



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE EXATAS
CURSO DE BACHAREADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ADALBERTO GOMES DA SILVA NETO

**PRINCÍPIOS AERODINÂMICOS DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO
VERTICAL: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS TURBINAS SAVONIUS E
DARRIEUS**

ANGICOS/RN

2020

ADALBERTO GOMES DA SILVA NETO

**PRINCÍPIOS AERODINÂMICOS DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO
VERTICAL: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS TURBINAS SAVONIUS E
DARRIEUS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Sousa Rodrigues.

Angicos/RN

2020

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G633p Gomes Da Silva Neto, Adalberto. PRINCÍPIOS AERODINÂMICOS DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL / Adalberto Gomes Da Silva Neto. - 2020. 40 f.: il.

Orientador: Marcus Vinicius Sousa Rodrigues. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2020.

1. Energia eólica. 2. Aerodinâmica. 3. Rotores Savonius e Darrieus. 4. Eficiência energética. I. Vinicius Sousa Rodrigues, Marcus, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

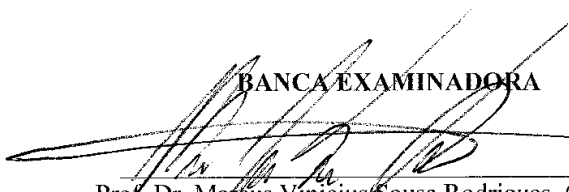
ADALBERTO GOMES DA SILVA NETO

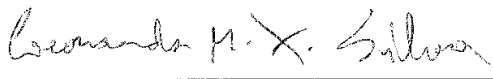
**PRINCÍPIOS AERODINÂMICOS DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO
VERTICAL: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS TURBINAS SAVONIUS E
DARRIEUS**

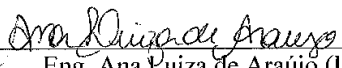
Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 06 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Marcus Vinicius Sousa Rodrigues. (UFERSA)
Presidente


Prof. Me Leonardo Magalhaes Xavier Silva (UFERSA)
Membro Examinador


Eng. Ana Luiza de Araújo (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A princípio, gostaria de exprimir meus agradecimentos a Deus por sempre me acompanhar e me dá força, saúde e disposição necessárias para conclusão desse trabalho.

Aos meus pais, Francisco de Assis Gomes e Isanir Queiroz Gomes, por serem minha base e por sempre estarem presente para me auxiliar nas minhas escolhas.

A todos os meus familiares, que estavam sempre torcendo por mim.

A Carla Larissa, minha namorada, pelo apoio e companheirismo, que me fizeram continuar.

A todos os meus colegas e professores da UFERSA, que me auxiliaram de forma direta e indireta o meu crescimento acadêmico, mas afinal muitos deles nem sabem que me ajudaram nessa tarefa, com isso não citarei todos aqui.

A meu orientador, Marcus Vinicius Sousa, por toda dedicação, dicas e sugestões para a realização deste trabalho.

Meus agradecimentos superam quaisquer palavras que aqui escrevo, e vão além do sentido de agradecer a contribuição que muitas pessoas exerceram para a conclusão deste trabalho.

Obrigado a todos.

RESUMO

A energia eólica é considerada uma energia limpa e renovável que pode ser produzida em qualquer lugar. Ela é proveniente da circulação do ar na atmosfera, provocada pelo aquecimento desigual da terra. A conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade se dá através de um gerador elétrico conectado ao seu eixo. As turbinas eólicas podem ser classificadas de várias maneiras, mas a principal é quanto a referência do eixo em relação ao solo, podendo ser de eixo vertical ou horizontal. Para projetar o rotor eólico são utilizados perfis aerodinâmicos com seus coeficientes de sustentação e arrasto que variam de acordo com o ângulo de ataque. Estes perfis possuem diferentes dimensões e angulações ao longo das pás, a fim de proporcionar o melhor efeito aerodinâmico e uma melhor eficiência. Atualmente, as turbinas de eixo vertical têm despertando interesse dos fabricantes para a sua aplicação na geração de eletricidade em pequena escala, visto que elas têm características de serem economias e de fácil manutenção adjunto do fato de não terem restrições pra instalação. Esse interesse se explica justo pelo desenvolvimento na aerodinâmica que está vinculado a eficácia energética. As principais máquinas verticais são os rotores de Savonius e Darrieus, em razão que esses tipos de equipamentos são os pioneiros na produção, no qual as variações de máquinas existentes são baseados nas duas, havendo alterações só em termos técnicos, no entanto utilizam os mesmos fundamentos. As duas se distinguem devido que uma apresenta um elevado coeficiente de arrasto enquanto a outra tem um coeficiente de sustentação alto. Observado essas características a partir de uma pesquisa explorativa, surgiu o questionamento e interesse pela área da aerodinâmica e mecânica dos fluidos. Dessa forma, neste trabalho é apresentado os princípios aerodinâmicos de uma turbina eólica de eixo vertical, com base em uma revisão bibliográfica, assim caracterizando as principais vantagens e desvantagens do uso desse dispositivo para a conversão de energia eólica em energia elétrica.

Palavras-chave: Energia Eólica. Força de Sustentação e Arrasto. Dimensionamento. Eficiência energética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das forças aerodinâmicas.....	15
Figura 2: Geometria do perfil.....	15
Figura 3: Componentes de forças.....	17
Figura 4: Modelos de turbinas.....	18
Figura 5: Tipos de turbinas.....	19
Figura 6: Turbinas Darrieus	24
Figura 7: Descrição do movimento	25
Figura 8: Variação Savonius	29
Figura 9: Descrição do funcionamento Savonius.....	31
Figura 10: Placas de extremidades	34

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Afastamento
H	Altura da pá
α	Ângulo de ataque
β	Ângulo de passo
A_p	Área planiforme da pá
C_D	Coeficiente de Arrasto
C_m	Coeficiente de momento
C_p	Coeficiente de potência
$C_{p,max}$	Coeficiente de potência máxima
C_L	Coeficiente de sustentação
C_{tan}	Coeficiente tangencial
C_t	Coeficiente de torque
c	Comprimento da corda
L	Comprimento da pá
d	Diâmetro da pá
D	Diâmetro do rotor
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
ρ	Massa específica
M_{rot}	Momento rotacional
Re_c	Número de Reynolds
θ	Posição angular da pá
$\dot{W}_{disp}$	Potência disponível
$\dot{W}_{ext}$	Potência extraída do vento
$\dot{W}_{m\acute{a}x}$	Potência máxima
AR	Razão de aspecto de pá
λ	Razão de velocidade de ponta de pá

F_T	Resultante de força
s	Sobreposição
σ	Solidez
T	Torque
$\dot{m}$	Vazão mássica
ω	Velocidade angular
V_1	Velocidade incidente
V_2	Velocidade mais afastado
V	Velocidade real na turbina
V_r	Velocidade do vento relativo
V_{tan}	Velocidade tangencial
μ	Viscosidade dinâmica

LISTA DE ABREVIACÃO

UFERSA	Universidade Federal Rural Do Semi-arido
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
CFD	Simulação Computacional Fluidodinâmica
TSR	Tip Speed Ratio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	14
2.1 Princípios aerodinâmicos	14
2.2 Turbinas eólicas de eixo vertical	18
3 AERODINÂMICA DAS TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL.....	24
3.1 Turbina Darrieus.....	24
3.2 Turbina Savonius.....	29
4 METODOLOGIA.....	35
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
6 REFERÊNCIA.....	37

1 INTRODUÇÃO

Por definição, energia eólica é aquela oriunda da força do vento. É uma fonte abundante, limpa, renovável e disponível em lugares diversos. A transformação da energia dos ventos para eletricidade é feita através de aerogeradores, ou turbinas eólicas, que captam a energia através de pás aerodinâmicas ligadas a uma turbina, acionando um gerador elétrico (MACHADO, 2014).

O movimento dos ventos é uma abundante fonte de energia, no segundo milênio, fontes energéticas como a água, vento e o sol eram utilizadas para a produção de calor e de força motriz. À medida que os países começaram a se industrializar, a demanda por energia aumentou drasticamente. Assim estas fontes tradicionais de energias foram substituídas pelo carvão, petróleo, gás natural e energia nuclear (PURIFICAÇÃO; DELLA FONTE, 2012).

