UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL

CAMPUS ERECHIM

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ARIEL BIAVATI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO VENTO E DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES NAS DEPENDÊNCIAS DA UFFS - CAMPUS ERECHIM

ERECHIM – RS

2017

ARIEL BIAVATI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO VENTO E DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES NAS DEPENDÊNCIAS DA UFFS - CAMPUS ERECHIM

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador(a): Profª Mª. Franciele Stail Bordin
Coorientador: Profº Dr. Anderson André Genro Alves Ribeiro

ERECHIM - RS
2017

ARIEL BIAVATI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO VENTO E DA VIABILIDADE TÉCNICA DE INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES NAS DEPENDÊNCIAS DA UFFS – CAMPUS ERECHIM

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Aprovado em: _____/_____/_____

Banca Examinadora:

_____
Prof. Mª. Franciele Stail Bordin (orientadora)
UFFS - Erechim

_____
Prof. Dr. Anderson André Genro Alves Ribeiro (coorientador)
UFFS - Erechim

_____
Profº. Dr. Paulo Hartmann
UFFS - Erechim

_____
Profº. Dr. Roberto Valmir da Silva
UFFS - Erechim

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais e familiares pelo amor, incentivo apoio incondicional.

A minha orientadora Franciele Bordin e coorientador Anderson Ribeiro, pelo suporte no pouco tempo que lhes couberam, pelas suas correções e incentivos.

Ao Professor Roberto Valmir da Silva pela ajuda e tempo gasto em todas as coletas de dados.

E aos amigos que ganhei e me acompanharam nesta caminhada, por todas as festas e sufocos que passamos, meu muito obrigado.

RESUMO

A energia elétrica tornou-se um fator essencial para o crescimento econômico mundial. Associado a escassez das fontes tradicionais de geração e a necessidade de suprir a demanda energética com o mínimo de impactos ao meio ambiente, a geração eólica torna-se uma alternativa muito eficaz de incorporação à matriz energética. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho traz uma revisão bibliográfica sobre a história da utilização da energia proveniente dos ventos, citando os diferentes modelos de aerogeradores e sua evolução ao decorrer do tempo, tendo como objetivo estudar o comportamento do vento e a viabilidade técnica de instalação de aerogeradores nas dependências da UFFS – Campus Erechim. Os dados de distribuição dos ventos na região do *campus* foram coletados por uma estação meteorológica presente no local, sendo comparados á dados coletados pelo INMET e do Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul. Os dados coletados foram analisados estatisticamente e o potencial eólico determinado. A partir deste potencial eólico foram comparados diferentes modelos de turbinas para determinar a mais eficiente para o regime de ventos local. Com este resultado foi feito um estudo para determinação do melhor local para instalação, sendo analisado o relevo, a vegetação, o efeito de esteira e a propagação de ruídos provenientes da turbina. Como resultado, levando-se em conta a análise técnica realizada, é viável a instalação dos aerogeradores nas dependências da UFFS Erechim, sendo que o projeto atenderia a demanda de energia interna do *campus*.

Palavras-Chave: Potencial eólico. UFFS Erechim. Matriz energética. Fontes alternativas.

ABSTRACT

Electric energy has become an essential factor for global economic growth. Associating the shortage of tradicional sources of generation and the need to supply energy demand with the least impact on the environment, wind generation becomes a effective alternative for the energy prodution.

Based on this assumption, the present work presents a bibliographical review about the history of the use of wind energy, quotting the different models of wind turbines and their evolution over time, in order to study the wind behavior and the wind turbines installation technique viability in the UFFS - Campus Erechim area. Wind distribution data in the campus area were collected by a meteorological station present at site and compared with data collected by INMET and the Atlas of Wind Potential of Rio Grande do Sul.

The data collected were statistically analyzed and the wind potential determined. From this wind potential, different turbine models were compared to determine the most efficient for the local wind regime. With this result, a study was carried out to determine the best location for installation, considering the relief, the vegetation, the wake effect and the propagation of noise from the turbine. As a result, taking into account the technical analysis carried out, it is feasible to install the wind turbines in UFFS Erechim premises, and the project would meet the internal energy demand of the campus.

Keywords: Wind energy potential. UFFS Erechim. Energy matrix. Alternative sources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelos de turbinas de eixo horizontal com diferente número de pás. 14
Figura 2 - Modelos de rotores Savonius (a) e Darrieus (b). 15
Figura 3 – Capacidade instalada de produção eólica mundial com estimativa até o ano de 2021. 17
Figura 4 - Mapa nacional das velocidades médias anuais do vento a 50 m de altura. 18
Figura 5 - Mapa do Rio Grande do Sul de velocidades médias anuais na altura de 100 m. 20
Figura 6 - Influência da orografia na velocidade do vento. 21
Figura 7 - Mapa do modelo de rugosidade do estado do Rio Grande do Sul. 21
Figura 8 - Esquema representativo da influência de um obstáculo no vento. 22
Figura 9- Demonstração do ângulo de passo e de ataque em uma pá de um aerogerador. 26
Figura 12 - Curva típica de um modelo de turbina com controle de potencia por estol. Curva de potência do aerogerador Modelo ELV-H3.1. 27
Figura 14 - Curva típica de um modelo de turbina com controle de potencia por controle de passo. Curva de potência do aerogerador Modelo ELV-H20.8. 28
Figura 19 - Frequência em função da velocidade do vento. 32
Figura 20 - Estação meteorológica do INMET, situada no município de Erechim. 33
Figura 21 - Perfil de velocidades médias em alturas de 100m para a região de Erechim-RS. . 34
Figura 22 - Rosa dos ventos da frequência de incidência por direção. 35
Figura 23 - Estrapolação da velocidade do vento para diferentes alturas. 36
Figura 24 - Mapa do relevo da região e limitação do terreno do Campus UFFS Erechim. 39
Figura 25 - Mapa do relevo da região com limitação do terreno do Campus UFFS Erechim e local indicado para instalação das turbinas. 40
Figura 26 - Efeito de esteira em um parque eólico *offshore* na Dinamarca. 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores aproximados para o comprimento de rugosidade em alguns terrenos típicos. 24
Tabela 2 - Velocidade, frequência e frequência relativa de incidência dos ventos coletado pela estação meteorológica da UFFS Erechim. 32
Tabela 3 - Comparativo entre as velocidades mensais médias e índice pluviométrico mensal, entre junho de 2016 e maio de 2017. 34
Tabela 4 - Velocidade média do vento em cada estação do ano para a região de Erechim. 35
Tabela 5 - Consumo e gastos com energia elétrica no decorrer de um ano no Campus UFFS – Erechim. 37
Tabela 6 - Modelos e características dos aerogeradores analisados para possível implantação no Campus UFFS Erechim. 37
Tabela 7 - Energia anual gerada e fator de capacidade para cada modelo de aerogerador analisado. 38
Tabela 8 - Energia anual gerada e fator de capacidade para modelo de aerogeradores com potência maior que 10KW. 39

