

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

ALISSON GEOVANE SILVA DE SOUZA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Seleção de aerogeradores de eixo vertical para aplicação em áreas urbanas no Rio
Grande do Sul**

Ibirubá

2022

ALISSON GEOVANE SILVA DE SOUZA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Seleção de aerogeradores de eixo vertical para aplicação em áreas urbanas no Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto, fabricação e automação industrial

Orientador: Me. Bruno Conti Franco

Coorientador: Dr. Alexandre Bittencourt de Sá

Ibirubá

2022

Ficha catalográfica

Seleção de aerogeradores de eixo vertical para aplicação em áreas urbanas no Rio Grande do Sul

Alisson Geovane Silva de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 22 de fevereiro de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Me.(orientador): Bruno Conti Franco

IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. (Coorientador): Alexandre Bittencourt de Sá

IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Luciano Machado Cirino

IFRS campus Ibirubá

Prof.^a Me. Danielle dos Santos de Lima

Membro externo.

AGRADECIMENTOS

Dedico os meus sinceros agradecimentos para:

Os meus orientadores Me. Bruno C. Franco e ao Dr. Alexandre B. de Sá que me guiaram no desenvolvimento deste trabalho;

A Doutoranda Isadora Limas Coimbra pelo compartilhamento de seu conhecimento na área de energia eólica;

Ao Bernardo Bender pela amizade, incentivo e aconselhamentos ao longo desta jornada;

Aos meus pais que deram tudo de si para garantirem que eu chegasse até esta fase da graduação.

*Quando os ventos de mudança sopram, umas
pessoas levantam barreiras, outras constroem
moinhos de vento.*

Érico Veríssimo

RESUMO

O potencial eólico do Brasil vem sendo amplamente explorado nos últimos anos. Por se tratar de uma energia limpa e uma alternativa à sustentabilidade ambiental na geração de energia elétrica, estimasse um aumento da capacidade de usinas eólicas de aproximadamente 3% até o ano de 2025. Os parques eólicos brasileiros são construídos com grandes aerogeradores de eixo horizontal, o que demanda extensas áreas com velocidade do vento favorável à geração de energia em larga escala. Um dos grandes consumidores da energia gerada no país são os centros urbanos. Por este fator, e visando uma contribuição à matriz energética, a instalação de aerogeradores de eixo vertical em ambientes urbanos pode ser favorável, já que essas máquinas não necessitam de dispositivo de orientação da turbina face ao vento, como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal, sendo estruturas aptas para serem instaladas em teto de casas ou no topo de edifícios. O desenvolvimento deste trabalho visa um estudo voltado à seleção de aerogeradores de eixo vertical para a implementação em áreas urbanas no estado do Rio Grande do Sul. Por intermédio de um comparativo entre modelos de aerogeradores com rotores do tipo Darrieus, Darries H e Savonius, pretende-se selecionar o que apresenta melhor desempenho para a geração de energia conforme as condições do ambiente. Para este trabalho foram utilizados dados da literatura, como parâmetros dimensionais dos rotores, de performance, de velocidades médias do vento e de rugosidade nas regiões do estado do Rio Grande do Sul. A partir dos dados selecionados, foi possível determinar a potência, o torque e o coeficiente de torque de cada modelo de rotor. Fazendo um comparativo entre os rotores, o modelo Darrieus H apresenta maior potência em relação aos demais, cerca de 33% maior em relação ao rotor Darrieus e 44% maior em relação ao rotor Savonius, portanto esse modelo de rotor é o que apresenta maior capacidade de geração de energia em centros urbanos no Rio Grande do Sul.

Palavras chave: Aerogeradores. Eólica. Energia. Darrieus. Savonius.

ABSTRACT

The wind power potential of Brazil has been widely explored in recent years. As it is a clean energy and an alternative to environmental sustainability in the generation of electric energy, it is estimated an increase in the capacity of wind farms of approximately 3% by the year 2025. The Brazilian wind farms are built with large horizontal axis wind turbines, which demands extensive areas with favorable wind speeds for large-scale power generation. One of the major consumers of energy generated in the country are urban centers. For this factor, and aiming at a contribution to the energy matrix, the installation of vertical axis wind turbines in urban environments can be favorable, since these machines do not need a turbine orientation device towards the wind, as happens in horizontal axis wind turbines, being structures able to be installed on the roof of houses or on top of buildings. The development of this work aims at a study aimed at the selection of vertical axis wind turbines for implementation in urban areas in the state of Rio Grande do Sul. Through a comparison between models of wind turbines with rotors of the Darrieus, Darries H and Savonius type, it is intended to select the one that presents the best performance for energy generation according to the environmental conditions. For this work, data from the literature were used, such as dimensional parameters of the rotors, performance, average wind speeds and roughness in the regions of the state of Rio Grande do Sul. From the selected data, it was possible to determine the power, torque and torque coefficient of each rotor model. Comparing the rotors, the Darrieus H model has higher power compared to the others, about 33% higher than the Darrieus rotor and 44% higher compared to the Savonius rotor, so this rotor model is the one with the highest capacity. generation in urban centers in Rio Grande do Sul.

Key words: Wind turbines. Wind. Energy. Darrieus. Savonius.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	[kg/m^3]	Densidade do ar seco
v	[m/s]	Velocidade do vento
r	[m]	Raio do rotor da turbina
C_p	[-]	Coefficiente de potência
η	[-]	Rendimento global do aerogerador
λ	[-]	Razão de velocidade de ponta de pá
ω	[rad/s]	Frequência rotacional
σ	[-]	Solidicidade
B	[-]	Número de pás
c	[m]	Corda da pá
C_m	[-]	Coefficiente de torque
T	[Nm]	Torque no eixo do aerogerador
A_r	[m^2]	Área varrida
h	[m]	Altura
z_0	[m]	Rugosidade do relevo
A	[m^2]	Área do rotor
d_r	[m]	Diâmetro do rotor
v_m	[m/s]	Velocidade média
a	[m]	Afastamento entre pás
s	[m]	Sobreposição de pás
e	[m]	Espessuras de pás
α	[-]	Ângulo de ataque
β	[-]	Ângulo de passo
\vec{D}	[N]	Força de arrasto
\vec{L}	[N]	Força de sustentação

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Potência de saída.....	20
Equação 2 – Razão de velocidade de ponta de pá	22
Equação 3 - Índice de solidicidade	23
Equação 4 – Coeficiente de Torque.....	23
Equação 5 – C_m em função do TSR e do C_p	24
Equação 6 – Componentes que determinam a rotação da turbina	25
Equação 7 – Velocidade do vento de acordo com a altitude	27
Equação 8 – Rendimento aerodinâmico de um aerogerador	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidade média v_m anual do vento a $h_1 = 2\text{m}$ de acordo com regiões delimitadas pelo IBGE, rugosidade z_0 estimada para cada região e velocidade do vento $h_2 = 50\text{ m}$	31
Tabela 2 – Parâmetros do Rotor Savonius	34
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o rotor Darrieus H	35
Tabela 4 – Parâmetros utilizados para o rotor Darrieus	36
Tabela 5 – Valores analisados para os tipos de rotores com $v_m = 3,2\text{ m/s}$	38
Tabela 6 – Comparativo entre os parâmetros dos rotores com $v_m = 3,2\text{ m/s}$	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de aerogeradores: Savonius (1); Darrieus (2); Darrieus H.....	15
Figura 2 – Design atuais de rotores do tipo Savonius.	16
Figura 3 – Esquema explicativo das dimensões de um aerogerador Savonius	17
Figura 4 – Aerogerador tipo Darrieus.....	18
Figura 5 – Funcionamento de um aerogerador com rotor Darrieus	18
Figura 6 – Aerogerador de eixo vertical com rotor Darrieus H.....	19
Figura 7 – Funcionamento de um aerogerador com rotor Darrieus H.....	20
Figura 8 – Área varrida para modelos de aerogeradores de eixo vertical.	21
Figura 9 – Valores de C_p em função λ para cada modelo de rotor	22
Figura 10 – Diagrama de velocidade e forças atuantes sobre uma pá de turbina.....	25
Figura 11 – Rosa dos ventos características para um fluxo dominante dentro de um vale; em uma planície e acima das elevações extremas de um vale	26
Figura 12 – Rugosidade do relevo de acordo com o tipo de cobertura do terreno.....	27
Figura 13 – Influência da rugosidade de acordo com a camada limite terrestre para a) Áreas urbanas; b) Subúrbios e c) Litoral.	28
Figura 14 – Média das velocidades anuais do vento na Região Sul do país	30
Figura 15 – Rugosidade do relevo do Rio Grande do Sul determinado pelo Atlas Eólico do Rio Grande do Sul.....	32
Figura 16 – Representação dimensional do rotor Savonius	33
Figura 17 – Desempenho aerodinâmico para um Rotor Savonius Ótimo.	34
Figura 18 – Coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta da pá para rotores Darrieus e Darrieus H.....	35
Figura 19 – Potência dos rotores analisados em função da velocidade do vento.....	37
Figura 20 – Comparativo entre os torques gerados por cada rotor em função da velocidade..	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Aerogeradores de eixo vertical.....	15
2.1.1	ROTORES DO TIPO SAVONIUS.....	16
2.1.2	ROTORES DO TIPO DARRIEUS	17
2.1.3	ROTORES DO TIPO DARRIEUS H	19
2.2	FATORES DETERMINANTES NA POTÊNCIA E TORQUE DOS AEROMOTORES.....	20
2.3	FORÇAS AERODINÂMICAS.....	24
2.4	VELOCIDADE DO VENTO.....	26
2.5	RUGOSIDADE DO RELEVO	27
2.6	RENDIMENTO AERODINÂMICO η	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	METODOLOGIA DE PROJETO.....	29
3.1.1	Média das velocidades do Vento no Rio Grande do Sul.....	29
3.1.2	Fator de rugosidade e velocidade do vento.....	30
3.1.3	Definição dos parâmetros do aerogerador Savonius	33
3.1.4	Definição dos parâmetros do aerogerador Darrieus H	34
3.1.5	Definição dos parâmetros do aerogerador Darrieus.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	VARIAÇÕES DE POTÊNCIA.....	37
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é fundamental para a manutenção da sociedade moderna. A evolução da economia e o crescimento da população mundial atualmente necessita do uso contínuo de combustíveis fósseis, que além de não serem renováveis, acabam sendo um dos grandes poluidores do planeta. A utilização de fontes alternativas de energia, como solares e eólicas tornam-se atrativas, já que não utilizam combustíveis fósseis e não geram poluentes. O processo de queima deste tipo de combustível, libera na atmosfera gases como CO₂, CH₄, N₂O e vapor d'água, que atuam retendo o calor na atmosfera e intensificando o mecanismo de efeito estufa (Netto, 2020).

Deste modo, a fonte de energia eólica vem sendo umas das fontes renováveis a ser incluída na matriz energética por se tratar de uma energia limpa e uma alternativa a sustentabilidade ambiental na geração de energia elétrica. A geração de energia eólica tem se desenvolvido em grandes parques, longe dos centros urbanos, necessitando de linhas de transmissão e distribuição (SOUSA; JUNIOR; SOUSA, 2018). De acordo com a ANEEL (2021), a expansão da geração de energia elétrica no ano de 2021 alcançou em abril a marca de 1.007 megawatts (MW), com 324,45 MW liberados apenas no mês de março.

Atualmente o Brasil soma 175.407,3 MW de potência fiscalizada. Desse total em operação, 75% das usinas que geram energia são movidas por fontes sustentáveis, com baixa emissão de gases do efeito estufa (ANEEL, 2021). A energia eólica hoje representa cerca de 10,9% da matriz elétrica brasileira, sendo que os maiores parques estão na região Nordeste do país. A expectativa atual é que se as usinas eólicas cheguem a 13,6% até o final do ano de 2025 (BRASIL, 2021).