Esse tipo de energia é capaz de se expandir tanto em questões técnicas como econômicas, visto que, a sua utilização é apenas de 1% em todo o mundo. A energia eólica depende indiretamente da energia do sol. Uma pequena parcela da radiação solar é convertida em energia cinética, devido principalmente à diferença líquida de radiação em altas e baixas latitudes, o que forma o vento. Os ventos são então influenciados pela rotação da Terra, gradientes de temperatura e o relevo da região, e também pela rugosidade do solo e altura de interesse (ATLAS EÓLICO DO ESPIRITO SANTO, 2009).

Segundo Hamdan (2014), após a crise petroléira dos anos de 1970, as energias consideradas renováveis ganharam uma grande ênfase mundialmente, devido ao esgotamento dos recursos fósseis. Muitos países classificados como desenvolvidos, passaram a incentivar e investir cada vez mais em projetos voltados a utilização de formas alternativas de geração de energia.

Com o aumento dos interesses por problemas ambientais, há um esforço para a minimização dos danos ambientais causado pela geração elétrica. A grande vantagem desse tipo de energia é a neutralidade com relação à emissão de gases poluentes e a disponibilidade infinita do insumo energético. Já para a fauna local, se caracteriza como uma desvantagem, pois, causam danos ao tráfego das aves em migrações, simultâneo aos ruídos aerodinâmicos e mecânicos (CASER; PAIVA, 2016).

Embora seja uma fonte pouco utilizada, representa cerca de 8,4 % de toda energia produzida no Brasil no ano de 2019, com uma capacidade de geração de 14,34 GW segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA). A princípio, sua utilização comercial havia começado tendo como enfoque fins agrícolas, até, a Dinamarca

tornar-se a pioneira na geração de eletricidade em grande escala, ligando assim uma turbina à rede elétrica pública, no ano de 1976. Destacam-se nesse cenário a Alemanha, Espanha e Estados Unidos. Em grande parte, o aumento do interesse nessa forma de energia decorre do incremento da eficiência dos aerogeradores (SANTOS, 2015).

As turbinas eólicas podem ser classificadas de diversas maneiras, mas a principal é de acordo com a orientação do eixo do rotor em relação ao solo, que podem ser classificadas como turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) ou turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH). Comumente, as mais utilizadas são as de eixo horizontal, visto que, o seu rendimento é superior por apresentarem uma maior capacidade de captação dos ventos com uma velocidade relativa elevada, gerando assim, maiores rotações e desempenho. Por essa razão, a maioria das turbinas horizontais apresentam uma elevada altura, visto que quanto mais alto maior a velocidade relativa. Em média, dependendo do local de sua instalação podem ficar entre 20 a 30 metros, considerada a camada limite até 150 metros acima da superfície (MACHADO, 2014).

As TEEV's são habitualmente utilizada para a produção de eletricidade em baixa escala, por ainda apresentarem um baixo desempenho. Contudo, seu baixo custo faz com que ela se torne viável, podendo ser facilmente produzida pois não há restrições de local para implementação e independe da direção do vento. Outro fator que se torna viável é a sua aerodinâmica, os ventos não necessitam ser apenas em regime laminar, ou seja, ventos com perfil de velocidade constantes. Dessa maneira, sua instalação pode ser até mesmo em centros urbanos e com pouco espaço (SANTOS, 2015).

Atentando a presente conjuntura de expansão dos parques eólicos, esse trabalho almeja apresentar os princípios aerodinâmicos de uma turbina eólica de eixo vertical, utilizando a metodologia de revisão bibliográfica. Ademais irá abordar esse tema devido ao questionamento por inovação energética em que os rotores eólicos verticais apresentam uma vantagem no custo de implementação em relação aos outros modelos, no qual o foco é na aerodinâmica, em razão que a competência energética está diretamente relacionada com a área estudada.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Princípios aerodinâmicos

A aerodinâmica é o estudo do movimento de fluidos, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos. Dessa maneira, a aerodinâmica veio ganhar ênfase industrial a partir do surgimento dos aviões e dos automóveis mais sofisticados, visto que, anteriormente não tinha tanta preocupação com o atrito no ar e com o consumo de combustível (MACHADO, 2014).

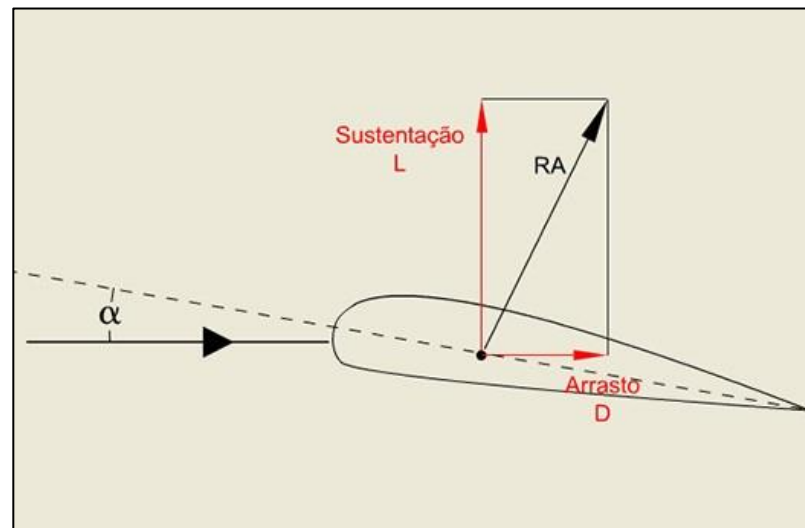
A área fundamental da física que ensina e analisa líquidos e gases em condições estáticas ou dinâmicas é a mecânica dos fluidos. A dimensão envolvida nessas análises depende do sistema que se quer estudar (HEILMAM, 2017).

Segundo Heilmam (2017), o processo de transporte de um fluido é caracterizado, basicamente, pela capacidade que este tem de estabelecer equilíbrio. As variáveis comuns às condições dinâmicas e estáticas dos movimentos dos fluidos podem ser estabelecidas considerando três fatores, que são a quantidade de movimento, a massa e a dinâmica.

O estudo de perfis aerodinâmicos, ou aerofólios, provocou um grande avanço na área, apesar de inicialmente, estarem intimamente ligados ao desenvolvimento da hidrodinâmica, pois, apresentavam mais recursos como os tanques de água circulante e ainda não existiam os túneis de vento (MACHADO, 2014).

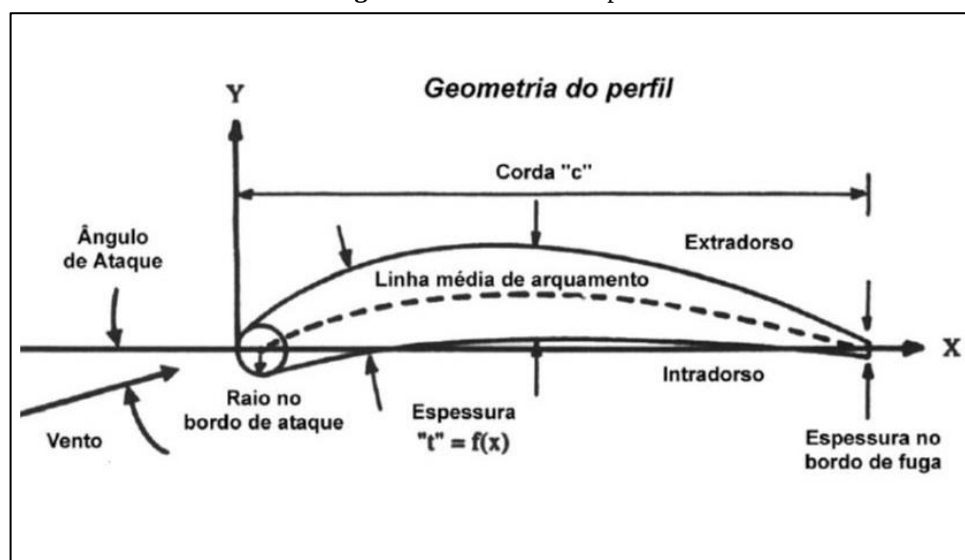
Este avanço se deu devido à tecnologia, em razão que para analisar aerofólios tinha que ser através da dedução analítica, por meio da integração das tensões sobre uma superfície de um corpo, considerada uma atividade bem difícil. Nesse cenário, a simulação computacional fluidodinâmica – (CFD), que soluciona um conjunto de equações diferenciais não lineares através de técnicas numéricas iterativas, pode aliar-se aos métodos experimentais realizados em túneis de vento, de modo a determinar a magnitude das forças atuantes. É importante salientar que o fluxo de vento ao redor de uma pá é governado por equações diferenciais parciais – equações de Navier-Stokes (SANTOS, 2015).