Sumário

1. INTRODUÇÃO 11
2. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA 12
2.1. Revisão do Potencial Eólico 17
2.1.1. Potencial eólico mundial 17
2.1.2. Potencial eólico nacional 18
2.1.3. Potencial eólico do Rio Grande do Sul 19
2.2. Fatores que influenciam o regime dos ventos 20
2.2.1. Orografia 20
2.2.2. Rugosidade 21
2.2.3. Obstáculos 22
2.3. Cálculo do potencial eólico 22
2.3.1. Potência do vento 22
2.3.2. Perfil da velocidade do vento 23
2.3.3. Energia gerada 25
2.3.4. Fator de capacidade 25
2.4. Mecanismos de controle de potência em turbinas eólicas 26
2.4.1. Controle por estol 27
2.4.2. Controle de passo 28
3. METODOLOGIA 28
4. RESULTADOS 31
4.1. Estimativa do potencial eólico 31
4.1.1. Velocidade média no período de medições 31
4.1.2. Comparativo dos dados coletados com os dados obtidos do INMET 32
4.1.3. Médias mensais e por estações do ano 34
4.1.4. Direção do vento 35
4.1.5. Estrapolação da velocidade do vento para diferentes alturas 36
4.1.6. Consumo energético local 36
4.1.7. Opções de aerogeradores 37
4.1.8. Cálculo da Energia Anual Gerada e Fator de Capacidade 38
4.1.9. Escolha do Aerogerador e estimativa de produção 38
4.1.10. Posicionamento dos aerogeradores 39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 42

6. REFERÊNCIAS 43

1. INTRODUÇÃO

Com o grande crescimento populacional, a evolução e modernização cada vez mais tecnológica da sociedade, a energia elétrica tornou-se algo essencial e indispensável para qualquer ramo de atividades. Com a grande preocupação na necessidade de aumento da produção energética, associado ao crescente valor dos combustíveis fósseis e a preocupação com os impactos ambientais, busca-se suprir essa necessidade através de fontes energéticas renováveis.

A geração eólica de eletricidade vem crescendo exponencialmente ao longo dos anos. Por se tratar de uma das fontes energéticas mais abundantes no planeta, apresenta baixo impacto ambiental, permite a utilização conectada à rede ou em locais remotos, onde os custos de transmissão são altos, a extração em terra e em alto mar e ainda a ocupação concomitante do solo para a agricultura sem perigo para as atividades agropecuárias.

Tendo em vista o apresentado acima, este trabalho tem como objetivo medir e analisar o comportamento das velocidades do vento, juntamente com a determinação do potencial eólico, nas dependências da Universidade Federal da Fronteira Sul, situado no município de Erechim, na região norte do estado do Rio Grande do Sul, através dos dados coletados de uma estação meteorológica. São analisadas as medições da intensidade e direção dos ventos, comparando com dados obtidos de outras fontes e com índices pluviométricos da região.

A Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) é uma instituição de ensino superior pública brasileira sediada na cidade de Chapecó, em Santa Catarina, e com campi nas cidades de Cerro Largo, Erechim, Laranjeiras do Sul, Passo Fundo e Realeza. O *campus* da UFFS sediado no município de Erechim, onde é realizado o estudo, está localizado junto à região do Alto Uruguai à cerca de 375 km da capital, a uma altitude de aproximadamente 770 metros.

Posteriormente, é realizado um estudo para determinação das melhores opções de modelos e potências de aerogeradores para uma possível instalação *ongrid* (conectada à rede), visando suprir totalmente ou parcialmente as necessidades energéticas do *campus*, assim como o local mais indicado para instalação dos mesmos.

A opção pela instalação *ongrid* deve-se pela vantagem de ser conectada à rede energética da concessionária. Assim, nos períodos de pouco vento, ou seja, de pouca geração eólica, a rede fornece energia para suprir a necessidade de consumo interna do Campus. Por outro lado, nos períodos de pouco consumo energético (períodos de férias letivas, por exemplo), o excesso de energia eólica pode ser enviado e vendido à rede elétrica da concessionária.

2. REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

Como já é de conhecimento geral, o vento nada mais é do que o deslocamento de massas de ar causadas pela diferença de pressão em diferentes partes do planeta, sendo uma fonte de energia limpa, natural e inesgotável. A energia proveniente do vento vem sendo utilizada desde a antiguidade, seja através dos moinhos de vento, ou impulsionando as caravelas, levando civilizações aos quatro cantos do planeta, descobrindo e colonizando os continentes.

Com o desenvolvimento das práticas agrícolas pela humanidade, iniciadas cerca de 8000 a.C., surgiu a necessidade da criação de ferramentas que auxiliassem as diversas etapas do trabalho e, desta forma, possibilitassem a substituição do esforço humano e animal. A partir desta motivação, foram construídos os cata-ventos, também chamados de moinhos de vento (Carvalho, 2003).

Para aproveitamento da energia eólica, a potência cinética do vento é convertida em potência mecânica, para a realização de trabalho ou conversão em energia elétrica, por meio das turbinas eólicas (Custódio, 2009).

Os moinhos movidos por ventos tem origem remota e incerta (Aldabó, 2002). Acredita-se que as primeiras unidades de moinhos de vento surgiram no Oriente, com eixo vertical (Carvalho, 2003). Há indicativos de uso do vento para moagem de grãos e elevação da água pelos egípcios, por volta de 3000 a.C. Os primeiros registros de uso no acionamento de máquinas foram em torno de 300 a.C. na China (Custódio, 2009). Segundo informação confiável extraída de fontes históricas, surgiram mais especificamente na Pérsia por volta de 200 a.C. Eram moinhos bem primitivos, com baixa eficiência e de eixo vertical (Fadigas, 2011).

Os primeiros moinhos de vento de eixo horizontal foram construídos no Ocidente a partir do século XII. Segundo Golding, 1976 apud Carvalho, 2003, tendo os primeiros registros datados de 1191 na Inglaterra e França. De acordo com Fadigas, 2011, a primeira informação documentada registra o seu aparecimento no ano de 1180, em Duchy, se espalhando pela Holanda e Alemanha no século XVIII, e pela Polônia e Rússia no século XIV.