O uso dos ventos para geração de energia elétrica mediante o uso de aerogeradores ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Estes aerogeradores normalmente são colocados em regiões bem ventosas, geralmente em áreas de maior altitude (LOPES; SILVA; SANTOS, 2017). As principais turbinas eólicas desenvolvidas na atualidade são as de eixo horizontal e as de eixo vertical, sendo basicamente compostas por elementos como: pás, eixo do rotor, cabos de amarração, caixa de engrenagens, gerador e torre de sustentação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o avanço da tecnologia e o dimensionamento de aerogeradores cada vez mais modernos e otimizados, podemos melhor aproveitar os recursos eólicos com a elaboração de conceitos de projeto para análise antes da real execução. A realização de análise por meios computacionais torna-se essencial para entender e selecionar as melhores otimizações que um sistema eólico possa vir a ter, garantindo a integridade do mesmo e eficiência na geração de energia. O desenvolvimento de um projeto em ambiente computacional permite fazer comparação da capacidade de geração de cada tipo de turbina projetada, fazendo com que a proposta do projeto se adeque a aplicação desejada (SOUZA, 2018).

Os centros urbanos são um dos maiores consumidores de energia elétrica no país, deste modo, a possibilidade da instalação de aerogeradores de eixo vertical nas cidades é considerada um meio viável para contribuição à matriz energética de um país (ALVES, 2013). Os aerogeradores de eixo vertical não necessitam de dispositivo de orientação da turbina face ao vento, tal como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal, deste modo, tornam-se estruturas aptas para serem instaladas em teto de casas ou no topo dos edifícios.

Segundo Caser e Paiva (2016) a velocidade do vento é um dos parâmetros mais importantes para a definição do local de instalação de turbinas eólicas, sendo os locais de menor rugosidade¹ ou de maior altitude, ótimos candidatos para a implementação desta tecnologia, enquanto que a instalação em centros urbanos torna-se um desafio maior, devido a barreira gerada por casas e edifícios para a passagem do fluxo de ar.

Portanto, trabalhar no desenvolvimento e análise de rotores de aerogeradores de eixo vertical com o uso de ferramentas de simulação como *softwares* de modelagem CAD (*Computer Aided Design*) e análises CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é uma forma viável de projetar e adaptar um sistema de geração de energia eólico, afim de identificar e definir os parâmetros adequados para garantir funcionalidade e eficiência de um aerogerador. O estado do Rio Grande do Sul é um candidato em potencial para a instalação de aerogeradores de eixo vertical, possuindo grandes centros urbanos que possibilitam a instalação dessas máquinas. Devido a baixa quantidade de estudos voltados a estes equipamentos eólicos nessa região, sendo

¹ Parametrização das características dos elementos distribuídos sobre o terreno que interferem na modelagem do escoamento do vento próximo a superfície.

por fatores de fabricação e disponibilização comercialização em escala baixa, este trabalho visa contribuir com a seleção de modelos de rotores de aerogeradores que possam vir a contribuir com necessidades energéticas de um centro urbano.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo a análise de fatores aerodinâmicos para aerogeradores de eixo vertical do tipo Darrieus, Darrieus H e Savonius, sendo estes os modelos mais estudados e conhecidos, a fim de determinar o modelo de rotor mais adequado para aplicação em meios urbanos no estado do Rio Grande do Sul.

1.2.1 Objetivos específicos

A seleção de rotores de aerogeradores de eixo vertical exige aprofundamento em conceitos eólicos do ambiente de aplicação assim como a determinação de parâmetros dimensionais do equipamento em estudo. Para este trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Análise de parâmetros dimensionais e de performance de aerogeradores de eixo vertical disponíveis na bibliografia;
- Análise específica de modelos de aerogeradores com rotores do tipo Darrieus, Darrieus H e Savonius, a fim de verificar a viabilidade de cada modelo para a implementação em áreas urbanas;
- Utilização de parâmetros geométricos como a velocidade do vento e a rugosidade do relevo para comparação entre os modelos de rotores que entreguem níveis eficientes de geração de energia de acordo com as condições geográficas de cada região.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

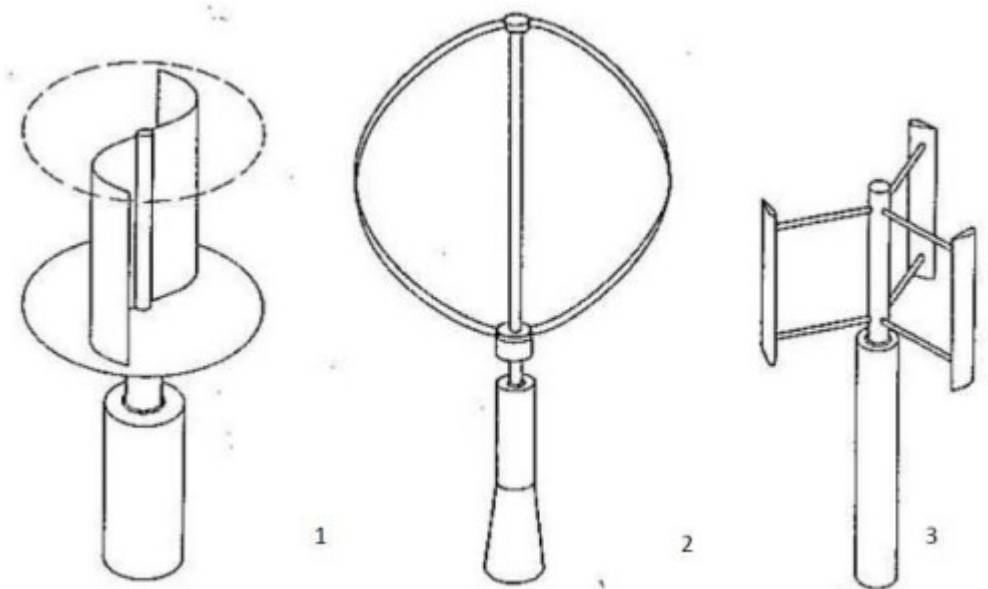
Este trabalho aborda um breve estudo sobre aerogeradores de eixo vertical, dando enfoque aos modelos de rotores mais comumente utilizados para aproveitamento da energia eólica. Nesta seção serão abordados temas que influenciam diretamente no aspecto de geração de energia dessas máquinas, assim como conceitos de funcionamento e parametrização das mesmas.

2.1 AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL

Os aerogeradores de eixo vertical são estruturas mais simples se compararmos aos de eixo horizontal, pois possuem a vantagem de não precisarem de mecanismos de acompanhamento para as variações de direção do vento. Devido ao seu formato, possui complexidade de projeto reduzida e os esforços devido às forças de Coriolis são menores. Estes modelos de aerogeradores, também chamados de rotores, de eixo vertical também podem ser movidos pelas forças de sustentação (*lift*) e pelas forças de arrasto (*drag*).

Segundo Alves (2013) podemos classificar como principais tipos de aerogeradores de eixo vertical os seguintes tipos: Darrieus, Savonius e Darrieus H, todos estes com o seu design disposto na Figura 1.

Figura 1 – Modelos de aerogeradores: Savonius (1); Darrieus (2); Darrieus H



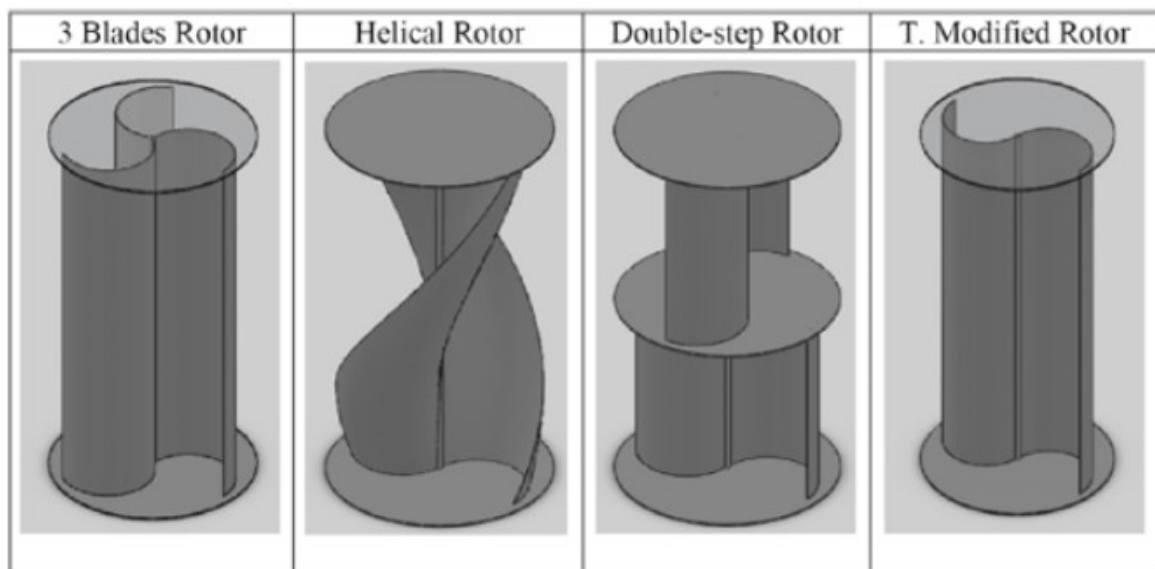
Fonte: (Alves, 2013)

2.1.1 ROTORES DO TIPO SAVONIUS

Os rotores do tipo Savonius são movidos, principalmente, pela força de arrasto, ou seja, as turbinas giram devido a pressão do ar sobre as pás. É o modelo de rotor mais simples, e sua maior eficiência pode chegar a 20% (ECOSOLAR E.R., 2018). Desenvolvido e patenteado em 1929 por Sigurd J. Savonius, de Helsingfors na Finlândia, possui como características a simplicidade em sua construção, um alto torque na partida e em plena operação, aceitação de vento de qualquer direção para o funcionamento, baixo ruído e velocidade angular reduzida, reduzindo assim o desgaste das partes móveis do equipamento (AKWA & PETRY, 2011).

O conceito deste tipo de rotor consiste na união de duas meias-canais em sentidos opostos e apoiadas pelo eixo vertical. Esta sobreposição das canas leva ao aparecimento das componentes aerodinâmicas. Segundo Caser e Paiva (2016), a turbina Savonius ao longo dos anos ganhou diversas variações em seu design original e atualmente existem em 4 diferentes designs, a Savonius de três pás, a de pás helicoidais, o rotor de dois estágios e o rotor de apenas um estágio e duas pás, conforme é exibido na Figura 2.

Figura 2 – Design atuais de rotores do tipo Savonius.