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica é basicamente a combinação da força de sustentação e arrasto. Essas forças são caracterizadas como componentes da força resultante que atuam sobre um perfil aerodinâmico. A força de sustentação é perpendicular às superfícies das pás, surgindo a partir do diferencial de pressão entre as superfícies. A força de arrasto age em direção paralela às superfícies das pás, representado na Figura 1.

Figura 1 - Representação das forças aerodinâmicas

Fonte: Lunelli, 2013.

Um aerofólio, ou um perfil, pode ser definido como a seção bidimensional transversal de uma pá. Ele é representado da seguinte forma que está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Geometria do perfil

Fonte: Silva, 2013.

Seu comprimento é denominado de corda c , que vai do bordo de ataque até ao bordo de fuga. Um dos importantes pontos para dimensionar um perfil é o ângulo de ataque, sendo o ângulo que o aerofólio faz com a direção do vento, medido com uma linha de referência (linha da corda) na pá, sendo representado pelo símbolo α . A superfície superior é chamada de extradorso, acima da qual está a região de baixa pressão, enquanto, a superfície inferior é chamada de intradorso, abaixo da qual está a região de alta pressão. Pra finalizar, o ultimo

componente é o arqueamento, que é a diferença entre a linha de corda e a linha media (ponto intermediário entre extradorso e o intradorso) que fica o centro aerodinâmico (SILVA, 2013).

Consoante as análise das forças atuantes em um aerofólio, visto que sua resultante se divide em duas forças, elas apresentam um coeficiente adimensional que são de arrasto, C_D , e de sustentação, C_L , elas dependem da geometria do objeto, no qual cada tipo irá apresentar suas especificações o que distinguem se vai ser de sustentação ou arrasto e das características do escoamento, mostrado, respectivamente, pelas expressões:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_r^2 A_p} \quad (1)$$

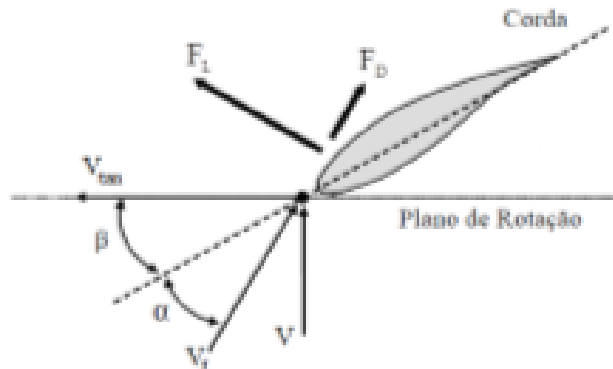
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_r^2 A_p} \quad (2)$$

em que V_r é a velocidade do vento resultante, A_p é a área planiforme da pá e ρ é a massa específica. Quanto maiores os coeficientes menores serão as forças pra interromper o movimento. Os resultados destes, indicam sua intensidade. Para algumas geometrias e escoamentos, existem tabelas que já indicam o número do coeficiente, mas, para perfis eólicos do tipo que utilizam aerofólios, comumente tem que calcular levando em consideração as condições específicas de cada aplicação.

Quando começar o movimento rotacional das pás de uma turbina eólica, a velocidade resultante do vento poderá ser calculada a partir do somatório de duas outras, que são a velocidade do vento incidente V_1 , perpendicular ao plano de rotação, e a velocidade do vento resistente (velocidade da pá) V_{tan} , paralelo ao plano de rotação, desta maneira obtemos:

$$V_r = V_1 + V_{tan} \quad (3)$$

Para determinar a componente da força, faz-se necessário uma relação entre a equação dos coeficientes e o ângulo de ataque α somado com o ângulo de passo β que é o ângulo em que a velocidade V_r faz com o plano de rotação. Representado na Figura 3 (SANTOS, 2015).

Figura 3 - Componentes de forças

Fonte: Marques, 2014.

As forças se distinguem devido as suas direções, sendo uma força cisalhante e outra força normal. É possível observar que os coeficientes C_D e C_L são característicos do formato do aerofólio a partir do seu ângulo de ataque. As forças são determinadas pelas seguintes expressões:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_r^2 A_p \quad (4)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_r^2 A_p \quad (5)$$

Assim, as Equações (4) e (5), expressam a intensidade das forças aerodinâmicas, em que F_D é a força de arrasto e F_L a força de sustentação. Para determinar a magnitude dessas duas forças, utiliza-se a expressão da força resultante F_R , exposta a seguir:

$$F_R = F_D^2 + F_L^2 \quad (6)$$

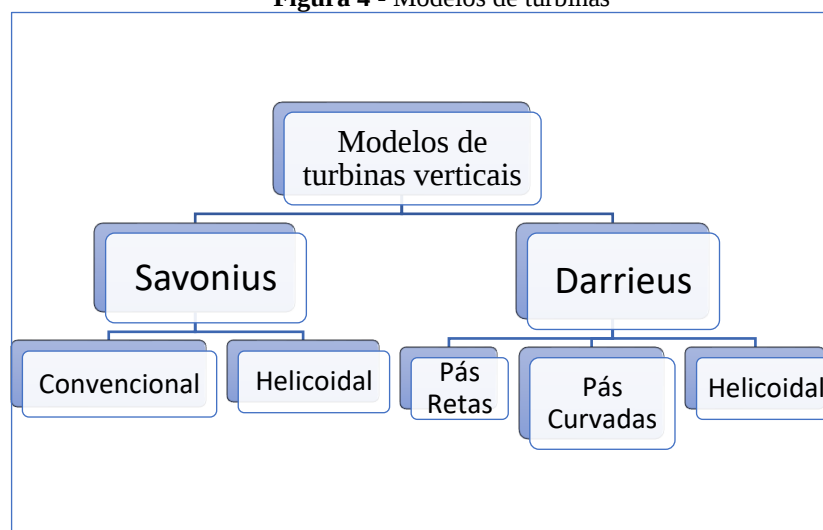
2.2 Turbinas eólicas de eixo vertical

A TEEV é caracterizada por apresentar o eixo do rotor fixado verticalmente. Sua composição se assemelha com as de turbinas de eixo horizontal, apresentando quatro componentes básicos, que são: o rotor junto com as pás, onde o torque aerodinâmico é gerado; a caixa geradora que converte o torque em energia elétrica; a torre que sustenta as pás do rotor; e a fundação da construção, ajudando na sua estabilidade. A única diferença entre elas é que os geradores e os outros elementos que produzem eletricidade estão localizados na base e a sua configuração interna é complexa (PURIFICAÇÃO; DELLA FONTE, 2012).

Os principais modelos de turbinas verticais são as de Savonius e Darrieus, o primeiro, proposto por S. J. Savonius na década de 30, é movido pela força de arrasto e foi baseado no rotor de Flettner, já o outro modelo foi inventado por G. J. M Darrieus e tem seu funcionamento fundamentado na força de sustentação de um aerofólio, o que permite que se obtenha uma rotação mais elevada neste modelo em relação ao Savonius (MACHADO, 2014).

Os dois modelos vistos se tornam os principais pelo fato que todos os modelos presentes atualmente derivaram deles. Por terem sido os pioneiros, os seus fundamentos estão presentes na maioria das turbinas, visto que passaram por algumas mudanças no sentido de melhorias em busca de aumentar a eficiência. O organograma da Figura 4 mostra as variações:

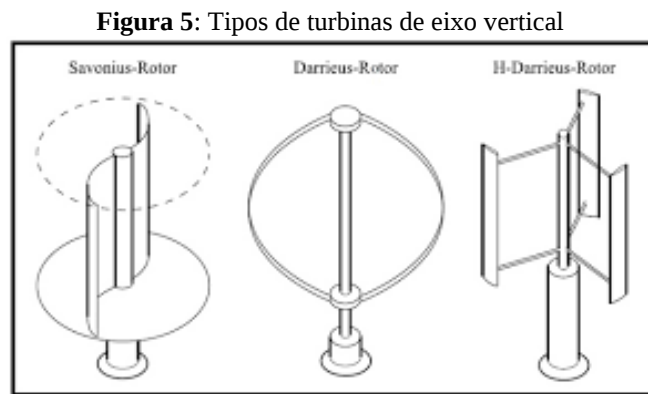
Figura 4 - Modelos de turbinas



Fonte: Autoria própria, 2020.

