, ilustrados na figura 15.

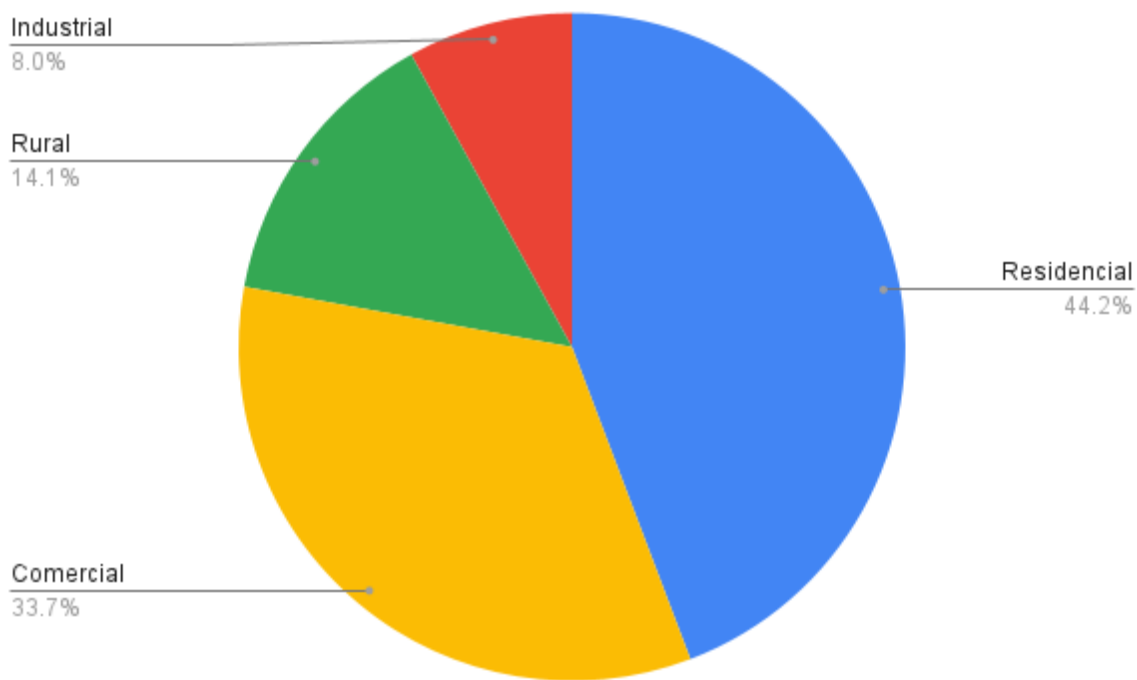


Figura 15 – Distribuição da GD por setor. Fonte: (CHRISPIM, 2022)

2.3 Turbinas eólicas

Para entender melhor a alta participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira mas baixa a penetração no mercado de geração distribuída, é relevante entender as principais características das turbinas eólicas, em especial no que tange às diferenças entre aqueles comumente utilizados em grandes projetos de geração de energia versus os usados em instalações de pequena escala. De maneira geral, os geradores eólicos são divididos em duas principais categorias: os de eixo horizontal, cujo eixo rotativo é paralelo à direção do vento e os de eixo vertical, cujo eixo rotativo é perpendicular à direção do vento.

2.3.1 Turbinas de eixo horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal, comumente abreviadas para HAWTs (Horizontal Axis Wind Turbines, em inglês) são aquelas cujo eixo principal de rotação é horizontal e paralelo à direção do vento.

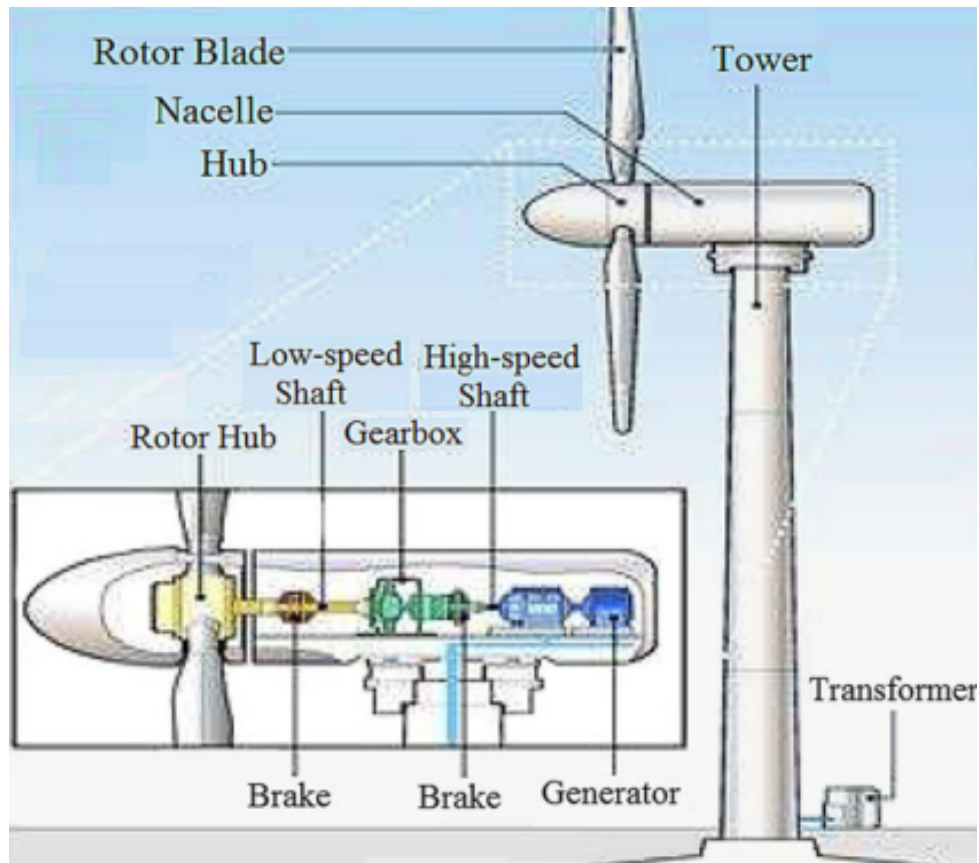


Figura 16 – Estrutura de uma HAWT. Reprodução: (MAHMOUD; XIA, 2012)

A estrutura típica de uma turbina desta classe, conforme ilustrado na figura 16, é uma torre, que tem a função de elevar os demais componentes até a altura desejada; as pás, semelhantes a uma hélice, utilizam um aerofólio para gerar sustentação e criar rotação, e devem estar dispostas em um plano orientado perpendicularmente à direção do vento para seu funcionamento ideal; uma *gearbox*, que ajusta a frequência de rotação do eixo de uma frequência baixa (típicamente entre 10 e 50 RPM) que é a produzida pelas pás devido ao vento, para um frequência alta sob a qual o gerador opera (tipicamente entre 1000 e 3000 RPM) e por fim o gerador em si, que irá transformar a energia cinética da rotação do eixo em energia elétrica. Além desses componentes básicos, frequentemente estão presentes também: um sistema de orientação composto por motores e *vanes* responsáveis por orientar o as pás na direção do vento e um sistema de anemômetros e freios responsáveis por permitir restringir a operação da unidade em ventos com velocidade muito baixa (geralmente inferiores a 3-8 m/s) ou muito altas (geralmente superiores a 20 m/s), que poderiam danificar os sistemas (MAHMOUD; XIA, 2012).

Um aspecto importante deste tipo de turbina é o seu processo de evolução ao longo dos anos, que favoreceu o aumento constante no tamanho das turbinas. Nesta, como em qualquer outra fonte de energia, uma maior eficiência e uma maior quantidade de energia convertida são variáveis muito desejadas. No caso de turbinas eólicas, os principais fator

determinantes na quantidade de energia convertida são: a vazão (em kg/s) de ar que passa pelas pás e a eficiência na captura desse vento. Entender os processos de otimização pelos quais o design das turbinas passaram para maximizar ambas variáveis ajuda a entender o design atual delas.

2.3.1.1 Maximizando a eficiência

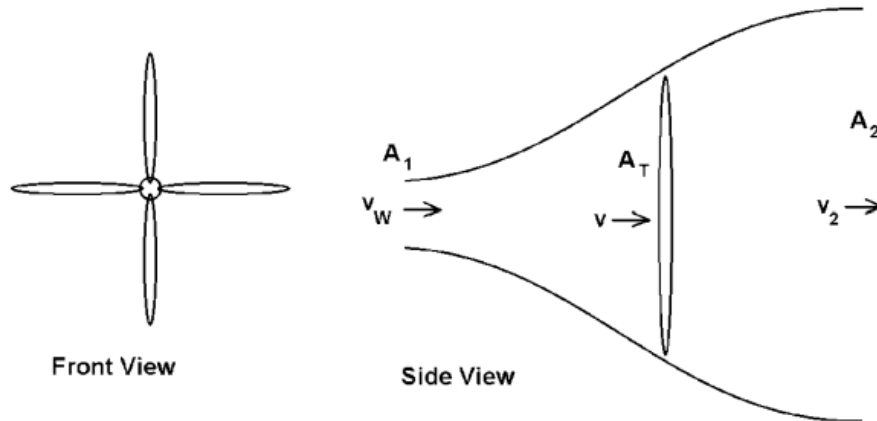


Figura 17 – Visão frontal e lateral de uma turbina com fluxo de ar ilustrado. Reprodução: (BLACKWOOD, 2016)

A energia cinética carregada por uma determinada massa m de fluido, neste caso o ar, movendo-se a uma determinada velocidade é

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Considerando um regime permanente, a energia total que atravessa o sistema por unidade de tempo e representaria a potência máxima que poderia ser extraída é:

$$P_{max} = \frac{1}{2}mv_w^2$$

Essa não é, contudo, a real potência máxima que uma turbina ideal conseguiria extrair do ar. Isso porque, quando são escritas as equações de conservação de massa para o esquema de uma turbina indicado na figura acima, tem-se que

$$\dot{m} = \rho A_1 v_w = \rho A_T v = \rho A_2 v_2$$

Onde \dot{m} é o fluxo de ar em $[kg/s]$, ρ é a densidade do ar, A_T a área transversal coberta pelas pás e v a velocidade do ar nas pás. Como as áreas são todas reais maiores que zero, segue-se que, sempre que haja vento incidindo sobre a turbina ($v_w > 0$), haverá

também vento saindo pelo outro lado, com $v_2 > 0$, o que, pela conservação da energia, representa energia perdida. Isso implica na existência de um limite natural para a eficiência das turbinas, como demonstrado por (BLACKWOOD, 2016), que é de

$$\eta \approx 59.3\%$$

Este limite é chamado de limite de Betz em homenagem ao cientista que primeiro o demonstrou em 1919, e ocorre quando a velocidade do vento à jusante da turbina é $\frac{1}{3}$ daquela à montante. Como referência, atualmente as turbinas mais eficiente atingem valores de eficiência em torno de 0.4, podendo chegar até 0.5 em alguns casos (HANSEN, 2015). Além deste limite, essa análise nos traz uma outra equação interessante: a da potência da turbina. Ainda segundo a derivação de Blackwood, esta equação é:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_T v_w^3 \eta$$

Portanto, proporcional à área transversal coberta pelas pás e ao cubo da velocidade do vento. Maximizar a produção de energia de uma turbina envolve então maximizar estas duas variáveis. Por sorte, a solução para ambas é a mesma: aumentar o seu tamanho. Aumentar o tamanho das turbinas (e de suas pás) terá o obvio efeito de aumentar a área coberta por elas, e portanto o fluxo de ar que passa pela turbina. Além disso, quanto maior ela é, mais alta também será. O comportamento do vento é naturalmente complexo e depende de uma série de fatores relacionados à geografia local e características do terreno, mas de maneira geral a altura tem uma relação direta com a velocidade do vento, pois 1) mais próximo ao solo a presença de construções, árvores e outros obstáculos diminui a velocidade média do vento e aumenta sua turbulência e principalmente 2) o contato com a superfície da terra gera uma camada limite produzida pelo arrasto aerodinâmico, comumente chamada camada limite atmosférica ou camada limite planetária. Na terra, ela tem um comprimento de cerca de 100 metros e segue uma distribuição aproximadamente logarítmica (TAR, 2007). Esse fenômeno pode ser observado na figura 18, que descreve a velocidade do vento em função da altura em determinadas localidades.