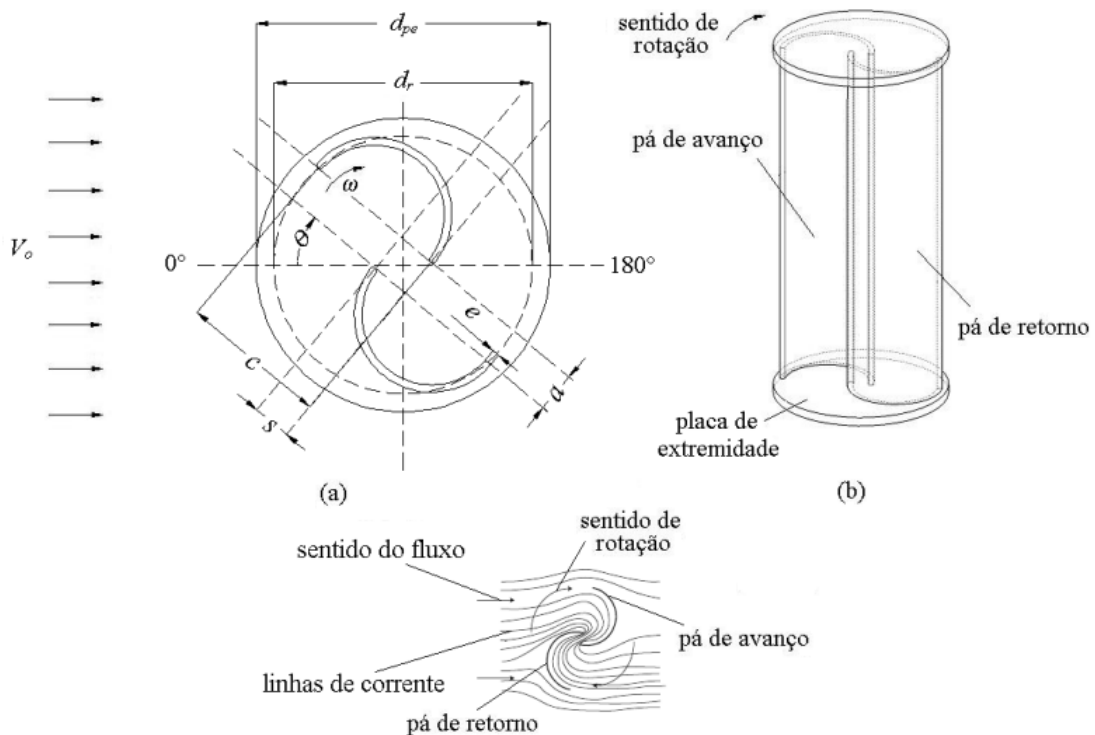


Fonte: Caser e Paiva (2016)

Abaixo os esquemas explicativos ajudam a entender os parâmetros geométricos de um rotor Savonius com pás de seção semicircular e o escoamento bidimensional sobre o mesmo. O vento, cuja velocidade não perturbada é igual a V_0 , incide nas pás do rotor que pode adquirir

torque positivo, dependendo da velocidade angular, ω , na qual o rotor está operando. Na Figura 3, θ indica a posição angular da pá de avanço, que passa a ser denominada de pá de retorno quando θ atingir valor superior a 180° . Outros parâmetros geométricos representados por essa figura são a corda da pá, c , o afastamento, a , a sobreposição, s , e a espessura das pás, e .

Figura 3 – Esquema explicativo das dimensões de um aerogerador Savonius



Fonte: Akwa e Petry (2011)

2.1.2 ROTORES DO TIPO DARRIEUS

Os rotores do tipo Darrieus possuem perfil aerodinâmico desenhado de forma semelhante às asas dos aviões, de modo a criar sustentação para se movimentar e gerar energia. Em 1926, G. J. M. Darrieus desenvolveu e gerou a patente de seus estudos sobre aerogeradores de eixo vertical que fazem uso das forças de sustentação exercidas nas pás para movimentação. Os aerogeradores que utilizavam este tipo de rotor ficaram conhecidos como aerogeradores tipo Darrieus, Figura 4.

Figura 4 – Aerogerador tipo Darrieus

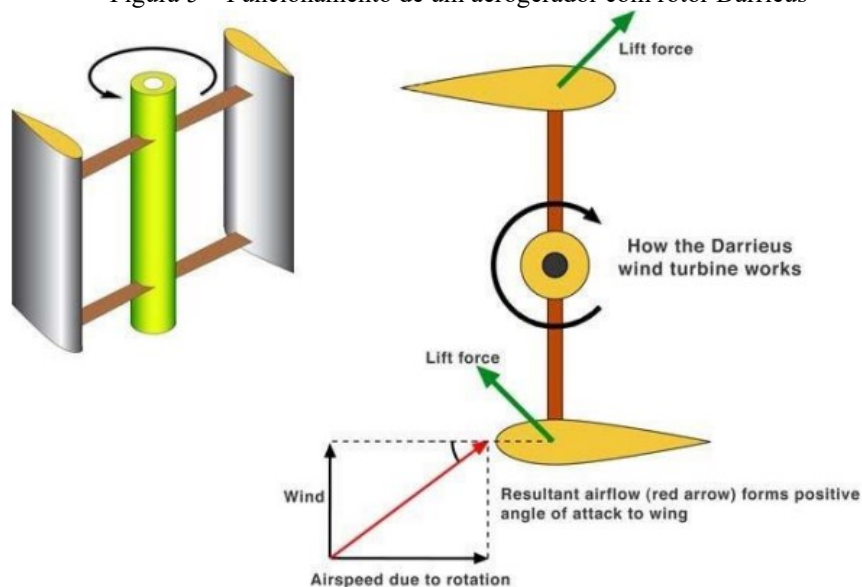


Fonte: EcoSolar E. R. (2019)

Estes aerogeradores apresentam uma eficiência maior se comparado aos rotores Savonius, já que, devido ao design de seu perfil, alcançam velocidades maiores que a real velocidade do vento, fazendo com que esse modelo seja bastante adequado para a geração de eletricidade (MEIRA; OLIVEIRA, 2020).

O ângulo de ataque gerado pelo fluxo de ar no rotor gera uma força que é transformada em um torque positivo para o eixo, auxiliando o conjunto a rotacionar no mesmo sentido que já está em rotação, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Funcionamento de um aerogerador com rotor Darrieus

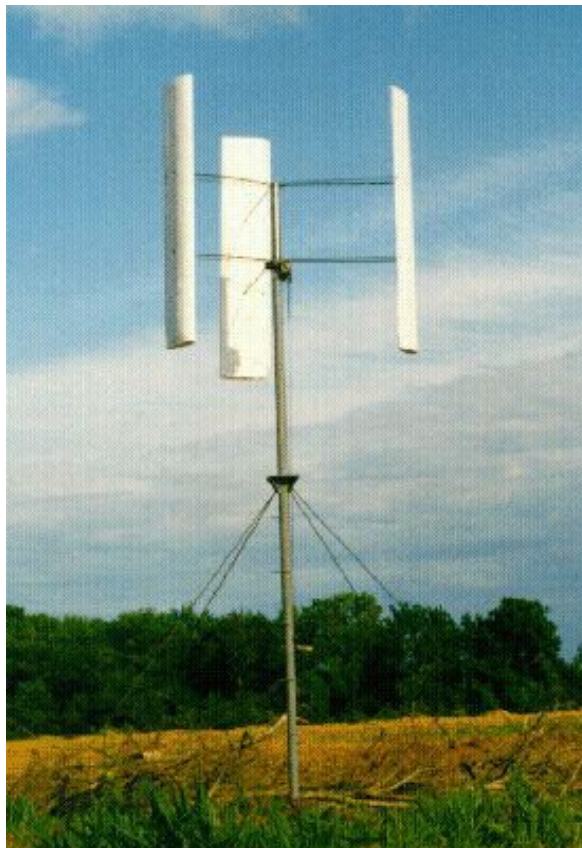


Fonte: Meira e Oliveira (2010)

2.1.3 ROTORES DO TIPO DARRIEUS H

Os aerogeradores com rotores Darrieus H são uma variação dos rotores Darrieus. O mecanismo de funcionamento desenvolvido é o mesmo do rotor original, porém com uma geometria mais simples para reduzir custos de produção e facilitar o transporte das pás (MAIA, 2018). Esse modelo consiste na disposição de pás verticais alinhadas radialmente e conectadas ao eixo por meio de suportes horizontais, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Aerogerador de eixo vertical com rotor Darrieus H



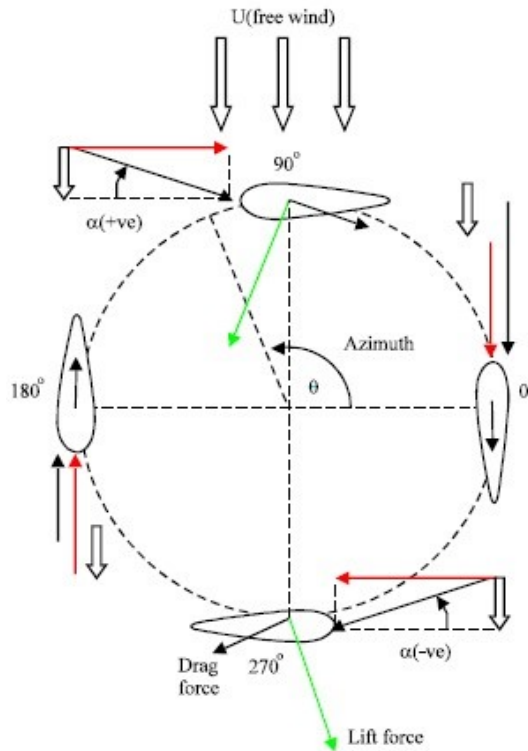
Fonte: Wind energy the facts (2021)

De acordo com Ragheb (2011) *apud* Maia (2018) este tipo de aerogerador tem sido pouco comercializado e normalmente é destinado a uso de baixa escala². Devido a sua geometria, a cada posição que a pá se posiciona, recebe o vento de uma forma diferente e apresenta um rendimento energético ligeiramente superior ao da turbina Darrieus de pás curvas,

² Destinado para uso em pequenas estações de geração de energia eólica.

isso devido a sua área de passagem de escoamento ser maior. (SOUSA; JUNIOR; SOUSA, 2018). A Figura 7 – Funcionamento de um aerogerador com rotor Darrieus. A Figura 7 ilustra um esquema dos parâmetros de funcionamento de um rotor Darrieus H.

Figura 7 – Funcionamento de um aerogerador com rotor Darrieus H



Fonte: Stroski (2019)

2.2 FATORES DETERMINANTES NA POTÊNCIA E TORQUE DOS AEROMOTORES

A potência de saída de um aerogerador é dada em função da velocidade do vento que incide na turbina, da densidade do ar, do diâmetro do rotor e do coeficiente de potência, conforme exemplifica a Equação 1.

