

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Heliaquim Benicio Saraiva Ferreira

Kaison Leandro Alves dos Santos

**ESTUDO AERODINÂMICO DE AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Heliaquim Benicio Saraiva Ferreira

Kaison Leandro Alves dos Santos

**ESTUDO AERODINÂMICO DE AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
para conclusão do Curso de Engenharia
Mecânica do Centro Universitário Alves Faria,
sob a orientação do Prof. Dr. Rodrigo Lisita
Ribera.

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA (UNIALFA)
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Heliaquim Benicio Saraiva Ferreira

Kaison Leandro Alves dos Santos

**ESTUDO AERODINÂMICO DE AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

AVALIADORES:

Prof. Dr. Rodrigo Lisita Ribera – UNIALFA
(Orientador)

Prof. Me. Fabiana Rocha de Andrade e Silva – UNIALFA

GOIÂNIA
NOVEMBRO DE 2019

*Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus,
pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.*

*Aos meus pais, minha família que, com muito carinho e apoio,
não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.*

*Agradeço também a todos os professores nos acompanharam durante a
graduação, em especial ao Prof. Dr. Rodrigo Lisita e à Prof. Me. Fabiana Rocha,
responsáveis pela realização deste trabalho.*

Aos amigos e todos os colegas que sempre estava junto a nós no decorrer do curso.

“ Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma. ”

Antoine Lavoisier

RESUMO

Heliaquim Benício Saraiva, Kaison Leandro Alves dos Santos. **Estudo Aerodinâmico De Aerogeradores De Eixo Vertical De Pequeno Porte**. Trabalho de conclusão de curso. 43f. Graduação em Engenharia Mecânica. Goiânia, 2019.

A geração de energia elétrica está classificada em diversos segmentos, sendo os mais aplicados: modelos mecânicos, térmicos, químicos e nucleares, sendo a energia eólica cada vez mais usada no cotidiano por se tratar de uma fonte inesgotável, sustentável e de baixo impacto ambiental. Visto que, o consumo de energia elétrica é cada vez maior no meio industrial, procurou-se desenvolver um estudo aerodinâmico para um projeto de um Aerogerador de eixo vertical de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: Energia. Aerogerador. Eixo vertical. Aerodinâmica.

ABSTRACT

Heliaquim Benicio Saraiva Ferreira, Kaison Leandro Alves dos Santos. Small vertical wind turbine for industrial use. Final Paper. 43f. Graduation in Mechanical Engineering, Goiânia, 2019.

Electricity generation is classified in several segments, being the most applied: mechanical, thermal, chemical and nuclear models, being the wind energy increasingly used in daily life because it is an inexhaustible, sustainable and low environmental impact source. Given the increasing consumption of electricity in the industrial environment, an aerodynamic study was developed for a project of a small vertical axis wind turbine.

KEYWORDS: Energy. Wind generator. Vertical axis. Aerodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Novos investimentos globais em energia limpa	18
Figura 2 - Moinhos de vento em La Mancha, na Espanha.....	19
Figura 3 – Parque eólico Pedra do Reino, Sobradinho-BA	20
Figura 4 – Turbina eólica de eixo horizontal	21
Figura 5 – Aerogerador de Pequeno Porte de eixo vertical	22
Figura 6 – Aerogerador híbrido de Pequeno Porte de eixo vertical.....	23
Figura 7 – Aerogerador de Pequeno Porte de eixo horizontal	23
Figura 8 – Fluxograma de projeto.....	24
Figura 9 – Componentes de um Aerogerador	25
Figura 10 - TEEH Darrieus	27
Figura 11 - Forças atuantes na pá.....	28
Figura 12 - Perfil NACA 2412.....	31
Figura 13 - Nomenclatura das dimensões do perfil	32
Figura 14 - Perfis NACA utilizados.....	32
Figura 15 - Relação Cl/Cd com ângulo de ataque NACA 0006	34
Figura 16 – Relação Cl com Cd NACA 006.....	35
Figura 17 - Relação Cl/Cd com ângulo de ataque NACA 0010	36
Figura 18 - Relação Cl com Cd NACA 0010	37
Figura 19 - Relação Cl/Cd com ângulo de ataque NACA 0024.	38
Figura 20 - Relação Cl com Cd NACA 0024	39
Figura 21 - Relação Cl com Cd com todos os perfis analisados.....	41
Figura 22 - Relação Cl/Cd com ângulo de ataque de todos perfis analisados	42

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
1.1 COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA	25
2 METODOLOGIA.....	30
2.1 DESENVOLVIMENTO.....	30
2.2 PERFIS AERODINÂMICO.....	31
3 DISCUSSÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS.....	40
CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45

INTRODUÇÃO

Na ausência de energia a população sobrevive sem as necessidades básicas como saúde, educação e segurança. As empresas geradoras de serviços operam com grandes restrições e sem competitividade, o que limita o desenvolvimento como um todo da nação e consequentemente, de todo o mundo. A energia contribui para o aprimoramento de novas tecnologias visando conforto, segurança, benfeitorias que servem de base para o desenvolvimento da espécie humana. Aproximadamente, um bilhão de pessoas ainda vivem sem eletricidade e outros milhares sem a disponibilidade suficiente ou de fontes não confiáveis. Aproximadamente, 3 bilhões de pessoas usam combustíveis fósseis como madeira, gás ou outra biomassa qualquer para atividades domésticas que demandam energia como, por exemplo: aquecerem suas casas, cozinhar, tomar banho etc., isso resulta no lançamento de gases nocivos à saúde e a atmosfera, tal ação resulta em grandes impactos ambientais, pois atualmente quase metade da população usa combustíveis fósseis, mas também pode-se notar um grande progresso no cenário das energias renováveis que vem contribuindo cada vez mais com a geração de energia que é vital para o desenvolvimento dos países. Com a descoberta e evolução de novas tecnologias com custo cada vez mais competitivo, os estados proporcionam melhores condições de saúde, segurança, conforto, gerando uma maior expectativa de vida para a população (SIVARAMAN, 2018).

Novas fontes de energia em larga escala combinam eletrificação dentro e fora da rede gerando enormes ganhos no acesso e na produção de energia em vários países. O sistema fotovoltaico em residências tem contribuído de forma significativa, pois se mostram cada vez mais eficientes, ao passo que se tornam mais acessíveis a população como um todo, contribuindo para a acessibilidade a países que sofrem com a falta de energia, os estados situados no sul da Ásia e em grande parte da África tem se beneficiado desse avanço tecnológico chamado energia renovável (SIVARAMAN, 2018).

Atualmente, acredita-se que sem energia elétrica é inimaginável a sobrevivência e consequentemente o desenvolvimento da população. O Banco Mundial tem se comprometido a ajudar os estados de forma a implementar tecnologias que melhor atendem suas necessidades e aceleram a expansão de eletricidade contribuindo com a erradicação da pobreza a nível global (FRANCISCO, 2019).

Desde a revolução industrial, a demanda de energia pelo ser humano é cada vez maior. No Brasil, o consumo foi de 460,8 TWh, por meio da rede de distribuição energética no ano de 2016 (vale lembrar que estes dados não incluem unidades autoprodutoras), o que

corresponde a um consumo *per capita* de 2.228 Kwh/hab (EPE, 2016).

Estima-se, que a demanda de energia para o Brasil no ano de 2050 será três vezes maior que o atual consumo de 513 TWh (consumo de 2014) para 1.624 TWh, o equivalente a 7 mil quilowatts-hora por habitante/ano (ABRAFAC, 2014).

A principal fonte de energia no mundo atualmente são as matrizes não renováveis, que geram grande impacto ambiental, tendo o petróleo papel significativo com 31% de toda a demanda, seguido por carvão mineral 28%, gás Natural 21%, biomassa 10%, nuclear 4% e hidrelétrica 2%, apenas 1% são fontes renováveis provenientes da energia solar e eólica (RIBEIRO, 2019).

A fonte não renovável utiliza-se de recursos naturais esgotáveis, seja a curto, médio ou longo prazo, sendo que os principais exemplos de fontes de energia não renováveis são os combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural e xisto betuminoso). São geralmente de grande impacto socioambiental; em muitos casos a extração e comercialização de suas matérias-primas geram disputas, conflitos e até guerras, que têm por finalidade o domínio e comércio desses recursos. O carvão, a segunda fonte não renovável mais utilizada, principalmente para o abastecimento de termelétricas, teve o seu consumo em grande escala iniciado na época da primeira revolução industrial; no Brasil, entretanto, esta fonte corresponde a apenas 6% da matriz energética total. O carvão mineral precisa ser extraído dos subsolos que em alguns casos estão localizados em áreas florestais e de reservas ambientais, o que gera um grande impacto ambiental. Além dos problemas com a extração, os resíduos provenientes da queima deste combustível são altamente poluentes, sendo considerado ainda mais poluente que o próprio petróleo (PENA, 2019).

O gás natural é utilizado nas termoelétricas, indústrias, residências e até em veículos automotores, apesar de apresentar um menor impacto ambiental, é composto por uma mistura de hidrocarbonetos nas formas gasosas, tendo em sua composição elementos como o metano, etano, propano, butano, entre outros gases. Geralmente, essas reservas estão próximas às áreas de extração do petróleo e do carvão mineral, apesar de não gerar tantos resíduos ainda sim é poluente, pois os gases da combustão são lançados na atmosfera, sendo em grande parte responsáveis por causar o efeito estufa na atmosfera terrestre (OPS, 2008).

A intenção da humanidade é cada vez se utilizar da menor quantidade possível desses recursos, devido tanto aos impactos ambientais quanto à escassez e a geração de resíduos sólidos e gasosos. Os gases gerados pela queima de combustíveis fósseis são um dos grandes, senão, o maior vilão causador do efeito estufa na atmosfera terrestre, contribuindo para o

aquecimento global e alterando a temperatura terrestre, que por sua vez influencia diretamente nos ecossistemas e na biodiversidade do planeta (OPS, 2008).

O uso de energias renováveis está crescendo no cenário energético mundial como jamais nenhuma outra fonte de energia tenha feito, revela a BP (*British Petroleum*), Spencer Dale. Estima-se, que o uso da energia solar e eólica crescerá como nenhuma outra fonte de energia cresceu. Enquanto, a participação do petróleo na demanda mundial cresceu de 1% para 10% em 45 anos as energias renováveis alcançarão essa mesma proporção em apenas 25 anos (FOLHA DE SÃO PAULO, 2019). Para se ter uma noção da evolução da energia eólica no Brasil, em 2004 produzia-se pouco mais de 1,4 GW de potência em um total de 54 usinas, já em 2020 segundo o GWEC (Conselho de energia eólica global) o Brasil irá produzir mais de 700 GW de potência e para 2022 as perspectivas são ainda melhores com produção que se aproxima de 840 GW (REVISTA MODAL, 2017).

Alguns estudos apontam que em 2050, as energias renováveis devem representar dois terços de todo o consumo energético mundial, permitindo que os objetivos climáticos possam ser alcançados, além de impulsionar o crescimento sustentável, mobilizando o capital e impulsionando a inovação em todas as áreas de desenvolvimento e tecnologia (AIER, 2018).

No Brasil, de acordo com dados da federação nacional da Indústria, o setor industrial é responsável por aproximadamente 40% do consumo de energia elétrica do Brasil, com 573 mil unidades consumidoras industriais (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2017).

Visto que, com o passar dos anos a energia elétrica se torna um recurso cada vez mais caro e essencial para indústria brasileira, o estado tem investido em diversos recursos para conter o consumo a fim de evitar o acionamento de termelétricas, cujo custo da produção é elevado e poluente, ou seja, nocivo à saúde devido aos resíduos sólidos e gasosos depositados no meio ambiente (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2017).

Neste contexto, a demanda por fontes auxiliares de fornecimento de energia para as indústrias, possibilitando uma redução no consumo da rede pública e consequentemente, na redução de resíduos contaminantes, é uma necessidade. Assim, o presente projeto propõe avaliar a viabilidade do uso de turbinas eólicas de eixo vertical de pequeno porte para produzir energia elétrica com o fluxo de massa exaurido por exaustores, podendo ser aplicadas em indústrias de diversos segmentos.

Este trabalho tem como objetivos:

Geral

Avaliar a geração de energia limpa e sustentável através da conversão de energia cinética do vento em energia elétrica, utilizando para tal um Aerogerador de eixo vertical de pequeno porte, com ênfase em estudos aerodinâmicos simulados pelo *software XFLR5*.