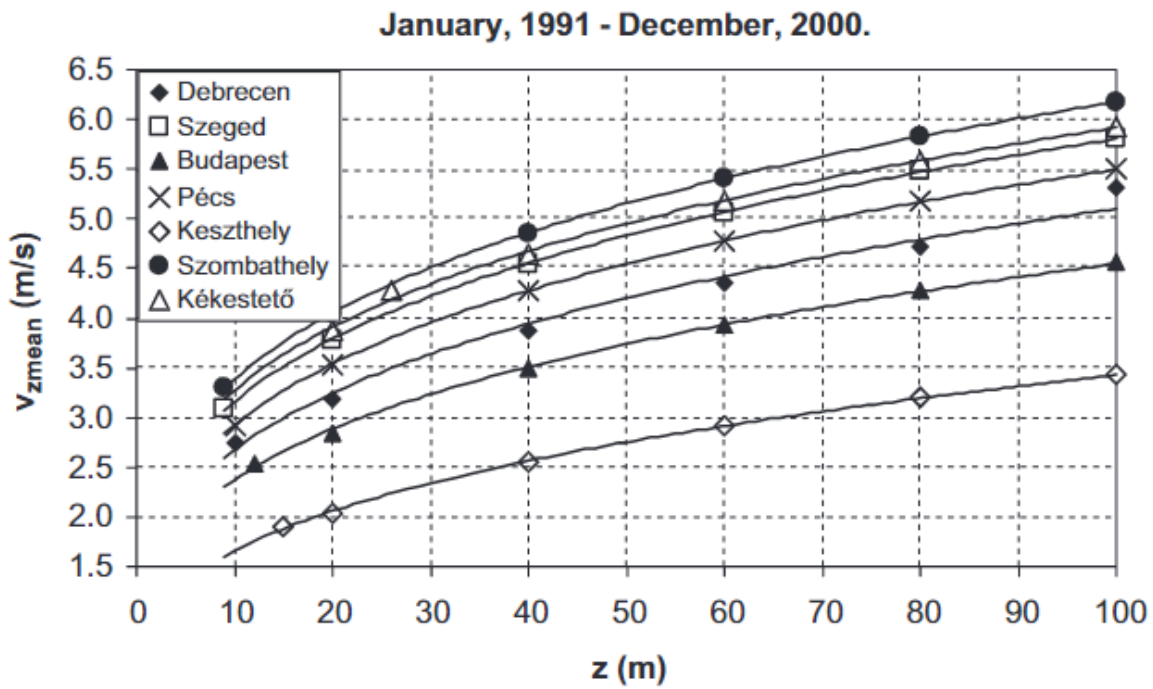


Figura 18 – Distribuição da velocidade do vento com a altura. Reprodução: (TAR, 2007)

Ambos estes fatores, aliados ao alto número de peças e complexidade mecânica das turbinas de eixo horizontal - o que torna o preço de uma unidade alto - fizeram com que elas, ao longo das últimas décadas, fossem ficando cada vez maiores.

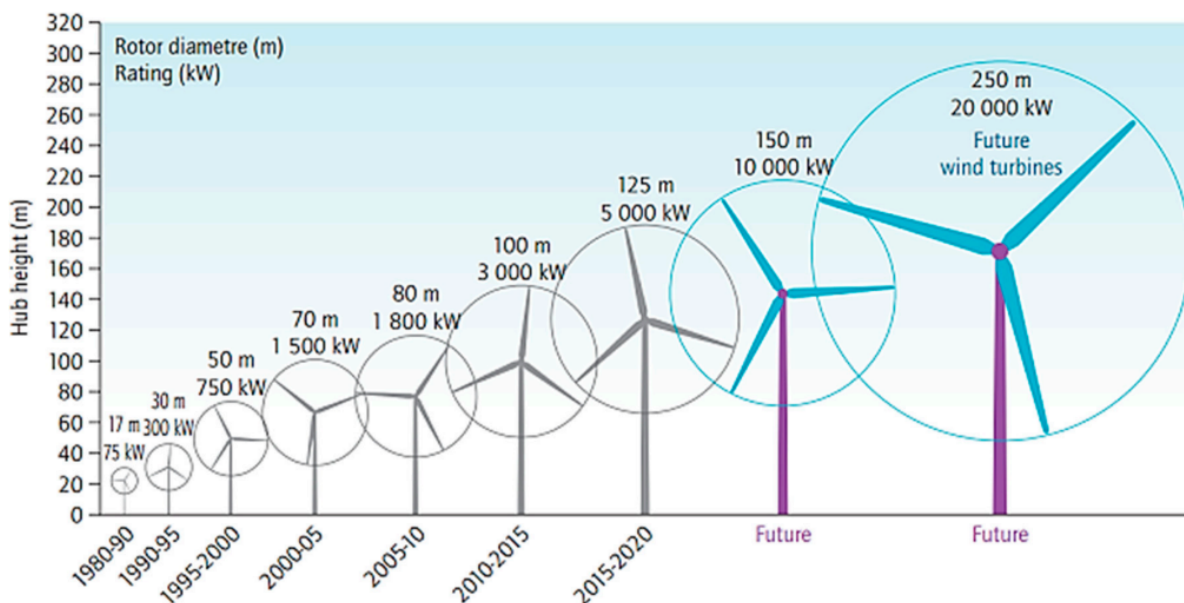


Figura 19 – Evolução do tamanho de HAWTs. Reprodução: (PADMANATHAN *et al.*, 2019)

É natural que existam também desvantagens em aumentar tanto o tamanho das turbinas, e desafios que surgem especialmente no âmbito da resistência dos materiais podem se mostrar obstáculos à continuação desse processo no futuro. Ainda assim, a alta capacidade produtiva, aliada à crescente eficiência em maiores escalas, foram motivos determinantes para que este tipo de turbina se tornasse a escolha imediata nos grandes projetos de infraestrutura eólica.

2.3.1.2 Pequena escala

Apesar do sucesso das turbinas eólicas horizontais em grande escala, também existem modelos de pequenas dimensões, com capacidade produtiva de algumas centenas de watts ou poucos kilowatts, adequados à geração distribuída. Nessa escala, contudo, seu sucesso é significativamente mais limitado. Isso porque este tipo de turbina é geralmente instalado a baixas alturas (proporcionais ao seu tamanho) e em ambientes urbanos ou próximo a construções no geral (muitas vezes no telhado de construções, próximo a superfície). Isso faz com que a qualidade do vento recebida por essas turbinas seja muito baixa, com baixas velocidades e altos níveis de turbulência, o que prejudica seu desempenho. De fato, ensaios experimentais observam, ao longo de meses, performances reais em torno de 5% a 20% da potência nominal (calculada em condições ideais) nesses equipamentos, como documentado por (PAGNINI; BURLANDO; REPETTO, 2015).

2.3.2 Turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical, por sua vez, têm um cenário diferente. Abreviadas para VAWTs (Vertical Axis Wind Turbines, em inglês), elas têm os mesmos elementos básicos que uma HAWT: um rotor e pás que giram um eixo ligado a um gerador. A maior diferença é que este eixo é paralelo à direção do vento e termina no chão, não havendo portanto a torre como no caso das HAWTs. Além disso, como as pás giram em torno deste eixo, elas são efetivamente omnidirecionais, o que elimina necessidade de sistemas complexos de orientação.

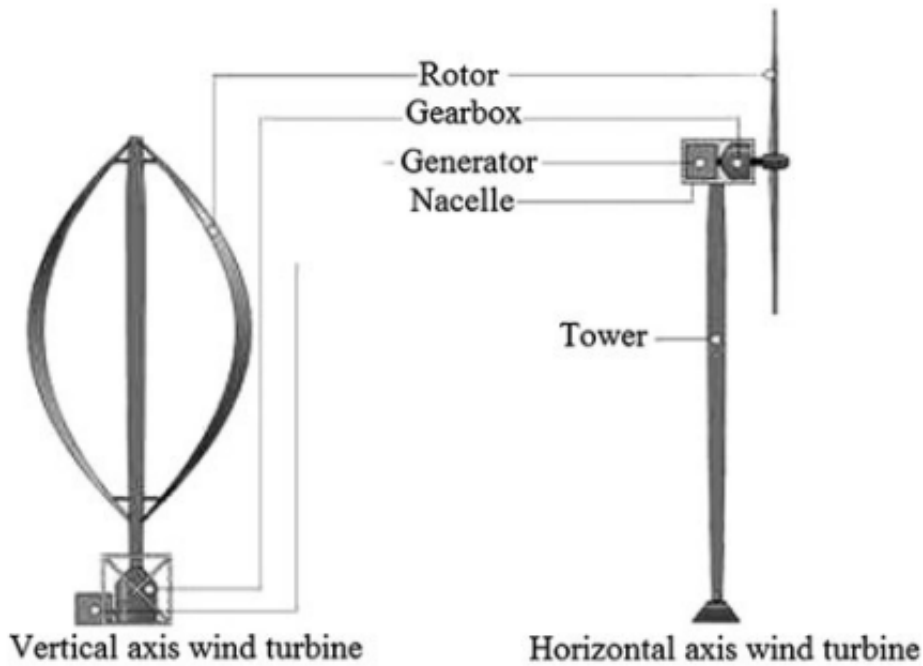


Figura 20 – Estrutura de VAWTs e HAWTs. Reprodução: (MAHMOUD; XIA, 2012)

Isto tem algumas vantagens, a maior delas que as VAWTs tenham uma composição mais simples, com menos peças e portanto um custo menor, quando comparadas as HAWTs. Este é o primeiro fator que as tornará interessantes para aplicações em pequena escala no contexto de geração distribuída deste trabalho. Contudo, como será discutido, diversos problemas de performance e eficiência ainda não solucionados fazem com que turbinas verticais não sejam muito utilizadas comercialmente. Os detalhes de cada aplicação porém, dependem do tipo específico de VAWT. As VAWTs se dividem em duas principais categorias: turbinas do tipo Savonius, que são aquelas cuja principal força motriz é a de arrasto; e turbinas do tipo Darrieus, que utilizam majoritariamente a sustentação produzida por suas pás como força motriz.

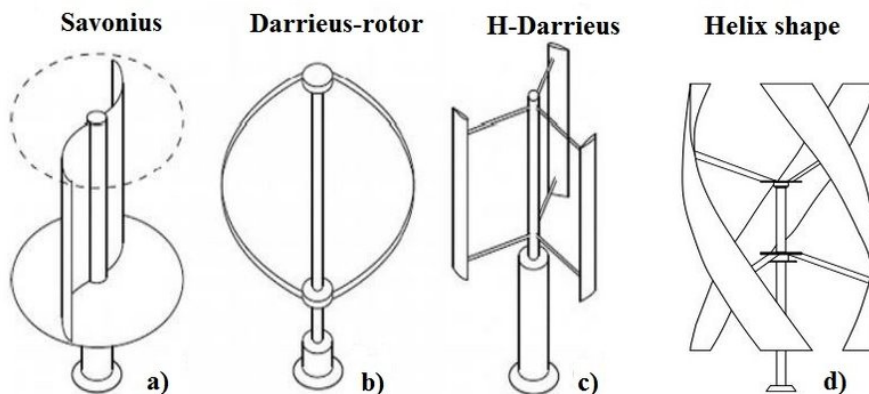


Figura 21 – Diferentes tipos de VAWTs. Reprodução: (CASTELLANI *et al.*, 2019)

2.3.2.1 Turbinas tipo Savonius

Turbinas do tipo Savonius são aquelas que se baseiam no arrasto para girar as pás. Devido a isto, são facilmente reconhecíveis pelas suas pás de baixo alongamento, focadas em maximizar a área superficial e com perfis de elevado camber (frequentemente semicilíndricos), para maximizar o coeficiente de arrasto.

2.3.2.1.1 Aerodinâmica das turbinas tipo Savonius

A aerodinâmica deste tipo de turbina é usualmente bem simples, e baseia-se principalmente no arrasto gerado por suas pás, como ilustrado na figura 22.