Conforme comenta Hau, 2005 apud Fadigas, 2011, os moinhos na Europa tiveram, sem dúvida, uma forte e decisiva influência na economia agrícola por vários séculos, substituindo a força humana e animal.

A estrutura inicial, do tipo cavalete, é formada por uma casa de madeira em forma de caixa, girando em um eixo e apoiada sobre um cavalete. Posteriormente foram desenvolvidos moinhos de vento do tipo torre, os quais possuem corpo fixo e uma parte superior móvel responsável pela sustentação das velas. Um dos representantes mais difundidos do tipo torre foi o chamado moinho de vento holandês (Carvalho, 2003), tido como um símbolo do desenvolvimento deste país.

Dois melhoramentos técnicos levaram o moinho holandês ao ponto máximo em termos de desenvolvimento tecnológico, o primeiro foi a patente de Edmund Lee em 1745, que se consistiu em um rotor lateral cujo plano de rotação é perpendicular ao plano de rotação das pás principais (Golding, 1976 apud Carvalho, 2003). Os rotores de eixo horizontal

precisam se manter perpendiculares à direção do vento para capturarem o máximo de energia (Custódio, 2009).O segundo ocorreu em 1792, quando foram construídos os primeiros moinhos de vento dotados de pás com persianas (Hau,1996 apud Carvalho, 2003). Com este recurso, em caso da incidência de fortes ventos, lâminas localizadas ao longo das pás poderiam ser abertas sem grandes dificuldades. Com este aprimoramento,pela primeira vez foi possível ter certo controle sobre a rotação e a potência dos moinhos de vento.

Outros aperfeiçoamentos foram realizados nos equipamentos. Um deles foi o desenvolvimento do equipamento denominado ECLIPSE, pelo Reverendo Leonhard R. Wheeler de Wisconsin, bem semelhante aos moinhos de vento utilizados no bombeamento de água, e que se tornou o modelo padrão da turbina eólica americana (Hau, 2005 apud Fadigas, 2011).

Um dos principais cientistas a se interessar pelo tema foi Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). Daniel Bernoulli (1700-1782) usou as leis básicas da mecânica dos fluídos, formulados por ele mesmo para o cálculo de pás de moinhos de vento.

Com a Revolução Industrial e o surgimento da máquina a vapor no século XIX, iniciou-se o declínio da energia eólica na Holanda e em outros países europeus. Porém, mesmo com o declínio no uso desses equipamentos na Europa, houve uma expansão de seu uso nos EUA em função da necessidade de energização de áreas que não possuíam reservas hídricas (Hau, 2005 apud Fadigas, 2011).

No mesmo período da descoberta da eletricidade (final do século XIX), o desenvolvimento e fabricação de motores a combustão (ciclo otto e diesel), somado com a descoberta de grandes reservas de petróleo, e o aproveitamento da energia hidráulica contida nos rios, visando o abastecimento de eletricidade de centros urbanos, elevou a decadência na utilização da energia eólica através de moinhos de vento (Carvalho, 2003).

Alguns países com pequenas reservas de petróleo, ou sem potencial hidráulico para geração de eletricidade, incentivaram a pesquisa relacionada ao potencial eólico para geração de eletricidade.

O marco inicial no desenvolvimento das modernas turbinas eólicas se deu na Dinamarca com Poul La Cour, professor de um centro educacional para adultos em Askov. Poul La Cour construiu um protótipo de turbina eólica para realizar seus experimentos em 1891. Tratava-se de uma turbina eólica acoplada a um gerador de corrente contínua (CC), cuja energia gerada era utilizada na eletrólise e no armazenamento do gás hidrogênio produzido, o qual foi utilizado em lâmpadas (Fadigas, 2011). A motivação da pesquisa partiu do próprio governo da Dinamarca, que buscava formas de fornecer eletricidade a comunidades rurais do país.

O conjunto aerogerador é constituído pelo rotor, hélices, transmissão e conversor de energia mecânica em elétrica (gerador). O rotor capta a energia cinética dos ventos e a converte em energia mecânica no eixo e pode ter eixo horizontal (tais como rotor hélice, pás múltiplas e holandês) ou eixo vertical (tais como rotor Savonius e Darrieus). Seu princípio de funcionamento é o mesmo do gerador hidrelétrico. Nas usinas hidrelétricas o fluxo de água é utilizado para girar o rotor de uma turbina. Na energia eólica, o fluxo de ar provocado pelo vento é que impele o rotor de uma turbina. A principal diferença entre os dois sistemas é que o ar possui densidade muito menor do que a água, e por isso o diâmetro da turbina eólica

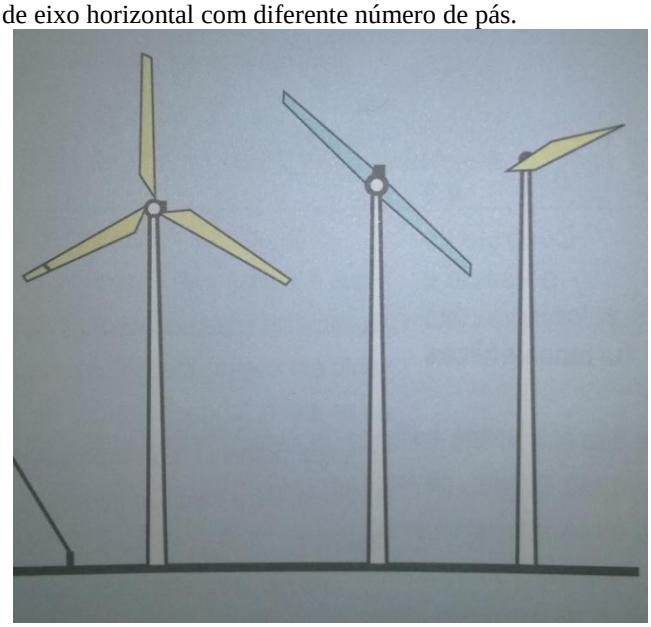
deverá ser muito maior. Outra diferença é que o vento se apresenta melhor distribuído na natureza do que nos rios, além de não ser necessário canalizá-lo (Aldabó, 2002).

O primeiro aerogerador de grande dimensão foi construído na França em 1929, e era constituído de duas pás com 20 m de diâmetro. Após algum tempo em operação ele foi destruído por uma tormenta (Aldabó, 2002).