A princípio, sua utilização comercial era pra pequeno porte, contudo, passou a se difundir devido as suas características, na qual apresentavam um melhor comportamento em ventos turbulentos e tinha baixas emissões de ruídos comparada com as turbinas de eixo horizontal, possuindo assim diversas vantagens, como a facilidade na sua manutenção, devido ao fato da principais peças se localizar na base.

As únicas desvantagens em relação as TEEH's são que, por ficarem a uma baixa altura, acaba diminuindo o aproveitamento de maiores velocidades do vento e cargas aerodinâmicos cíclica, por consequência diminui o desempenho e aumenta a fadiga, prejudicando a vida útil da TEEV. Representado na Figura 5 exemplos de modelos.



Fonte: Emule, 2017.

Como descrito anteriormente para o transporte de fluido, é levado em conta três fatores fundamentais, mas, restringindo a área da mecânica dos fluidos para a análise de uma turbina eólica de eixo vertical, deve-se levar em consideração outros fatores que são a velocidade do vento, a massa específica, a área de varredura das pás e a altura que o rotor foi instalado. Estes fatores estão diretamente relacionados ao desempenho de um aerogerador.

Para analisar o desempenho real de um rotor eólico, deve-se considerar a potência extraída, $\dot{W}_{ext}$, que é a potência máxima retirada do vento. Consoante a Ruan Cabral (2017) sua descrição pode ser feita, por meio do teorema de rankine-froude, caracterizado pela média aritmética entre a velocidade de aproximação do vento V_1 , ou seja, a velocidade no montante a que chega sem interferências na turbina e a velocidade do vento mais afastado V_2 , isto é a velocidade na jusante a que sai da turbina. Obtendo a velocidade real através da hélice da turbina V , representado por:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (7)$$

Logo, a equação da potência extraída pode ser simplificada, sabendo que sua formula inicial é descrita pela Equação 8:

$$\dot{W}_{ext} = \frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \quad (8)$$

Em que a vazão mássica $\dot{m}$, é expressa por:

$$\dot{m} = \rho A_p V \quad (9)$$

Dessa forma que agregando as Equação (7), (8) e (9), obtém a expressão pra potência extraída:

$$\dot{W}_{ext} = \frac{1}{4} \rho A_p (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (10)$$

Sabe-se que para obter a potência extraída máxima, $\dot{W}_{ext}$, tem de ocorrer a relação de máximos e mínimos derivado do cálculo das velocidades. Assim será obtido o valor para velocidade mais afastado do perfil: $V_2 = V_1/3$, sendo representado na expressão por:

$$\dot{W}_{máx} = \frac{8}{27} \rho A_p V_1^3 \quad (11)$$

A disposição da equação de potência máxima, consoante o autor Hansen (2008), é primordial, posto que, a própria demonstra que a potência expande com o cubo da velocidade do vento e só aumenta linearmente com a massa específica do ar. A potência disponível total para a hélice, $\dot{W}_{disp}$, é representada pela seguinte equação:

$$\dot{W}_{disp} = \frac{1}{2} \rho A_p V_1^3 \quad (12)$$

Sendo assim, é o produto entre a vazão mássica, $\dot{m}$, através da hélice e a energia cinética total do vento. Torna-se conspícuo, ao analisar está equação, que a mesma simboliza

a energia total disposta pelo vento para uma turbina eólica. Todavia, as pás não conseguem absorver-la, pois, se assim fosse, violaria o princípio de conservação de massa, no qual, a velocidade mais afastada V_2 seria nula. Assim sendo, apenas uma porção dessa energia será integrada pelo rotor da turbina eólica. O coeficiente de potência ou o rendimento do rotor eólico, C_p , pode ser definido como a razão entre a potência extraída do vento, $\dot{W}_{ext}$, ou seja, a potência fornecida pelo vento e a potência total disponível, $\dot{W}_{disp}$, em uma área equivalente à área varrida pelo rotor (SANTOS, 2015). Isto é:

$$C_p = \frac{\dot{W}_{ext}}{\dot{W}_{disp}} \quad (13)$$

Esse fator pode ser traduzido como sendo a relação entre a potência mecânica do conversor eólico e a potência contida no vento. A performance aerodinâmica de uma turbina eólica é dada em uma função do coeficiente de potência C_p , que demonstra o máximo que a turbina pode extrair do vento, reitera Geroto (2012).

Substituindo a Eq. (12) na Equação (13) é possível escrever a seguinte expressão para a potência extraída:

$$\dot{W}_{ext} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_1^3 \quad (14)$$

O coeficiente de potência máximo, $C_{p,max}$, é definido por:

$$C_{p,max} = \frac{\dot{W}_{máx}}{\dot{W}_{disp}} \quad (15)$$

e indica a potência máxima $\dot{W}_{máx}$ que pode ser extraída de uma turbina eólica.

Substituindo as Equações (11) e (12) na Equação (15), é possível obter o seguinte resultado:

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (16)$$

Esse valor obtido na Equação 16, é conhecido como número de Betz e indica o rendimento ideal para uma turbina eólica. Visto que, quando se deseja fazer um projeto de um

aerogerador, buscar-se chegar aproximado desse número, o que significa uma potência máxima extraída do vento de aproximadamente 59,3% ou cerca de 2/3 da energia disponível aproveitada. Entretanto, na prática as turbinas eólicas modernas apresentam um rendimento em torno de 40% (SANTOS, 2015).

Atrelado a eficiência está o torque aerodinâmico, dado que toda vez que a turbina extrai potência gera um torque aerodinâmico. Conhecendo as forças aerodinâmica e sua resultante encontra a seguinte expressão:

$$T = \frac{\dot{W}_{ext}}{\omega} \quad (17)$$

Em que ω representa a velocidade angular rotação do rotor, a qual surge devido ao movimento circular após começar a rotação. Entretanto o torque T pode ser escrito em função da razão de velocidade λ também chamada de razão de velocidade da ponta da pá ou do inglês Tip Speed Ratio (TSR), pois ela é definida como a razão entre a velocidade tangencial e a velocidade do vento não perturbado. Assim é expressa:

$$\lambda = \frac{V_{tan}}{V_1} \quad (18)$$

Em que a velocidade tangencial é escrita pelo produto entre ω e D , definindo assim a expressão:

$$\lambda = \frac{\omega D}{2V_1} \quad (19)$$

No qual D é o diâmetro do eólico da turbina. Limitando a Equação (19), através do coeficiente de torque C_t descrito por:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (20)$$

Dessa forma, por intermédio das Equações (14), (19) e (20) é capaz de descrever a expressão do torque gerado:

$$T = \frac{1}{4} C_t A \rho V_1^2 D \quad (21)$$

3 AERODINÂMICA DAS TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL

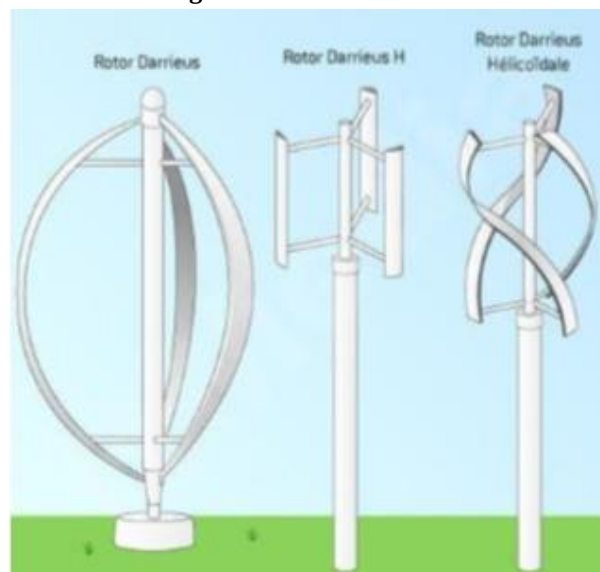
3.1 Turbina Darrieus

A turbina Darrieus é um dos rotores mais utilizados de eixo vertical. Isso se dá, devido a esse modelo ser um dos pioneiros, embora a sua utilização para eletricidade só iniciou nos anos de 30 através de testes em diversos protótipos, entretanto, sem sucesso comercial (PURIFICAÇÃO; DELLA FONTE, 2012).