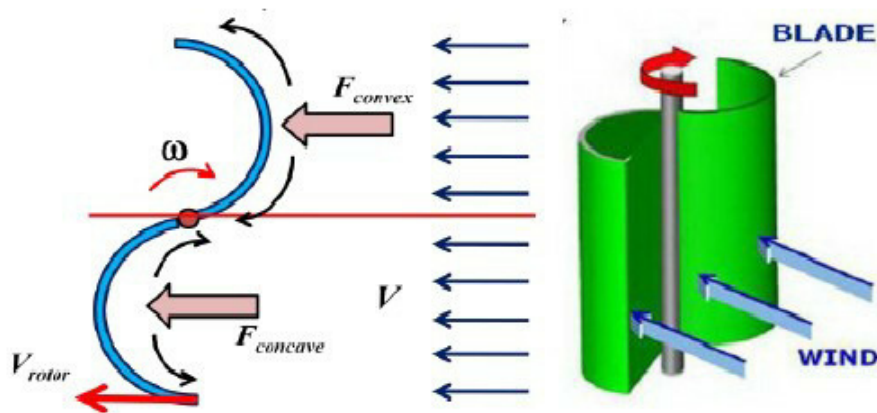


Figura 22 – Aerodinâmica básica de uma turbina tipo Savonius. Reprodução: (WENEHE-NUBUN; SAPUTRAA; SUTANTO, 2014)

Como exemplo tome-se a configuração mais simples de uma turbina deste tipo: uma com duas pás e um perfil semicilíndrico. Quando há incidência de vento, o torque atuante sobre o eixo é a diferença entre o torque em cada pá:

$$T = F_{concave}d - F_{convex}d$$

Onde F é a força atuante em cada pá e d a distância do ponto onde age essa força até o eixo. Neste caso, em que o perfil é simétrico (cilíndrico), essa distância é metade da corda da pá. As forças F serão naturalmente as forças de arrasto dadas por

$$D = \frac{1}{2}\rho v^2 SC_D$$

Onde D é o arrasto (drag), ρ é a densidade do ar, v a velocidade do fluido sobre a superfície, S a área transversal e C_D o coeficiente de arrasto. Para o sistema:

$$T = \frac{1}{2}\rho v^2 SC_{Dconcave}d - \frac{1}{2}\rho v^2 SC_{Dconvex}d$$

Onde T é o torque produzido. Vale notar que a velocidade v atuante em cada pá (e em cada coordenada radial da pá) não é a mesma pois cada coordenada r enxergará uma velocidade aparente do fluido diferente que depende da velocidade angular ω de rotação ($v_a = v - \omega r$). De fato, a razão entre a velocidade da ponta da pá e o vento (comumente chamada TSR do inglês Tip Speed Ratio, e representado pelo símbolo λ) é um parâmetro importante no desempenho da turbina. O parâmetro mais significativo, contudo, talvez seja da diferença entre os coeficientes de arrasto $C_{Dconcave} - C_{Dconvex}$ pois é daí a principal contribuição para o torque final que irá girar o eixo e conseqüentemente o gerador.

Para melhorar o desempenho do sistema, o número de pás pode ser aumentado. De maneira geral, a tendência quando se aumenta o número de pás é aumentar o torque total do sistema (o que pode ajudar a turbina a iniciar em velocidades mais baixas) a custo de uma menor razão de velocidade. A potência total, expressa pelo coeficiente de potência C_P , definido como a razão entre a potência produzida sobre a potência máxima disponível, geralmente cresce com o número de pás até atingir um número ideal (frequentemente 3) a partir do qual a melhora é insignificante perto do custo aumentado ou até mesmo menor (WENEHENUBUN; SAPUTRAA; SUTANTO, 2014).

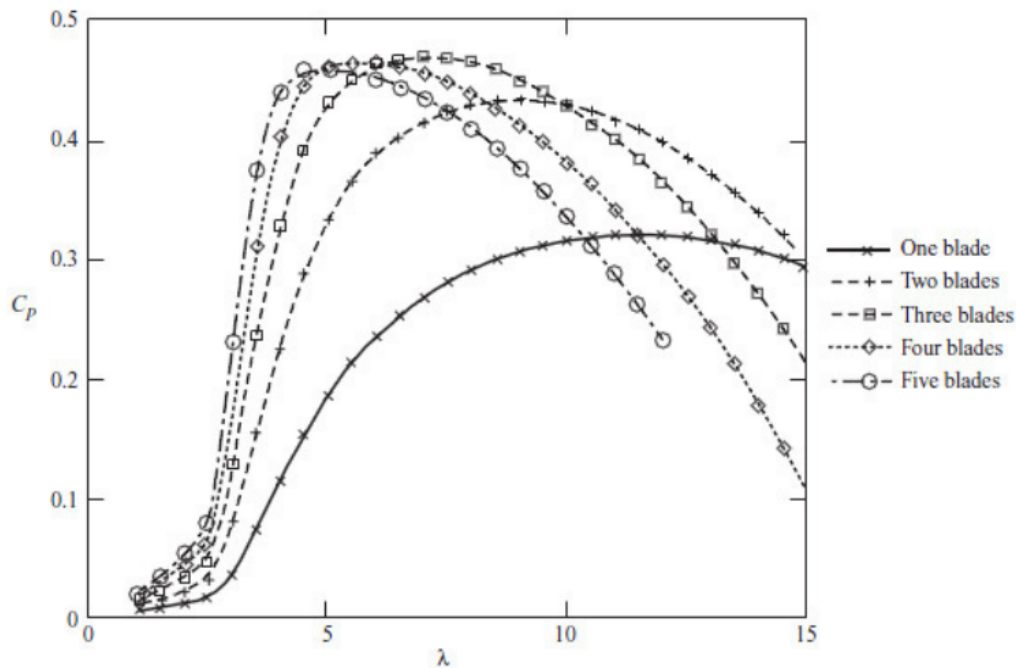


Figura 23 – Coeficiente de potência de uma turbina do tipo Savonius de perfil semicilíndrico em função do número de pás. Reprodução: (WENEHENUBUN; SAPUTRAA; SUTANTO, 2014)

2.3.2.1.2 Aplicações das turbinas tipo Savonius

Como mencionado, devido ao funcionamento baseado em arrasto, este tipo de turbinas opera com baixa eficiência (em torno de 15%) e por isso não são comumente utilizadas em grandes projetos de infraestrutura elétrica. Sua principal vantagem, devido também a seu funcionamento com base em arrasto (e não sustentação) é ser muito resiliente do ponto de vista aerodinâmico. Turbinas do tipo Savonius são capazes de operar mesmo com ventos baixos e extremamente turbulentos, como é característico em baixas alturas e em ambientes urbanos, onde turbinas para geração distribuída são frequentemente instaladas. Devido aos esforços aerodinâmicos a quais são submetidas, requerimentos estruturais fazem com que as turbinas cresçam muito em peso conforme sua capacidade nominal aumenta, o que geralmente as restringe a níveis em torno de 10 kW de potência nominal, o que não é um grande problema visto que esse número não é frequentemente excedido no contexto de geração distribuída (KUMAR *et al.*, 2019c).

2.3.2.2 Turbinas tipo Darrieus

As turbinas do tipo Darrieus são VAWTs que utilizam as forças de sustentação geradas por suas pás para girar seus eixos. Devido a isso, tendem a ser caracterizadas por pás mais alongadas e possuem uma maior variedade de designs que serão explorados a seguir. Algumas considerações, contudo, são comuns a todas deste tipo. A mais importante delas talvez seja o fato de que, por ser movida pela sustentação, a velocidade das pás consegue superar a velocidade do vento (TSR maiores que 1). Isso possibilita um melhor aproveitamento e permite que turbinas desse tipo atinjam níveis de eficiência muito maiores, em torno de até 40% (KUMAR *et al.*, 2019c).

Essa configuração também traz alguns desafios, especialmente no *self-start* da turbina, pois frequentemente elas são incapazes de começar a girar sozinhas com ventos de baixa velocidade, o que faz com que sejam incapazes de funcionar sob estas condições ou precisem de algum sistema auxiliar externo que forneça potência para o início da operação.

2.3.2.2.1 H-Darrieus

As turbinas Darrieus de pá reta, também chamadas de tipo H (mais frequentemente quando tem apenas duas pás, embora também ocasionalmente quando tem mais), são o tipo mais simples. Seu funcionamento básico pode ser representado pelo diagrama:

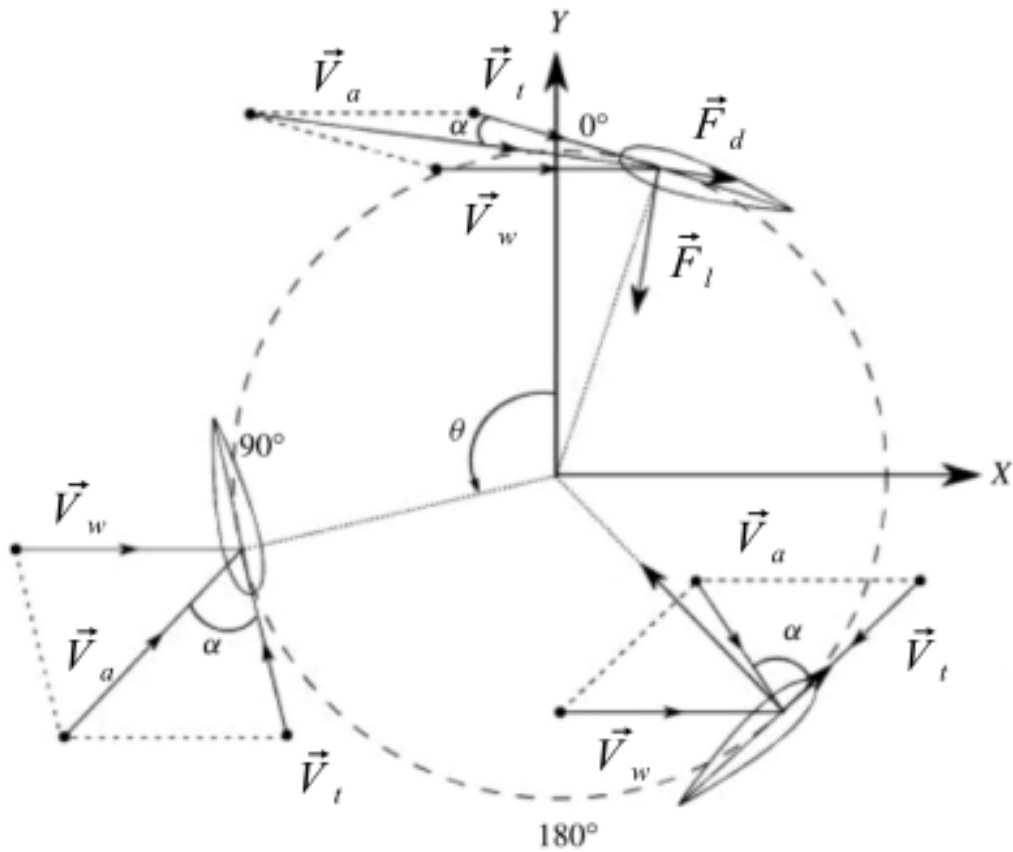


Figura 24 – Diagrama de forças e velocidades em uma turbina H-Darrius. Visão superior.
Reprodução: (JAKUBOWSKI; STAROSTA; FRITZKOWSKI, 2018)

Primeiro, há de se notar que a velocidade aparente \vec{V}_a enxergada pelo aerofólio em cada parte da sua trajetória em torno do eixo é resultado da soma da velocidade do vento, \vec{V}_w mais a velocidade devido à rotação, \vec{V}_t

$$\vec{V}_a = \vec{V}_w + \vec{V}_t$$

Sobre as pás agirão então as forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação D e L :

$$D = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S C_D$$

$$L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 S C_L$$

O torque T produzido, uma função do ângulo θ em torno do eixo, será então

$$T(\theta) = (L \sin \alpha - D \cos \alpha) r, \quad \in \langle 0, 2 \rangle$$

Onde r é a distância do eixo até o aerofólio (raio do rotor) e α , o ângulo de *pitch*, é o ângulo que a velocidade aparente faz com o vento, determinado por

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{V}_t \cdot \vec{V}_a}{|\vec{V}_t| |\vec{V}_a|} \right)$$