Equação 1- Potência de saída

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A_r \cdot C_p \cdot \eta$$

Onde:

ρ = densidade do ar seco (kg/m³);

v^3 = velocidade média do vento (m/s);

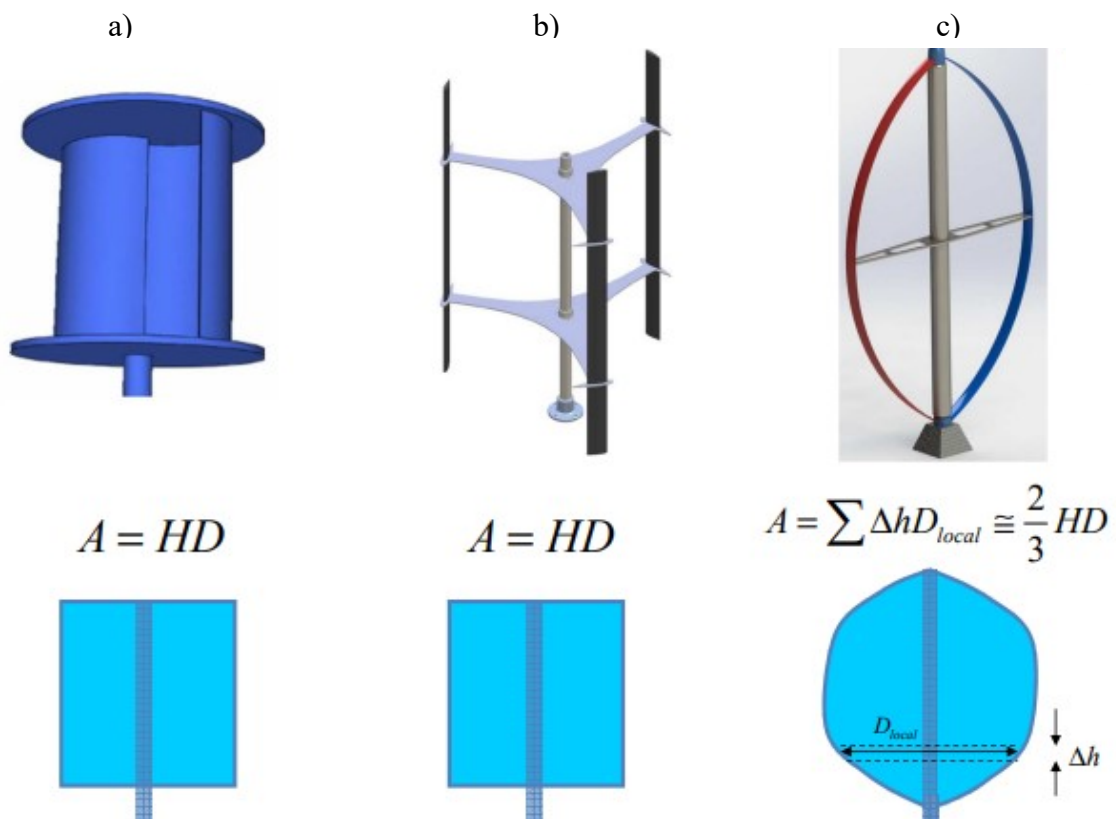
A_r = Área varrida (m^2);

C_p = coeficiente de potência;

η = rendimento global do aerogerador.

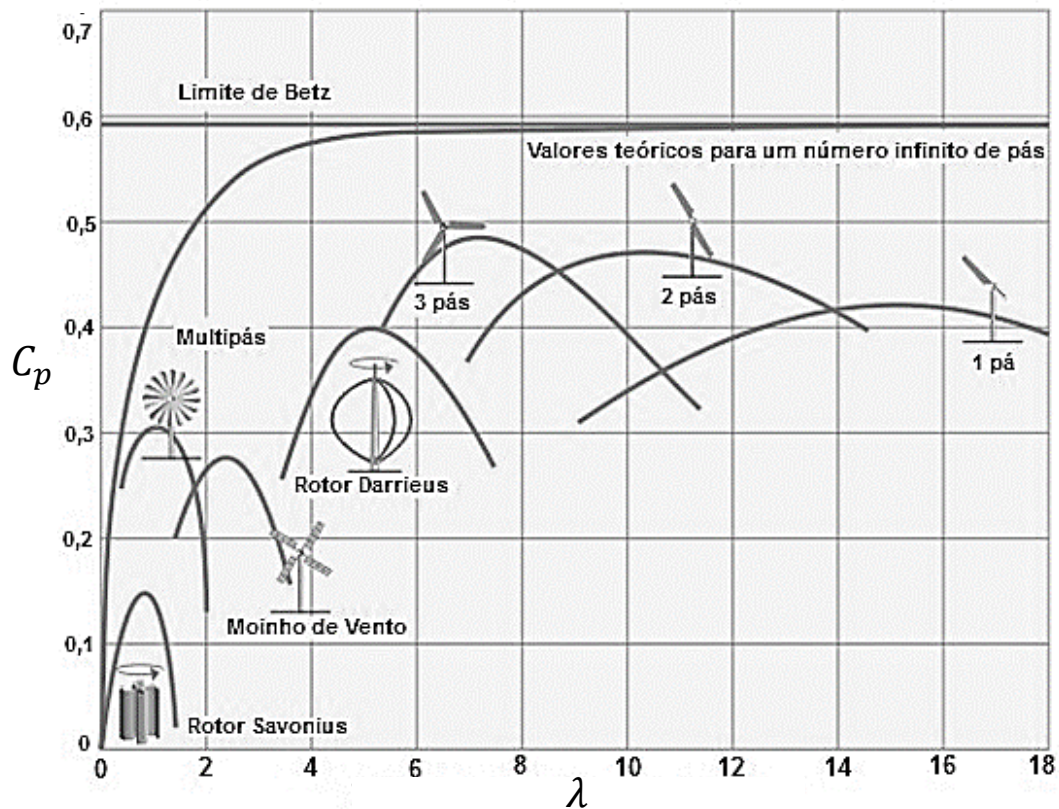
A área varrida é definida de acordo com o modelo de aerogerador empregado. Na Figura 8 temos expostas as equações de área varrida para o Rotor Savonius em a), para o rotor Darrieus H em b) e para o Rotor Darrieus em c).

Figura 8 – Área varrida para modelos de aerogeradores de eixo vertical



Fonte: Adaptado de Alé (2013)

A variável C_p coeficiente de potência define o quanto de potência pode ser retirada do vento por uma máquina eólica, sendo introduzido pela Teoria de Betz. Segundo Geroto (2011), o máximo coeficiente de potência teórica alcançada por uma turbina eólica é de 0,593, sendo este o limite de Betz. Este limite indica que, mesmo para os melhores aproveitamentos eólicos (turbinas de 2 ou 3 pás), recupera-se apenas um máximo de 59% da energia do vento. Na figura Figura 9 temos o limite de Betz demonstrado graficamente e os valores típicos de C_p para os modelos mais comuns de aerogeradores em função λ da razão de velocidade.

Figura 9 – Valores de C_p em função λ para cada modelo de rotor

Fonte: Bazzo (2017)

O coeficiente de potência C_p representa a eficiência aerodinâmica do aerogerador, sendo em função da razão de velocidade de ponta de pá (*Tip Speed Ratio (TSR)*). A razão de velocidade da ponta da pá pode ser definida pela Equação 2:

Equação 2 – Razão de velocidade de ponta de pá

$$\lambda = \frac{\omega r}{v}$$

Onde:

λ = razão de velocidade de ponta de pá;

ω = frequência rotacional (rad/s);

r = raio da turbina (m);

v = velocidade do vento (m/s).

Um fator que influencia na rotação máxima que um aerogerador é capaz de desenvolver quando submetido a um determinado fluxo de ar é a solidicidade, sendo uma relação da área das pás pela área varrida pelo vento. Seu desenvolvimento é expresso pela

Equação 3.

Equação 3 - Índice de solidicidade

$$\sigma = \frac{Bc}{r}$$

Onde:

σ = solidicidade;

B = número de pás;

c = corda da pá (m);

r = raio da turbina (m).

Quanto maior o valor da solidicidade, menor será a rotação máxima desenvolvida pelo aerogerador, relacionando diretamente com o C_p desenvolvido pelo equipamento.

O coeficiente de torque C_m determina a eficiência aerodinâmica da máquina eólica em relação ao torque gerado no eixo. É escrito em função da velocidade do vento no local, área varrida pelo aerogerador, raio da turbina e torque, conforme a Equação 4.

Equação 4 - Coeficiente de Torque

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_r}$$

Onde:

C_m = coeficiente de torque;

T = torque no eixo do aerogerador (Nm);

ρ = densidade do ar seco (kg/m³);

v = velocidade do vento (m/s);

A_r = área varrida (m²);

r = raio do rotor (m).

O C_m também pode ser definido pela razão entre o C_p e a velocidade da ponta da pá (TSR), Equação 5.

Equação 5 – C_m em função do TSR e do C_p

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda}$$

2.3 FORÇAS AERODINÂMICAS

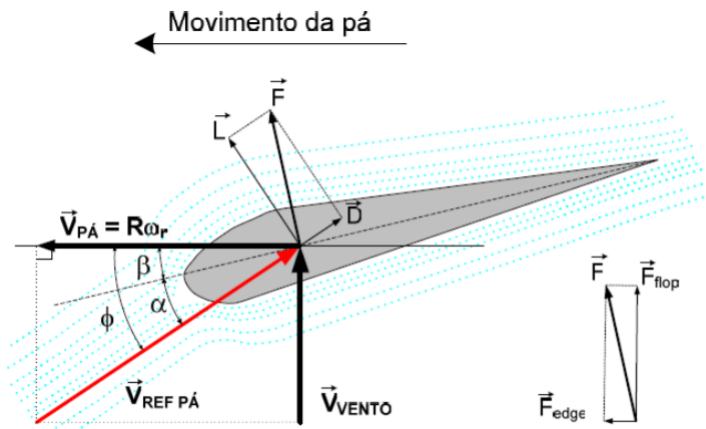
De acordo com as iterações das pás, as turbinas eólicas são classificadas em turbinas de arraste e sustentação. A operação de cada tipo de turbina é respectivamente caracterizada pelo predomínio de cada uma dessas forças, devido a aspectos construtivos (ROCHA, 2008).

As turbinas de arraste são caracterizadas devido à ação do vento empurrar as pás, forçando o rotor a girar em volta de seu eixo. Esse tipo de turbina apresenta uma desvantagem, pois a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento, limitando assim sua eficiência. Sua utilização é usualmente aplicada em áreas rurais para bombear pequenos volumes de água com ventos de baixa velocidade.

As asas dos aviões têm características aerodinâmicas similares às turbinas de sustentação. O vento passa mais rapidamente sobre a superfície mais longa da pá, o que resulta em uma área de baixa pressão. A diferença de pressão entre as duas superfícies gera uma força de sustentação. Em uma asa de avião, isto ocasiona uma força de elevação, mas no caso das pás das turbinas, pelo fato delas serem confinadas a se mover em um plano, as forças de sustentação ocasionam sua rotação.

Segundo Matte (2014) as forças aerodinâmicas em um aerogerador é a resultante das componentes de sustentação e arraste. A Figura 10 ilustrada as forças que atuam sobre o perfil de pá de um aerogerador.

Figura 10 – Diagrama de velocidade e forças atuantes sobre uma pá de turbina.



Fonte: Rocha (2008).

Onde:

\vec{v}_{vento} : Velocidade do vento incidente sobre a turbina;

$\vec{v}_{PÁ}$: Velocidade tangencial da seção da pá;

$\vec{v}_{REF PÁ}$: Velocidade do vento vista do referencial da pá;

α : ângulo entre $\vec{v}_{PÁ}$ e a linha de corda, chamado de ângulo de ataque;

β : Ângulo entre $\vec{v}_{PÁ}$ e a linha de corda, chamado de ângulo de passo;

\vec{D} : Força de arrasto;

\vec{L} : Força de sustentação;

\vec{F}_{FLAP} : Componente da força resultante na pá, na direção normal ao plano de movimento;

\vec{F}_{Edge} : Componente da força resultante na pá, na direção tangencial ao plano de movimento.

As componentes das forças que determinam a rotação de uma turbina são definidas pela Equação 6:

Equação 6 – Componentes que determinam a rotação da turbina

$$\begin{cases} \vec{F}_{Edge} = \vec{L} \cdot \text{sen}(\phi) - \vec{D} \cdot \text{cos}(\phi) \\ \vec{F}_{FLAP} = \vec{L} \cdot \text{cos}(\phi) + \vec{D} \cdot \text{sen}(\phi) \end{cases}$$

Para a mesma velocidade de rotação e vento incidente em uma turbina, o ângulo θ não se altera. Assim as componentes das forças resultantes tangencial ao plano de movimento podem ser alteradas conforme as componentes \vec{D} e \vec{L} .