Específicos

- Decompor o Aerogerador de eixo vertical em seus componentes, suas funções e relacionamentos;
- Modelar o Aerogerador;
- Modelar as pás;
- Coletar dados através de gráficos gerados pelo *software*;
- Verificar e validar o modelo das pás.

Este trabalho justifica-se, principalmente pela utilização de uma fonte energética alternativa em áreas industriais, para diminuir os gastos com as tarifas de energia, utilizando um Aerogerador, o qual não necessita de abastecimento de combustível como as fontes convencionais de energia. Por se tratar de uma turbina eólica, que tem como o vento uma fonte abundante de matéria prima, é capaz de combater o efeito estufa e é livre de poluição. Para reaproveitar a energia eólica presente nas diversas formas disponíveis, nos mais diversos ambientes, inclusive nas áreas industriais como, por exemplo, nas saídas de exaustores. É proposta a utilização de Aerogerador de eixo vertical de pequeno porte para realizar a conversão de energia cinética em energia elétrica. Esta pode ser utilizada de várias formas, armazenadas em baterias ou injetada na rede, proporcionando economia e sustentabilidade.

O trabalho será desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, para um melhor entendimento sobre energia renovável e desempenho e funcionamento de um Aerogerador de eixo vertical. Para à elaboração do projeto serão utilizados modelos matemáticos, o projeto utilizará uma abordagem de engenharia. Na fase de conceito uma revisão bibliográfica levantará as aplicações e os modelos de turbinas eólicas de eixo vertical, horizontal, e de pequeno, médio e grande porte. No desenvolvimento serão selecionados três modelos de perfis NACA¹ para uma análise aerodinâmica. A implementação será através da utilização de software para análise dos perfis aerodinâmicos. Serão tomadas como base estudos aerodinâmicos em aeronaves devido a uma maior bibliografia disponível tendo como foco perfis NACA simétricos, devido à falta de recursos tecnológicos para estudos práticos de

¹ NACA conhecida como Comitê Consultivo Nacional de Aeronáutica, surgiu bem como sua organização sucessora, a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), em resposta ao sucesso de outros. A NACA foi fundada em 3 de março de 1915, como uma agência governamental independente, subordinada diretamente ao Presidente. Os fundamentos da NASA e o sucesso de suas muitas missões assentam diretamente na pedra angular dos conhecimentos técnicos e organizacionais da NACA (Elizabeth Suckow, 2009).

aerodinâmica e fluxo de massa, as simulações se darão por gráficos apresentados pelo *software XFLR5* que se baseia dentre vários pontos de estudo como: perfil, linha de curvatura, borda de ataque, borda de fuga etc., mas tem como foco três pontos de estudos dos quais são os de maiores relevâncias para os estudos aerodinâmicos de perfis NACA: ângulo de ataque que é o ângulo cuja a corda (linha que divide simetricamente o perfil da pá ao meio) forma com a direção do vento, o coeficiente de sustentação que mantém as foças equilibradas e dá sustentação ao conjunto e o coeficiente de arrasto que é uma consequência da turbulência do vento gerado na região da borda de fuga.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pode-se dizer que energia está associada à capacidade de produção de ação e/ou movimento e manifesta-se de muitas formas diferentes, como movimento de corpos, calor e eletricidade. Conforme a primeira lei da termodinâmica, a energia não pode surgir do nada e nem pode ser destruída, a única possibilidade que existe é a sua transformação de um tipo de energia em outro. Um exemplo disso, é a energia potencial gravitacional da queda d'água nas turbinas de hidrelétricas que é convertida em energia cinética e depois elétrica; outro exemplo é a massa de ar que movimenta um Aerogerador que converte energia cinética em energia mecânica, e posteriormente em elétrica, que é um recurso fundamental para a humanidade e que impacta diretamente a qualidade de vida, bem estar, segurança e tecnologia (SILVA, 2019).

A matéria prima das fontes de Energias não renováveis é escassa, não se sabe ao certo até quando se tem à abundância desses recursos, atualmente os gases produzidos na queima dos combustíveis fósseis são apontados como responsáveis pelo efeito estufa e aquecimento global. Esses recursos esgotáveis recebem esse nome: fósseis, pois são originários de restos de animais e plantas que viveram em épocas remotas, a transformação desses fósseis na matéria prima do petróleo teve seu acúmulo e formação ao longo de milhares de anos em camadas muito profundas da crosta terrestre devido à pressão e alta temperatura. Esses combustíveis encontrados em nossa crosta, o petróleo, o gás e seus derivados não são renováveis, ou seja, uma vez esgotados se torna impossível obtê-los novamente diferentemente do vento que é um recurso não poluente e inesgotável (GOUVEIA, 2018).

Outra fonte de energia não tão poluente quanto os derivados dos combustíveis fósseis, mas que também faz parte da gama de energias não renováveis é a energia nuclear ou energia atômica, que geralmente, utiliza-se em sua maioria de urânio (recurso não renovável) ou outros elementos para sua transformação. Por serem uma fonte de energia altamente concentrada e de elevado rendimento, diversos países utilizam a energia nuclear como opção energética. As usinas nucleares respondem por 16% da energia elétrica produzida no mundo, sendo que cerca de 90% dessa energia está situada nos EUA, Países da Europa, Rússia e Japão (40% da matriz energética de países como Bélgica, Finlândia e Suécia são provenientes de energia nuclear) (GOUVEIA, 2018). No Brasil, mais precisamente no estado do Rio de Janeiro também se explora essa tecnologia, através das usinas de Angra 1 e Angra 2. A construção de Angra 3 estava paralisada desde 1986, mas teve sua licença ambiental aprovada

em Julho de 2008, teve as obras retomadas, mas atualmente o projeto se encontra novamente paralisado (ENERGIA, 2019). Apesar de muito rentável, os riscos de acidentes, caso aconteça, são catastróficos, tal como em Chernobyl na Ucrânia. Hoje a lei não permite a exploração de urânio nem que as gerações de energia nuclear sejam realizadas por empresas privadas, o que deixa esse tipo de energia cada vez mais inviável (ENEEL, 2019).

Entre as fontes não renováveis, o carvão é uma das mais abundantes e também um dos combustíveis fósseis mais baratos; assim como as outras fontes não renováveis, não depende de fatores climáticos, mas em contrapartida sua queima emite numerosos gases nocivos, incluindo o dióxido de carbono, dióxido sulfúrico e cinzas. O carvão chega a emitir 2 vezes mais CO₂ que os outros combustíveis fósseis. Outro ponto negativo do carvão é ele ser altamente nocivo à saúde de operadores que o manejam (MS, 2018).

Dentre as fontes renováveis de energia tem-se a Hidrelétrica responsável por 70% da produção de energia elétrica no Brasil (SHIMAKO, 2018). Esse tipo de energia é principalmente obtido através de centrais hidroelétricas, que estão associadas a barragens de grande ou média capacidade, que represam a água dos rios, constituindo um reservatório de água, interrompendo pontualmente, o fluxo de água. Entre as vantagens tem-se, o baixo custo para sua produção e principalmente no Brasil é abundante devido ao país possuir 12% do volume de água doce superficial da terra (característica imprescindível para a geração de energia hidrelétrica). Não é por acaso que se tem uma das maiores hidrelétricas do mundo no Brasil, que é a Binacional Itaipu. No Brasil, há diversas usinas hidrelétricas, as maiores geradoras de energias em ordem decrescente de capacidade são: Usina Hidrelétrica de Itaipu (Paraná), Usina Hidrelétrica de Belo Monte (Pará), Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós (Pará) e Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Pará) e Usina Hidrelétrica de Santo Antônio (Rondônia).

Uma usina hidrelétrica gera energia elétrica, a partir do potencial hidráulico de um rio, ou seja, vazão do rio (volume de água em um determinado período de tempo), apesar de usar um recurso natural, os impactos ambientais de uma usina hidrelétrica são de grande escala e irreparáveis, pois na construção das usinas ocorrem grandes desmatamentos, provocam prejuízos à fauna e à flora, inundam áreas verdes, além de alocar dezenas e até povoados inteiros, para construção das mesmas, gerando assim uma mudança de todo um ecossistema e também da cultura vivida na respectiva região onde é implantada uma usina nestas configurações (SHIMAKO, 2018).

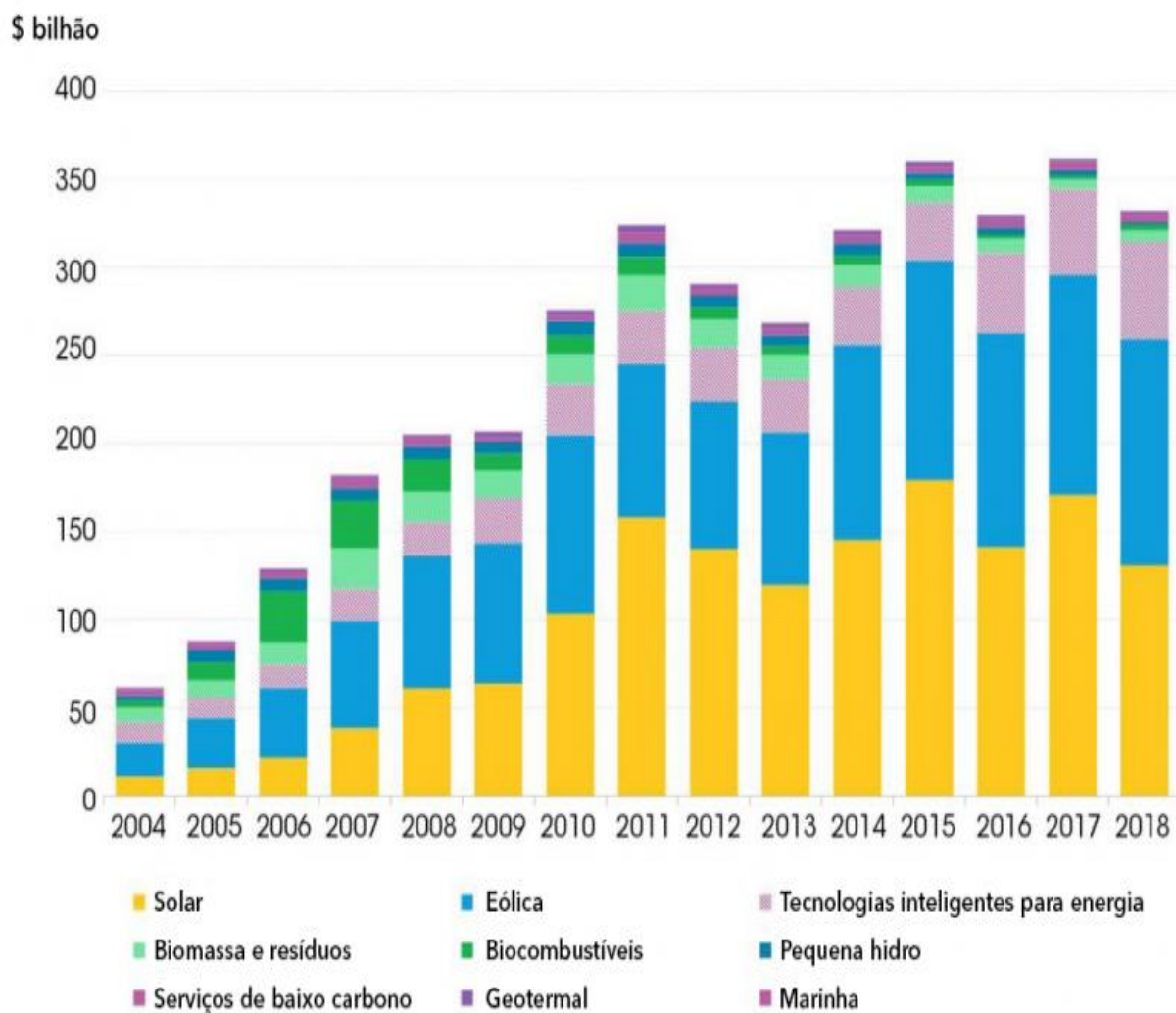
A energia solar, energia fornecida pelo sol (calor e luz), é convertida em energia térmica ou energia elétrica. A conversão para energia térmica é muito utilizada em sistemas de aquecimento de água, por exemplos, aquecedores de piscinas. A conversão direta da radiação solar em energia elétrica é feita através de placas fotovoltaicas que são fabricadas a partir de materiais semicondutores como, o silício. A energia solar é bastante vantajosa comparada com outras fontes renováveis, como as hidrelétricas, pois a mesma não requer uma área tão extensa para sua instalação e se torna mais vantajosa no Brasil, pois ele possui grandes áreas com radiação solar, pois está próxima a linha do equador (EÓLICA, 2019).