E o torque total pode ser obtido integrando-se a expressão ao longo de uma volta completa

$$T_a = \int_0^{2\pi} T(\theta) d\theta$$

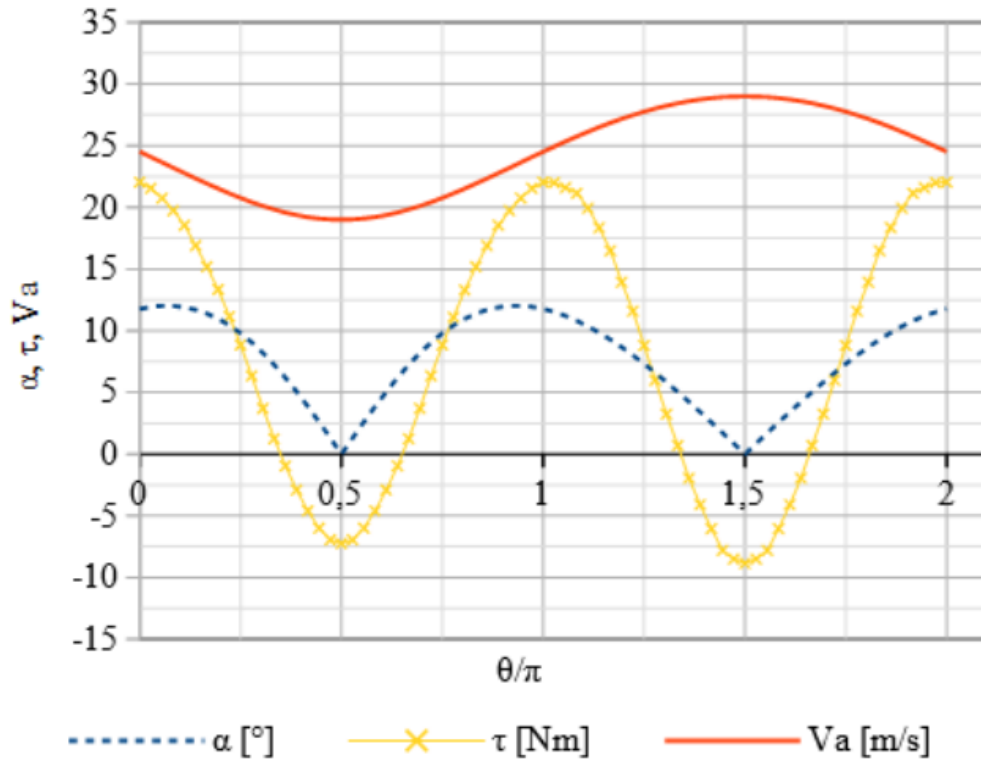


Figura 25 – Exemplo da variação do ângulo de pitch, torque total e velocidade aparente em uma pá ao longo do eixo. Reprodução: (JAKUBOWSKI; STAROSTA; FRITZKOWSKI, 2018)

Como observa-se na figura 25, ao longo da rotação, a pá encontra diferentes velocidades aparentes e portanto produz diferentes níveis de torque. Essa é uma das principais vulnerabilidades deste tipo de turbina, pois esse carregamento cíclico frequentemente causa vibrações que podem levar a estrutura à fadiga ou sofrer outras falhas estruturais. Devido a isso, são viáveis apenas em pequena escala, onde o custo de manufatura de designs mais robustos e eficientes não justificaria a baixa eletricidade produzida, e por isso os modelos disponíveis no mercado são da faixa de 500 W a 1.5 kW.

2.3.2.3 Turbinas Darrieus Helicoidais

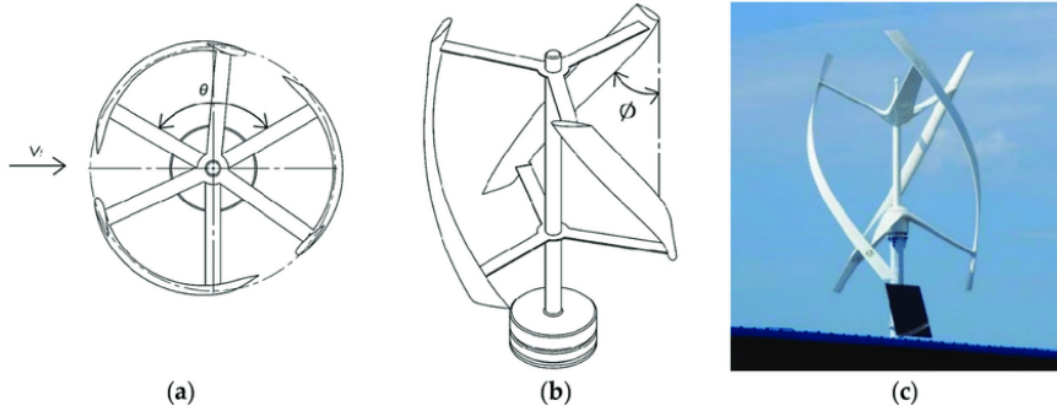


Figura 26 – Exemplo da estrutura típica de uma turbina Darrieus helicoidal. Reprodução: (KUMAR *et al.*, 2019a)

Na tentativa de melhorar alguns dos pontos onde as turbinas Darrieus convencionais (de pá reta) tem algumas deficiências, alguns designs alternativos surgiram. Um deles é a turbina Darrieus helicoidal, onde o eixo da direção *spanwise* da pá percorre uma curva geodésica ao longo do cilindro designado pela sua rotação.

Como foi mostrado na seção anterior, o torque na turbina de pá reta oscila ciclicamente durante a revolução em torno do eixo. Isso pode causar vibrações e tensões que irão ocasionar em fadiga e é uma das causas frequentes para as falhas estruturais que ocorrem nessas turbinas. Para mitigar esse fenômeno, no tipo helicoidal as pás são deformadas em uma hélice (geralmente 3 pás a ângulos 60°). Assim, cada seção da pá estará a um ângulo diferente em cada momento da rotação e o torque será mais uniforme ao longo da revolução. Outro impacto deste design é a indução de um fluxo de ar ao longo desse eixo *spanwise* da pá, que ajuda que a camada limite permanece colada ao aerofólio, e atrase o estol. Isso traz benefícios na capacidade de *self-start* da turbina, reduz ruídos, e reduz vibrações durante a operação que diminuem a tensão e a fadiga sob as quais as pás estão sujeitas, prolongando sua vida.

A principal desvantagem deste modelo quando comparado a uma turbina Darrieus convencional é seu custo de manufatura. Enquanto pás retas podem ser facilmente fabricadas por processos de extrusão, pás helicoidais requerem processos mais complexos baseados em moldes. Para unidades com potencial produtivo moderadamente alto, o custo da manufatura é compensado pelos ganhos em eficiência e turbinas deste tipo estão comercialmente disponíveis com capacidades na faixa de 2 a 10 kW (KUMAR *et al.*, 2019c).

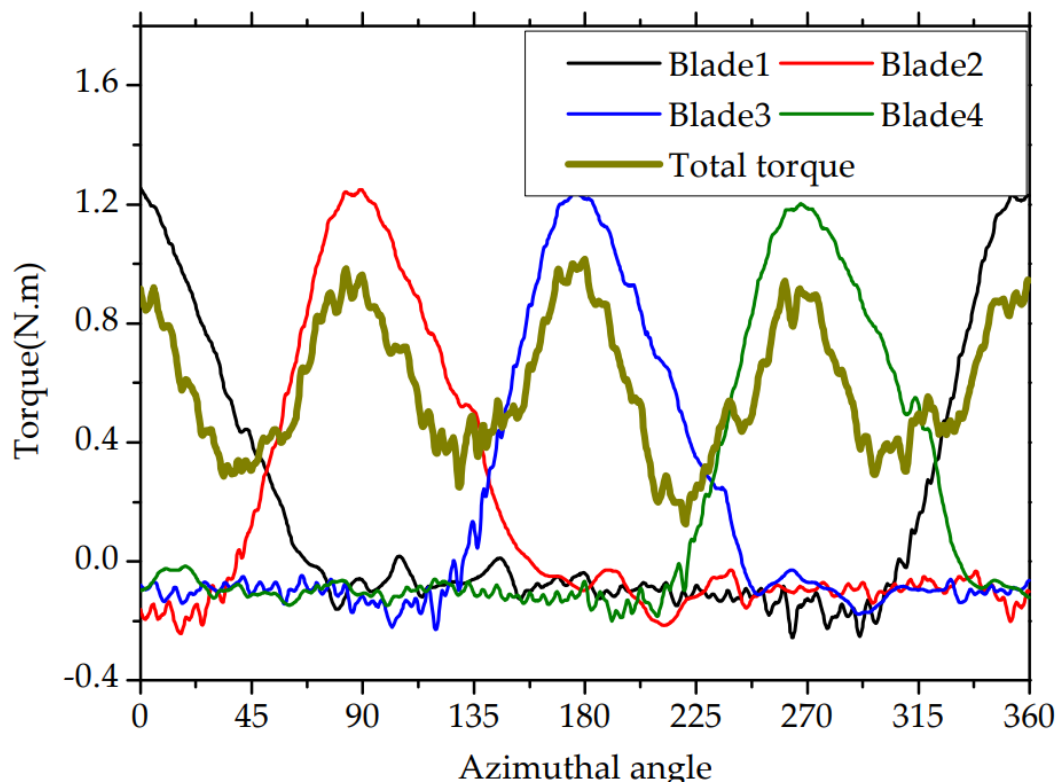


Figura 27 – Exemplo da variação do torque em função do ângulo em uma turbina Darrieus helicoidal de 4 pás. Simulação computacional. Reprodução: (CHENG *et al.*, 2017)

2.3.2.4 Turbinas Darrieus de Pá Curva

O tipo mais comum, as turbinas Darrieus de pá curva, também chamadas Darrieus-Rotor, Darrieus Tipo D, ou Rotor Phi (este último quando as extremidades das pás são conectadas ao eixo), são aquelas cujo eixo *spanwise* das pás descrevem uma curva no plano que contém o eixo de rotação.

Caso as pás sejam unidas ao eixo por meio de suas extremidades, esta configuração elimina a necessidade das hastes que sustentam as pás presentes nos outros tipos. Estruturalmente, isto reduz o número de elementos estruturais e reduz a quantidade de material utilizado na construção. Além disso, nesta configuração, é possível afixar cabos na extremidade superior do eixo da turbina que podem ser fixados no solo para resistir as forças aerodinâmicas que agem no sentido de tombar a estrutura. Esses componentes são especialmente importantes em turbinas de grande escala, onde o eixo central precisaria ser inviavelmente robusta para suportar sozinha estes esforços (KUMAR *et al.*, 2019b)



Figura 28 – Dornier Darrieus, 55 kW, 25 m de altura, com cabos de apoio claramente visíveis.

Do ponto de vista de performance, as hastes de suporte das pás (ainda que recobertas por perfis aerodinâmicos) são fontes de arrasto parasita que atrapalham o desempenho da turbina, e sua remoção elimina esse componente do arrasto total.

Em todo o caso, a curvatura das pás altera o componente da velocidade devido à rotação das pás. Isso faz com que as seções mais próximas das extremidades, que estão mais próximas do eixo (e portanto tem um raio menor a ser multiplicado pela velocidade angular) estejam sujeitas a menores componentes de velocidade circunferencial, o que naturalmente irá reduzir a magnitude da velocidade aparente. Esta redução da magnitude, contudo, é em certos casos compensada - e, a depender da situação, até superada - pelo aumento do ângulo de ataque efetivo, o que faz com que nessas seções a componente tangencial da força gerada (e conseqüentemente o torque) possa ser igual ou maior que a das seções centrais da pá. Há de se notar, contudo, que esse desempenho não é previsível ou consistente, e a depender da velocidade e/ou níveis de turbulência do vento, a menor velocidade (e conseqüentemente menor Reynolds) associada ao maior ângulo de ataque propicie o estol dinâmico destas seções, o que gera mais vórtices de ponta de asa e frequentemente é um fator que diminui a performance da turbina nestas seções (KUMAR *et al.*, 2019c).

Devido a todos estes fatores, apesar de existirem alguns modelos de pequena capacidade produtiva de alguns kW, este tipo de turbina é mais frequentemente usado em unidades de grande escala, a partir de 50 kW, na configuração Phi. De fato, a maior turbina eólica vertical já construída no mundo, a ÉOLE, com 110 metros de altura, é uma

turbina Darrieus de pá curva do tipo Phi.

2.3.2.5 Comparativo da performance aerodinâmica

Ilustrando as diferentes características aerodinâmicas de cada subtipo de turbina Darrieus, Scheurich, Fletcher e Brown (2010), por meio de simulações computacionais, produziram um comparativo da distribuição de torque nas pás em função do ângulo azimutal (de revolução) e da seção da pá, em três turbinas de configuração 1) de pá reta 2) de pá curva e 3) helicoidal. Os resultados estão aqui reproduzidos nas figuras 29 a 32.