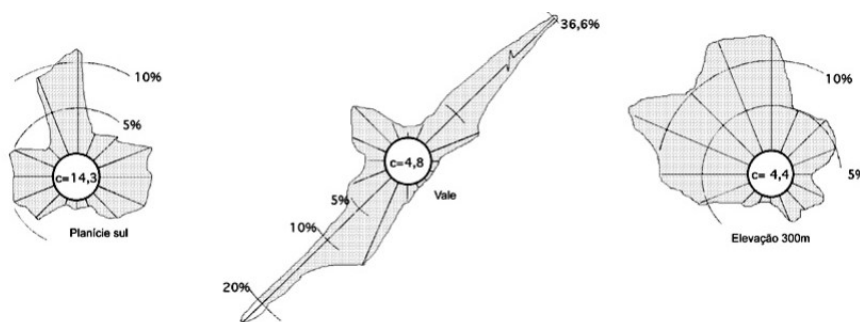
Rocha (2008) *apud* Matte (2014), afirma que a intensidade das componentes tem influência direta do ângulo de ataque da pá da turbina. O ângulo de ataque próximo de 90° exerce a máxima força de arrasto, enquanto que a mínima é exercida para um ângulo de 0° . Já a força de sustentação é máxima para um ângulo de ataque de aproximadamente 15° . Acima desse valor, a força de sustentação é reduzida devido a um fenômeno conhecido como estol³. Deste modo, as componentes da força resultante responsáveis pelo movimento da pá podem ser controladas com a alteração do ângulo de ataque α .

Apesar de o ângulo de ataque ter influência direta nas forças aerodinâmicas, Rocha (2008) cita que é mais conveniente expressar a potência desenvolvida pelo mesmo em função do ângulo de passo (β), cujas medições e controles são mais simples.

2.4 VELOCIDADE DO VENTO

O vento é definido basicamente por dois parâmetros essenciais: direção e velocidade. A direção do vento e a sua velocidade ao longo do tempo conduzem a construção da rosa dos ventos, Figura 11.

Figura 11 – Rosa dos ventos características para um fluxo dominante dentro de um vale; em uma planície e acima das elevações extremas de um vale



Fonte: Junior (2008)

³ Perca de sustentação devido ao aumento do ângulo de ataque das pás, fazendo com que o escoamento do vento se descole da face superior das pás, gerando turbulências entre o escoamento do ar e da superfície da pá, aumentando consequentemente a força de arrasto.

De acordo com Junior (2008), a velocidade média dos ventos pode variar entre 3 e 7 m/s de acordo com as condições meteorológicas. Nas costas e em vales mais ou menos estreitos é mais elevada, mais de 6 m/s e nas demais regiões a velocidade pode variar, de 3 a 4 m/s, sendo bem mais elevada nas montanhas, dependendo da altitude e da topografia.

2.5 RUGOSIDADE DO RELEVO

A velocidade do vento varia de acordo com a altitude, sendo determinada pela Equação 7, onde podemos representar a velocidade do vento em duas alturas distintas com base na rugosidade do relevo.

Equação 7 – Velocidade do vento de acordo com a altitude

$$v(h_2) = v_1(h_1) \frac{\ln \frac{h_2}{z_0}}{\ln \frac{h_1}{z_0}}$$

Onde $v_1(h_1)$ é a velocidade do vento na altura h_1 , $v_2(h_2)$ é a velocidade do vento altura h_2 e z_0 é a rugosidade do relevo, sendo dispostos na Figura 12 para cada situação do terreno.

O valor z_0 corresponde ao comprimento de rugosidade na altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor igual a zero (LIRA *et al*, 2017).

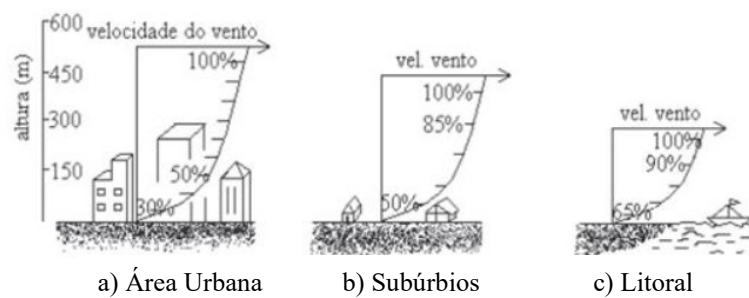
Figura 12 – Rugosidade do relevo de acordo com o tipo de cobertura do terreno

Tipo de Cobertura e/ou uso da terra	Faixa de Rugosidade Z_0 [m]
Áreas urbanas	0,7 - 3
Florestas	0,4 - 1
Reflorestamento	0,4 - 0,95
Vegetação de áreas úmidas	0,1 - 0,4
Culturas agrícolas	0,02 - 0,15
Pastagens	0,02 - 0,20
Solo exposto	0,001 - 0,01
Corpos de água [lagos, oceano] sem vento de superfície	0,0002 - 0,001

Fonte: Atlas eólico do Rio Grande do Sul (2014).

Conforme o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014) o fluxo dos ventos que corre mais próximo à superfície perde energia devido o atrito causado pelo contato com a vegetação e obstruções, como os prédios e as construções. Por este fator o fluxo de vento normalmente é de menor intensidade e apresenta maior turbulência. A Figura 13 ilustra o fluxo de vento em regiões de diferentes rugosidades e o limite onde a rugosidade possui influência sobre a corrente de ar em movimento.

Figura 13 – Influência da rugosidade de acordo com a camada limite terrestre para a) Áreas urbanas; b) Subúrbios e c) Litoral.



Fonte: Adaptado de Lage (2011)

2.6 RENDIMENTO AERODINÂMICO η

É definido como a relação entre potência gerada pelo aerogerador e a energia do vento que atravessa o rotor, conforme ilustra a Equação 8.

Equação 8 – Rendimento aerodinâmico de um aerogerador

$$\eta = \frac{B}{\frac{\rho A v^3}{2}}$$

Onde:

B = Número de pás;

ρ = Densidade do Ar (kg/m^3);

A = Área do rotor (m^2);

v = Velocidade do vento (m/s).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros aerodinâmicos dos aerogeradores em questão foram obtidos por meio de dados que constam na bibliografia. Esses dados foram utilizados para definição de parâmetros importantes para a seleção de modelos de rotores que podem vir a ser dimensionados para uso em meios urbanos. A região de aplicação para determinado modelo de aerogeradores de eixo vertical é fundamentada no estado do Rio Grande do Sul.

3.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Este trabalho trata-se de um projeto de geração de energia eólica. Por esta razão, o primeiro parâmetro a ser analisado é a velocidade média do vento da região onde pretende-se alocar um aerogerador. É de suma importância o estudo do vento no local uma vez que ele determinará a viabilidade potencial e econômica para a implantação do projeto, pois sabe-se que a energia gerada pelas turbinas eólicas é convertida da energia cinética proveniente do vento.

Para análise de base de dados de velocidade do vento, será focado nas regiões presentes no estado do Rio Grande do Sul. A velocidade do vento será obtida mediante consulta aos dados disponibilizados pelo Atlas Climático da região sul do Brasil (2012).

3.1.1 Média das velocidades do Vento no Rio Grande do Sul

Na Figura 14, temos a ilustração das médias de velocidade por ano acordo com a condição geográfica de cada região do estado no período de 1976-2005. De acordo com o Atlas Climático da região sul do Brasil (2012), as médias das velocidades foram registradas a 2,0 metros de altura, tendo como fonte de dados a rede de estações meteorológicas do IAPAR⁴, da EPAGRI⁵, da FEPAGRO⁶ e do 8º DISME/INMET⁷, das estações da Embrapa⁸ Clima

⁴ Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná.

⁵ Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina.

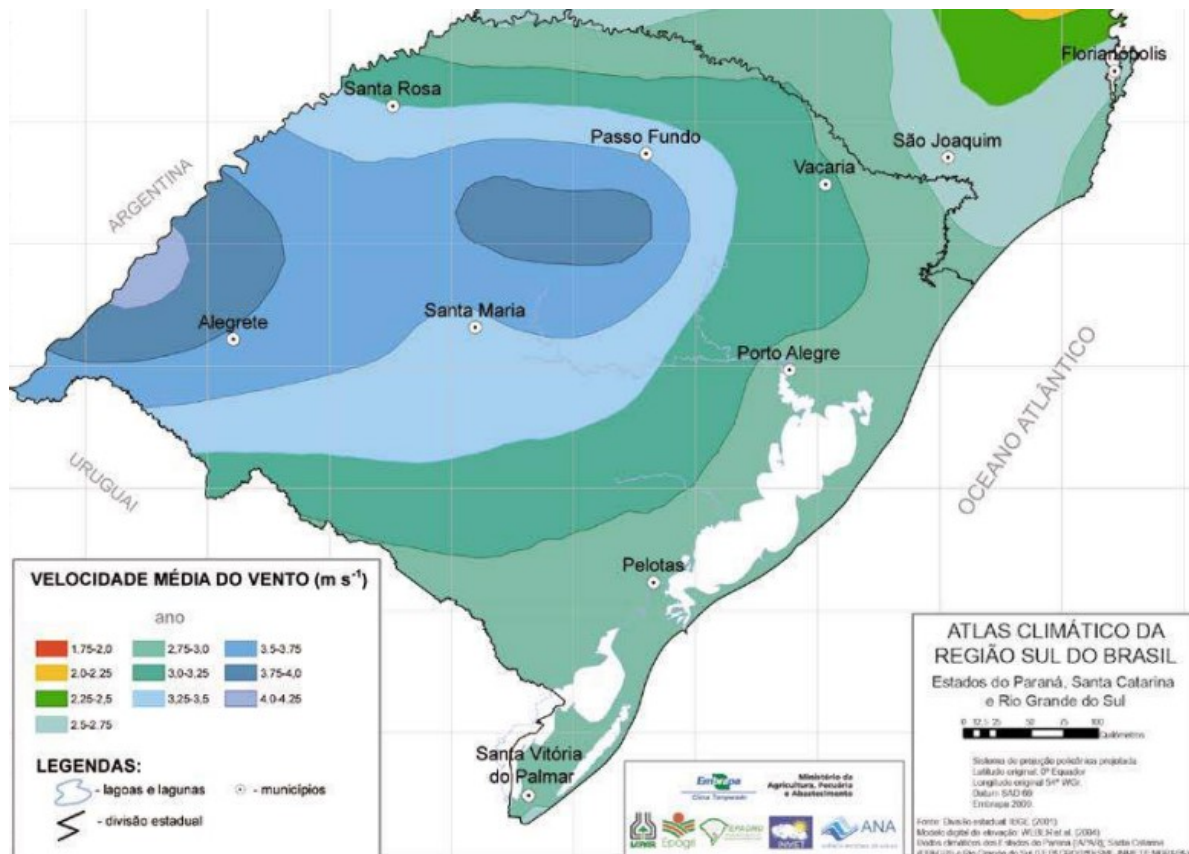
⁶ Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária.

⁷ Distrito de Meteorologia/ Instituto Nacional de Meteorologia.

⁸ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Temperado e da Embrapa Trigo. O cálculo para as velocidades foi desenvolvido a partir da média aritmética mensal, estacional e anual dos valores diários no período 1976-2005.