O princípio aerodinâmico utilizado é o de sustentação, devido os seus perfis de pás que se assemelham com perfis de aviões, normalmente sendo usado do tipo alares e Naca 00xx. Dessa forma, sua configuração é a que mais se aproxima da eficiência das turbinas horizontais de três pás, pois seguem o mesmo princípio (SANTOS, 2015).

A constituição da estrutura do rotor Darrieus, se dá a partir de pás curvas ou retas, atadas nos extremos do cubo no eixo vertical, conforme ilustrado na Figura 6. Assim, o seu funcionamento se dá a partir de quando as pás criam uma área de baixa pressão sobre o lado mais longo da superfície e como essa está presa ao cubo do rotor, a força irá causar rotação. Como visto, elas podem apresentar três classificações que são as de pás retas (Giromill, Darrieus H), helicoidais ou curvas (Troposkein), podendo ter duas ou mais pás dependendo da aplicação (CASER; PAIVA, 2016).

Figura 6 - Turbinas Darrieus

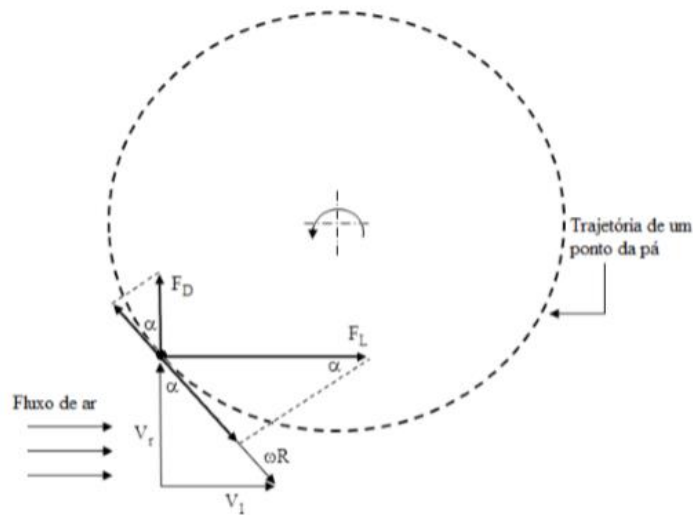


Fonte: Caser; Paiva, 2016.

Sua grande vantagem acaba sendo a sua baixa complexidade que se torna economicamente viável. Analisando cada local e fazendo o dimensionamento certo é uma boa escolha quando se quer inovar na eletricidade.

Para analisar o comportamento de uma turbina Darrieus, deve levar em consideração o princípio da variação cíclica de incidência. Ou seja, um aerofólio colocado ao vento de acordo com o ângulo de ataque fica submetido às forças aerodinâmicas de intensidades e direções variáveis. A rotação acontece devido ao binário gerado pelas resultantes das forças. Os seus aerofólios avançam devido a seu percurso circular, conforme ilustrado na Figura 7 (SANTOS, 2015).

Figura 7- Descrição do movimento



Fonte: Santos, 2015.

A resultante da força aerodinâmica na direção tangencial à trajetória da pá, F_T , tem que ser positiva para que assim aconteça o giro do rotor.

Visto isso, é possível analisar que o fluxo de ar, com a velocidade, V_1 , resulta em um movimento relativo ao se aproximar do elemento de pá, com velocidade, V_R , que é a soma vetorial das velocidades. Portanto, de acordo com a geometria que forma o movimento, como descrito a cima é possível escrever a seguinte expressão:

$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad (22)$$

Assim, para seguir o princípio, F_T tem que ser maior que zero, ou seja:

$$F_L \sin \alpha > F_D \cos \alpha \quad (23)$$

Isso implica que o rotor de Darrieus é uma máquina eólica movida por sustentação aerodinâmica. Então, da Equação (23), podemos obter:

$$\frac{F_L}{F_D} > \frac{1}{\tan \alpha} \quad (24)$$

Substituindo as Equação (3) e (4) na Equação (6), é possível escrever a seguinte forma alternativa:

$$F_T = \frac{1}{2} C_{tan} \rho V_r^2 A_p \quad (25)$$

Sendo C_{tan} o coeficiente da força tangencial, expresso por:

$$C_{tan} = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (26)$$

Para se conseguir obter um elevado desempenho para um rotor de Darrieus, deve-se levar em consideração a escolha de um perfil com alta relação de sustentação/arrasto, indicada pela razão C_L/C_D . Visto que, uma boa escolha do formato de um aerofólio é o primeiro passo para obtenção de sucesso no seu projeto, mas, outros fatores que influenciam as forças aerodinâmica é o número de Reynolds e o ângulo de ataque α .

Segundo Victor (2019), o número de Reynolds indica o regime de escoamento presente no fluido, podendo ser classificado como laminar, no qual sua velocidade é praticamente constante, e turbulento que acontece uma maior variação, visto que não adianta aplicar teorias a um certo tipo de regime e ele apresentar outra característica, então é de fundamental importância saber o tipo. Esse número em um projeto de pá de turbina eólica de Darrieus pode ser calculado em relação a corda da pá da seguinte forma:

$$Re_c = \frac{\rho V_R c}{\mu} \quad (27)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica, ou seja, a resistência do fluido ao escoamento.

Conforme Passos (1984) teria que observar diferentes valores de Re_c em cada rotação, pois V_R necessita da posição da pá e da inclinação desta. Uma possibilidade à Equação (27) para calcular o número de Reynolds seria usar a velocidade tangencial ao invés da velocidade resultante. Assim, o número de Reynolds é dado por:

$$Re_c = \frac{\rho \omega D c}{2\mu} \quad (28)$$

O ângulo de ataque deve ser bem observado, pois pode acontecer um fenômeno chamado de estol, que pode ser compreendido como a redução do coeficiente de sustentação gerado pelo deslocamento da camada limite com o aumento do ângulo de ataque da pá. Por conseguinte, ultrapassando este limite do ângulo, ao invés de proporcionar o aumento da sustentação o efeito acaba sendo o contrário. Para a maioria dos perfis, esse ângulo crítico oscila em torno de 15° (SANTOS, 2015).

Em baixas rotações de velocidade têm-se ângulos de ataque muito grandes, acima do ponto de estol, acarretando a não geração de torque de partida devido a força tangencial F_{tan} ser baixa, podendo ser até negativa. Em virtude desse comportamento causado pelas oscilações do estol a turbina Darrieus não parte do repouso. Para tal, deve-se ser instalado um dispositivo auxiliar pra dar partida no sistema.

Baseando-se ainda em Passos (1984), o número adimensional chamado razão de aspecto de pá, indicado por AR , demonstra a relação entre sustentação/arrasto, dessa forma a medida em que AR aumenta a razão será proporcional. Portanto a equação leva em consideração os coeficientes aerodinâmicos C_L e C_D em função do ângulo de ataque e ainda as dimensões das pás, representada a seguir:

$$AR = \frac{L}{c} \quad (29)$$

Onde L é o comprimento da pá e c é a corda do aerofólio da pá. Esse parâmetro é muito importante para a performance do rotor. Consoante a Alexander e Holownia (1978), valores de razão de aspecto próximo de 1,0 apresentam baixo desempenho, já para valores maiores, próximo de 5,0, o desempenho se torna satisfatório.

O último parâmetro aerodinâmico que se deve ser analisado é a solidez σ , que consiste na ideia de quanto área varrida é ocupada pelas pás. Ela é definida pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{\text{Area Total das Pás}}{\text{Area de Varredura das Pás}} \quad (30)$$

Para a turbina de Darrieus, devido seu formato a área total das pás pode ser descrita por dois fatores que são o número de pás, N , que normalmente são composta por três e o comprimento da corda do aerofólio, c . Para a área de varredura é levado em consideração o diâmetro do rotor, D . Sendo assim, a Equação 30 reduz para:

$$\sigma = \frac{Nc}{D} \quad (31)$$

A solidez é um dos primeiros parâmetros a ser atentado, uma vez que é onde se define a geometria da turbina, expresso na Equação 30 a proporcionalidade entre a solidez e a geometria. Desse modo, sabendo a geometria e escolhido a razão da velocidade, o próximo passo consiste em saber a eficiência do rotor, por intermédio do cálculo das forças aerodinâmicas onde se tem noção de como será o seu funcionamento total.