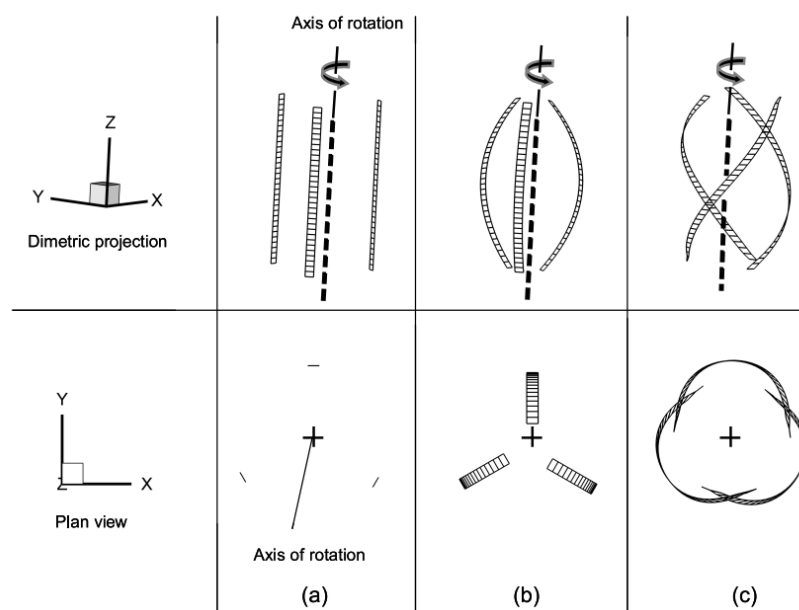


Figura 29 – Configuração das pás simuladas. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)

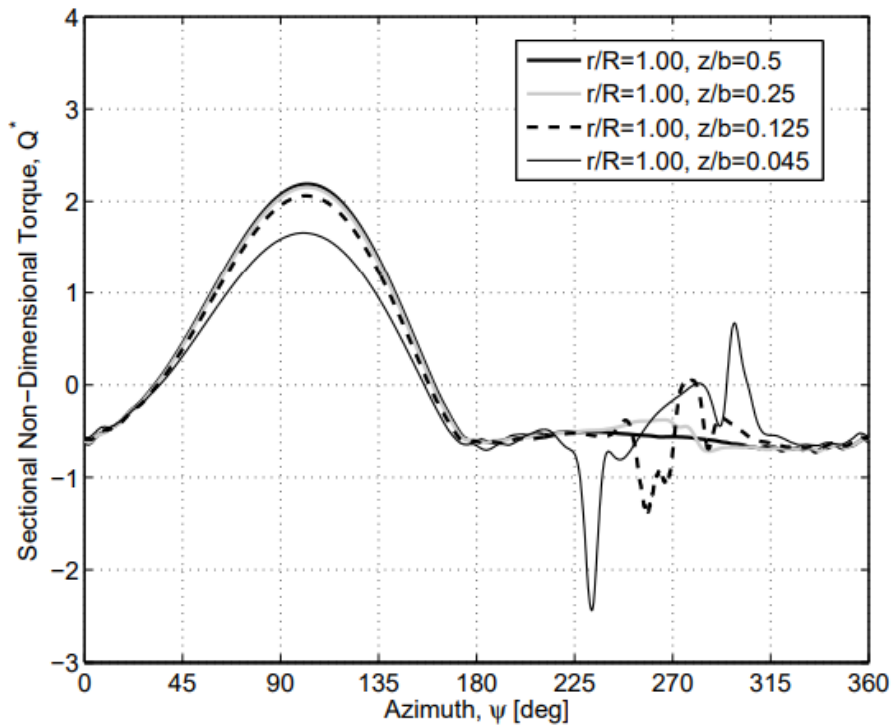


Figura 30 – Torque nas pás de uma turbina Darrieus de pá reta em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)

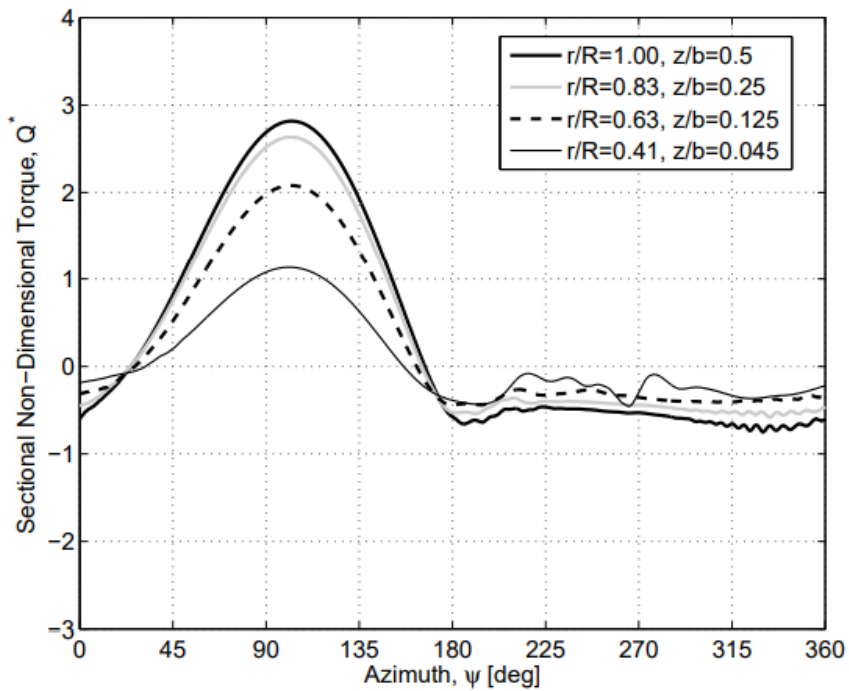


Figura 31 – Torque nas pás de uma turbina Darrieus de pá curva em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)

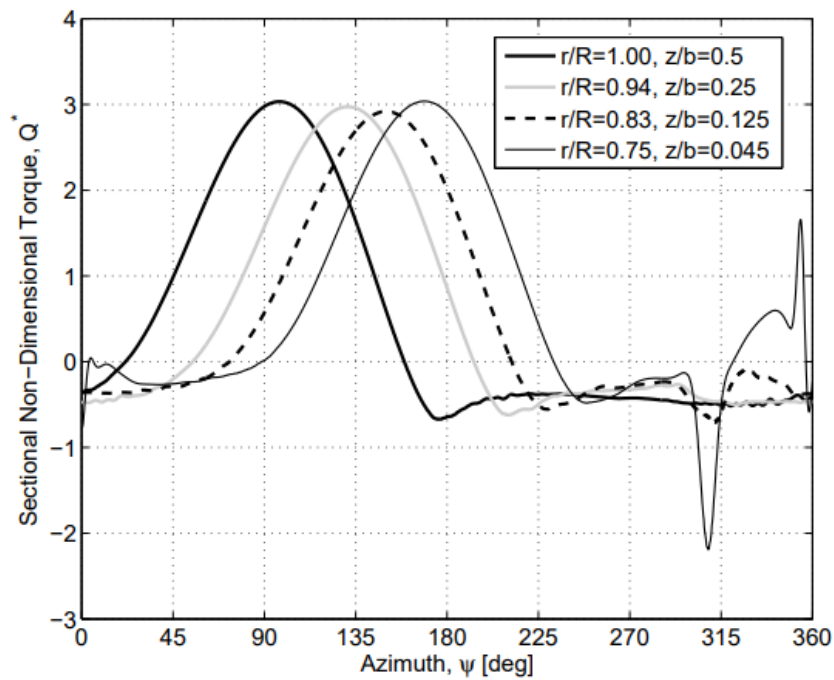


Figura 32 – Torque nas pás de uma turbina Darrieus helicoidal em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)

A coordenada z/b corresponde à localização da seção analisada na pá ao longo do eixo da envergadura, 0.0 sendo a extremidade inferior e 0.5 o meio da pá. Percebe-se, na figura 30, a distribuição constante de torque ao longo da pá na turbina reta, com a extremidade ($z/b = 0.045$) apresentando torque ligeiramente menor devido às perdas oriundas de efeitos de ponta de asa. Na turbina de pá curva, na figura 31, nota-se o menor desempenho próximo às extremidades, devido principalmente à diminuição da velocidade circunferencial, elevados ângulos de ataque e possivelmente estol dinâmico. No terceiro gráfico, na figura 31, fica evidente a contribuição da configuração helicoidal na distribuição de torque ao longo da revolução e conseqüente uniformização do torque. De fato, Scheurich, Fletcher e Brown (2010) reproduzem ainda o gráfico da variável $\Delta C_P(\Psi)$, definida como a diferença entre o coeficiente de torque $C_P(\Psi)$ para cada ângulo azimutal Ψ de revolução e o coeficiente C_P médio de cada configuração, também reproduzido aqui na figura 33.

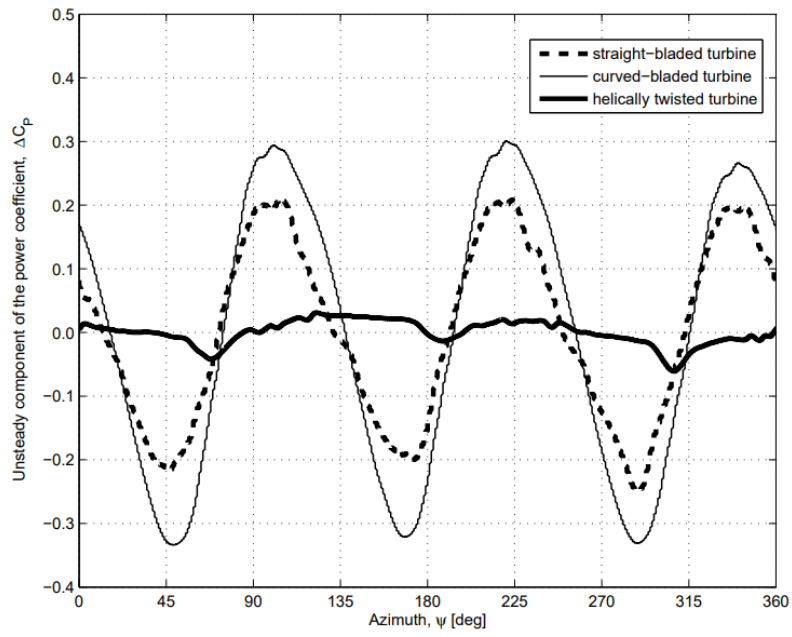


Figura 33 – ΔC_p em função do ângulo azimutal. Reprodução: (SCHEURICH; FLETCHER; BROWN, 2010)

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Estimativa das necessidades elétricas de edificações

O consumo de energia elétrica, usualmente medido em $kW.h/m^2.yr$ de uma edificação é produto de vários fatores. O tipo de atividade a qual se destina, seja ela residencial, comercial, administrativa, hospitalar, escolar ou outra é talvez o mais importante deles. Edificações destinadas a um mesmo fim geralmente tem padrões de consumo, densidade de ocupação e requerimentos de energia similares. De fato, na literatura, estudos que tratam dessa métrica frequentemente agrupam seus dados com base nesta distribuição. Para edifícios públicos administrativos, os maiores responsáveis pelo consumo de energia elétrica são sistemas de climatização (ar condicionado), iluminação e computadores. Como os sistemas de climatização, principais contribuintes, variam de acordo com características climáticas e necessidades locais, os números encontrados na literatura também variam. Ma *et al.* (2016), que investigaram o consumo de energia elétrica em edifícios públicos na China, encontraram os seguintes valores, reunidos na tabela 2.

Tipo de edifício público	Região com verões moderados e invernos frios	Região com verões quentes e invernos frios	Região com verões quentes e invernos moderados
Escritórios governamentais	56.40	65.92	58.64
Escritórios não-governamentais	58.26	81.62	68.57
Escolas	24.71	33.87	17.27
Hospitais	75.89	140.61	128.76

Tabela 2 – Consumo médio de eletricidade em diferentes tipos de edifícios públicos na China. [$kW.h/m^2.yr$] (MA *et al.*, 2016)

Neste contexto, verões quentes se referem à regiões onde sistemas de ar condicionado são frequentemente utilizados no verão enquanto verões moderados são regiões onde tais equipamentos não são frequentemente utilizados. Do mesmo modo, invernos frios se referem à regiões onde sistemas de aquecimento são utilizados no inverno e invernos moderados onde não são. O Brasil, embora apresente uma diversidade grande de climas, se enquadra majoritariamente na categoria verões quentes e invernos moderados, o que se reflete claramente em edificações com sistemas de ar condicionado instalados porém sem nenhum sistema de aquecimento. Assim, o valor de interesse para o escopo deste trabalho seria o de Escritórios da terceira coluna, o que corresponde a um consumo anual médio em torno de $60 kW.h/m^2$ a $70 kW.h/m^2$.

Este, contudo, é um valor médio, que sofre grandes variações. Ainda de acordo

com Ma *et al.* (2016) as faixas de valores para diferentes países são:

Tipo de edifício público	Estados Unidos	Reino Unido	Japão	Norte da China
Escritórios governamentais	99 - 244	50 - 121	68 - 116	21 - 153
Escritórios não-governamentais		97 - 186	87 - 106	24 - 122
Escolas	59 - 151	37 - 64	18 - 31	6 - 38
Hospitais	166 - 355	71 - 183	119 - 200	59 - 115

Tabela 3 – Consumo de eletricidade segundo tipo de edificação em diferentes países. [$kW.h/m^2.yr$] (MA *et al.*, 2016)

Percebe-se claramente na tabela 3 a grande variação entre os valores, com um fator de mais de 10 vezes entre o menor valor registrado no Norte da china e o maior registrado nos Estados Unidos. Para preservar a generalidade deste trabalho serão considerados três casos, com três consumos diferentes: $20 kW.h/m^2.yr$, simulando um caso mínimo, $65 kW.h/m^2.yr$, simulando um caso mediano e $200 kW.h/m^2.yr$, simulando um caso extremo.