Em 1931, a Rússia desenvolveu o aerogerador BALAKLAVA, um modelo avançado de três pás de 30 m de diâmetro, com rotação controlada pela variação do ângulo de passo das pás e o controle de posição feito por meio de uma estrutura de treliças inclinada apoiada sobre um vagão em uma pista circular de trilhos (Hau, 2005 apud Fadigas, 2011).

O menor numero de pás em uma turbina de eixo horizontal é 1 (um), possível com um contrapeso. Neste caso, o movimento do rotor é muito irregular porque a incidência do vento é maior na pá que no contrapeso. O rotor apresenta maiores dificuldades de balanceamento, sofre maiores vibrações, produz mais ruído, devido à alta velocidade e à vibração. Rotor com 2 pás é comum, mas seu movimento também não é estável, e o impacto visual pode ser levemente perturbador, uma vez que apresenta velocidade maior que um rotor de 3 pás, além de emitir mais ruído. O rotor de 3 pás tem movimento mais suave e estável, resultando em impacto visual menor. O balanceamento é mais fácil e apresenta vibrações e emissões de ruídos menores (Custódio, 2009).

Figura 1 - Modelos de turbinas de eixo horizontal com diferente número de pás.



Fonte: Custódio, 2009. Adaptado pelo autor.

Os Estados Unidos, uma década antes da implantação do Programa de Eletrificação Rural, realizaram muitos esforços no sentido de levar a energia elétrica aos consumidores localizados em áreas ainda não beneficiadas pela rede pública. Um dos projetos bem-sucedidos foi o aerogerador JACOBS, desenvolvido em 1920 pelos irmãos Marcellus e Joseph Jacobs. O aerogerador possuía três pás tipo hélice de madeira, controle centrífugo de passo e diâmetro de 4 metros (Fadigas, 2011).

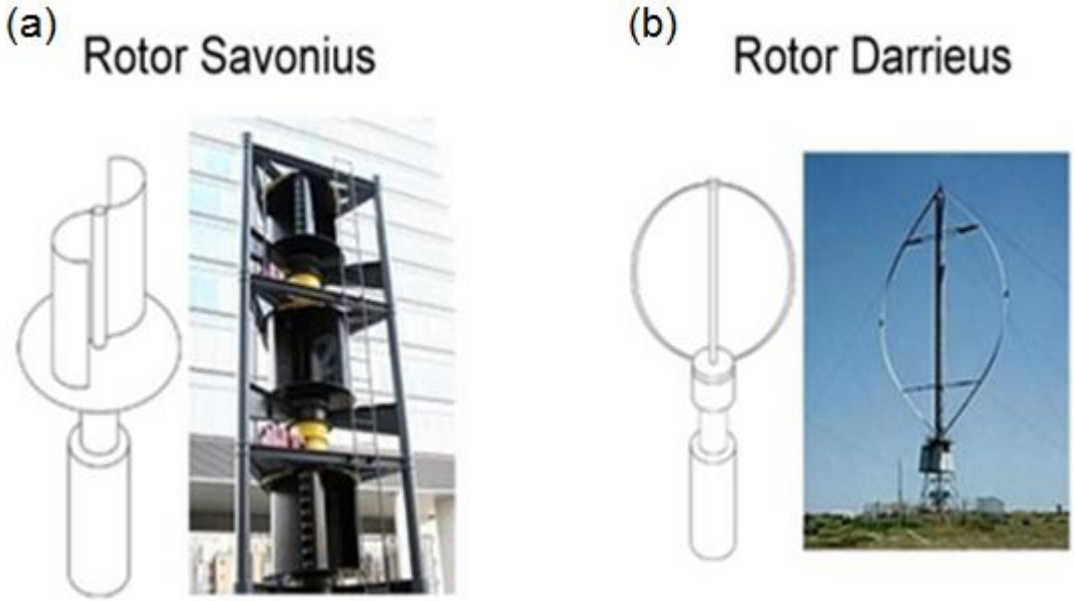
Neste mesmo ano, o físico Albert Betz (1885- 1968) demonstrou que uma turbina eólica ideal poderá extrair no máximo 16/27 da potência disponível no vento, o que representa

59,3% dessa potência. Este valor é o chamado de Máximo de Betz, ou coeficiente de Betz (Custódio, 2009).

Ainda na primeira metade do século XX, no campo das unidades eólicas de eixo vertical, merece destaque o desenvolvimento do rotor Savonius, pelo finlandês Sigurd Savonius e do rotor Darrieus desenvolvido por Georges Jean Marie Darrieus (Schulz,1989 apud Carvalho, 2003).

A Figura 2 apresenta modelos de aerogeradores desenvolvidos por Sigurd Savonius e Georges Jean Marie Darrieus.

Figura 2 - Modelos de rotores Savonius (a) e Darrieus (b).



Fonte: Portal-Energia.

A turbina Savonius possui um torque de partida médio ou alto. A velocidade do rotor é baixa, sendo usada no bombeamento d'água e moagem de grãos. Tem a possibilidade de controle de torque com regulação da passagem de ar entre as pás. Usa um rotor que não é estritamente de arraste, mas tem a característica de pá com grande área para interceptar o vento. Isto significa mais material e problemas com a força do vento para grandes velocidades, o que provoca um momento que deve ser suportado pela pá e que deve ser absorvido na base da torre, mesmo com o rotor parado. Uma vantagem é a facilidade de construção.

A turbina Darrieus possui baixo torque e velocidade do rotor alta, movendo-se mais rápido do que o vento, por isso é usada na geração de energia elétrica. Nesta máquina, o aerogerador é instalado no solo, facilitando a sua montagem e manutenção (Custódio, 2009).

Após a II Guerra Mundial, na década de 1950, o desenvolvimento de turbinas eólicas ficou quase que exclusivamente destinada para fins de pesquisa, por conta dos baixos preços do petróleo e carvão mineral que tornava a geração de eletricidade com base nesses combustíveis economicamente mais atrativa.

Em 1973, a chamada "primeira crise do petróleo", na qual acarretou em uma alta no preço deste combustível, propiciou a retomada de investimentos em fontes renováveis de

energia. Com este acontecimento, diversos países europeus, dentre eles Dinamarca, Suécia e Reino Unido, além dos Estados Unidos, possibilitaram investimentos privados em estudos de viabilidade técnica-econômica para aplicação de grande escala *offshore*.

O rápido crescimento da demanda mundial por eletricidade conduziu à necessidade da geração de eletricidade alternativa, com os produtores considerando os recursos renováveis para suprir a demanda sem agregar poluição ambiental (Aldabó, 2002).