Além da solidez outro fator que interfere no funcionamento é o efeito TSR, expresso anteriormente pela Equação (19) para simplificar a equação do torque. Para baixos valores de λ (velocidade de ponta de pá), a maioria do vento atravessa as pás sem ser perturbado, ou seja, irá apresentar uma baixa rotação e torque. Então para um bom projeto, é necessário obter um alto valor de velocidade de ponta para que assim possibilite uma maior interação entre o vento e as pás, possibilitando extrair o máximo de potência do vento (SANTOS, 2015).

Visto isso, para implementação de uma turbina Darrieus, os conceitos iniciais de aerodinâmica é de suma importância, pois é a partir deles que é produzido qualquer turbina, onde se pretenda obter uma alta eficiência. Entretanto, o desempenho na prática pode ser influenciado por fenômenos naturais, como as turbulências do ar sobre as pás, que modificam alguns parâmetros. Para uma maior precisão é necessário levar para túneis de vento, para assim se obter um resultado mais preciso do que acontecerá na prática.

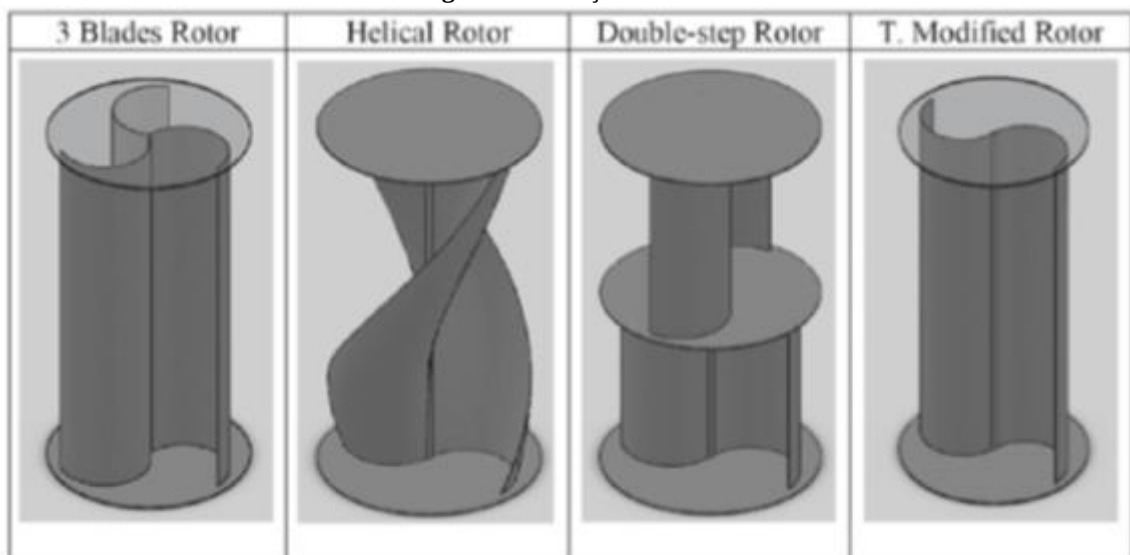
3.2 Turbina Savonius

Este tipo de turbina foi concebido por volta do ano de 1929, quando o mundo enfrentava uma grande crise econômica, causada pela superprodução. Visto isso, a procura por inovação era constante e o suprimento energético era algo primordial pra o desenvolvimento. Nessa turbina predomina a força de arrasto, ou seja, as turbinas giram predominantemente a força paralela ao vento (AKWA; PETRY,2011).

Uma das suas grandes vantagens é por apresentarem um baixo custo de implementação, isso se dá devido ao seu design que não apresenta aerofólios, facilitando na hora da construção e evitando a necessidade de complexas manutenções. Já um ponto que deixa a desejar é a sua eficiência, que segundo Díaz, Pajaro, Salas (2014) é aproximadamente 10%.

Com o aumento do estudo na área, o modelo de Savonius passou por algumas alterações, visto que, quando foi criada seu formato consistia de duas meias-canais em sentidos opostos apoiado pelo eixo vertical, essa sobreposição das canas gerava componentes aerodinâmicas, contudo para melhorar o seu rendimento, seu design foi alterado e dividido em quadro modelos diferente que são: a convencional, a Savonius de 3 pás, a de pás helicoidais e o rotor de 2 estágios. Representado pela figura abaixo:

Figura 8: Variação Savonius



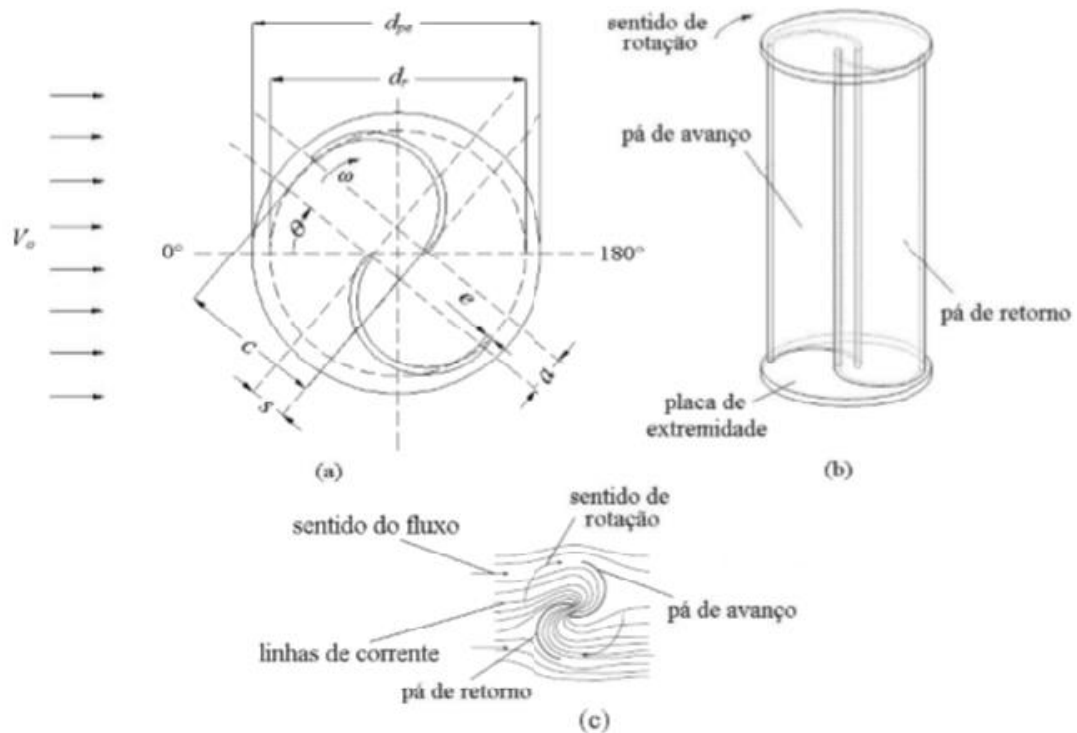
Fonte: Díaz, Pajaro, Salas, 2014.

Devido a sua baixa eficiência, para a geração de eletricidade em grande escala se torna inviável, mesmo sabendo que atualmente pode chegar até 18% do rendimento, mas, essa

turbina pode ser utilizada como sistema de partida para outros tipos de turbinas, pois ela começa a girar com a velocidade mais baixa comparado a outros tipos de rotores, contendo um alto torque de partida. O rotor Savonius, no entanto, não pode ser considerado como um dispositivo eólico de desempenho superior e nem inferior ao desempenho das demais máquinas eólicas. Os rotores Savonius deveriam ser compreendidos apenas como mecanismos diferentes para o aproveitamento da energia eólica, sendo alternativas tecnológicas às turbinas convencionais (VANCE, 1973; ELDRIDGE, 1980).