3.2 Mapeamento de equipamentos disponíveis comercialmente

Foram mapeados três fabricantes referências no setor de turbinas eólicas verticais, um especializado em cada configuração de turbina viável nessas escalas, são eles: Aeolos®, Vision Air Wind®e Windside®.

3.2.1 Aeolos

Fundada em 1986 na Dinamarca, a empresa oferece HAWTs, em 11 modelos diferentes que vão de 500 W a 100 kW e VAWTs do tipo Darrieus de pá reta em 10 modelos que vão de 300W a 1 kW para sistemas *off-grid* e de 3kW a 10kW para sistemas *on or off-grid*. A menor das VAWTS, de potência nominal 300W tem 1,6 metros de altura e 1,2 metros de diâmetro, e a maior delas, de potência nominal 10 kW, tem 6,0 metros de altura e 5,5 metros de diâmetro. As especificações técnicas completas de todos os modelos estão disponíveis no Apêndice A.

3.2.2 Vision Air Wind

Especializada em turbinas Darrieus helicoidais, a Vision Air Wind, ou V-Air, conta com dois modelos adequados a este contexto: o VisionAir 3, de 3,2 metros de altura e potência nominal de 1,5 kW e o VisionAir 5, de 5,2 metros de altura e 5 kW de potência nominal. Suas especificações técnicas também foram reunidas em uma tabela e estão disponíveis do Apêndice B.

3.2.3 Windside

A Windside, companhia finlandesa especializada em turbinas do tipo Savonius helicoidais de alta resiliência, oferece 7 modelos de turbina que vão desde o WS-0,15, de 80 cm de altura e potência nominal de 150 W até o WS-30 de mais de 10 metros de altura e potência nominal entre 10 kW e 20 kW (feitos sob medida). As especificações técnicas estão reunidas na tabela do Apêndice C.

3.3 Componentes adicionais

Outra grande questão quando se trata de um edifício gerando sua própria energia elétrica é sua relação com a rede de distribuição. Caso ele esteja completamente separado dela, cenário chamado de *off-grid*, são necessários sistemas de armazenamento de energia, comumente baterias, que irão garantir a estabilidade do fornecimento mesmo quando a fonte, neste caso a eólica, é de baixo fator de capacidade e não produz em uma considerável parte do tempo (quando não há ventos favoráveis). Estes sistemas podem ter um custo elevado, que varia de cerca de 100 dólares por *kW.h* para baterias de chumbo até 220 a 630 dólares por *kW.h* para baterias de lítio (JAISWAL, 2017).

Além disso, em ambos os casos, *on-* ou *off-grid*, um inversor é necessário para converter a corrente direta gerada pelas turbinas em corrente alternada que possa ser utilizada por aparelhos comuns, o que também incute um custo adicional na instalação.

3.4 Viabilidade

3.4.1 Modelo de edificação

Embora tenha-se buscado manter a maior generalidade possível até então, faz-se necessário um certo recorte para a etapa final da análise. O edifício modelo, a ser usado como base (para efeitos de dimensões e não necessariamente aplicação) nos cálculos subsequentes é o prédio da secretaria do Departamento de Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo SAA EESC/USP. O edifício, localizado aproximadamente nas coordenadas -22.005, -47.933, de dimensões aproximadas 15 x 55 m, totalizando aproximadamente 825 metros quadrados de área ocupada e três pisos, somando 2 475 metros quadrados de área construída.



Figura 34 – Prédio SAA EESC/USP. Créditos: Paulo Celso Greco Júnior.

3.4.2 Estimativas iniciais

O primeiro passo é estimar o consumo de um prédio deste tamanho. Seguindo os valores estabelecidos anteriormente, serão considerados 3 casos, distribuídos na tabela 4.

	Consumo [kW.h/m ² .yr]	Área [m ²]	Consumo total [kW.h/yr]
Caso mínimo	20	2 475	49 500
Caso mediano	65	2 475	160 875
Caso máximo	200	2 475	495 000

Tabela 4 – Estimativas de consumo anual de energia elétrica para o edifício-modelo.

Reitera-se aqui as considerações que este consumo foi estimado com base em dados da literatura para edifícios de escritórios densamente ocupados, e podem não refletir o consumo real do edifício tomado como modelo neste trabalho apenas para fins de dimensionalização.

A segunda variável a ser estimada é gasto base de referência, que é aquele correspondente a comprar a energia elétrica diretamente da distribuidora como é tradicionalmente feito. Em maio de 2022, o preço médio do kilowatt-hora no estado de São Paulo era de R\$ 1,04 por kWh para a tarifa residencial e R\$ 0,98 kWh para tarifa comercial/ industrial.

	Consumo total [kW.h/yr]	Tarifa média [R\$]	Custo médio anual [R\$]
Caso mínimo	49 500	0,98	48 510
Caso mediano	160 875	0,98	157 657
Caso máximo	495 000	0,98	485 100

Tabela 5 – Estimativa de custo da energia elétrica tradicional.

3.4.3 Comparativo com solar

Outra estimativa válida é a comparação com o preço da instalação de painéis solares, uma tecnologia de geração distribuída renovável com mercados e fornecedores mais consolidados. O Portal Solar, uma empresa subsidiária do grupo Votorantim e referência no mercado solar fotovoltaico nacional, estima que a cada 12 000 $kW.h/yr$, ou 1 000 $kW.h$ por mês, sejam necessários em torno de 10 kWp (kilowatt-pico) de capacidade instalada, cujo custo médio da instalação (incluindo o custo dos painéis e serviços) é de R\$ 45 000,00 (PORTAL..., 2022).

Além disso, os painéis ocupam uma extensa área, de aproximadamente 1 000 metros quadrados a cada 130 kWp de potência instalada. Compilando essas informações e fazendo estimativas lineares (que desconsideram efeitos de escala), o custo aproximado de instalação desta tecnologia está reunido na tabela 6.

	Consumo total [$kW.h/yr$]	Capacidade necessária [kWp]	Custo de instalação [R\$]	Área dos painéis [m^2]
Caso mínimo	49 500	41	157 000	327
Caso mediano	160 875	134	513 000	1 064
Caso máximo	495 000	412	1 570 000	3 270

Tabela 6 – Estimativa de custo da instalação de energia solar fotovoltaica.

Percebe-se, na tabela 6, que o custo de compra e instalação é relativamente baixo, e se pagaria em torno de 39 meses. Ressalta-se, contudo, que essa é uma estimativa grosseira, e não estão considerados ainda custos relacionados à manutenção dos equipamentos e custos relacionados à utilização da rede, para o caso *on-grid* ou custos relativos ao armazenamento, para o caso *off-grid*. Este último será feito na seção seguinte. Por fim, podem ser feitas considerações sobre a área necessária. Para o caso mínimo, os painéis poderiam ser facilmente instalado no telhado do edifício, enquanto para os casos mediano e máximo isso não seria possível, pois a área total dos painéis excede a área de telhado.

3.4.4 Sistema de armazenamento

3.4.4.1 Estado da arte

Como mencionado, fontes de energia de baixo fator de capacidade necessitam sistemas de armazenamento de energia a longo prazo para garantir o abastecimento durante os períodos inoperantes da fonte. Isto é válido tanto para painéis fotovoltaicos quanto para turbinas eólicas. O preço das baterias, a depender da tecnologia, varia de 100 a 630 dólares por $kW.h$ de capacidade. Solução comerciais, são mais caras, e como referência são trazidos aqui três sistemas que representam o estado da arte do armazenamento comercialmente disponíveis nos Estados Unidos: a Generac PWRCcell, a Enphase IQ Battery e a Tesla Powerwall, cujas informações estão reunidas na tabela 7.

	Generac PWRCell	Enphase IQ Battery 10	Tesla Powerwall
Capacidade de armazenamento [$kW.h$]	9,0	10,0	13,5
Potência contínua [kW]	3,4	3,8	5,6
Preço [USD]	9 999	18 000	10 500

Tabela 7 – Especificações de sistemas de armazenamento comercialmente disponíveis.

A opção mais barata, o Powerwall da Tesla, tem um custo aproximado de 780 dólares por kilowatt-hora. Para uma autonomia de 24 horas, o que corresponderia a 136 kW.h, 441 kW.h e 1357 kW.h de capacidade de armazenamento para os casos mínimo, mediano e máximo, respectivamente, seriam necessárias 10, 33 e 101 unidades, com um custo total de US\$ 105 000, US\$ 346 500 e US\$ 1 060 500. Em conversão direta, sem qualquer consideração acerca de custos associados à importação (ou sequer à disponibilidade de tais sistemas em mercado nacional), isso corresponde a R\$ 551 000, R\$ 1 820 000 e R\$ 5 560 000. Isto corresponde a aproximadamente 3,5 vezes o valor da instalação dos painéis fotovoltaicos, e acrescentaria cerca de 137 meses, ou mais de 11 anos, à estimativa inicial de tempo em que o sistema se pagaria. Este prazo, é maior que a garantia e o tempo de vida esperado de um sistema de baterias deste tipo, que é em torno de 10 anos, e inviabilizaria a implementação de um sistema *off-grid* completo.

3.4.4.2 Mercado nacional

Também foram investigadas baterias adequadas a este contexto vendidas no mercado nacional. Foram investigadas três marcas referência no país no segmento de baterias e que têm linhas de baterias destinadas à utilização com painéis solares, mas que funcionalmente seriam também adequadas à utilização com turbinas eólicas. Os dados estão reunidos na tabela 8.

	Moura Solar 12MS234	Fulguris FGCL220	Unipower UPLFP48
Tensão Nominal [V]	12	12	48
Capacidade Nominal [A.h]	234	220	100
Capacidade Nominal [$kW.h$]	2,80	2,64	4,80
Tecnologia	Chumbo-Ácido	Chumbo-Ácido	Lítio
Preço [R\$]	1 659,00	1 599,00	11 999,00

Tabela 8 – Especificações de baterias disponíveis no mercado nacional

Os custos são de aproximadamente 600 reais por kW.h para uma bateria chumbo-ácida e 2 500 por kW.h reais para uma bateria de lítio. Há de se ressaltar que as baterias de chumbo, embora significativamente mais baratas, apresentam vida mais curta. Para os modelos descritos acima, a vida útil era de cerca de 1600 ciclos a DoD 20% e apenas cerca de 400 ciclos a DoD 50%, o que representaria uma vida útil de pouco mais de um ano caso utilizadas nessas condições. O modelo de lítio, contudo, alega ser capaz de operar por mais de 10 000 ciclos a DoD 50% e mais de 6 000 ciclos a DoD 80%, o que tornaria sua utilização mais viável em um sistema de geração distribuída. Novamente para a autonomia de 24 horas, 136 kW.h, 441 kW.h e 1357 kW.h nos casos mínimo, mediano e máximo, os custos com as baterias foram reunidos na tabela 9.

	Moura Solar 12MS234	Fulguris FGCL220	Unipower UPLFP48
Caso mínimo [R\$]	80 580	82 372	339 970
Caso mediano [R\$]	261 290	267 105	1 102 408
Caso máximo [R\$]	804 022	821 910	3 392 217

Tabela 9 – Custos de baterias disponíveis no mercado nacional

Ressalva-se que este custo é apenas das baterias, e não inclui todo o adicional de transporte e instalação. Ainda assim é extremamente alto, maior que o dobro do preço da compra e instalação dos painéis solares que seriam necessários para uma instalação deste tamanho.

Dada a inviabilidade da implementação de baterias e independência da rede, será assumido daqui em diante a utilização de um sistema *on-grid*, e todos os componentes associados necessários, incluindo inversores e controladores de carga.

3.4.5 Inversores e controladores de carga

Para a instalação de geradores distribuídos também são necessários alguns componentes adicionais, principalmente controladores de carga, responsáveis por proteger os equipamentos de sobrecarga, e inversores, que transformam a energia DC gerada em energia AC para ser utilizada. O maior modelo encontrado, um Inversor Off Grid Híbrido Epever UPower-Hi UP5000 - 80A MPPT - 48/220V, custa aproximadamente 6 500 reais e é capaz de operar com até 5kW, o que inculiria um custo adicional na instalação de cerca de R\$ 1300 por kW. Este custo, contudo, depende muito do modelo específico de turbina utilizado, e muitas vezes este tipo de componentes são vendidos pelos próprios fabricantes das turbinas já nas especificações adequadas a ela, como pode ser visto nas brochuras de venda e nas especificações detalhadas nos Apêndices.