Figura 14 – Média das velocidades anuais do vento na Região Sul do país



Fonte: Atlas eólico do Região sul do Brasil (2014)

3.1.2 Fator de rugosidade e velocidade do vento

Devido as edificações em centros urbanos e demais condições do relevo a velocidade do vento é muito variável, tanto geograficamente quanto temporalmente, sendo influenciado por diferentes aspectos, que afetam a sua intensidade, direção e sentido (PICCOLO;BUHLER; RAMPINELLI, 2014). O Atlas eólico do Rio Grande do Sul (2014) demonstra graficamente (Figura 15) a rugosidade aerodinâmica medida sobre o relevo de todo o estado, na qual foram mensuradas por meio de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

A Tabela 1 lista a localização de cada estação meteorológica do Rio Grande do Sul disponibilizadas no Atlas Climático da região sul do Brasil (2012), junto da classificação de

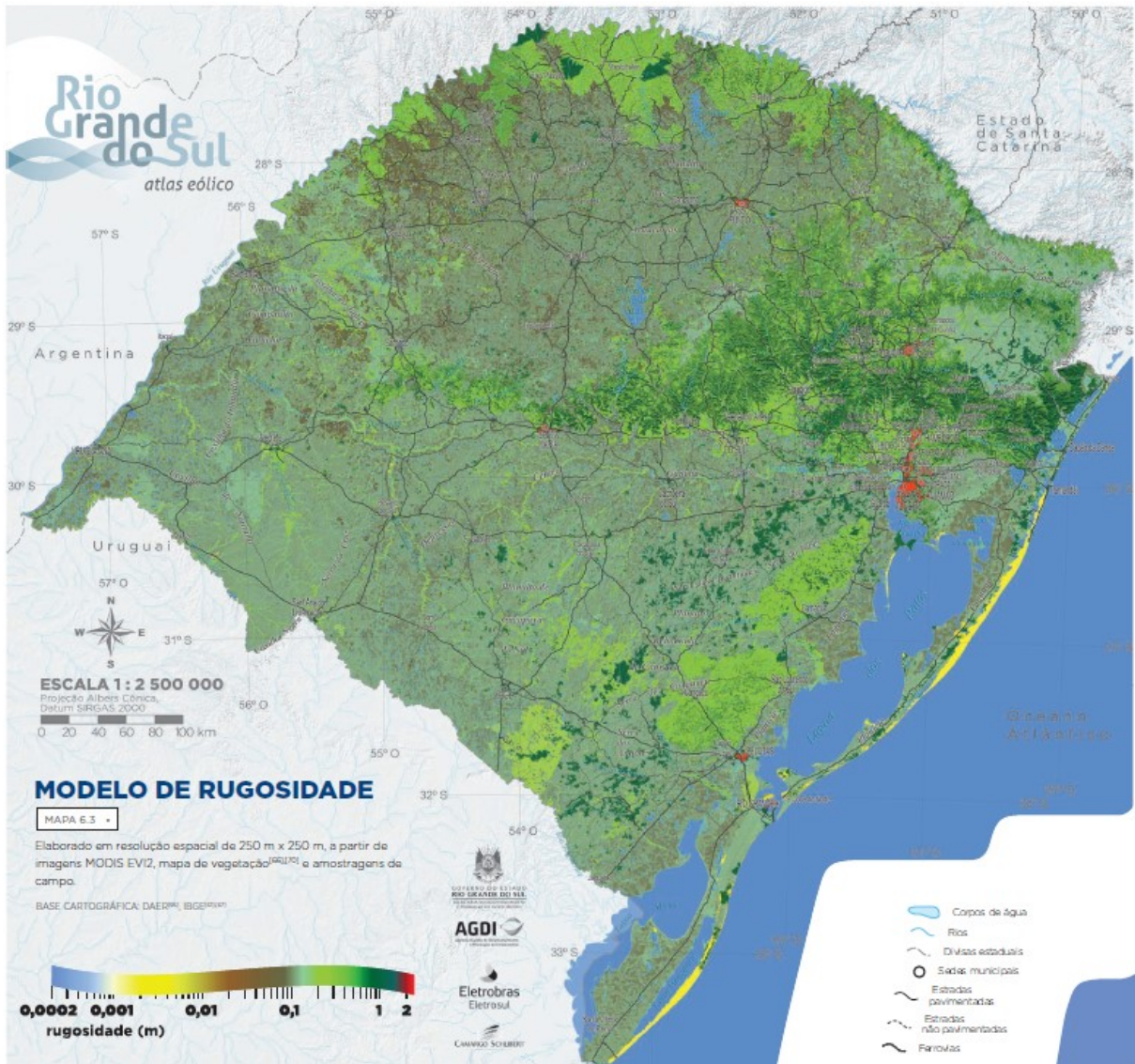
Microrregião e Mesorregião definidas pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e demais de dados de velocidade e rugosidade do relevo.

Tabela 1 – Velocidade média v_m anual do vento a $h_1 = 2\text{m}$ de acordo com regiões delimitadas pelo IBGE, rugosidade z_0 estimada para cada região e velocidade do vento $h_2 = 50\text{m}$.

Cidade da estação meteorológica	Microrregião	Mesorregião	$v_m (h_1)$	z_0	$v_m (h_2)$
Planalto	Frederico Westphalen	Noroeste Rio-grandense	1,5	0,2	3,1
Caxias do Sul	Caxias do Sul	Nordeste Rio-grandense	4,5	2	9,2
Cruz Alta	Cruz Alta	Noroeste Rio-grandense	5,3	0,12	10,8
Encruzilhada do Sul	Serras de Sudeste	Sudeste Rio-grandense	3,4	0,15	6,9
Erechim	Erechim	Noroeste Rio-grandense	2,6	0,9	5,3
Farroupilha	Caxias do Sul	Nordeste Rio-grandense	1,8	0,6	3,7
Itaqui	Campanha Ocidental	Sudoeste Rio-grandense	5,5	0,1	11,2
Júlio de Castilhos	Santiago	Centro Ocidental Rio-grandense	3,9	0,1	7,9
Osório	Osório	Metropolitana de Porto Alegre	2,9	0,7	5,9
Rio Grande	Litoral Lagunar	Sudeste Rio-grandense	2,6	1,9	5,3
Santa Maria	Santa Maria	Centro Ocidental Rio-grandense	2,3	2	4,7
Santa Rosa	Santa Rosa	Noroeste Rio-grandense	2,9	0,09	5,9
São Borja	Campanha Ocidental	Sudoeste Rio-grandense	4,0	0,09	8,2
São Gabriel	Campanha Central	Sudoeste Rio-grandense	3,9	0,2	7,9
Soledade	Soledade	Noroeste Rio-grandense	6,0	0,15	12,2
Taquari	Lajeado-Estrela	Centro Oriental Rio-grandense	2,3	0,6	4,7
Uruguaiana	Campanha Ocidental	Sudoeste Rio-grandense	4,1	0,01	8,4
Veranópolis	Caxias do Sul	Nordeste Rio-grandense	3,0	0,9	6,1

Fonte: Autor (2022)

Figura 15 – Rugosidade do relevo do Rio Grande do Sul determinado pelo Atlas Eólico do Rio Grande do Sul



Fonte: Atlas eólico do Rio Grande do Sul.

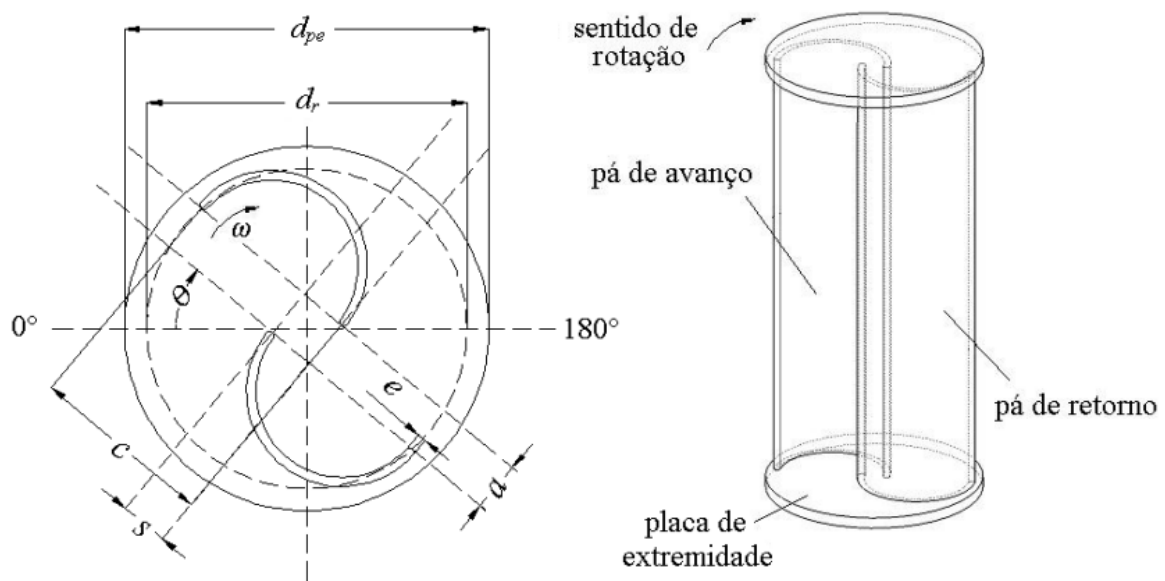
Com base nas velocidades médias anuais do vento retiradas do Atlas Climático da região sul do Brasil (2012) e leitura da rugosidade no gráfico da Figura 15, é possível calcular a velocidade do vento em alturas diferentes em função da rugosidade do relevo, sendo demonstradas na Tabela 1. De acordo com Carmo (2012) os edifícios residenciais de centros urbanos possuem em média 12 andares, o que equivale a cerca de 50 m de altura, sendo este valor então usado para extrapolar a velocidade do vento mediante a Equação 7. De acordo com Lemos (2017), a localização de uma estação meteorológica deve ser em um espaço livre de agentes que interfiram nas medições de velocidade do vento, como construções e vegetações

altas. Por esta razão, como valor de rugosidade z_0 foi utilizado o valor médio do tipo de terreno classificado como pastagens, conforme ilustra a Figura 12.

3.1.3 Definição dos parâmetros do aerogerador Savonius

A dimensões do rotor Savonius de um estágio escolhido para este trabalho são especificados por Akwa e Petry (2011) em seu trabalho, e estão demonstradas na Figura 16.

Figura 16 – Representação dimensional do rotor Savonius

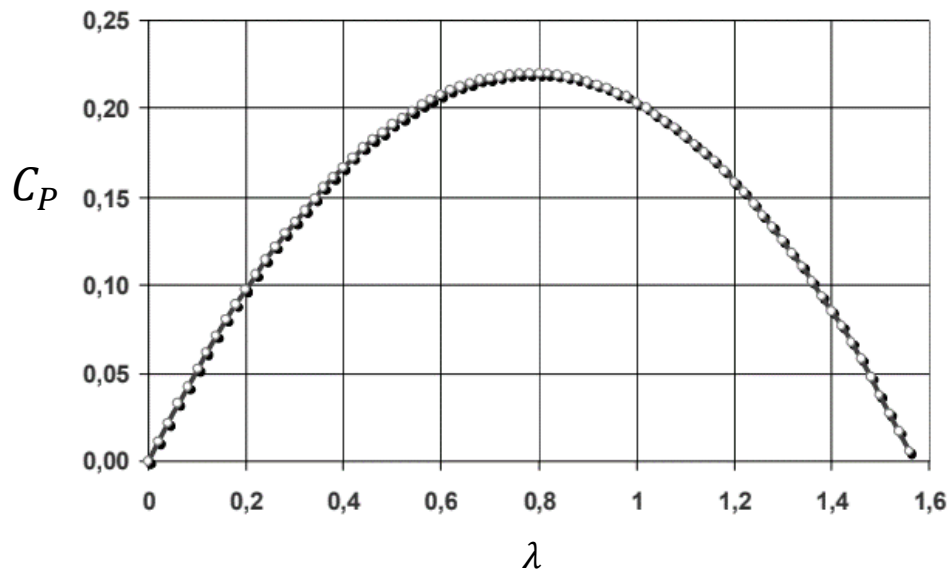


Fonte: Akwa e Petry (2011)

O rotor Savonius em estudo foi considerado contendo um único estágio, com altura h de 2m e d_r igual a 3m, o que corresponde a uma área varrida A_r de 6m^2 para captação da energia do vento. Essas dimensões também foram utilizadas por Geroto (2011). O uso de um ou mais estágios interfere apenas na variação do torque estático, não alterando valores de coeficiente de potência C_p , conforme ilustra o trabalho apresentado por Bianchin, Beck e Seidel (2020)

Na Figura 17 temos os valores de C_p , determinados experimentalmente, demonstrados para os um Rotor Savonius.