Eólico é um termo proveniente do latim, *aeolicus*, que pertence a *Éolo*, o Deus dos ventos, que controlava a força dos ventos na mitologia grega, a palavra eólica é aquilo que tem relação com o vento, assim energia eólica é a energia proveniente da energia do vento.

Na ciência, sabe-se que não é o Deus Grego Éolo que controla o vento, e sim que ele é proveniente do deslocamento de massa de ar das zonas de alta pressão para as de baixa pressão. Essa diferença de pressão é devido à diferença de aquecimento da superfície da terra, pois o sol não aquece a terra por igual, de forma uniforme. Algumas regiões recebem a massa de ar quente e outras de ar frio; nas regiões quentes, o ar expande e eleva-se, e a massa fria toma conta desse espaço que é uma zona de baixa pressão fazendo com que o ar se desloque, criando o vento (WALISIEWICZ, 2008).

A energia eólica vem sendo utilizada pelo homem a milhares de anos, uma das suas utilizações pioneiras foram em embarcações, que ainda é bastante utilizada nos dias de hoje em barcos a vela, que utilizam a energia dos ventos para se locomoverem. Pode-se ver que o investimento desde meados dos anos 2000 nas energias limpas é em bilhões de dólares, conforme Figura 1.

Figura 1 – Novos investimentos globais em energia limpa



Fonte: Investimentos em energia (Web ,2019)

Os moinhos de vento, Figura 2, utilizam a energia do vento para mover suas pás, que giram todo um sistema de engrenagens no seu interior para a realização da moagem de cereais, ou bombeamento de água.

Figura 2 - Moinhos de vento em La Mancha, na Espanha



Fonte: Moinho. In Britânica Escola. Web (2019)

A primeira turbina eólica para a geração de eletricidade foi desenvolvida na Escócia em julho de 1887, pelo Professor James Blyth. A produção de eletricidade dessa turbina era usada para iluminação da sua casa de férias em Glasgow (ROCHA, 2012).

O incentivo, os investimentos para o desenvolvimento e os estudos da aplicação das turbinas eólicas começaram a partir da crise internacional do petróleo, que deu origem a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica, instalada no ano de 1976, na Dinamarca. Atualmente, no mundo já existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação. O Brasil, como possui áreas com fluxo de massa de ar com velocidades altas, não poderia deixar de explorar esse recurso natural, hoje ele já conta com enormes parques eólicos com enormes capacidades de geração de energia, no total são 503 parques espalhados no território brasileiro,

sendo um deles, o de sobradinho, como mostra a Figura 3. Esse parque utiliza o modelo de eixo horizontal como mostra a Figura 4. Contando com cerca de 6500 Aerogeradores, com uma capacidade de produção de 12,64 GW cada uma (AIER, 2019).

Figura 3 – Parque eólico Pedra do Reino, Sobradinho-BA



Fonte: GMC Construções e Empreendimentos (2015)

Turbinas eólicas podem ser caracterizadas como de grande e pequeno porte. As de grande porte, com os Aerogeradores industriais com alta capacidade de geração de energia, podem gerar em média 2,5 MW de energia elétrica, tendo em média de 80 a 100 metros de altura, com 3 pás sendo que cada pá tem 45 metros de comprimento, chegando a pesar 6 toneladas cada (VESTAS COMPANY, 2018).

Figura 4 – Turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Autoria dos autores (2012)

Aerogeradores de pequeno porte tem uma pequena produção de energia, se comparado aos de grande porte, costumam ser usados em residências, e possuem uma produção em média de 1000 W. Aerogeradores podem se diferenciar também de acordo com a posição do seu eixo, sendo classificados como Aerogeradores de eixo vertical e horizontal, cada modelo possui *layouts* diferentes para os modelos das pás como mostram as Figuras 5, 6 e 7.

Figura 5 – Aerogerador de Pequeno Porte de eixo vertical



Fonte: Turbina tipo Darrieus, Eólica Fácil (2017)

Figura 6 – Aerogerador híbrido de Pequeno Porte de eixo vertical



Fonte: Tecnalbi engenharia (2019)

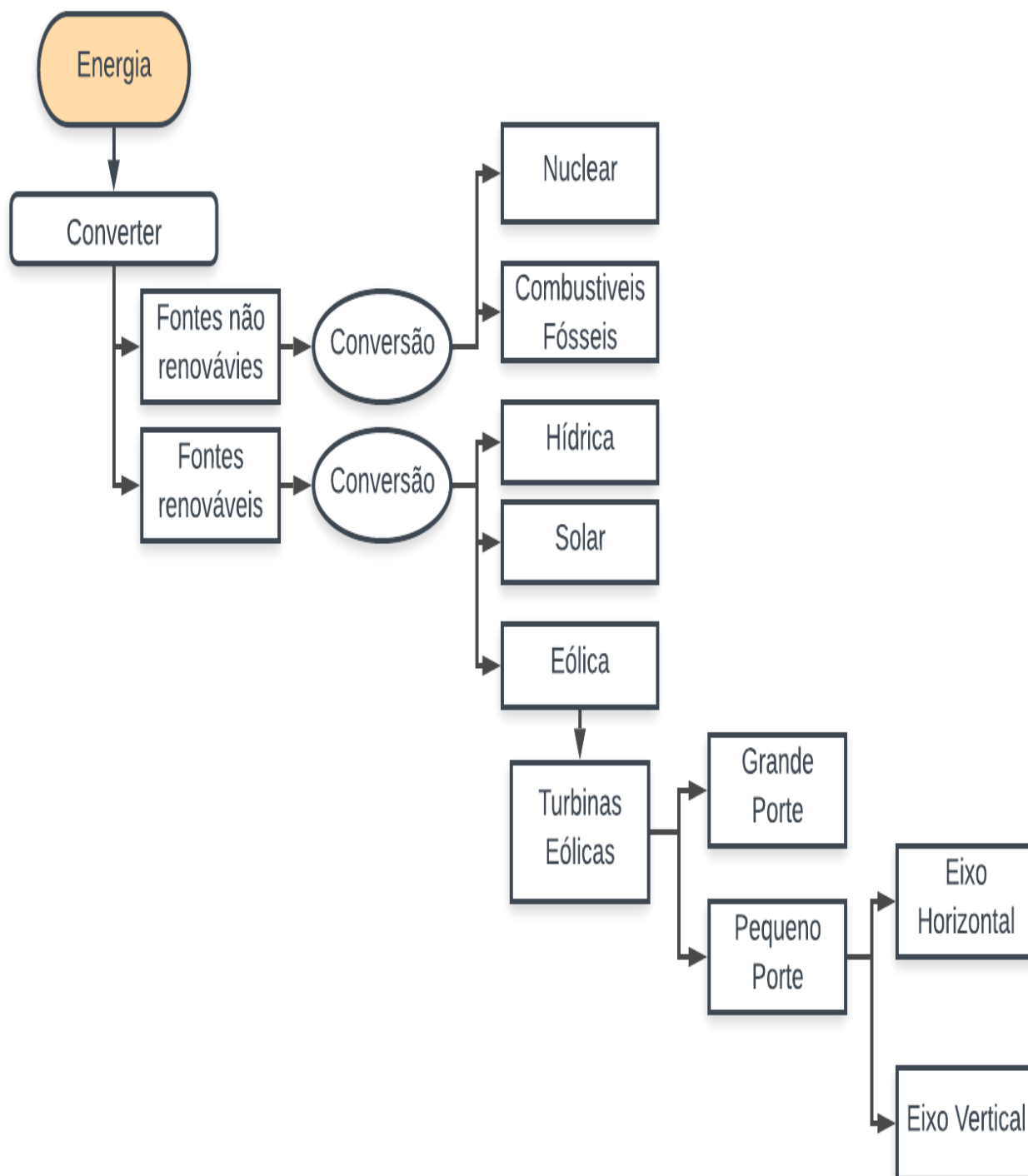
Figura 7 – Aerogerador de Pequeno Porte de eixo horizontal



Fonte: Aerogeradores Hummer, Livre Power, Lda, (2017)

A Figura 8 abaixo, mostra o fluxograma do projeto, que se decompõe em vários modelos de fontes de energia, como renováveis e não renováveis até chegar ao modelo de Aerogerador requerido nesse projeto, o TEEV (Turbina Eólica de Eixo Vertical).

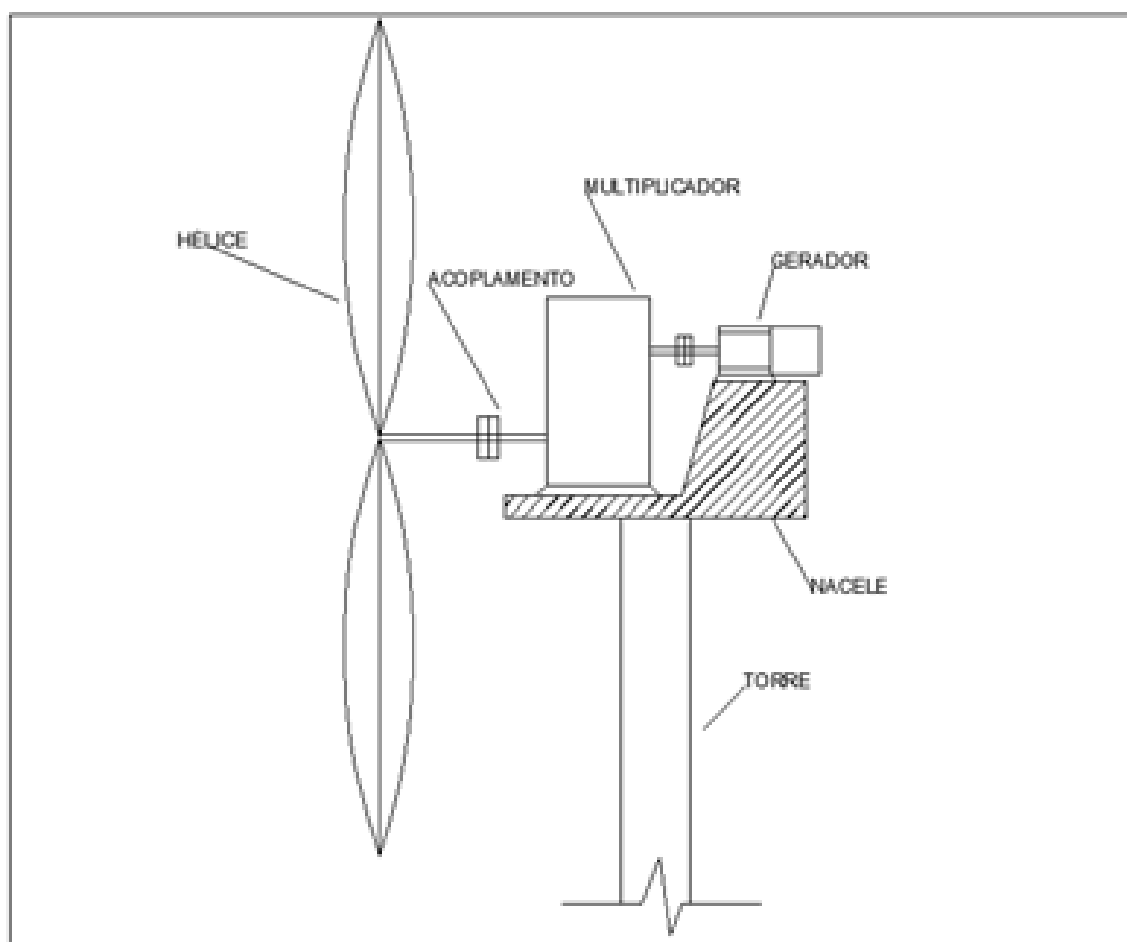
Figura 8 – Fluxograma de projeto



1.1 COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA

O Aerogerador de eixo vertical e horizontal possui praticamente os mesmos componentes, variando apenas a sua posição de funcionamento e o design. A Figura 9 mostra os principais componentes de um Aerogerador de eixo horizontal.