Uma das vantagens das usinas eólicas é que não provocam desapropriações de áreas e remanejamentos de pessoas, comuns principalmente nos aproveitamentos hidrelétricos. Há compatibilidade entre a produção de eletricidade a partir do vento sem o uso da terra para a pecuária e a agricultura (Custódio, 2009).

A primeira fazenda eólica *offshore* (marítima) a operar comercialmente foi a Fazenda de Vindeby, instalada em 1991 na Dinamarca e projetada pela concessionária dinamarquesa Elkraft. Era uma pequena fazenda composta de 11 turbinas Bonus de 450 kW instaladas a 1,5 e 3 km da costa, em águas rasas (Fadigas, 2011).

Devido ao grande potencial existente nos rios do Brasil, as pesquisas para o uso dos ventos como fonte de energia elétrica começaram tarde no país, quando comparadas com as experiências internacionais.

Dentre os primeiros estudos visando o domínio da tecnologia eólica, merecem destaque os iniciados no ano de 1976 nos laboratórios do Centro Técnico Aeroespacial (CTA). Inicialmente sendo desenvolvidos protótipos de pequena potência de 1 a 2KW (Carvalho, 2003).

Em novembro de 1984, a Eletrobras firmou convênio com a Fundação Padre Leonel França, ligada a PUC-RJ, com o objetivo de elaborar o Atlas de Potencial Eólico Nacional (Eletrobras,1988 apud Carvalho, 2003).Mas somente em 2001 é que ele foi lançado, tendo como principal objetivo fornecer informações para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas adequadas para o aproveitamento eólico no país.

Com a união entre a CELPE (Companhia Energética de Pernambuco), a Folkcenter da Dinamarca e UFPE, em julho de 1992 foi instalada na ilha de Fernando de Noronha a primeira turbina eólica do país, com potência de 75 KW e três pás de 17 metros de diâmetro. Em março de 1996 foi inaugurado em Olinda o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) (CRESESB, 2008).

Um grande incentivo às fontes renováveis no país ocorreu em 2002, quando foi aprovada a lei n. 10.438, que criou o PROINFA (Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia).

Em 2010, diversos estados da federação, como São Paulo, Bahia, Alagoas e Rio Grande do Sul, iniciaram trabalhos de mapeamento eólico de seus territórios, com medidas de velocidade dos ventos feitas em alturas superiores a 80 metros.

2.1. Revisão do Potencial Eólico

2.1.1. Potencial eólico mundial

Com o aumento na demanda energética mundial juntamente com a crescente preocupação com atividades ambientalmente corretas, visando o mínimo impacto ao meio ambiente, busca-se suprir essa necessidade através de fontes energéticas renováveis.

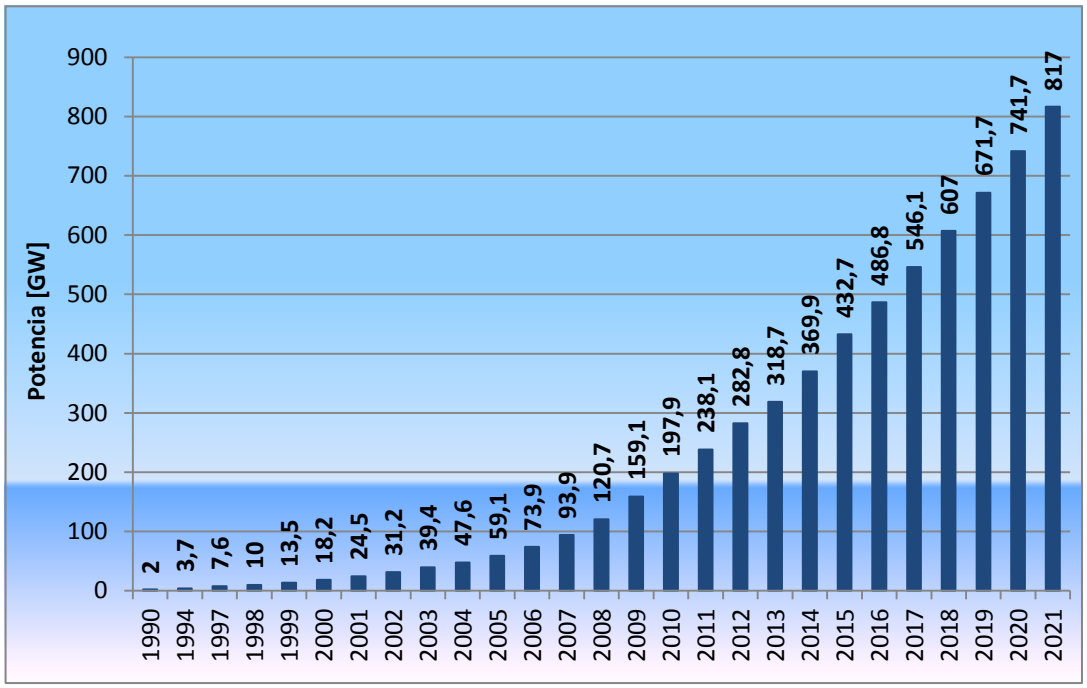
Uma das principais fontes energéticas, em que há maior investimento mundial, é a geração eólica de eletricidade. Tratando-se de uma das fontes energéticas mais abundantes no planeta, apresenta baixo impacto ambiental, permite a utilização conectada à rede ou isolada em locais remotos, onde os custos de transmissão são altos, a extração em terra e em alto mar e ainda a ocupação concomitante do solo para a agricultura sem perigo para as atividades agropecuárias.

Com os altos investimentos no setor eólico, houve um aumento na produção de mais de 485% nos últimos 10 anos e segundo relatório anual da Global Wind Energy Council (GWEC) estima-se crescimento mínimo de 68% na produção eólica de energia até o ano de 2021.

O ranking de capacidade eólica acumulada instalada está sendo liderado desde 2010 pela China, a qual em 2016 possuía uma capacidade de 168.690 MW, seguido por EUA (82.184 MW), Alemanha (50.018 MW), Índia (28.700 MW), Espanha (23.074 MW), Reino Unido (14.543 MW), França (12.066 MW), Canadá (11.900 MW), Brasil (10.740 MW), e completando o top 10, a Itália (9.257 MW) (GWEC, 2016).

A Figura 3 demonstra o crescimento da produção eólica mundial desde 1990 com previsões até o ano de 2021.