Figura 17 – Desempenho aerodinâmico para um Rotor Savonius Ótimo.



Fonte: Adaptado de Alé (2013)

O rendimento aerodinâmico η do aerogerador será considerado 1, pois as perdas mecânicas no sistema não estão sendo consideradas.

O dimensionamento de uma turbina eólica consiste na determinação de uma série de variáveis, como diâmetro do rotor, comprimento e largura das pás, geometria e posicionamento das pás, tipo de configuração das turbinas e tipo de gerador elétrico (que não será abordado neste trabalho). Para o rotor em questão os parâmetros definidos que serão usados para o cálculo de potência estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros do Rotor Savonius

Coefficiente de potência C_p	0,20
Diâmetro do rotor d_r (m)	3
Altura h (m)	2
Área varrida A_r (m ²)	6
Razão de velocidade de ponta da pá λ	1

Fonte: Autor (2022)

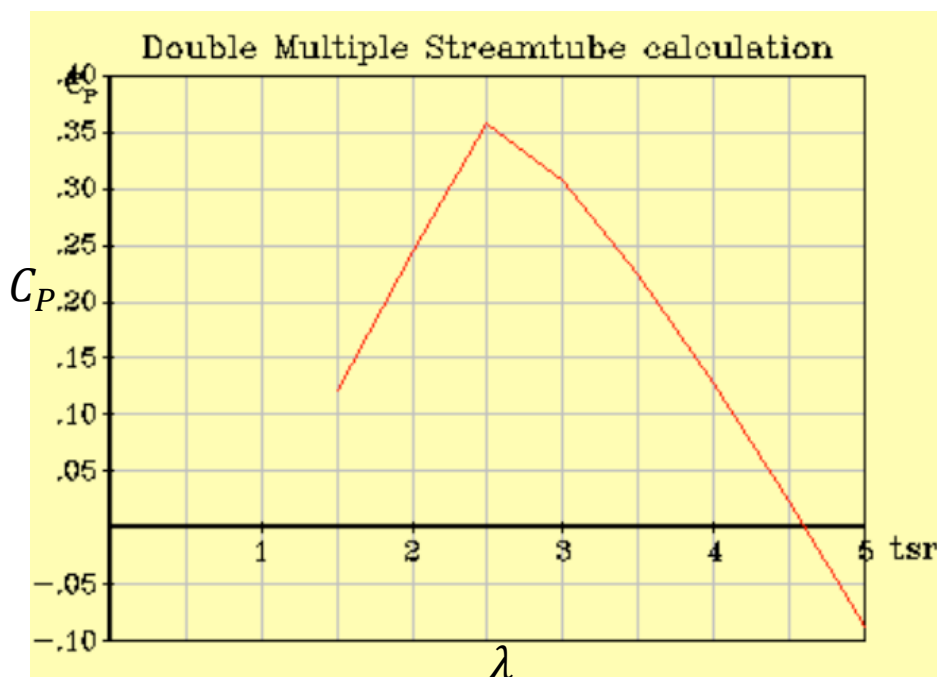
3.1.4 Definição dos parâmetros do aerogerador Darrieus H

Para a definição dos parâmetros de rotor Darrieus H será utilizado um perfil de hélice NACA 0018, contendo 3 pás em sua estrutura, que segundo o trabalho abordado por Geroto (2011), apresentam facilidade de fabricação e um bom desempenho devido a sua solidicidade

de até $\sigma = 0,2$. O rotor Darrieus H em estudo possui diâmetro d_r de 3m a altura h de 2m, sendo as mesmas dimensões usadas para o aerogerador com rotor Savonius.

A Figura 18 apresenta a curva de potência em função da razão de velocidade da ponta da pá λ para aerogeradores com rotor do tipo Darrieus e Darrieus H. Estes valores são determinados através de simulações feitas em tuneis de vento, o qual não será abordado neste trabalho. Por esta maneira, serão utilizados dados já testados e validados para rotores de aerogeradores do tipo Darrius.

Figura 18 – Coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta da pá para rotores Darrieus e Darrieus H.



Fonte: Adaptado de Geroto (2011)

Na Tabela 3 abaixo temos os parâmetros considerados para cálculo de potência do rotor em questão.

Tabela 3 –Parâmetros utilizados para o rotor Darrieus H

Coeficiente de potência C_p	0,36
Diâmetro do rotor d_r (m)	3
Altura h (m)	2
Área varrida A_r (m ²)	6
Razão de velocidade de ponta da pá λ	2,5

Fonte: Autor (2022)

3.1.5 Definição dos parâmetros do aerogerador Darrieus

Para o rotor Darrieus, foram aplicados os mesmos valores de perfil de hélice NACA 0018 utilizados para o rotor Darrieus H. As especificações consideradas são altura h de 2m e diâmetro d_r de 3m. A Tabela 4 especifica os parâmetros utilizados para cálculo de potência desse rotor.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para o rotor Darrieus

Coeficiente de potência C_p	0,36
Diâmetro do rotor d_r (m)	3
Altura h (m)	2
Área varrida A_r (m ²)	4
Razão de velocidade de ponta da pá λ	2,5

Fonte: Autor, 2022.

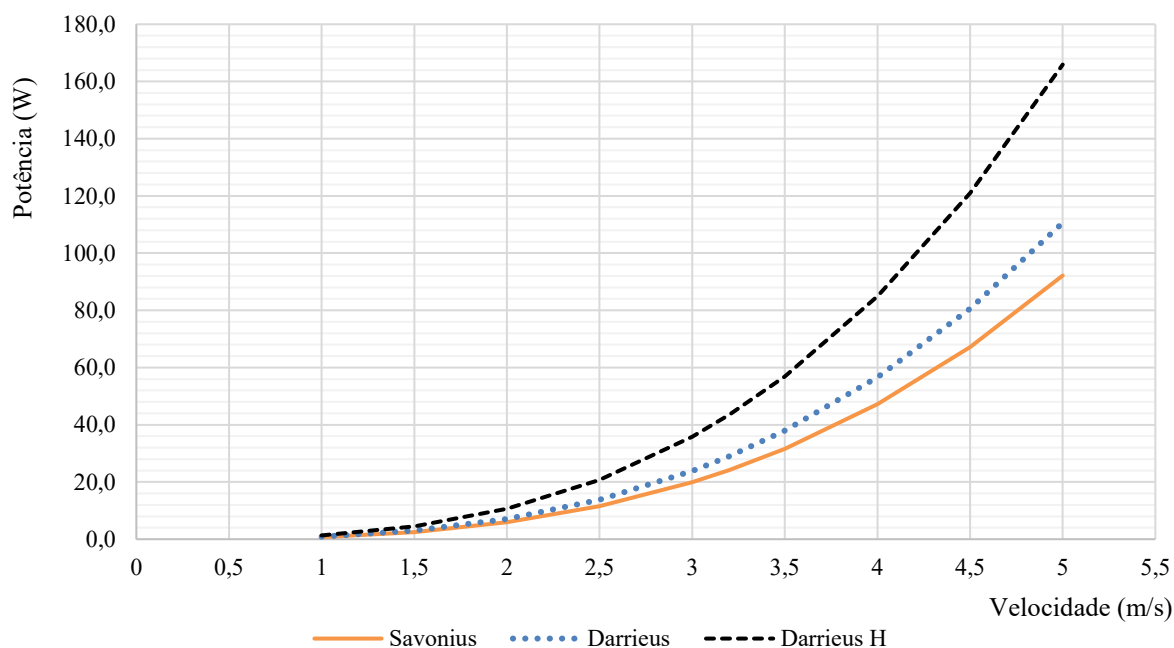
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando dados disponíveis na bibliografia com as condições de vento no Rio Grande do Sul, foi possível analisar a potência fornecida por cada modelo de rotor de aerogerador estudado.

4.1 VARIAÇÕES DE POTÊNCIA

Com base nos parâmetros de dimensionamento de cada rotor nas Tabelas 2, 3 e 4, podemos verificar a variação da potência, por meio da Equação 1, dos aerogeradores em função da velocidade do vento. Na Figura 19 podemos verificar graficamente a potência para cada tipo de rotor de aerogerador em função da velocidade do vento.

Figura 19 – Potência dos rotores analisados em função da velocidade do vento.



Fonte: Autor (2022)

Conforme podemos observar os valores de potência representados graficamente na Figura 19, o rotor Darrieus H apresenta maior potência que os demais para essa faixa de velocidade. Na Tabela 5 podemos verificar os valores de potência para uma velocidade média de 3,2 m/s, sendo esta a média de ventos do Rio Grande do Sul no período de um ano conforme os dados disponibilizados no Atlas Climático da região sul do Brasil (2012).

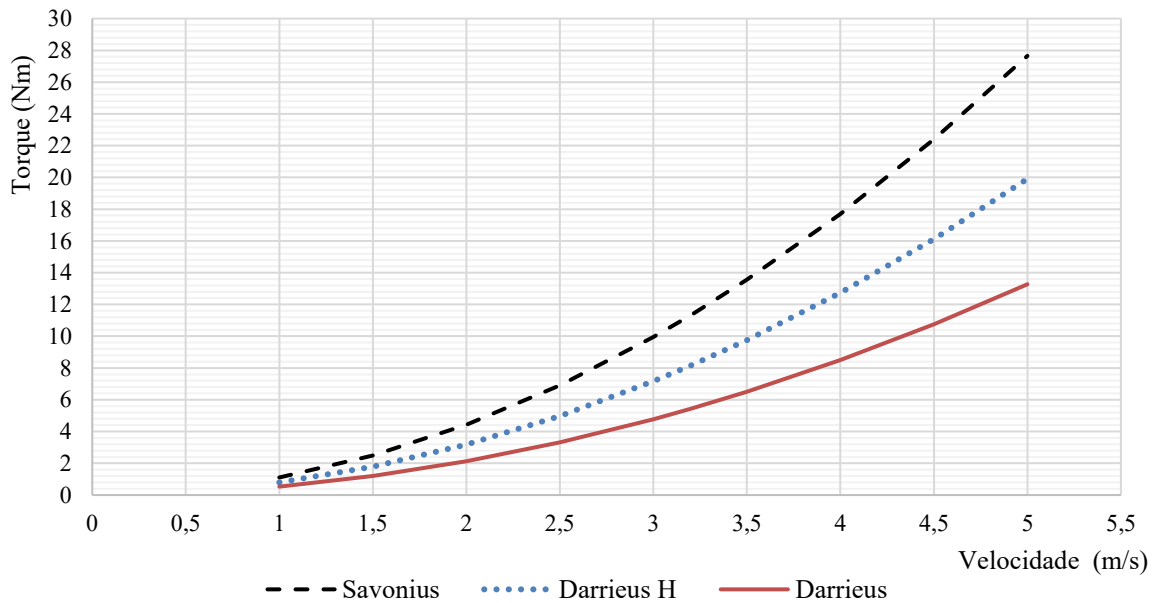
Tabela 5 – Valores analisados para os tipos de rotores com $v_m = 3,2$ m/s

Rotor	v_m (m/s)	Área varrida (m ²)	Potência (W)	Torque (N.m)
Savonius	3,2	6	24,2	11,3
Darrieus H	3,2	6	43,5	8,1
Darrieus	3,2	4	29,0	5,4

Fonte: Autor (2022)

Os rotores Darrieus H e Darrieus apresentam superioridade de potência se compararmos ao rotor Savonius, porém o Savonius apresenta maior Torque, já que há a predominância das forças de arrasto sobre as pás do rotor, sendo a principal característica deste modelo. Na Figura 20 temos um comparativo entre os torques gerados por cada tipo de rotor, sendo este, calculado pela Equação 4.