3.4.6 Potencial Eólico

Um dos maiores obstáculos enfrentados pela energia eólica é a performance entregue ser frequentemente muito menor que a performance nominal do aparelho. O principal fator que influencia isto é o potencial eólico da região na qual a turbina foi instalada.

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2013) traz as velocidades médias anuais do vento a diversas alturas, a partir de 30 metros. Vale notar que o Atlas, e outros esforços de mapeamento do potencial eólico nacional, se concentram em fornecer dados úteis a grandes projetos que utilizam turbinas de elevado tamanho, e para o contexto da geração distribuída, até a altura mínima de 30 metros é superior a altura que microturbinas eólicas são geralmente instaladas. Contudo, esta é a melhor fonte disponível, e será usada considerando-se a velocidade do vento para a altura de 30 metros.

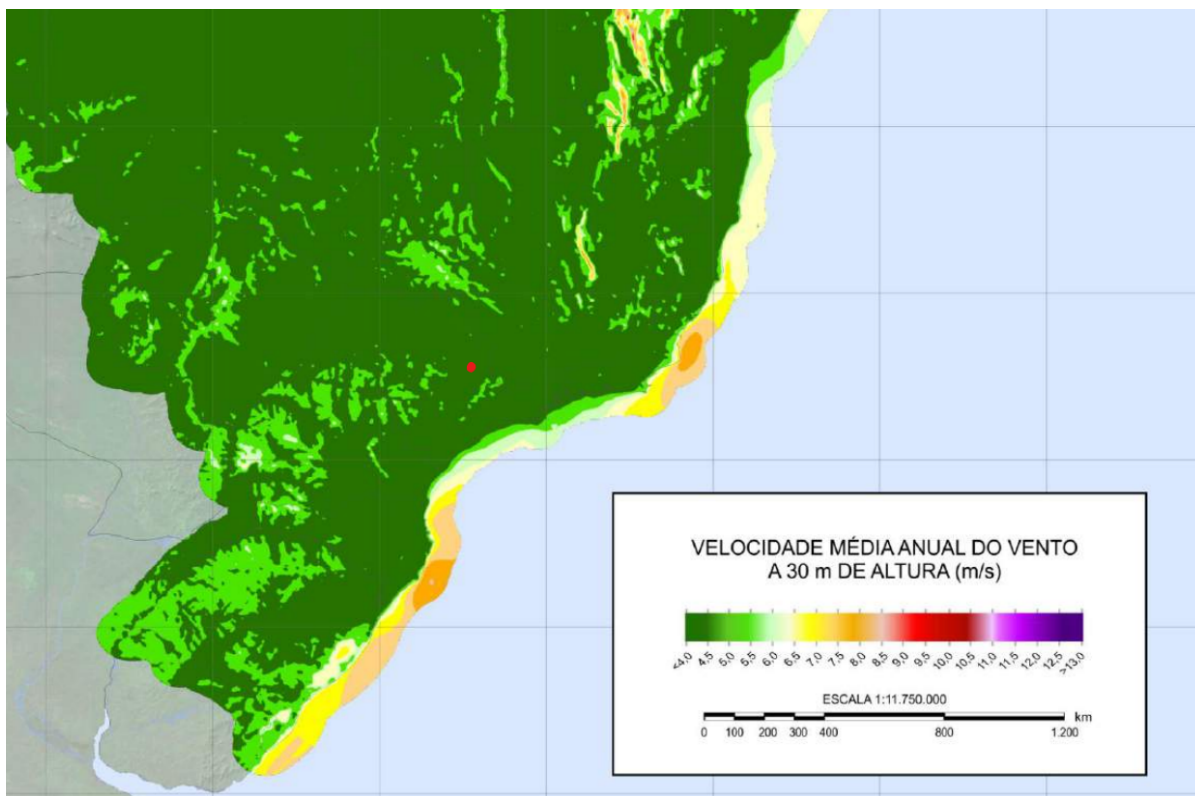


Figura 35 – Potencial eólico a 30m do centro sul do Brasil. Localização do edifício modelo marcada em vermelho. Reprodução: (CEPEL, 2013)

Observa-se na figura 35 que, com exceção da faixa litorânea, a maior parte da área do centro-sul do Brasil, inclusive a localidade onde se encontra o edifício modelo deste trabalho, possui velocidade média anual do vento menor que 4 metros por segundo, correspondente ao tom de verde mais escuro. Este valor é muito inferior à velocidade de potência nominal da maioria das turbinas (geralmente em torno de ou maiores que 10 m/s) e menores até que a velocidade mínima de operação de algumas turbinas, como as helicoidais da Vision Air. Para fins das estimativas desse trabalho, 4 m/s será a velocidade

considerada.

3.4.7 Turbinas necessárias

3.4.7.1 Windside

A maior turbina comercialmente disponível (sem ser sob demanda) da Windside é a WS-4, com uma produção estimada de 400 kW.h por ano a 4 m/s de velocidade anual média do vento. Detalhes dos outros modelos investigados estão disponíveis no Apêndice A. Para os casos de consumo seriam necessários portanto, 124 turbinas para o caso mínimo, 403 turbinas para o caso mediano e 1 238 turbinas para o caso máximo. Dada a natureza extrema e inviável destes números por si só, não serão apresentados cálculos referente à preço para este fabricante.

Embora seja um fabricante referência na área de turbinas do tipo Savonius, seu nicho são turbinas altamente resilientes em aplicações *off-grid* de pequena demanda energética onde a rede de distribuição e outras alternativas não são aplicáveis. Por isso, o foco das aplicações são a possibilidade de operar pequenos sistemas elétricos continuamente em ambientes remotos (como sistemas de iluminação ou aparelhos de aquisição de dados), e seu foco é na durabilidade e confiabilidade do sistema mais que eficiência ou capacidade produtiva bruta e suficiente para alimentar sistemas de elevado consumo como é um prédio de escritórios.

3.4.7.2 Vision Air

Dentre os modelos oferecidos pela Vision Air (detalhados no Apêndice B) o mais adequado seria o Vision Air 5, que a uma velocidade de vento anual média de 4 m/s é estimado pelo fabricante a produzir entre 1 000 kW.h (*low case scenario*) e 2 000 kW.h *high case scenario*, a um preço de cerca de 180 mil reais. Dadas as considerações do potencial eólico feitas, considerando que a altura real de instalação seria menor que 30 metros, e sendo a favor da segurança, adotar-se-á o cenário *low case*. Para os casos estipulados as estimativas foram reunidas na tabela 10.

	Turbinas tipo Vision Air 5 necessárias	Preço individual [BRL]	Custo total BRL
Caso mínimo	50	180 460	9 023 000
Caso mediano	161	180 460	29 054 060
Caso máximo	496	180 460	89 508 160

Tabela 10 – Estimativa de custo das turbinas tipo Vision Air 5.

Fica evidente que nessas condições de operação a utilização de tais turbinas é inviável, tanto economicamente (o custo das turbinas é cerca de 180 vezes o custo anual

gasto com eletricidade) e até fisicamente, visto que quase 500 turbinas de 3.2 metros de raio ocupariam uma enorme área, para além das quedas em performance que turbinas eólicas têm quando instaladas sob área de influência das esteiras das outras.

Para contextualizar este resultado, é válido rever algumas das hipóteses assumidas. Primeiro, as considerações acerca do consumo de energia do edifício foram feitas com base em exemplos da literatura de prédios de escritórios densamente ocupados e com alto consumo de energia, e, apesar de refletir com fidelidade esta realidade, os valores são altos, mais de 10 vezes maiores que níveis de consumo comuns residenciais. Segundo, regiões interioranas, a baixas alturas, tem um potencial eólico muito distante do que seria o ideal exigido por essas turbinas. De fato, quando observa-se o gráfico de energia produzida por ano elaborado pelo fabricante, reproduzido aqui na figura 36, percebe-se que 4 metros por segundo é limítrofe à velocidade mínima de operação.

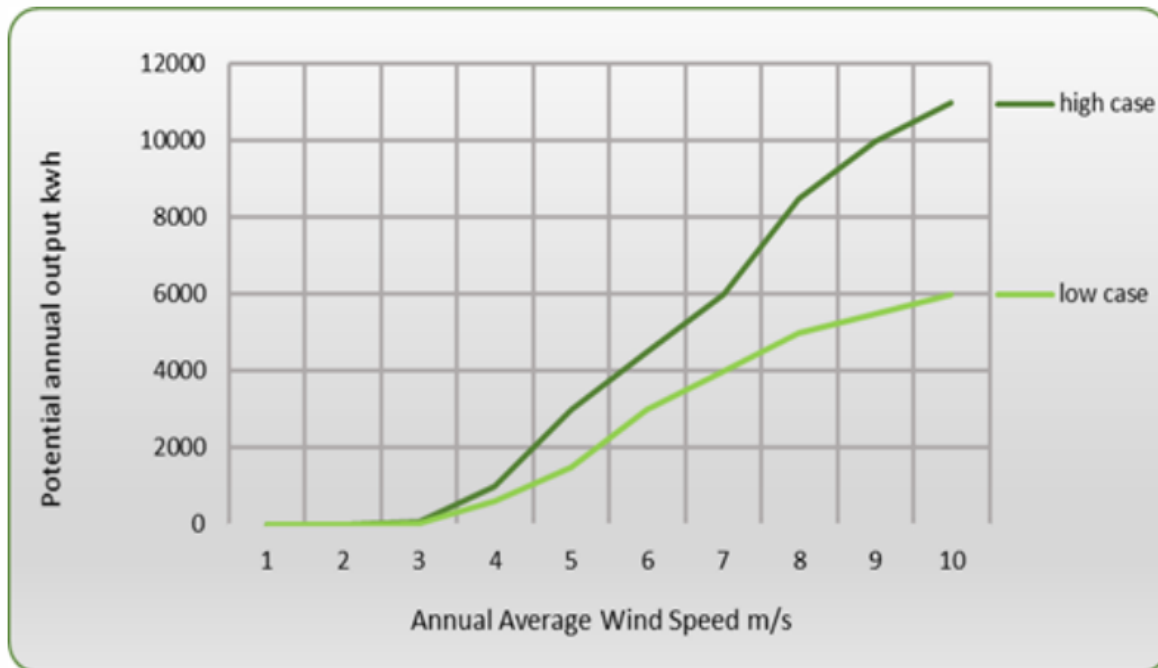


Figura 36 – Estimativa de *output* anual da turbina Vision Air 5 em função da velocidade anual média do vento. Reprodução: (WIND, 2020)

Faz sentido, portanto, que insistir na utilização de tais componentes em situações tão distantes das quais foi projetado para, resultaria em baixa performance e custos elevados como foi demonstrado.

3.4.7.3 Aeolos

Dentre os modelos oferecidos pela Aeolos (detalhados no Apêndice C), será considerado aquele de maior capacidade produtiva, o Aeolos-V 10kW. Embora este fabricante não forneça dados da produção anual com base na velocidade anual do vento como os ou-

tros, pode aproximar-se um valor com base na proporção de modelos similares. O Vision Air estima que seu modelo 3, avaliado em 1.5 kW, produza entre 200 e 400 kW.h ao ano (133 a 266 vezes a capacidade nominal). Para o modelo 5, avaliado em 5 kW de potência nominal, a estimativa é entre 1 000 kW.h e 2 000 kW.h (200 a 400 vezes o valor numérico da capacidade nominal). Uma estimativa de produção anual do modelo da Aeolos, avaliado em 10 kW, seria então entre 1 300 kW.h e 4 000 kW.h, que chamaremos de cenários *low case* e *high case*. Considerando os níveis de consumo estipulados as estimativas foram reunidas na tabela 11.

	Turbinas tipo Aeolos-V 10kW necessárias (low case)	Turbinas tipo Aeolos-V 10kW necessárias (high case)	Custo total BRL (low case)	Custo total BRL (high case)
Caso mínimo	38	13	5 247 990	1 795 365
Caso mediano	124	41	17 125 020	5 662 305
Caso máximo	380	124	52 479 900	17 125 020

Tabela 11 – Estimativa de custos da instalação de turbinas Aeolos.

Em comparação a outros modelos e outros fabricantes este é um número bem mais razoável. Porém, há de se considerar que não estão incluídas aqui considerações acerca de transporte e instalação dos componentes, que sem dúvidas representariam acréscimos significativos. De qualquer modo, nota-se que, no caso mais viável de todos, que seria a turbina mais eficiente, do fabricante com os preços mais acessíveis, considerando o caso onde o vento performe segundo as melhores expectativas, o preço das turbinas eólicas ainda seria maior que o dobro que o equivalente da execução de todo o projeto análogo utilizando energia solar fotovoltaica. Outros fatores que pesam a favor da tecnologia fotovoltaica são o projeto mais simples; o comportamento da incidência solar que é muito mais previsível que o dos ventos; e as *supply chains*, fornecedores e serviços de manutenção que já estão muito mais estabelecidos.