Figura 9 – Componentes de um Aerogerador



Fonte: Hidroenergia (2019)

- Hélice ou pá é um componente fundamental para a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica.
- Acoplamento faz a ligação e transmissão da energia mecânica para a caixa multiplicadora.
- Caixa multiplicadora tem a função de multiplicar a energia mecânica do sistema, ou seja, aumentar a velocidade de rotação do sistema para uma melhor eficiência.

- Gerador tem como função transformar a energia mecânica do sistema em energia elétrica.

Design Structure Matrix (DSM), é uma matriz quadrada, onde as células ao longo da diagonal representam os elementos de um sistema, e as células fora da diagonal representam as relações entre aqueles elementos. A Tabela 1 indica a relação entre vários elementos do Aerogerador de eixo vertical.

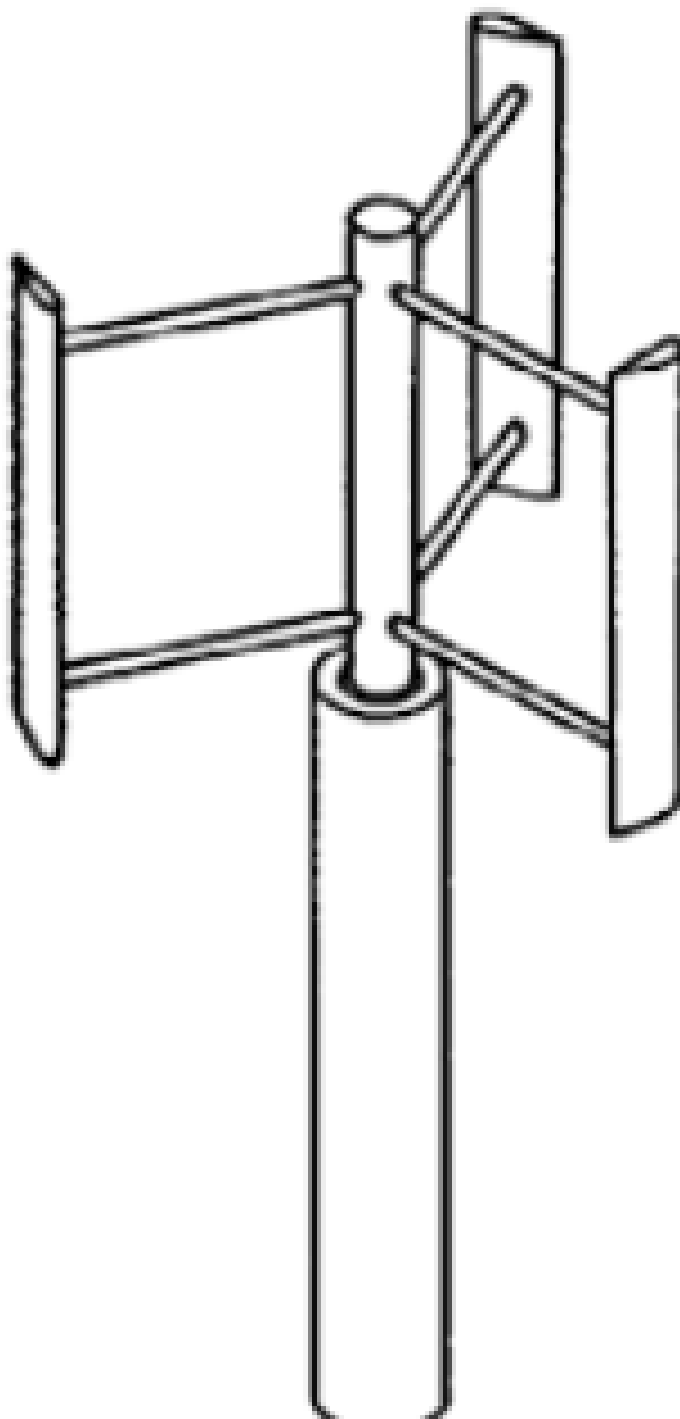
Tabela 1 – Tabela DSM

Matriz DSM															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Fundação A	A	X													
Base B		B	X	X	X	X									
Conjunto (parafuso, Porca e arruela) C			C	X	X	X									
Caixa de proteção D		X	X	D		X			X						
Caixa multiplicadora E					E	X			X	X					
Gerador F						F			X	X					
Cubo Inferior G							G	X	X	X					
Rolamento H							X	H	X						
Eixo I							X	X	I						
Torre/Rotor J							X	X	X	J	X	X	X	X	
Cubo superior K										X	K	X	X		
Rolamento L									X	X	X	L	X		
Eixo M											X	X	M		
Pás do Rotor N										X				N	X
Conjunto (parafuso, porca, arruela) O															O

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

O Aerogerador *Darrieus*, Figura 10, é o modelo de maior simplicidade construtiva, porém, o mesmo possui a análise aerodinâmica muito complexa quando comparada com os outros modelos de Aerogeradores de eixo vertical, tal complexidade se deve a variação do seu ângulo de ataque, essa variação se dá por causa das mudanças da velocidade angular do Aerogerador.

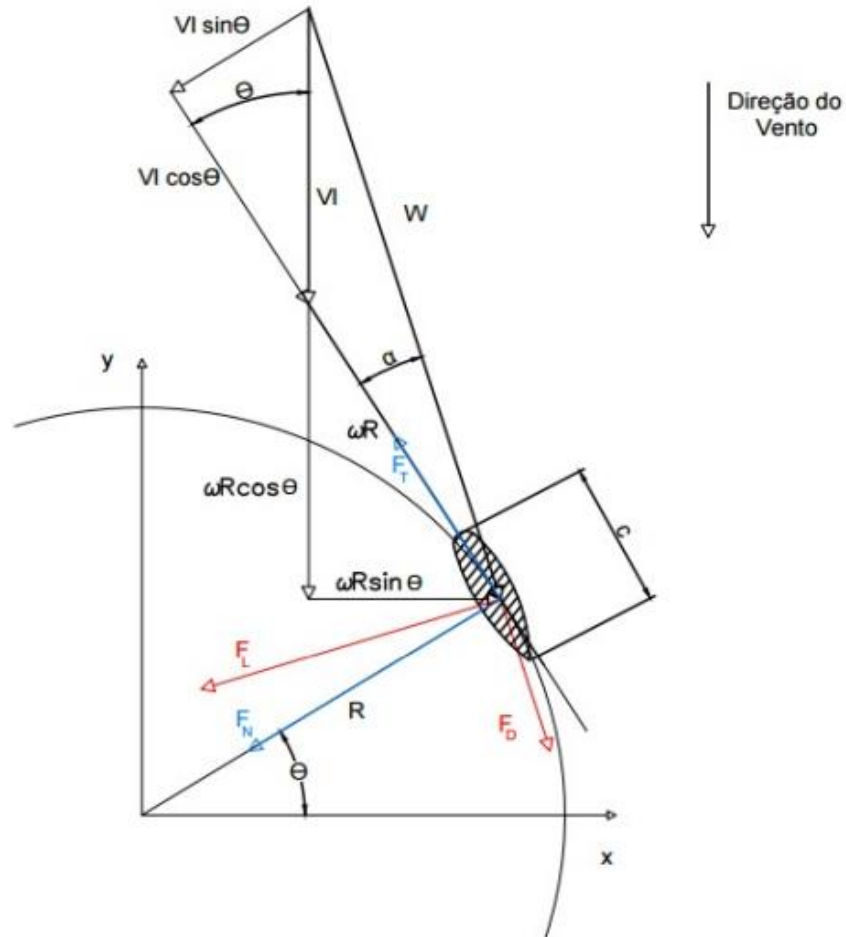
Figura 10 - TEEH Darrieus



Fonte: Darrieus vertical axis wind turbine (2017)

As forças atuantes na pá da TEEH podem ser visualizadas como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Forças atuantes na pá



Fonte: LUANA LEMOS AMARAL, 2016.

O ângulo de ataque (α), **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda} \right) \quad (1)$$

Velocidade relativa (W), **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$W = \sqrt{((V_I \sin \theta)^2 + (V_I \cos \theta)^2 + \omega R)} \quad (2)$$

A força tangencial (F_t) e força normal (F_n) que é exercida sobre a pá podem ser expressas como a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), respectivamente.

$$F_t = \frac{1}{2} \rho W^2 H_c C_t \quad (3)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho W^2 H_c C_n \quad (4)$$

Os coeficientes da força tangencial (C_t) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e o coeficiente da força normal (C_n) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são calculados usando as seguintes equações em função dos coeficientes de sustentação (C_L), e coeficiente de arrasto (C_D).

$$C_t = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (5)$$

$$C_n = C_L \cos(\alpha) - C_D \sin(\alpha) \quad (6)$$

A fração da força que age na direção do vento é expressa conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$F_y = F_t \cos \theta - F_n \sin \theta \quad (7)$$

O torque em cada pá, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$T = F_t R \quad (8)$$

O torque médio nas três pás pode ser expresso na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**,

$$T_{\text{médio}} = \sum F_t \frac{NR \Delta \theta}{2\pi} \quad (9)$$

Onde,

N é o número de pás.

Os coeficientes de sustentação e de arrasto são encontrados a partir da utilização do *software XFLR5*.

2 METODOLOGIA

2.1 DESENVOLVIMENTO

O Aerogerador, em estudo, será submetido a ventos com velocidade que podem chegar a 22 km/h dependendo da época do ano em Goiânia, mas sua velocidade média do ano será em torno de 10 km/h (WEATHER SPARK, 2016). Para o cálculo do número de *Reynolds* será considerado a velocidade do vento mais crítica 22km/h (6,111 m/s), com a corda da pá igual a 250 mm, utilizando $1,225 \frac{Kg}{m^3}$ como densidade do ar, e velocidade cinemática a $1,52 \times 10^{-5} m^2/s$ (CIMBALA, 2007). Por meio da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** obtém-se o seguinte número de *Reynolds*.

$$Re = \frac{V \rho C}{\mu} \quad (10)$$

$$Re = \frac{6,111 \frac{m}{s} 1,225 \frac{Kg}{m^3} 0,250mm}{1,52 \times 10^{-5} m^2/s}$$

$$Re = 0,123124 \times 10^6$$

Para definir se o fluido é compressível ou incompressível será utilizado a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), usando a velocidade do som de aproximadamente 340,29 m/s, (Renato Navarro, 2014), e o fluido com a sua velocidade máxima de 6,111 m/s.

$$M = \frac{V}{c} \quad (11)$$

$$M = \frac{6,111 m/s}{340,29 m/s}$$

$$M = 0,0178$$

Com o número de $Mach^2$ inferior a 0,3, os efeitos de compressibilidades não são importantes (Renato Navarro, 2014), ou seja, o valor obtido na Equação (2) é bem inferior, desta maneira as equações para análise do perfil são válidas.

2.2 PERFIS AERODINÂMICO

Aerofólios NACA são bastante utilizados na indústria aeronáutica para criar sustentação das aeronaves, utilizado também na indústria automobilística para dar estabilidade aerodinâmica mantendo o carro no solo, praticamente a mesma função que no avião, porém com o sentido da força de sustentação ao contrário. A família NACA é constituída de perfis NACA 4 dígitos, NACA 5 dígitos, NACA série 1 e NACA série 6 (ALLAN GILMOUR, 2012).

Os Perfis NACA de 4 dígitos podem ser simétricos ou assimétricos, cada dígito corresponde a uma característica do perfil.

Exemplo: NACA XYZW.

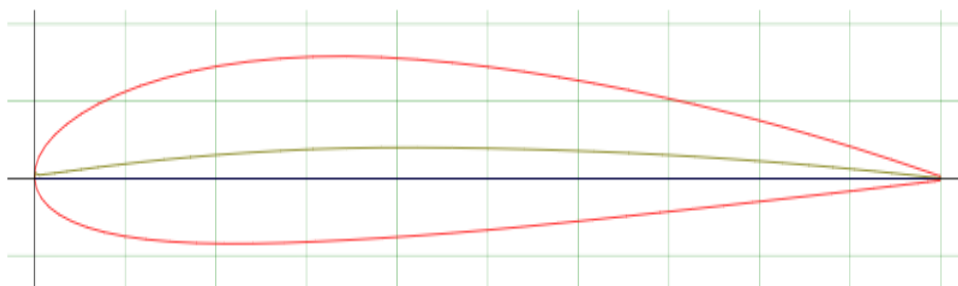
X: Camber máximo em porcentagem da corda.

Y: Posição do camber máximo em porcentagem da corda.

ZW: Espessura do perfil em porcentagem da corda.