Figura 20 – Comparativo entre os torques gerados por cada rotor em função da velocidade



Fonte: Autor (2022)

Tabela 6 – Comparativo entre os parâmetros dos rotores com $v_m = 3,2$ m/s

Parâmetros do Rotor	Savonius	Darrieus	Darrieus H
C_p	0,2	0,36	0,36
d_r (m)	3,0	3,0	3,0
h (m)	2,0	2,0	2,0
A_r (m ²)	6,0	6,0	4,0
λ	1,0	2,5	2,5
C_m	0,2	0,1	0,1
T (N.m)	11,3	5,4	8,1
P (W)	24,2	29,0	43,5

Fonte: Autor (2020)

Na Tabela 6 temos um comparativo entre os parâmetros dimensionados para os rotores e valores entregues pelo mesmo. Conforme podemos verificar o rotor do tipo Darrieus H apresenta superioridade de potência até 33% em relação ao rotor Darrieus e 44% em relação ao rotor Savonius. Por esta razão o aerogerador com um rotor do Tipo Darrieus H apresenta maior potência entregue independentemente da velocidade.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os dados obtidos, podemos verificar que o aerogerador Darrieus H apresenta maior potência devido ao fato de possuir uma maior área varrida pelo vento e coeficiente de potência relativamente alto em relação aos demais rotores. O rotor do tipo Darrieus apresentou uma potência inferior ao rotor Darries H, não sendo satisfatória para geração de energia. Este tipo de rotor é o único que apresenta a desvantagem de precisar de um motor de partida, conforme exemplifica Sousa, Junior e Sousa (2018) em seu trabalho. O rotor Savonius apresenta alto torque de partida conforme observado graficamente na Figura 20, porém devido a potência baixa fornecida não se recomenda a aplicação para geração de energia. Normalmente o seu uso se limite a aplicações de baixa potência, como bombeamento de água (GEROTO, 2011).

O rotor Darrieus H pode ser aplicado a qualquer região do estado do Rio Grande do Sul, já que demonstrou uma potência superior nas faixas velocidades testadas, e ao contrário do rotor Savonius, possui disponibilização comercial. Para a aplicação em um centro urbano, o aerogerador com o rotor Darrieus H deve ser posicionado acima da faixa de rugosidade z_0 , onde velocidade do vento é igual a 0, para que se tenha vento o suficiente para movimentar o rotor. Conforme for o espaço de instalação do aerogerador, os valores de velocidade do vento que afetaram o rotor devem ser calculados especificamente de acordo com a geometria das construções e condições geográficas que ficarão próximas. A norma NBR 6123/88 especifica os fatores de velocidade e equacionamento para verificar a viabilidade de implementação de um aerogerador no local selecionado.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar testes experimentais em tuneis de vento para a seleção de perfis de hélice mais eficientes para rotores Darrieus H, assim como variações de altura e diâmetro do rotor para adequação aos espaços disponibilizados para a instalação desse equipamento.

Outra sugestão é o desenvolvimento de rotores Darrieus e Savonius de forma conjugada visando a realização de ensaios experimentais do modelo desenvolvido. Baseando-se nos dados analisados neste trabalho e na literatura estudada, nesta concepção de rotor Savonius contribuiria para o aumento do torque do rotor Darrieus, fazendo com que o mesmo não necessite de acionamentos elétricos para funcionamento inicial.

REFERÊNCIAS

- AKWA, J. V.;PETRY, A. P.. Análise Do Desempenho De Rotores Eólicos Savonius Empregando O Método De Volumes Finitos. Revista Brasileira de Energia Solar, 164-175. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/70/70>
- ALÉ, J. A.. Smal Wind Turbines Technology. Turbinas eólicas de eixo vertical. Porto Alegre, RS, Brasil: PUCRS. Acesso em 20 de 01 de 2022 , disponível em https://app.eventize.com.br/upload/000388/files/3_%20TURBINAS%20EOLICAS%20DE%20EIXO%20VERTICAL.pdf
- ALVES, J. E.. EcoDebate. Acesso em 2021 de 11 de 08, disponível em Turbina eólica vertical urbana, artigo de José Eustáquio Diniz Alves: <https://www.ecodebate.com.br/2013/09/04/turbina-eolica-vertical-urbana-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>
- ANEEL.. Capacidade instalada em 2021 supera 1 gigawatt; eólicas são o destaque pelo quarto mês seguido. Acesso em 03 de 11 de 2021, disponível em ANNEL: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/capacidade-instalada-em-2021-supera-1-gigawatt-eolicas-sao-o-destaque-pelo-quarto-mes-seguido/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-d
- BAZZO, T. D. Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de ímãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento. Florianópolis: Universitê. Acesso em 10 de 01 de 2022, disponível em https://www.researchgate.net/publication/315805026_Projeto_Otimo_Multidisciplinar_de_Geradores_Sincronos_de_Imas_Permanentes_para_Aerogeradores_Considerando_a_Curva_de_Ocorrencia_do_Vento?enrichId=rgreq-da845cd8bc5352313872028967dda607-XXX&enrichSource=Y2
- BIANCHIN, L. S.; BECK, D.; SEIDEL, D. J..Influência do número de estágios no torque estático da turbina eólica Savonius. Revista Thema, 17(2), 309-317. Acesso em 2021 de 02 de 12, disponível em <https://periodicos.ifsul.edu.br/index.php/thema/article/view/1390/1489>
- BRASIL, G. D. Energia renovável chega a quase 50% da matriz energética brasileira. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em Governo do Brasil.: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1#:~:text=Um%20estudo%20do%20Instituto%20de,e%2054%25%20de%20fontes%20f%C3%B3sseis.>
- CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS; ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. ; DADOS DO MODELO MESOESCALA FORNECIDOS POR AWS

TRUEPOWER.. Atlas eólico : Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Optagraf. Acesso em 05 de 12 de 2021, disponível em https://drive.google.com/file/d/1mC9v_vzh4k_wroeEmIEP3k6o6TfqO28/view

CARMO, D. M.. Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa. Acesso em 05 de 01 de 2022, disponível em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144313882/Tese-aluno-57095.pdf>

CASER, E. S., & PAIVA, G. D. .Projeto aerodinâmico de uma turbina eólica de eixo. Monografia, universidade federal do espírito santo, Vitória. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2._pg_final_-_eduardo_caser_giuseppe_paiva.pdf

ECOSOLAR E.R.. Turbinas Savonius - Série Aerogeradore. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em ECOSOLAR E.R.: <https://www.ecosolarer.com.br/2018/09/02-turbinas-savonius-serie-aerogeradores.html>

GEROTO, G. H.. Estudo comparativo do desempenho de aeromotores de eixo vertical. Sodebras Soluções para o desenvolvimento do Brasil, 6(71), 20. Acesso em 01 de 2022, disponível em <http://www.sodebras.com.br/edicoes/n71.pdf>

JUNIOR, E. R. . Metodologia de projeto de turbinas eólicas de. Rio de Janeiro : Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Acesso em 25 de Janeiro de 2022, disponível em <http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/EdenRodrigues-Final.pdf>

LAGE, C.. Importância do Potencial Eólico. Acesso em 10 de 02 de 2022, disponível em ENERGIA EÓLICA NO AMBIENTE URBANO:ESTUDO NA UFABC: <http://energiaeolicaufabc.blogspot.com/2011/>

LEMOS, A.. Qual o Melhor Local de Instalação para minha Estação Meteorológica? Acesso em 12 de 02 de 2022, disponível em AgSolve: <https://www.agsolve.com.br/dicas-e-solucoes/10360/qual-o-melhor-local-de-instalacao-para-minha-estacao-meteorologica>

LIRA, M. A.; NETO, J. M.; LOIOLA; J. V.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M.. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. Revista Brasileira de Meteorologia, 13. Acesso em 10 de 02 de 2022, disponível em <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/tySn6XZL79CzchsJDqDQHwp/?lang=pt>

LOPES, F. F.; SILVA, V. F.; SANTOS, S.. Trabalho acadêmico integrador ii. Monografia, instituto federal de educação, ciência, arcos-m. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20171_TAI2_Aerogeradordeeixovertical.pdf

MAIA, A. C.. Uma análise de baixo custo computacional para uma turbina. São Carlos: Escola de Engenharia. Acesso em 08 de Novembro de 2021, disponível em

https://www.researchgate.net/publication/320730383_Uma_analise_de_baixo_custo_computacional_para_uma_turbina_eolica_de_eixo_vertical_segundo_o_modelo_MSTM/download

MARTINS, A.; SPINELI, D.; RIBEIRO, L.; LOBO, M.; LEMES, V.; MARÇAL, R. C. Performance da turbina savonius no túnel de vento. Anais do Curso de Engenharia Mecânica da UniEVANGÉLICA, 1-11. Acesso em 10 de 01 de 2022, disponível em <http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/engmec/article/view/4268/2816>

MATTE, E. K.. Dimensionamento e simulação de um perfil aerodinâmico para um aerogerador de eixo vertical. Horizontina: FAHOR Faculdade de Horizontina. Acesso em 10 de 11 de 2021, disponível em http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2014/Eudes_Klockner_Matte.pdf

MEIRA, L. A.; OLIVEIRA, M. R.. Projeto de Concepção de Unidade de Geração Eólica de Passo Variável. Monografia, Centro Federal De Educação tecnológica Celso Suckow Da Fonseca – CEFET/RJ, Rio de Janeiro. Fonte: http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202020_1%20Projeto%20de%20Concep%C3%A7%C3%A3o%20de%20Unidade%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20E%C3%B3lica%20de%20Passo%20Vari%C3%A1vel.pdf

MOURA, L. C.. Gestão de Projetos (3º ed.). São Paulo: Atlas S.A.

NETTO, D. C.. Otimização de uma turbina eólica tipo darrieus-h. Itajubá: Universidade Federal De Itajubá. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2176/Disserta%20a7%20c3%20a3o_2020070.pdf?sequence=1&isAllowed=y

PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A.. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino. Revista Brasileira de Ensino de Física, 36(4), 14. Acesso em 10 de 02 de 2022, disponível em <https://www.scielo.br/j/rbef/a/fmxzk4CKmm8msVRqy9Qkbp/abstract/?lang=pt>

ROCHA, R. V.. Simulação de aerogerador em uma bancada experimental. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. Acesso em 10 de 02 de 2022, disponível em <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008042802.pdf>

SOUSA, R. P.; JUNIOR, E. A.; SOUSA, M. P.. Análise da eficiência energética de turbinas. pp. 18-26. Fonte: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/ecop>

SOUZA, S. F.. Análise e Simulação de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. Campo Grande: Faculdade de Engenharias,. Acesso em 08 de 11 de 2021, disponível em https://engeletrica.ufms.br/files/2019/07/texto_final_TCC_Sthefany_Eletrica_2018_versa-digital-corrigida.pdf

WREGGE, M. S.;STEINMETZ, S.; JÚNIOR, C. R.; JÚNIOR, C. R.. Atlas Climático Da Região Sul Do Brasil (2 ed.). Brasília: WOC Tecnologia da Informação Ltda. Acesso em 20 de 09 de 2021, disponível em <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202005/13110041-atlas-climatico-da-regiao-sul-do-brasil.pdf>