4 CONCLUSÃO

A energia eólica é uma tecnologia promissora, que vem crescendo nos últimos anos, e desempenhando um papel primordial na transição das matrizes elétricas mundiais para fontes mais renováveis. Contudo, o sucesso da tecnologia se concentra em projetos de infraestrutura elétrica de larga escala, em plantas com capacidade produtora da ordem de mega- e gigawatts, compostas por turbinas horizontais de dezenas (e em alguns casos ultrapassando a centena) de metros de altura, devido à série de vantagens e ganhos em eficiência que elas têm nessa escala.

No contexto das turbinas verticais, e mais especificamente turbinas verticais de pequena potência nominal, a classe ainda encontra uma série de desafios, como tecnologias ainda imaturas, que impedem a consolidação de modelos no mercado; *supply chains* extremamente limitadas, que dificultam o acesso dos consumidores mesmo quando há o interesse; e consistentes problemas de performance, com os geradores entregando, na prática, resultados muito inferiores aos ideais. Todos estes fatores encarecem muito projetos baseados nestas turbinas, o que inviabiliza financeiramente a maioria deles, como ocorreu no caso explorado neste trabalho. Além disso, o setor enfrenta grande concorrência do setor solar fotovoltaico, que ocupa um nicho de geração distribuída e renovável muito semelhante ao das pequenas VAWTs, porém são capazes de entregar uma performance muito mais consistente, o que culminou na quase monopolização do mercado de mini e microgeração renovável pelos painéis.

Destaca-se por fim que a geração eólica distribuída encontra sucesso em nichos específicos, como em localidades não atendidas pela rede de distribuição e onde a energia solar não seja uma opção viável, como é o caso de aplicações *off-grid* em locais remotos a altas latitudes, que recebem baixíssima incidência solar durante o inverno. Além disso, no futuro, com o amadurecimento das tecnologias, e em locais com condições de vento mais propícias do que as investigadas neste trabalho, é possível que a viabilidade da micro geração eólica seja maior. Estudos de viabilidade nessas situações poderiam apresentar novas perspectivas àquelas aqui apresentadas e fornecer novos caminhos para o desenvolvimento da tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000043>. Acesso em: 25 apr. 2022.
- BEJAN, A. *et al.* The effect of size on efficiency: Power plants and vascular designs. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931010006599>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- BLACKWOOD, M. Maximum efficiency of a wind turbine. **Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two**, 2016. Disponível em: <https://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4865&context=ujmm>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- CASTELLANI, F. *et al.* Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy system for residential use. **Machines**, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333316757_Experimental_Vibration_Analysis_of_a_Small_Scale_Vertical_Wind_Energy_System_for_Residential_Use. Acesso em: 13 mai. 2022.
- CEPEL, C. d. P. d. E. E. Atlas do potencial eólico brasileiro. *In: _____*. [S.l.: s.n.], 2013.
- CHENG, Q. *et al.* Aerodynamic analysis of a helical vertical axis wind turbine. **energies**, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/575/htm>. Acesso em: 22 mai. 2022.
- CHRISPIM, G. Brasil atinge 10 gw de potência instalada em sistemas de geração própria de energia. **Associação Brasileira de Geração Distribuída**, 2022. Disponível em: <https://abgd.com.br/portal/brasil-atinge-10-gw-de-potencia-instalada-em-sistemas-de-geracao-propria-de-energia/>. Acesso em: 13 mai. 2022.
- EIA. Average u.s. construction costs for solar generation continued to fall in 2019. 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48736#:~:text=Solar%20construction%20costs%20averaged%20%241%2C796,to%20%241%2C497%2FkW%20in%202019>. Acesso em: 25 apr. 2022.
- GISTEMP, T. . Giss surface temperature analysis (gistemp), version 4. **NASA Goddard Institute for Space Studies**, 2022. Disponível em: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Acesso em: 25 apr. 2022.
- HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R. Global temperature in 2021. 2022. Disponível em: <http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2022/Temperature2021>. Acesso em: 25 apr. 2022.
- HANSEN, M. Aerodynamics of wind turbines. *In: _____*. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 978-1-138-77507-7.

IEA. World energy balances: Overview. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>. Acesso em: 25 apr. 2022.

IPCC. Summary for policymakers, in climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. **Cambridge University Press**, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-spm-1.pdf>. Acesso em: 25 apr. 2022.

IPCC. Summary for policymakers, in climate change 2014: Trends in stocks and flows of greenhouse gases and their drivers. **Cambridge University Press**, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf. Acesso em: 25 apr. 2022.

IPCC. Summary for policymakers, in climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. **Cambridge University Press**, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf. Acesso em: 25 apr. 2022.

JAISWAL, A. Lithium-ion battery based renewable energy solution for off-grid electricity: A techno-economic analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117300588>. Acesso em: 17 jun. 2022.

JAKUBOWSKI, M.; STAROSTA, R.; FRITZKOWSKI, P. Kinematics of a vertical axis wind turbine with a variable pitch angle. **AIP Conference Proceedings**, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322333406_Kinematics_of_a_vertical_axis_wind_turbine_with_a_variable_pitch_angle. Acesso em: 21 mai. 2022.

KUANG, H.; LI, S.; WU, Z. Discussion on advantages and disadvantages of distributed generation connected to the grid s. **International Conference on Electrical and Control Engineering**, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6057500>. Acesso em: 13 mai. 2022.

KUMAR, P. *et al.* Strategies for enhancing the low wind speed performance of h-darrieus wind turbine—part 1. **Clean Technologies**, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335548322_Strategies_for_Enhancing_the_Low_Wind_Speed_Performance_of_H-Darrieus_Wind_Turbine-Part_1. Acesso em: 22 mai. 2022.

KUMAR, P. *et al.* Review on the evolution of darrieus vertical axis wind turbine: Large wind turbines. **clean technologies**, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8797/1/1/14/htm>. Acesso em: 16 jun. 2022.

KUMAR, P. *et al.* A review on the evolution of darrieus vertical axis wind turbine: Small wind turbines. **Journal of Power and Energy Engineering**, 2019. Disponível em: https://www.scirp.org/pdf/JPEE_2019042615031517.pdf. Acesso em: 13 mai. 2022.

MA, H. *et al.* Analysis of typical public building energy consumption in northern china. **Energy and Buildings**, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816315869>. Acesso em: 17 jun. 2022.

MAHMOUD, M.; XIA, Y. Some industrial systems. *In: _____*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 11–33. ISBN 978-1-4471-2878-6.

MME, M. d. M. e. E. Plano decenal de expansão de energia 2030. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 25 apr. 2022.

MME, M. d. M. e. E. Ben relatório síntese 2022 (ano base 2021). 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 25 apr. 2022.

PADMANATHAN, K. *et al.* Conceptual framework of antecedents to trends on permanent magnet synchronous generators for wind energy conversion systems. **Journal of Power and Energy Engineering**, 2019. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/energies-12-02616-v2.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2022.

PAGNINI, L.; BURLANDO, M.; REPETTO, M. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. **Applied Energy**, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005802>. Acesso em: 21 mai. 2022.

PEPERMANS, G. *et al.* Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069>. Acesso em: 13 mai. 2022.

PORTAL Solar. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/>.

SCHEURICH, F.; FLETCHER, T.; BROWN, R. The influence of blade curvature and helical blade twist on the performance of a vertical-axis wind turbine. **48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition**, 2010. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2010-1579>. Acesso em: 22 mai. 2022.

TAR, K. Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000342>. Acesso em: 13 mai. 2022.

WENEHENUBUN, F.; SAPUTRAA, A.; SUTANTO, H. An experimental study on the performance of savonius wind turbines related with the number of blades. **International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application**, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277338974_An_Experimental_Study_on_the_Performance_of_Savonius_Wind_Turbines_Related_With_The_Number_Of_Blades. Acesso em: 21 mai. 2022.

WIND, V. A. Vision air 5 brochure. *In: _____*. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://secureservercdn.net/160.153.138.178/2b4.bf4.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/05/V5-Brochure-May-2020.pdf>.

ZAYAS, J. Revolution...now rewind: Illustrating the wind energy story. **Office of Energy Efficiency and Renewable Energy**, 2016. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/articles/revolutionnow-rewind-illustrating-wind-energy-story>. Acesso em: 25 apr. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – WINDSIDE

	WS-0,15	WS-0,30	WS-0,60	WS-2	WS-4
Altura [m]	0.86	1.35	2.60	2.50	5.15
Peso [kg]	38	43	122	120	800
Potência Nominal [kW]	0.071	0.094	0.162	0.225	0.540
Velocidade mínima (Cut-in wind speed) [m/s]	-	-	-	2	-
Velocidade máxima (Cut-out wind speed) [m/s]	40	30	20	20	40
Potência estimada a 4 m/s [kW]	-	-	-	-	-
Eficiência estimada (Potência a 4m/s/Potência Nominal)	-	-	-	-	-
Produção anual estimada @4 m/s [kW.h]	15	30	60	120	400
Preço base [USD]	7 180	8 630	14 070	22 350	72 850
Preço componentes adicionais [USD]	-	-	-	-	-
Preço total [USD]	7 180	8 630	14 070	22 350	72 850
Preço total [BRL]	37 670	45 265	73 805	117 160	381 897

APÊNDICE B – VISION AIR

	Hoyi 200	Hoyi 300	Vision Air 3	Vision Air 5
Altura [m]	1.3	1,4	3.2	5.2
Peso [kg]	41	49	274	756
Potência Nominal [kW]	0,2	0,3	1.5	5.0
Velocidade mínima (Cut-in wind speed) [m/s]	2	2.5	3	3.2
Velocidade máxima (Cut-out wind speed) [m/s]	50	50	20	20
Potência estimada a 4 m/s [kW]	0.015	0.020	< 0.1	0.26
Eficiência estimada (Potência a 4m/s/Potência Nominal)	7.5%	6.7%	<6.7%	5.2%
Produção anual estimada @4 m/s [kW.h]	NA	NA	200 - 400	1 000 - 2 000
Preço base [USD]	3510	4040	10620	29160
Preço componentes adicionais [USD]	1690 (inversor)	1690 (inversor)	4490 (ASB, controlador, dump load e inversor)	5260 (ASB, controlador, dump load e inversor)
Preço total [USD]	5 200	5 730	15 110	34 420
Preço total [BRL]	27 260	30 040	79 220	180 460

APÊNDICE C – AEOLOS

	Aeolos-V 300 W	Aeolos-V 600 W	Aeolos-V 1 000 W
Altura [m]	1.6	2.0	2.8
Peso [kg]	10	18	28
Potência Nominal [kW]	0.3	0.6	1.0
Velocidade mínima (Cut-in wind speed) [m/s]	1.5	1.5	1.5
Velocidade máxima (Cut-out wind speed) [m/s]	50	50	50
Potência estimada a 4 m/s [kW]	-	-	-
Eficiência estimada (Potência a 4m/s/Potência Nominal)	-	-	-
Produção anual estimada @4 m/s [kW.h]	-	-	-
Preço base [USD]	1 480	2 270	3 100
Preço componentes adicionais [USD]	1 305 (Controller, Inverter and Tower)	1 320 (Controller, Inverter and Tower)	2 800 (Controller, Inverter and Tower)
Preço total [USD]	2 785	3 590	5 900
Preço total [BRL]	14 602	18 823	30 934

	Aeolos-V 3 000 W	Aeolos-V 5 000 W	Aeolos-V 10 kW
Altura [m]	3.6	4.8	6.0
Peso [kg]	106	500	680
Potência Nominal [kW]	3.0	5.0	10.0
Velocidade mínima (Cut-in wind speed) [m/s]	1.5	1.5	2.5
Velocidade máxima (Cut-out wind speed) [m/s]	52.5	52.5	52.5
Potência estimada a 4 m/s [kW]	-	-	-
Eficiência estimada (Potência a 4m/s/Potência Nominal)	-	-	-
Produção anual estimada @4 m/s [kW.h]	-	-	-
Preço base [USD]	5 820	9 800	16 200
Preço componentes adicionais [USD]	3 640 (Controller, Inverter and Tower)	7 610 (Controller, Inverter and Tower)	10 140 (Controller, Inverter and Tower)
Preço total [USD]	9 460	17 410	26 340
Preço total [BRL]	49 600	91 284	138 105