A Figura 12 mostra um exemplo de um perfil NACA.

Figura 12 - Perfil NACA 2412

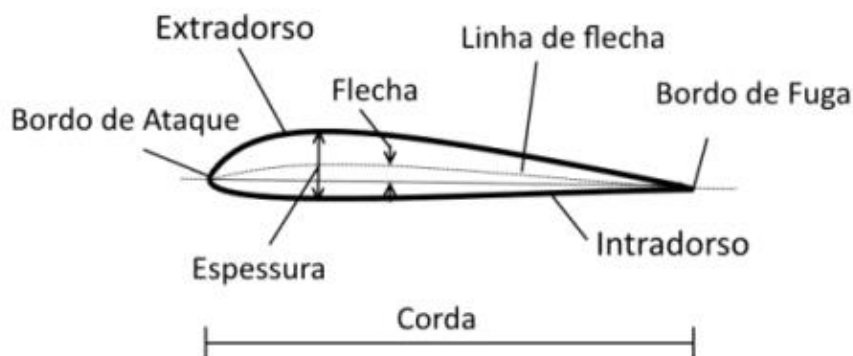


Fonte: Airfoiltools (2019)

² O Número de Mach ou velocidade Mach, é uma medida adimensional de velocidade que é definida como a razão entre a velocidade do objeto que se desloca em um meio fluido e a velocidade das ondas sonoras nesse meio.

A Figura 13 mostra detalhadamente a nomenclatura das dimensões característica de um perfil.

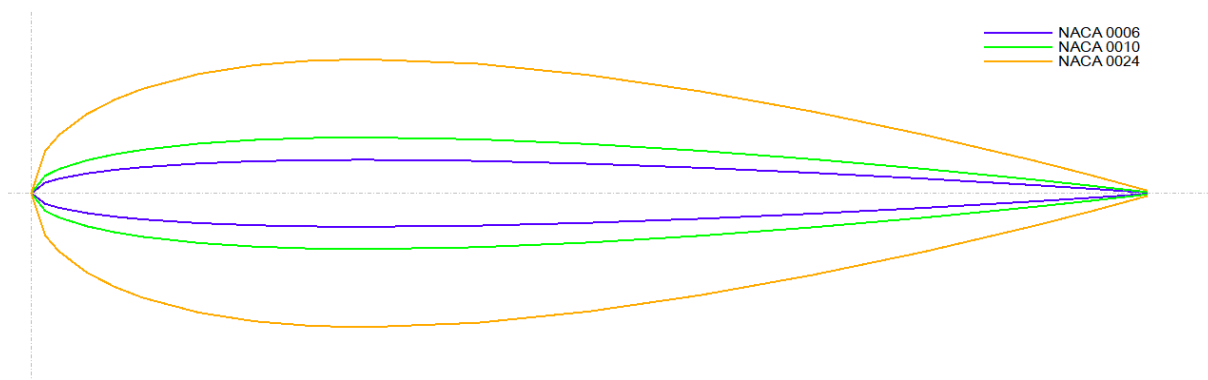
Figura 13 - Nomenclatura das dimensões do perfil



Fonte: Aerodinâmica Básica (2015)

Para o TEEH foram escolhidos três perfis de aerofólios NACA, que são os NACA 0006, NACA 0010 e o NACA 0024, são perfis NACA simétricos de fácil construção como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Perfis NACA utilizados



Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

O *XFLR5* projetado em 2005, por André Deperrois, para fornecer uma interface amigável com o *XFOIL*, e viabilizar cálculos em objetos 3D (Três dimensões), com baixos números de *Reynolds*. O *XFOIL* é conhecido como o famoso túnel de vento virtual

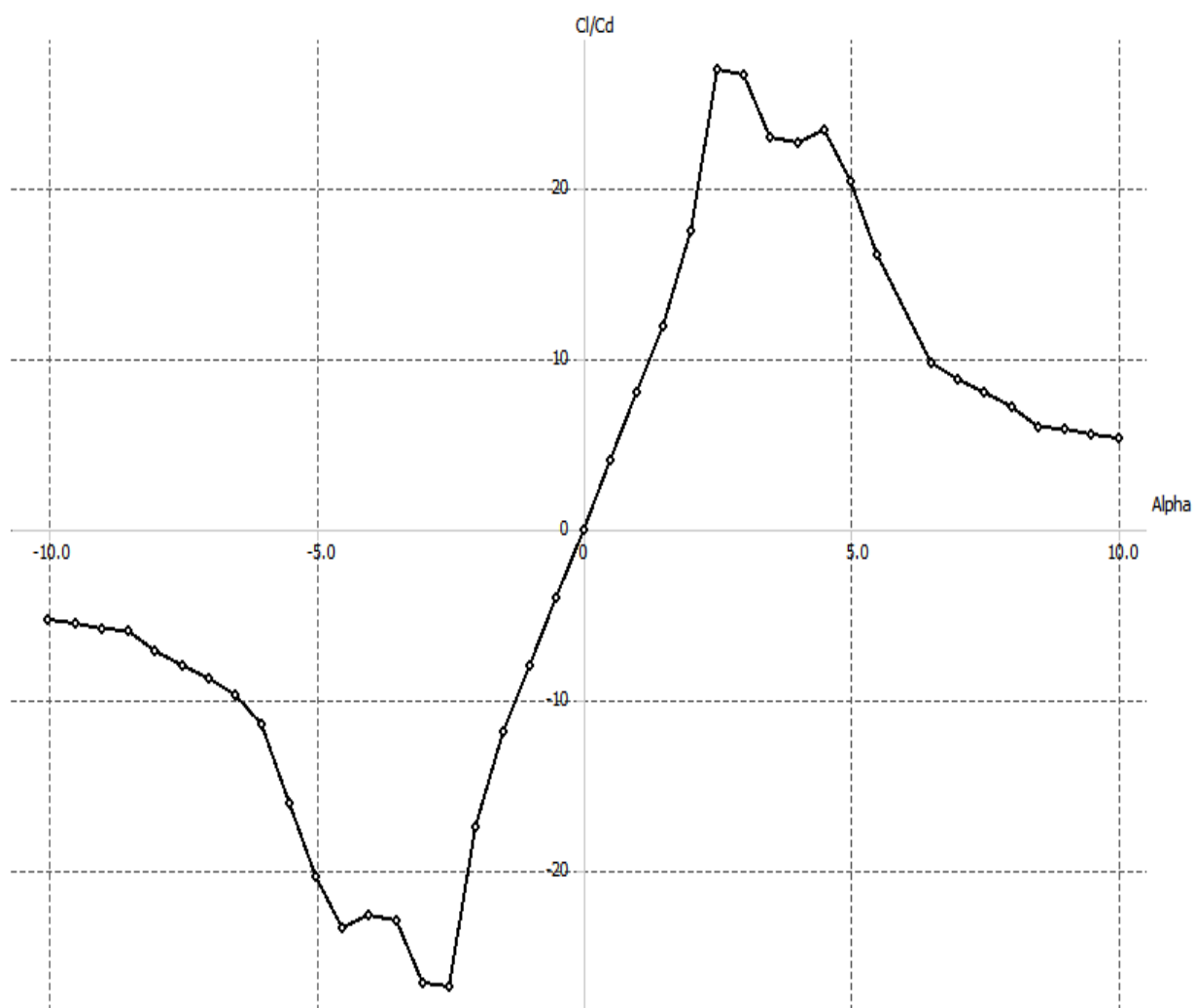
desenvolvido por Mark Drela³, *XFOIL*, como muitos de seus irmãos, simula com boa precisão o fluxo de ar em torno de um aerofólio, ou seja, o caso puramente ideal, provavelmente a não ser alcançado na prática, pois negligencia o arrasto induzido e qualquer outro efeito induzido (R/C Soaring Digest, 2008).

O *software* para fazer a análise requer vários dados, sendo eles os do perfil, o número de *Reynolds* que estará esse perfil e também o número de *match* que foram calculados pelas Equações (10) e (11).

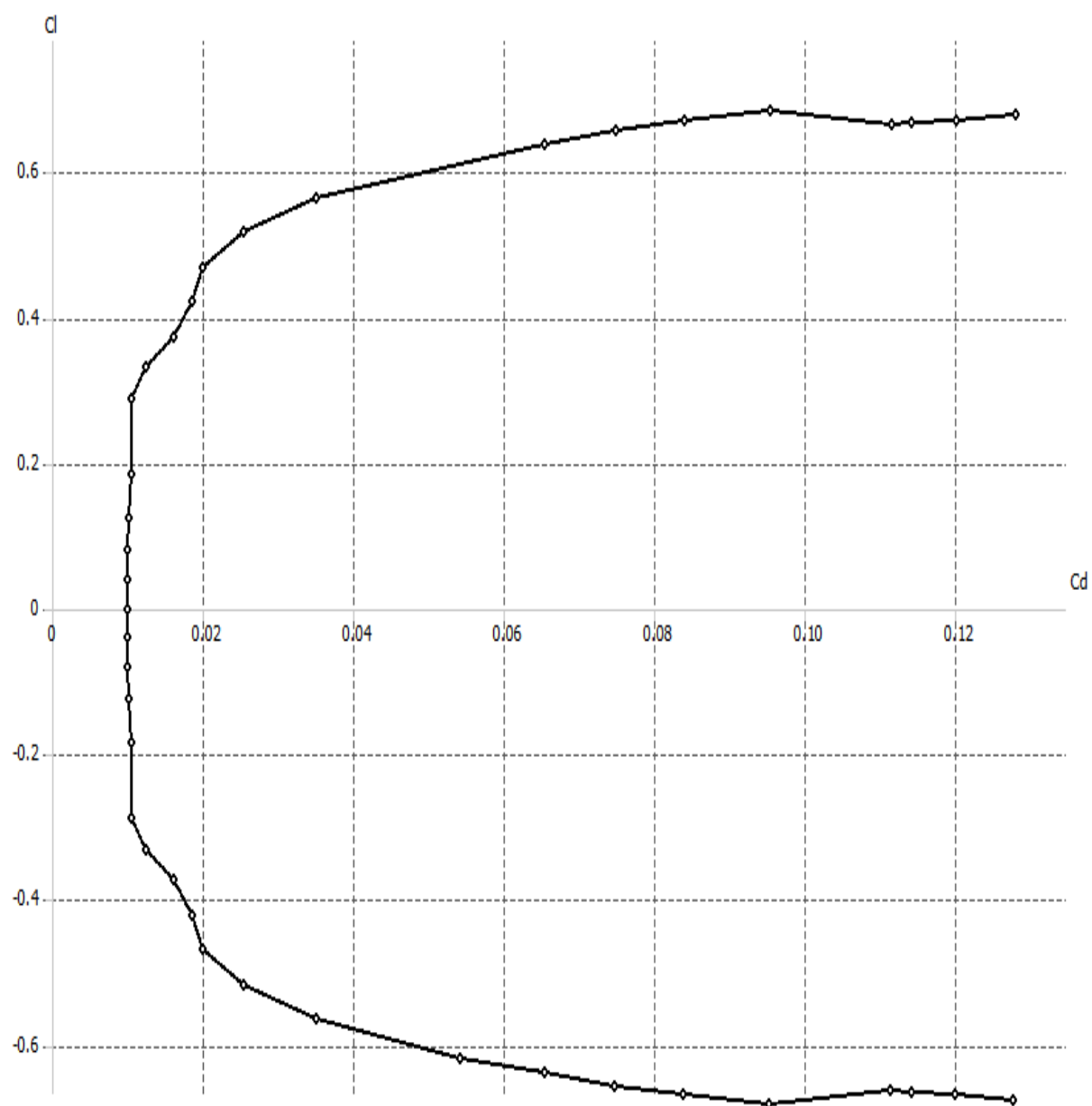
O *software* gera vários gráficos, porém apenas dois deles são interessantes para essa análise sendo eles: o de relação Cl/Cd (Coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto, respectivamente) por ângulo de ataque (α), e o segundo a relação Cl por Cd .

As Figura 15 e Figura 16 são os resultados gerados pelo *XFLR5* referente ao perfil NACA 0006.

³ Mark Drela é o professor de Terry J. Kohler de Dinâmica de Fluidos do Departamento de Aeronáutica e Astronáutica do MIT, onde ingressou na faculdade em 1986. Seus principais interesses de pesquisa são em aerodinâmica transônica e de baixa velocidade, design e desempenho de aeronaves e dispositivos aeromecânicos e metodologia de projeto aerodinâmico computacional.