Figura 3 – Capacidade instalada de produção eólica mundial com estimativa até o ano de 2021.



Fonte: CRESESB, 2001; GWEC, 2017. Editado pelo autor.

2.1.2. Potencial eólico nacional

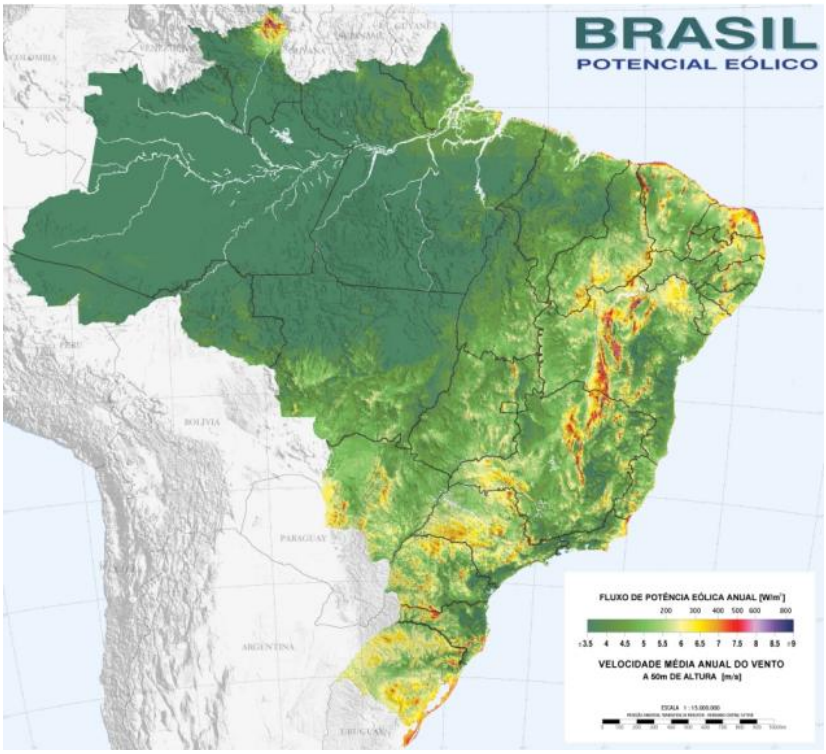
Em 2001, quando foi lançado o primeiro Atlas do Potencial Eólico, estimava-se um potencial eólico nacional de 143,5 GW. Já em 2010, esse potencial passou a ser estimado em mais de 250 GW. Porém, no ano de 2016,segundo matéria publicada por Noêmia Lopes no site da Agência FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), uma revisão do potencial eólico *onshore* (“em terra”) do Brasil, realizada em resposta ao aumento da altura das torres de geração energética, apontou que o país pode ter uma capacidade seis vezes maior de produzir energia a partir dos ventos do que o estimado no levantamento nacional do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, lançado em 2001.

Em entrevista, o coordenador da pesquisa, Ênio Bueno Pereira, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), comentou o seguinte,

> “O *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* foi feito com a estimativa do uso de torres de 50 metros de altura. Hoje, temos torres acima de 100 metros, que ampliam o potencial tecnicamente viável de exploração de 143 gigawatts para 880 gigawatts. Além disso, consideramos uma expansão das áreas que se tornam economicamente viáveis para a instalação das torres”.

A Figura 4 mostra o perfil médio de velocidades do vento para a altura de 50 metros.

Figura 4 - Mapa nacional das velocidades médias anuais do vento a 50 m de altura.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - CRESEB, 2001.

O potencial de energia eólica no Brasil é mais intenso de junho a dezembro, que coincide com os meses de menor intensidade de chuvas. Ou seja, nos meses em que falta

chuva é exatamente quando venta mais, tornando a energia eólica uma grande fonte suplementar à energia gerada por hidrelétricas. Durante este período, podem-se preservar as bacias hidrográficas fechando ou minimizando o uso das hidrelétricas (Marques et al, 2012).

Segundo o Banco de Informação de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2017 a geração eólica ocupa a terceira posição na capacidade de geração do Brasil, com 6,9%, atrás de Usinas Hidrelétricas (61,22%) e Usinas Termoelétricas (26,94%). O aumento na matriz energética ocorre em razão do bom desempenho da energia eólica e reflete as transformações ocorridas no setor energético nacional, que tem incentivado tanto o crescimento dessas fontes quanto a diversificação da matriz nos últimos anos.

2.1.3. Potencial eólico do Rio Grande do Sul

Um grande passo para a utilização da energia eólica no estado do Rio Grande do Sul ocorreu em 2010, quando foi dado início aos trabalhos de mapeamento eólico do território, e desenvolvimento do novo atlas eólico.