Por apresentarem característica aerodinâmica de arrasto, sua fundamentação teórica se torna mais simples, uma vez que sua funcionalidade se dá a partir do vento impulsionando semicírculos forçando ao rotor girar. Nesse tipo de turbina a velocidade das pás não pode ser maior que a do vento, limitando assim a sua eficiência. O que distingue do rotor Darrieus que sua funcionabilidade se dá a partir da diferença de pressão em um aerofólio.

Seu funcionamento pode ser descrito a partir da Figura 9, onde a velocidade do vento não perturbada é igual à V_0 , que na turbina de Darrieus foi representado por V_1 , incide nas pás do rotor onde gera o torque no rotor, dependendo da velocidade angular, ω , pode ser maior ou menor. Essa característica mostra que em baixas velocidades do vento, se pode obter um alto torque de partida. O ângulo indicado por θ , indica a posição angular da pá de avanço, que quando atinge 180° , passa a ser chamado de pá de retorno. Os outros elementos descritos na figura abaixo que compõe o rotor são a corda c que tem a mesma função da turbina de Darrieus, o afastamento a que indica a distância entre as calhas, e a sobreposição s , que indica a espessura das pás (AKWA; PETRY, 2011).

Figura 9: Descrição do funcionamento Savonius

Fonte: Akwa; Petry, 2011.

Por apresentar essas características de funcionamento, obtém essa condição $F_{D \cos \alpha} > F_{L \sin \alpha}$ força de arrasto maior que a sustentação, o inverso da turbina de Darrieus. Para descobrir esse valor de arrasto deve-se utilizar a Equação 4, que envolve também o coeficiente de arrasto, C_D , a qual o valor é tabelado e está indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficiente de arrasto

Formato Geométrico	C_A
Cilindro circular	1,2
Haste quadrada	2,0
Semicircular côncavo	2,3
Semicircular convexo	1,2
Cilindro elíptico	0,6
Hemisférico côncavo	1,4
Hemisférico convexo	0,39

Fonte: Adaptado de White, 1999.

Visto isso, sua característica inicial se parece com a do rotor de Darrieus, mas esse tipo de rotor não é gerado a partir de um binário resultantes das forças. Consoante a Corona (2016), o seu funcionamento se dá a partir de quando o vento atinge as pás resultando numa diferença de forças de arrasto entre a parte côncava e a parte convexa. Assim surgindo um momento de força que faz girar a turbina como ilustrado na Figura 9. Esse momento é calculado através da expressão:

$$M_{rot} = C_m \frac{1}{4} D \rho A_p V_0^2 \quad (32)$$

Onde C_m é o coeficiente de momento da força, e D o diâmetro das pás. Essa equação baseia-se na equação do torque visto anteriormente, distinguindo apenas o coeficiente que para este tipo de turbina utiliza o momento.

Os dois modelos de turbinas de eixo vertical apresentaram comportamentos parecido, pois estão no mesmo fluido, sendo assim as equações vista anteriormente irão servir para o entendimento do comportamento da turbina de Savonius.

Posteriormente, ao identificar as velocidades vigente no comportamento, tem-se que levar em conta a solidez da turbina, também definida pela Equação (30), havendo mudança apenas no formato da geometria, representado pela formula:

$$\text{Área de Varredura} = HD \quad (33)$$

Sendo H a altura das pás e D o diâmetro total do rotor, representado pela Equação (34):

$$D = 2d + s \quad (34)$$

No qual o s representa a relação de superposição das pás e o d representa assim o diâmetro delas. Sua área das pás total, se distingue também da turbina de Darrieus, podendo ser expressa:

$$\text{Área Total} = 2dH \quad (35)$$

Dessa forma, substituindo as Equações (33), (34) e (35), na Equação (30), a solidez da turbina Savonius pode ser representada:

$$\sigma = \frac{2dH}{(2d + s)H} \quad (36)$$

Um componente da solidez é comparar o eixo do rotor com o diâmetro das pás, em que se o eixo for muito menor que o diâmetro das pás, seu valor é descartado.

Bem como na turbina Darrieus, o efeito TSR ou velocidade de ponta da pá interfere no funcionamento da turbina, no qual deve-se ser analisado minuciosamente, visto que em baixa velocidade de λ a turbina apresentará um elevado torque mais pouco rendimento pois boa parte do vento não será aproveitada, em contrapartida às altas velocidades, as pás atuaram como uma barreira, oferecendo resistência para a passagem do vento. Então se deve ter uma velocidade intermediária para não atrapalhar. Se pode-se calcular a partir da Equação (19).

O Fator de aspecto de pá visto na Equação (29), também interfere na performance do rotor Savonius, visto que para se obter o seu resultado difere da outra expressão apenas pela geometria, ficando da seguinte forma:

$$AR = \frac{H}{D} \quad (37)$$

Sendo H à altura das pás e D o diâmetro do rotor.

O número de Reynolds também é de suma importância para o estudo da performance do rotor de Savonius. Segundo Blackwell et al (1977), o aumento do número de Reynolds acaba acarretando a retardação da camada limite sobre a parte convexa da pá, com isso ocasiona uma redução do arrasto sobre a pá e aumentar a força de sustentação. Outro ponto relacionado ao número de Reynolds são as escalas de turbulência, assim fazendo uma análise minuciosa tem-se o maior número de informações para não ocasionar a perda de rendimento.

Distinto do rotor Darrieus, que para a melhora da sua performance o ponto primordial é no planejamento dos seus perfis aerodinâmicos, nesse modelo os perfis são praticamente os mesmos se distinguindo a partir de parâmetros fundamentais. Esses tipos de parâmetros quando acrescentado ao projeto gera um melhor desempenho um deles são as placas de extremidades, conforme ilustrado na Figura 10. Segundo Oliveira (2014), sua finalidade é de evitar a fuga de ar na parte côncava das pás para o escoamento secundário, ou seja, as placas acabam aumentando a quantidade de ar que passa na turbina, podendo ser 1,1 vezes o valor do diâmetro do rotor.

Figura 10: Placas de extremidades

Fonte: Akwa; Petry, 2011.

Outra peculiaridade desse rotor é a razão das sobreposições s , que influencia no torque gerado. Para turbinas Savonius, que tenha finalidade apenas de produzir um alto desempenho do momento (torque), é fundamental o planejamento ideal desse valor, pois aumentando o seu valor até certo ponto causa uma melhora, contudo passando do valor ideal causa o efeito contrário. Uma condição que também ajuda é a razão de afastamento a , no qual por sua vez não pode ser grande, devido que acarreta a diminuição de recirculações causando a perda da quantidade de movimento e da potência útil (KOTHE, 2016).

Representado na Figura 10 duas variações de rotores, eles se distinguem pelo número de estágio apresentado. Sendo definido como a quantidade de rotores presente na turbina, que geralmente é ligado em serie. A escolha da quantidade de estágio depende muito do local que você deseja instalar a turbina, logo que o intuito da escolha de mais de um estágio é para captar ventos em todas as direções possíveis, gerando um maior aproveitamento. Em contrapartida, um aumento muito significativo pode ocasionar uma perda de eficiência, assim o ideal fica entre um a dois estágios (KOTHE, 2016).

Uma influência na aerodinâmica é o número de pás dos rotores, onde comumente se utilizam de duas a três pás, mas esse número pode chegar até seis. Com o aumento no número de pás o torque gerado no rotor aumenta significativamente. Porém, há uma perda no rendimento, podendo cair em média de 30% a 50% (KOTHE, 2016).

Os parâmetros fundamentais básicos que interferem no rendimento são esses apresentados, visto isso os conceitos servem para uma noção do comportamento dessa turbina, mas se torna quase impossível prescrever o que acontecerá na pratica. Dessa forma, assim como o rotor Darrieus é necessário fazer testes empiricamente, para que assim se consiga chegar ao resultado esperado.

4 METODOLOGIA

Postulado a Tartuce (2006), metodologia científica é o estudo sistemático e lógico dos métodos empregados nas ciências, seus fundamentos, sua validade e sua relação com as teorias científicas. Portanto, o presente trabalho de conclusão de curso pode ser caracterizado como uma atividade de pesquisa explorativa, ou seja, com fins de levantar informações sobre a aerodinâmica das turbinas eólicas de eixo vertical, de forma a aumentar o domínio, servindo para o desenvolvimento energético.

A princípio, o trabalho ficou dividido em duas etapas, que foram a definição da temática e do objetivo da pesquisa e em segundo o levantamento bibliográfico, tendo em vista a seleção de obras correlacionadas a temática.