Figura 15 - Relação Cl/Cd com ângulo de ataque NACA 0006

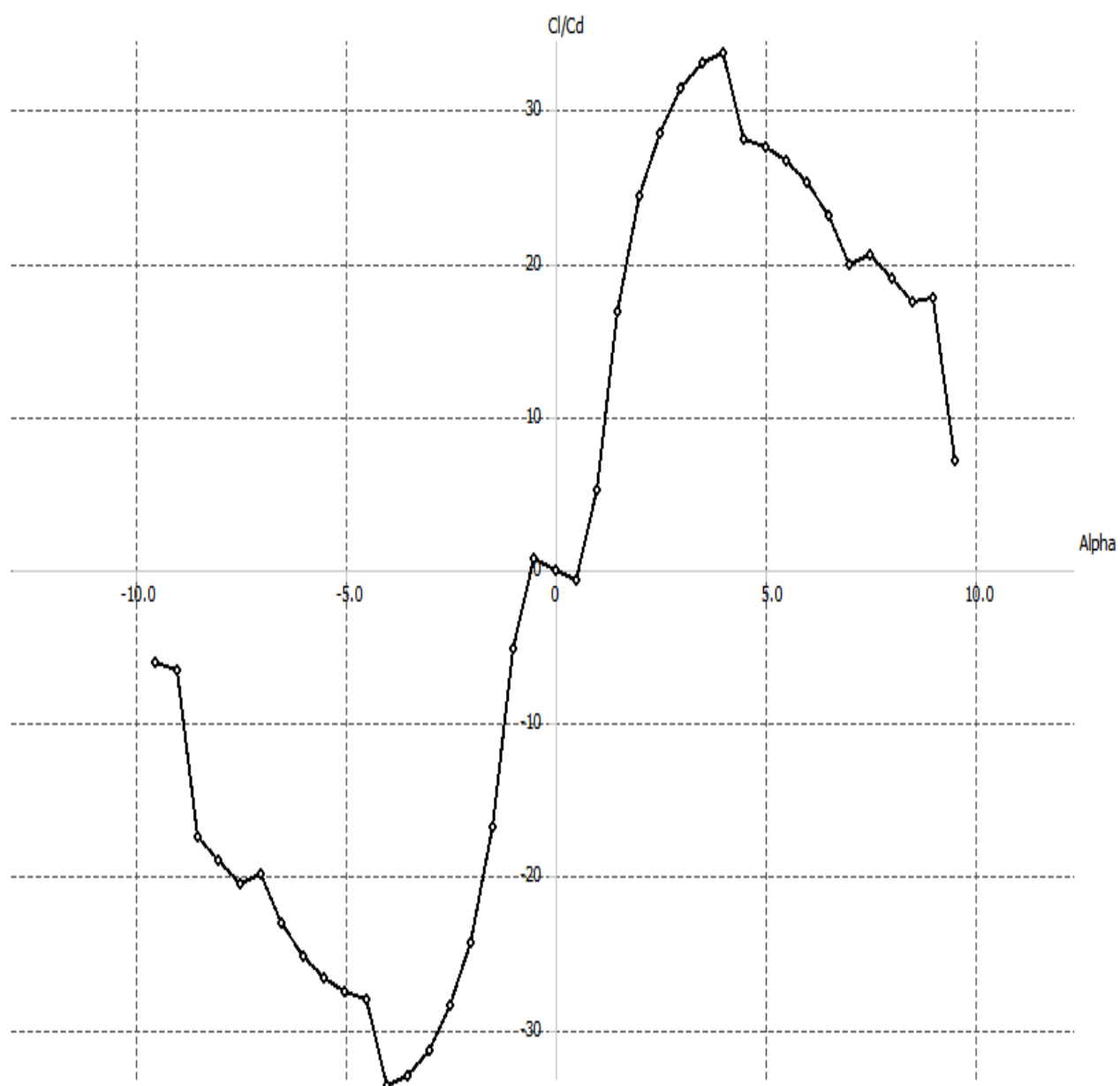
Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

Figura 16 – Relação C_l com C_d NACA 006

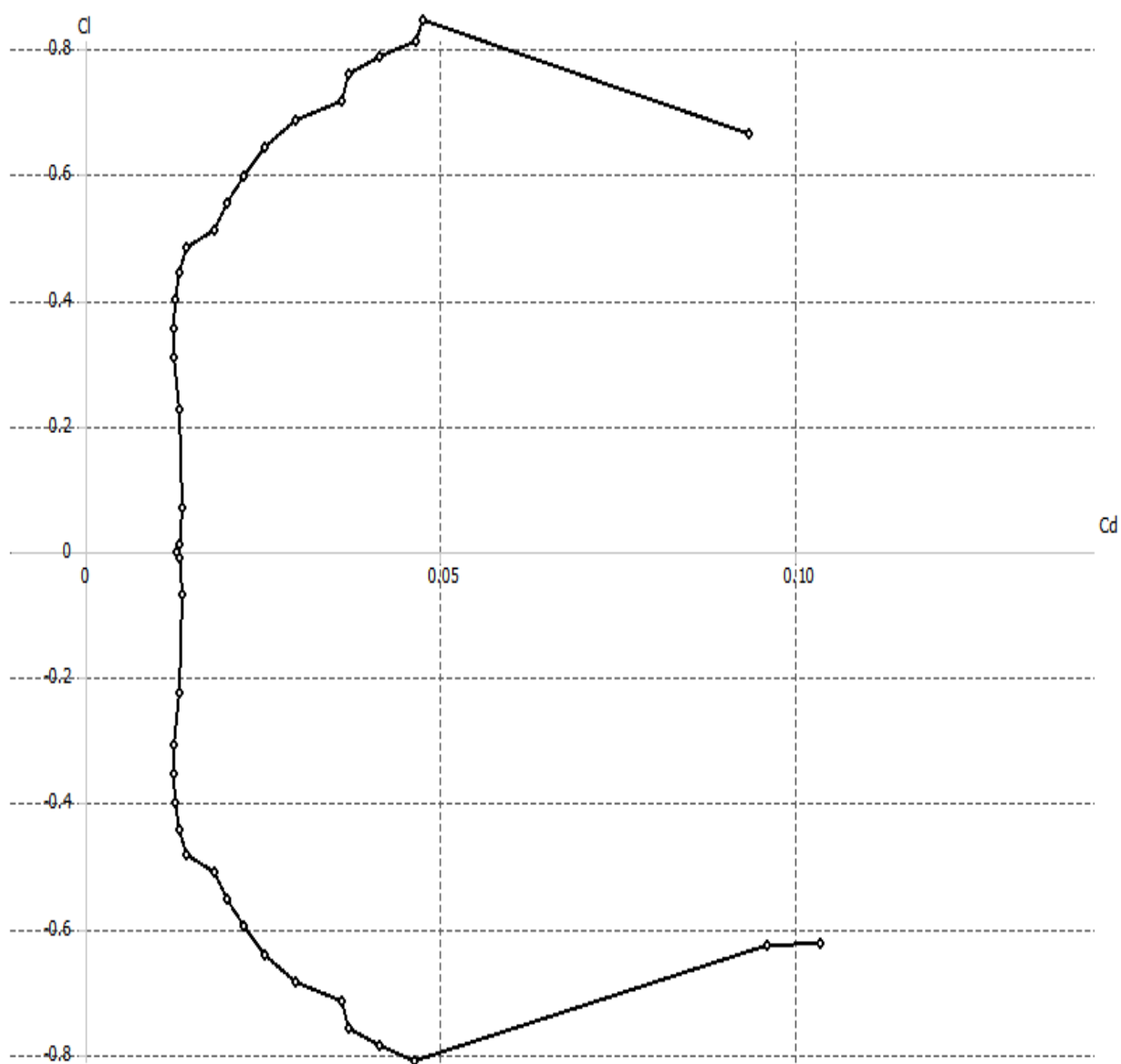
Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

As

Figura 17 e Figura 18 são os resultados gerados pelo *XFLR5* referente ao perfil NACA 0010.

Figura 17 - Relação C_l/C_d com ângulo de ataque NACA 0010

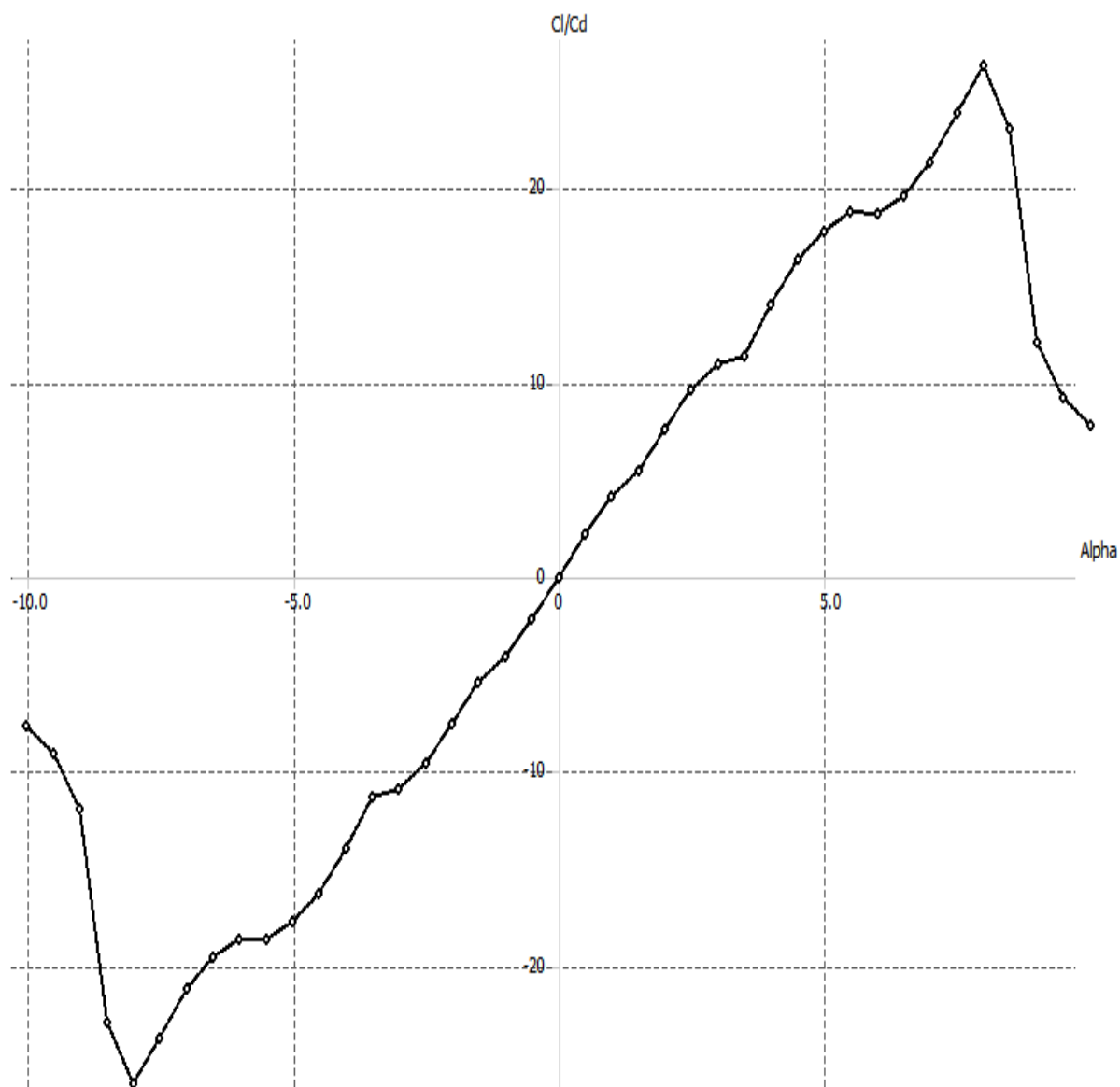
Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