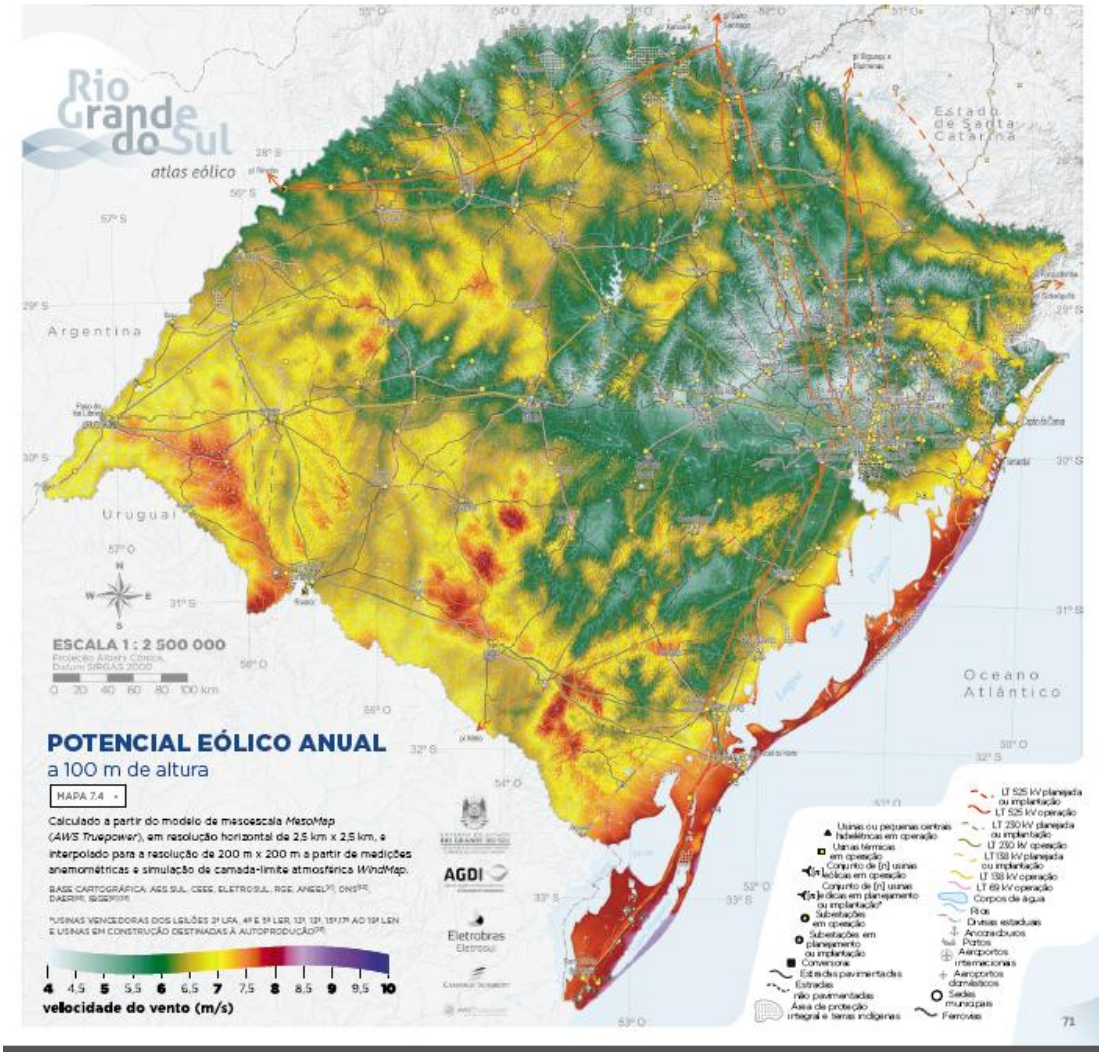
Em dezembro de 2014, após 12 anos de sua primeira edição, conforme noticiado pelo Ministério do Planejamento em seu site, o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul ganha uma nova edição, medindo agora não apenas o potencial dos ventos em terra, mas também nas três principais lagoas do Estado - dos Patos, Mirim e Mangueira - e sobre o oceano. O lançamento da publicação, elaborada pela Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento (AGDI) e coordenada pelo Eletrosul contribuirá para identificar o potencial e planejar investimentos.

Em seu site, a Eletrosul traz alguns resultados das medições realizadas em 70 torres, apontando que, com ventos de sete metros por segundo ou mais, o potencial gaúcho é de 102,3 GW à altura de 100 metros e de 245,3 GW extrapolado para a altura de 150 metros. Como já dito anteriormente, um dos diferenciais do novo atlas é a apresentação do regime de ventos e do potencial eólico *offshore*. Sendo que sobre as lagoas, a 100 metros de altura, o potencial é de 40 GW, enquanto que, para lâminas d'água de até 50 metros de profundidade, o potencial eólico sobre o oceano é de 110 GW.

Segundo Custódio, o estado foi pioneiro ao elaborar o Atlas Eólico em 2002 e agora inova mais uma vez, identificando potencial *offshore* e de municípios do interior. Com um nível de refinamento extraordinário, irá trazer excelentes resultados e será muito útil tanto para políticas públicas como para o planejamento das empresas que investem em energia eólica.

A Figura 5 mostra o mapa gaúcho de velocidades médias do vento para alturas de 100 metros.

Figura 5 - Mapa do Rio Grande do Sul de velocidades médias anuais na altura de 100 m.



Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul – 2014.

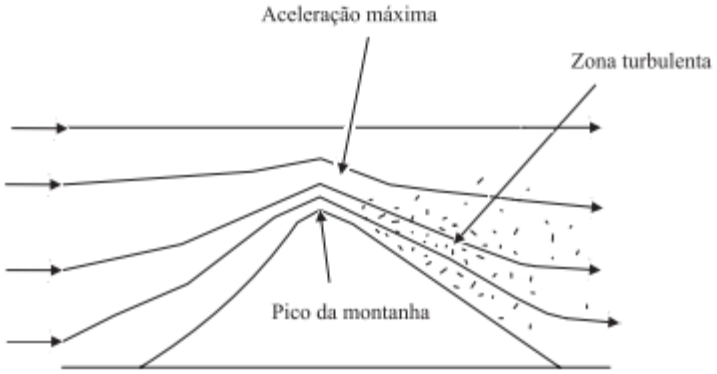
2.2. Fatores que influenciam o regime dos ventos

Alguns dos fatores que podem ocasionar grande influência no regime de velocidade dos ventos são a orografia, a rugosidade e os obstáculos.

2.2.1. Orografia

A orografia constitui um dos elementos mais importantes na caracterização do escoamento atmosférico de um dado local, dada a sua elevada dependência da complexidade do terreno em análise (terreno plano, elevações de declive suave ou terreno montanhoso) (Jervell, 2008).

Figura 6 - Influência da orografia na velocidade do vento.



Fonte: Jervell, 2008.