A primeira fase do trabalho, se deu a partir do questionamento da temática, visto que a região em que estamos localizados apresenta um grande número de aerogeradores, contudo, eles são de eixo horizontal o que gera um alto investimento inicial. Dessa forma, foi realizado uma pesquisa tendo como objetivo encontrar uma energia que fosse considerada limpa e de baixo custo, assim foi escolhido as eólicas de eixo vertical. Esse tipo de pesquisa inicial é classificado como pesquisa qualitativa, consoante a Gil (2002), na qual tem por finalidade de produzir informações aprofundada, e ilustrativas.

Escolhido a temática, o segundo intuito foi realizar um levantamento bibliográfico, visando selecionar obras de acordo com a temática. As ferramentas de pesquisa utilizada foram: artigos, sites, vídeos, livros, entre outros. Assim, validando todas as fontes, deu-se início o presente trabalho, reunindo os pontos mais importante e fundamental para o desenvolvimento da área em questão.

Segundo Fonseca (2002), os efeitos observados são relacionados com as variações nos estímulos, assim sendo, utilizando os conhecimentos descritos no trabalho e colocando-os em prática, obtém-se um avanço e com isso contribui para o suprimento de energia.

Em suma, a pesquisa teve abordagem descritiva, tendo em vista não considerar minuciosamente os resultados e sim descrever o seu funcionamento básico. O trabalho também pode ser compreendido como explorativo, já que, não é um tema que tem uma grande pesquisa no desenvolvimento da área.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente percebe-se que o Brasil vem passando por uma reformulação energética, priorizando assim reduzir os impactos ambientais através das energias renováveis. Para um país emergente é importante a distribuição de energia constante, e com isso necessita-se da descentralização da produção de eletricidade. Visto que a cada ano a porcentagem elétrica renovável vem aumentando.

Em suma, o trabalho exposto serviu de para elencar as características das duas principais fontes eólicas de eixo vertical. Logo, conclui-se as seguintes particularidades:

- Sua construção e manutenção é econômica;
- Devido a seu formato aerodinâmico, sua instalação pode ser em qualquer lugar independentemente da direção do vento;
- Rotor Darrieus é operado por força de sustentação e apresenta uma alta eficiência;
- Rotor Savonius é operado por força de arrasto e apresenta um alto torque.

Visto essas principais característica e as necessidades para o desenvolvimento energético, percebe-se que esse tipo de rotor é um forte candidato para a produção de eletricidade, tanto em larga como em pequena escala.

Com uma grande disseminação e estudo na área de modo como vem sendo ultimamente, os rotores poderão apresentar coeficientes de potência cada vez mais alto, melhorando assim seu desempenho.

Conclui-se que o presente trabalho pode ser utilizado como material introdutório ao estudo aerodinâmico dos rotores Savonius e Darrieus.

Para trabalhos futuros, busca-se a incentivar cada vez mais a investigação do comportamento da geração de energia, visto que ainda são encontrados poucos tipos de literatura. Contudo esses tipos de turbinas podem ser analisados por software cada vez mais desenvolvido, com isso a produção pratica desses tipos de turbinas utilizando essas ferramentas será um passo a mais para o desenvolvimento.

6 REFERÊNCIA

AKWA, João Vicente; PETRY, Adriane Prisco. Análise do desempenho de rotores eólicos savonius empregado o método de volumes finitos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Rio Grande do Sul, v. 2, p.1-12, 2 dez. 2011.

ALEXANDER, A. J.; HOLOWNIA, B. P. Wind Tunnel Tests On Savonius Rotor, **Journal of Industrial Aerodynamics**, v. 3, 1978.

AMARANTE, O. A. C. D. et al. **Atlas eólico: Espírito Santo**. Vitória. 2009.

BLACKWELL, B. F.; SHELDAHL, R. E.; Feltz, L. V. **Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors**, Final Report SAND76-0131, Sandia Laboratories, Albuquerque, USA, 1977.

CASER, Eduardo Spalenza; PAIVA, Giuseppe da Mota. **PROJETO AERODINÂMICO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL (TEEV) PARA AMBIENTES URBANOS**. 2016. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

CORONA, Jaime Câmara. **Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo de Turbina Eólica de Eje Vertical Tipo Savonius**. 2016.

DÍAZ, A. P.; PAJARO, G. J.; SALAS, K. U. **Computational model of Savonius turbine**. [S.l.]. 2014

Eficiência máxima de uma turbina e Lei de Betz. Produção de Ruan Cabral. 2017. P&B.

EMULE, Albert. **Projeto gerador elétrico eólico 12v 500 watts**. Salvador: Albert Emule, 2017. Color.

FONSECA, João José Saraiva da. **METODOLOGIA DE PESQUISA CIENTÍFICA**. 2002

GEROTO, G. H. R. “**Avaliação do desempenho de um aeromotor de eixo vertical**”. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas S.a., 2002.

HAMDAN, A.; MUSTAPHA, F.; AHMAD, K. A.; MOHD RAFIE, A. S. “**A review on the micro energy harvester in structural health monitoring (SHM) of biocomposite material for vertical axis wind turbine (VAWT) system: A Malaysia perspective**”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014

HANSEN, M. O. L. “**Aerodynamics of wind turbines**”. Second edition. USA: Earthscan, 2008

HEILMAM, Armando. **Introdução aos fenômenos de transporte: características e dinâmica dos fluidos**. Curitiba, Pr: Intersaberes, 2017

KOTHE, Leonardo Brito. **ESTUDO COMPARATIVO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO SOBRE O DESEMPENHO DE TURBINAS SAVONIUS HELICOIDAL E DE DUPLO-ESTÁGIO**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,rs, 2016.

LUNELLI, Dênis Luiz. **Os princípios da aerodinâmica do voo**. Sao Paulo: Hangar33, 2013. Color

MACHADO, Caio Filippo de Faria. **PROJETO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL**. 2014. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro- Ufrj, Rio de Janeiro, 2014.

MARQUES, J. “**Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**”. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2004

MINISTÉRIO DE ENERGIA E MINAS. **Resenha Energética Brasileira 2015**. Brasília, p. 32. 2015.

OLIVEIRA, C. P. **Análise do Desempenho de uma Turbina Savonius Helicoidal com Torção de 180° Empregando Simulação Numérica**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

PASSOS, J. C. **“Rotor eólico Darrieus: Um estudo experimental”**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1984

PAULA, Midiã Naara de Brito. **DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ROTOR DE AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL DE PEQUENO PORTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DE VENTO DE CARAÚBAS**. 2016. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do SemiÁrido-ufersa, Caraùbas - Rn, 2016.

PURIFICAÇÃO, Luerles Silva da; DELLA FONTE, Rodrigo Borges. **ESTUDO DE TURBINAS EÓLICAS VERTICAIS COM EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DARRIEUS PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS**. 2012. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

REIS, Lineu Belicos dos. **Geração de Energia Eletrica**. 2. ed. Barueri, Sp: Manole, 2011

SANTOS, Alane Farias dos. **PRINCÍPIOS BÁSICOS DA AERODINÂMICA DO FUNCIONAMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DE DARRIEUS**. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. Fortaleza-ce, p. 1-10. 21 ago. 2015.

SILVA FILHO, Gilson Clementino da; OLIVEIRA, Wagner Silva de. **ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TURBINA DE EIXO VERTICAL SAVONIUS, NA CIDADE DE JOÃO CÂMARA - RN**. 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Tecnologia em Energias Renováveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, João Câmara - Rn, 2018.

SILVA, Roberto Gil Annes da. **AERODINÂMICA DA ASA E FUSELAGEM NO REGIME SUBSÔNICO**. Sao Paulo: Roberto Gil Annes da Silva, 2013. Color.

SIMONSEN, Henrique. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA**. 2010. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, Sao Paulo, 2010.

TARTUCE, T. J. A. **MÉTODOS DE PESQUISA**. Fortaleza: UNICE – Ensino Superior, 2006. Apostila.

VICTOR, Joao. **Número de Reynolds: entenda tudo.** Sao Paulo: Guia da Engenharia, 2019. Color.

WENZEL, Guilherme München. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL.** 2007. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica – Demm, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,rs, 2007

WHITE. F. M; **Fuid Mechanics, Fourth** ed.: McGraw-Hill, 1999.