Figura 18 - Relação C_l com C_d NACA 0010

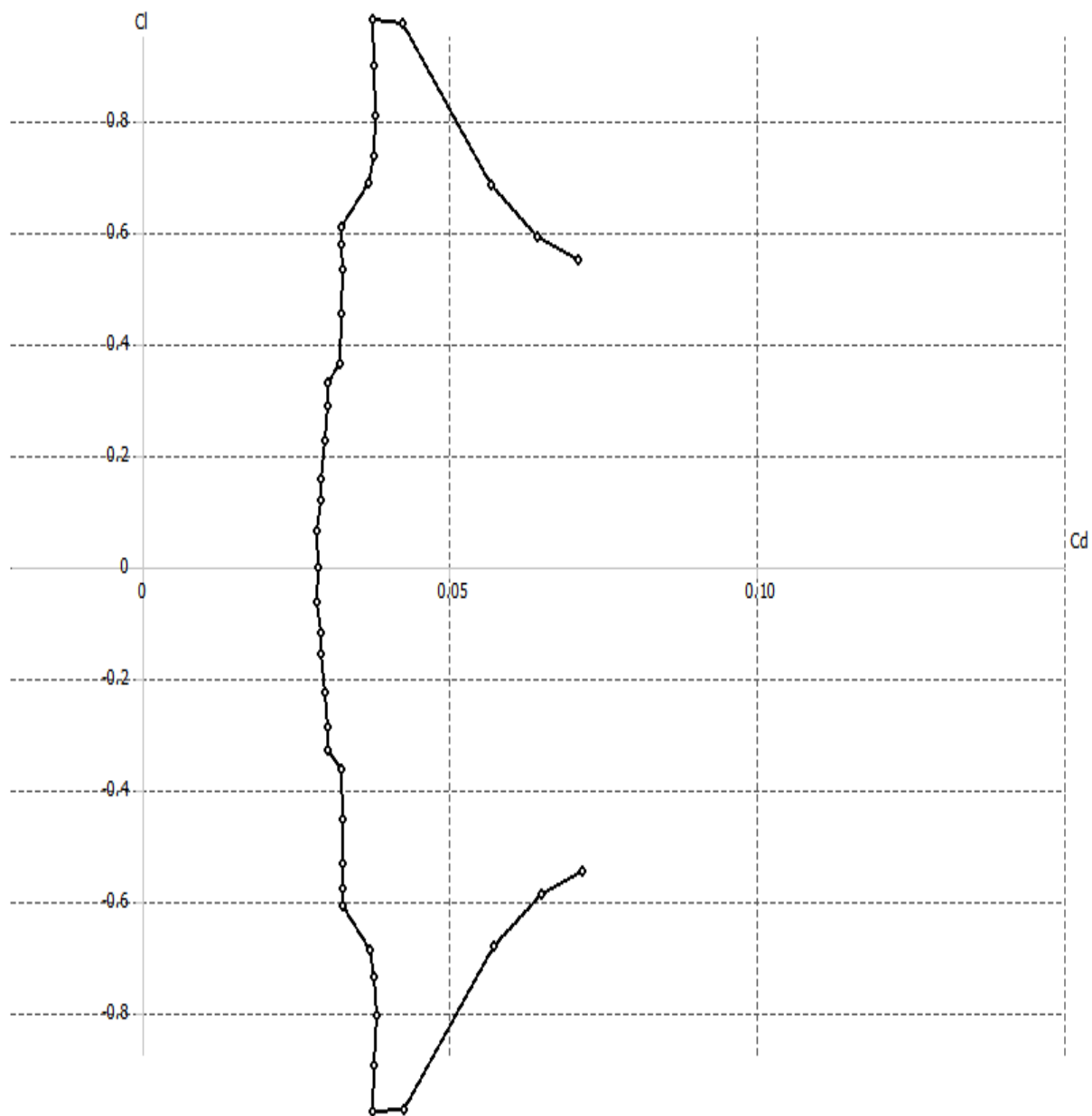
Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

As

Figura 19 e Figura 20 são os resultados gerados pelo *XFLR5* referente ao perfil NACA 0024.

Figura 19 - Relação C_l/C_d com ângulo de ataque NACA 0024.

Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

Figura 20 - Relação C_l com C_d NACA 0024

Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

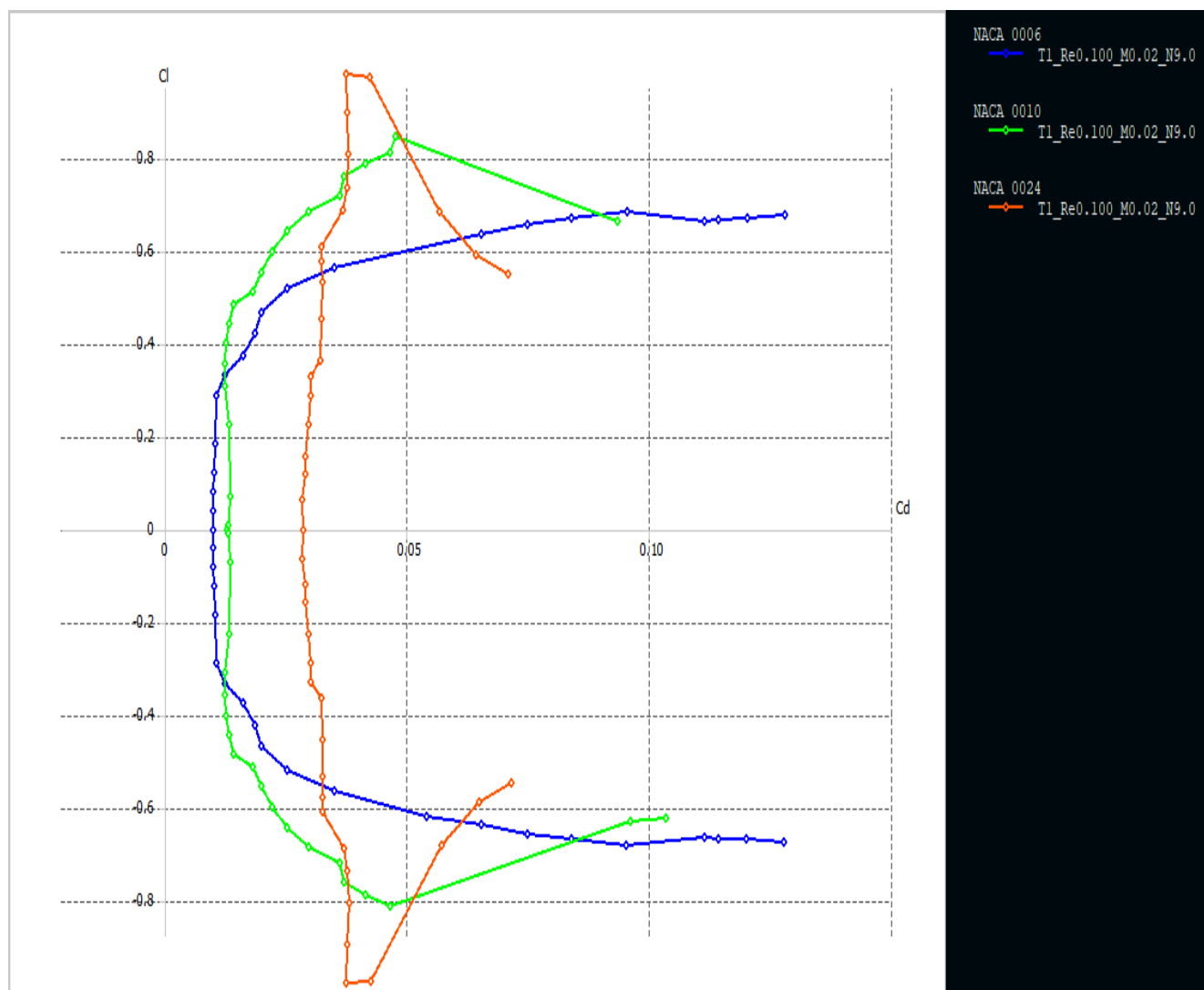
3 DISCUSSÃO, ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

O coeficiente de sustentação é determinado a partir de ensaios em túneis de vento ou *software* como, por exemplo, o *XFLR5*. O coeficiente de sustentação representa a eficiência do perfil em gerar a força de sustentação, ou seja, quanto maior for o valor do coeficiente de sustentação melhor será o perfil. Assim, perfis com altos valores de coeficiente de sustentação são considerados como eficientes para a geração de sustentação. Entretanto, o coeficiente de sustentação está em função do número de *Reynolds*, do ângulo de ataque e principalmente do modelo aerodinâmico do perfil. Juntamente com o coeficiente de sustentação também tem o coeficiente de arrasto, que representa a medida do perfil em gerar força de arrasto, ou seja, para um perfil possuir uma eficiência boa ele requer ter um alto coeficiente de sustentação e um baixo coeficiente de arrasto. O coeficiente de arrasto opera em função do número de *Reynolds*, do ângulo de ataque e da geometria do perfil.

Tem-se dois modelos de aerogerador de eixo vertical, o *Darrieus* e o *Savonius*, entretanto, o modelo *Savonius* utiliza a força de arrasto ao seu favor, no entanto, quanto maior for seu coeficiente de arrasto e menor for o coeficiente de sustentação do perfil aerodinâmico dele, ao mesmo tempo mais eficiente será o aerogerador, conforme é ressaltado por Tolmasquim (2016), que o para um perfil adequado, o TEEV teria que ter um baixo coeficiente de arrasto e um alto coeficiente de sustentação, pois o Aerogerador *Darrieus* usa a força de sustentação, a força na direção ortogonal ao vento, ao contrário de outras TEEV tipo a *Savonius* que usa a força de arrasto ao seu favor.

Avaliando os resultados gerados pelo *XFLR5* observa-se que quanto maior for a espessura do perfil maior será o coeficiente de arrasto (C_d), pode se observar através do perfil NACA 0024, por se tratar de um perfil mais robusto ele possui um bom coeficiente de sustentação como pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, porém o seu coeficiente de arrasto é bem elevado comparado com os demais perfis. O perfil NACA 0010 gerou um coeficiente de arrasto bem menor que o NACA 0024, porém o seu C_l é inferior ao do NACA 0024. O NACA 0006 obteve o menor coeficiente de arrasto, entretanto o seu C_l não é relativamente bom comparado com os demais perfis.

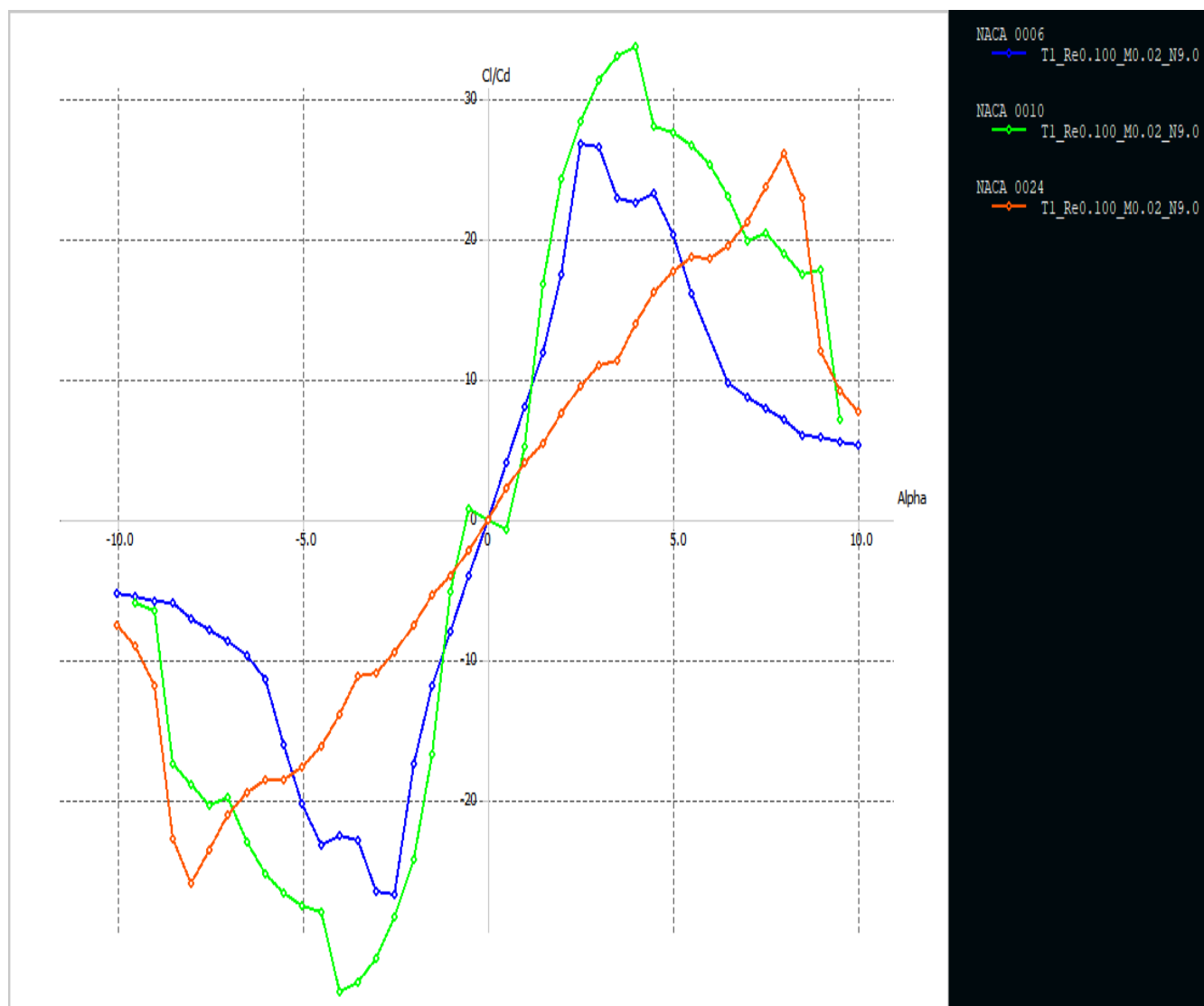
As Figura e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam o comparativo dos três perfis analisados, possibilitando uma análise simultânea.

Figura 21 - Relação C_l com C_d com todos os perfis analisados

Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

Analisando, o segundo gráfico gerado pelo *XFLR5*, Figura 22, ele apresenta uma relação do perfil que gera uma melhor eficiência de acordo com o ângulo de ataque, ou seja, para o ponto de maior valor da relação C_l/C_d tem-se o ângulo de ataque que gera a melhor eficiência. Avaliando os resultados percebe-se que o NACA 0006 e o NACA 0024 possuem quase o mesmo pico na linha com os valores de C_l/C_d , porém em angulações diferentes, já o NACA 0010 sobressai em relação aos demais, gerando um desempenho mais elevado.

Figura 22 - Relação C_l/C_d com ângulo de ataque de todos perfis analisados



Fonte: Autoria própria XFLR5 (2019)

CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho é possível verificar que o perfil aerodinâmico desempenha um papel fundamental na criação de sustentação e na eficiência de uma turbina eólica, ou seja, quanto maior for o coeficiente de sustentação e menor for o coeficiente de arrasto melhor será o desempenho do aerogerador.

Foi visto que os efeitos de compressibilidades não são importantes devido à baixa velocidade do fluido, o valor obtido na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) é bem inferior a 0,3, desta maneira as equações para análise do perfil no *software XFLR5* são válidas, pois o mesmo trabalha com fluidos incompressíveis e com baixo número de *Reynolds*.

Como visto anteriormente, foi realizada a decomposição genérica dos elementos de uma turbina eólica de eixo vertical, usando o modelo de tabela DSM (Tabela 1), que lista vários componentes de um aerogerador e suas ligações, sendo que ao longo da diagonal representam os elementos de um sistema, e as células fora da diagonal representam as relações entre aqueles elementos.

Foi selecionado o modelo de aerogerador de eixo vertical pois tem vantagens em relação a sistemas de controle para o direcionamento da turbina em relação ao vento, pois a mesma utiliza a força dos escoamentos em todas as direções, também possui uma vantagem nos aspectos de construção e manutenção, já que esses modelos de geradores estão ao nível do solo, comparado com o de eixo horizontal.

Optou-se pelo modelo de perfis NACA simétrico para as pás, pois se trata de um modelo de fácil fabricação uma vez que o mesmo é simétrico.

Com a utilização do *software XFLR5* foi possível fazer o levantamento de inúmeros resultados, sendo que o próprio *software* realiza a plotagem de inúmeros gráficos, sendo os mais importantes para essa análise o gráfico C_l por C_d , e a relação C_l/C_d por Ângulo de ataque Figura 21 e 22.

O perfil NACA 0010 gerou resultados satisfatórios em relação aos demais, tornando ele o perfil mais adequado para esse modelo de aerogerador, pois o mesmo possui uma relação C_l/C_d bem elevada comparada com os demais perfis, sendo que o coeficiente de sustentação não é tão elevado quanto o do perfil NACA 0024, entretanto, comparando o coeficiente de arrasto dos dois perfis é possível avaliar que o NACA 0010 possui um valor consideravelmente melhor.

Esse trabalho acadêmico serve de base para novos estudos na área de TEEV e conseqüentemente TEEH partindo do princípio que ambos abordam conceitos de tamanha

similaridade da qual pode e deve se fazer comparações para aplicação em determinadas áreas. Devido aos recursos reduzidos pode-se também se aprofundar em pesquisas tanto bibliográficas e principalmente pesquisas práticas e estudos dos fluidos aerodinâmicos em diversos modelos de pá.

Algumas sugestões para futuros trabalhos.

- Criação de um protótipo.
- Estudos de modelos de pás NACA assimétricos.
- Testes de comparação entre TEEV e TEEH.
- Comparação dos efeitos de fluidos constantes e não constantes
- Análise de viabilidade econômica
- Realizar testes em túneis de ventos para obter resultados mais confiáveis
- Realizar simulações em uma variedade maior de perfis

REFERÊNCIAS

Aerogeradores Hummer, Web, 2019. Disponível em: <<https://aerogeradores.blogs.sapo.pt/19458.html>>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

SIVARAMAN, Aarthi. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview>>. Acesso em: 13 Out. 2019.

Airfoiltools. Disponível em: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il#polars>>. Acesso em: 27 Ago. 2019.

ABRAFAC. Disponível em: <<https://www.abrafac.org.br/noticias/e-ainda-sobre-energia-elétrica-consumo-vai-triplicar-ate-2050/>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

AIER, **Agência Internacional de Energia Renovável** prevê crescimento até 2050. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2018/04/agencia-internacional-de-energia-renovavel-preve-crescimento-ate-2050/34004>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

A Voz da Indústria. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/?s=No+brasil+de+acordo+com+os+dados+da+federacao+nacional+>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

BP vê crescimento de energias renováveis disparando nas próximas décadas no mundo - 14/02/2019 - Mercado - Folha. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2019/02/bp-ve-crescimento-de-energias-renovaveis-disparando-nas-proximas-decadas-no-mundo.shtml>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

BORGES, Rodrigo. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica Darrieus para aplicação em edifícios.** 2012. Projeto de graduação - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico Departamento De Engenharia Mecânica Projeto de Graduação, 2016.

CASER, Eduardo Spalenza; PAIVA, Giuseppe da Mota. **Projeto Aerodinâmico de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV)** para Ambientes Urbanos. 2016. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

DULTRA, Ricardo. **Energia Eólica, Princípios e Tecnologia, CRECESB. Darrieus vertical axis wind turbine.** Disponível em: <https://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine>. Acesso em: 26 Ago. 2019.

EPE. **EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA.** Summary for Policymakers Climate Change 2013 - The Physical Science Basis, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

ENERGIA, Angra 3 está parada, mas país quer mais 8 usinas nucleares. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/politica/republica/brasil-sofre-para-concluir-angra-3-mas-governo-quer-mais-oito-usinas-nucleares-d6ma0ocle4eaviznfr3csm4zw/>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

Eólica será segunda maior fonte de energia do Brasil em 2019. Disponível em: <<http://conexaoplaneta.com.br/blog/eolica-sera-segunda-maior-fonte-de-energia-do-brasil-em-2019/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

Energia Eólica. Disponível em: <http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/intro_eolica.php>. Acesso em: 12 jun. 2019.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueria. **A População Mundial.** Brasil Escola. Disponível em <https://brasilestola.uol.com.br/geografia/populacao-mundial.htm>. Acesso em 11 de junho de 2019.

GOUVEIA, Rosimar “**Energia elétrica**”; Toda Matéria. Disponível em <<https://www.todamateria.com.br/autor/rosimar-gouveia/>>. Acesso em 17 de Março de 2019.

GILMOUR, Allan. **Estudo sobre o modelamento de um aerofólio NACA 0012:** Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica. 2012.

HIDROENERGIA. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/eficiencia-da-turbina-de-arquimedes-usando-multiplicador-de-velocidade-inversores-de-frequencia-e-gerador-pmsg/>>. Acesso em: 29 Ago. 2019.

Indústria será paga para reduzir consumo quando energia estiver mais cara, diz Aneel - Economia - Estadão. Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,industria-sera-paga-para-reduzir-consumo-quando-energia-estiver-mais-cara-diz-aneel,70002100491>>. Acesso em: 7 abr. 2019.

Investimento em energia limpa novamente ultrapassa US\$300 bi em 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com.br/blog/investimento-em-energia-limpa-novamente-ultrapassa-us300-bi-em-2018/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

LOPES, George, **Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica:** Universidade federal rural do semiárido campus Caraúbas Departamento de engenharia – de curso de bacharelado em engenharia mecânica, Caraúbas- RN, 2018.

Moinho. In Britannica Escola. Web, 2019. Disponível em: <<https://escola.britannica.com.br/artigo/moinho/482866>>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

OPS, ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. Brasília: **Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde.** 2008. 44p. Disponível em <http://www.saude.sp.gov.br/resources/ccd/saudeambiental/mudanca_climatica_e_seus_efeitos_na_saude_brasil.pdf>. Acesso 17 Mar. 2019.

PARQUE EÓLICO PEDRA DO REINO. Web, 2019. Disponível em: <<https://gmconstrucoes.com.br/sobre-nos/>>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

PEREIRA, T. C. Guimarães, **Energias renováveis: Políticas Públicas e Planejamento energético**: 1 ed. Curitiba: Ed. Digital, 2014.

PENA, Rodolfo F. Alves. "**Fontes renováveis de energia**"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fontes-renovaveis-energia.htm>>. Acesso em 17 de Março de 2019.

R/C Soaring Digest. Disponível em: <<https://www.rcsoaringdigest.com/pdfs/RCSD-2008/RCSD-2008-02.pdf>>. Acesso em: 13 Out. 2019.

ROCHA, H. et al. **ENERGIA EÓLICA PROJETO FEUP** Grupo: 1MIEEC03_02. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2012_13/files/REL_1MIEEC03_02.PDF>. Acesso em: 12 jun. 2019.

RIBEIRO, Amarolina. "**O que é matriz energética?**"; *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-matriz-energetica.htm>>. Acesso em 23 de maio de 2019.

STYLORBANO. Disponível em: <<http://www.stylourbano.com.br/turbina-eolica-enlil-gera-energia-usando-os-ventos-criados-pelos-veiculos/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

SPALENZA, Eduardo. **Projeto aerodinâmico de uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV) para ambientes urbanos**. 2016. Projeto de graduação - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico Departamento De Engenharia Mecânica Projeto de Graduação, 2016.

SUCKOW, Elizabeth. Disponível em: < <https://history.nasa.gov/naca/overview.html>>. Acesso em: 13 Out. 2019.

SILVA, JÚNIOR, Joab Silas Da. "**O que é energia?**"; *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-energia.htm>>. Acesso em 23 de maio de 2019.

SHIMAKO, Mariana Zanarotti, **O Potencial Hidrelétrico Brasileiro e a maior usina geradora de energia do Mundo**. Disponível em: <<http://www.usp.br/portallbiosistemas/?p=7865>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

TEDESCO, Henrique Tasca. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical**. 2015. 27 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

Turbina tipo Darrieus, Web, 2019. Disponível em:< <https://www.eolicafacil.com.br/eixo-vertical>>. Acesso em: 12 de maio de 2019.

Tecnalbi engenharia. Disponível em: <<http://www.tecnalbi.com/detalheproduto.php?id=60>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

TOLMASQUIM, Mauricio T.. **Energia Renovável** hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2016.

Vantagens e desvantagens do carvão MS, Manutenção e Suprimento. Disponível em: <<https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/vantagens-e-desvantagens-do-carvao/>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

Weather Spark. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29979/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Goi%C3%A2nia-Brasil-durante-o-ano#Sections-BestTime>>. Acesso em: 21 Ago. 2019.

WALISIEWICZ, Marek. Energia Alternativa. Publifolha, 2008.

XFLR5. Disponível em: <<http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>>. Acesso em: 27 Ago. 2019.

ZERBIN, Prof. Dr. Euryclides de Jesus. **Fundamentos de Energia.** 2002. Energia, Senai, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://gerson.luqueta.com.br/indexarquivos/EletrSenai.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2019.