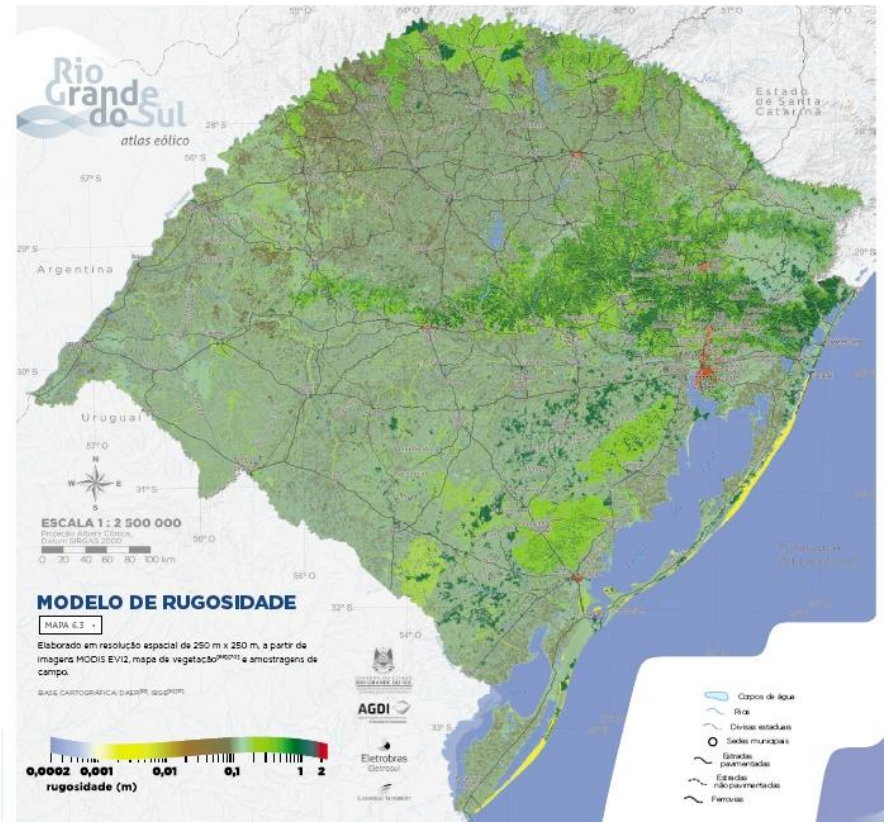
2.2.2. Rugosidade

Outro fator importante para identificar o perfil dos ventos de determinado local é a determinação da rugosidade deste terreno.

Geralmente os valores de comprimento de rugosidade não são calculados. Utiliza-se como base os comprimentos de rugosidade tabelados no European Wind Atlas, publicado em 1989. Este atlas possui a descrição de vários tipos de terreno com seus respectivos valores de comprimento de rugosidade (Caldas, 2010).

A Figura 7 exibe o perfil de rugosidade para o estado do Rio Grande do Sul.

Figura 7 - Mapa do modelo de rugosidade do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul, 2014.

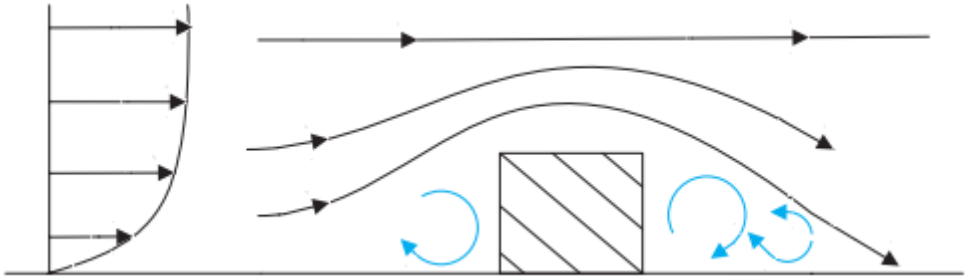
2.2.3. Obstáculos

Pode-se considerar como obstáculo toda construção ou outros elementos que causem variações bruscas do terreno e estejam próximas ao local de interesse.

Os obstáculos atuam como "quebra-ventos", reduzindo consideravelmente a velocidade do escoamento, além de provocar turbulência no fluxo de ar. Por esta razão deve-se evitar a instalação de aerogeradores e de torres de medição próximo a obstáculos (Caldas, 2010).

A Figura 8 demonstra uma representação da influência de obstáculos no perfil do vento.

Figura 8 - Esquema representativo da influência de um obstáculo no vento.



Fonte: Jervell, 2008.

2.3. Cálculo do potencial eólico

2.3.1. Potência do vento

A potência total P[W] de uma massa de ar, com velocidade v [m/s], atravessando uma área A [m^2], pode ser calculada pela Equação 2.1.

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad 2.1$$

onde:
ρ é a densidade do ar no local [kg/m^3].

Para os aerogeradores, considera-se a área A como a superfície traçada pelas pás do rotor. Como a potência do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, pequenas variações de velocidade do vento proporcionam grandes variações de potência (Aldabó, 2002).

Entretanto nem toda potência disponível no vento pode ser extraída pela turbina eólica. A máxima potência que pode ser extraída do vento por uma turbina eólica apresenta uma limitação referente a uma velocidade do vento na saída do rotor eólico que não pode ser inferior a 1/3 da velocidade do vento incidente v (Custódio, 2009).

Neste caso, o aproveitamento máximo teórico da potência eólica disponível é de 16/27 ou 59,3%, valor este chamado de coeficiente de Betz em homenagem ao primeiro

pesquisador a publicar este valor (Carvalho, 2003). A potência máxima teórica,$P_{MÁX}$, portanto, é dada pela Equação 2.2.

$$P_{MÁX} = \frac{16}{27}\left(\frac{1}{2}\rho A v^3\right) \qquad 2.2$$

Uma turbina real somente fará a extração de parte deste máximo, devido às perdas aerodinâmicas na conversão da energia eólica. O coeficiente de potência, Cp, indica a relação entre a potência realmente extraída do vento e a potência disponível no vento, conforme a Equação 2.3.

$$Cp = \frac{P_E}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \qquad 2.3$$

onde:
P_E é a potência produzida na turbina eólica [W].

O coeficiente de potência varia com a velocidade do vento, pois a eficiência aerodinâmica das pás do rotor da turbina depende da velocidade do vento incidente (Lunelli, 2011).

Na prática, para turbinas eólicas modernas os valores máximos para o coeficiente de potência são da ordem de 50% (Gasch, 1996 apud Carvalho, 2003).

2.3.2. Perfil da velocidade do vento

A parcela do escoamento do vento mais próximo à superfície da Terra perde energia com o atrito causado pelo contato com a vegetação e obstruções, prédios e construções. Por isso, normalmente é de menor intensidade e apresenta maior turbulência.

As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também podem contribuir para uma análise mais acurada (CRESESB, 2008).

Segundo Custódio, 2009, analisando-se a camada limite atmosférica na faixa de interesse para a conversão da energia eólica, ou seja, na camada limite superficial, observa-se que esta tem um comportamento que pode ser representado por uma função logarítmica ou por uma função exponencial. Desta forma, existem dois modelos de análise do comportamento da camada limite atmosférica: o perfil logarítmico e o perfil exponencial. O perfil logarítmico é dado pela Equação 2.4, onde é possível determinar a velocidade do vento v[m/s], na altura h[m] acima do nível do solo.

$$v = \frac{v^*}{k}\ln\left(\frac{h}{Zo}\right) \qquad 2.4$$

onde:
Z_0é o comprimento de rugosidade [m];
ké a constante de Von Kármán (k = 0,4) [adimensional];

v^*é a velocidade de atrito [m/s].

O comprimento de rugosidade,Z_0, é a altura média das saliências do solo, responsáveis pela força de atrito que se opõe ao movimento da massa de ar, resultando em redução da velocidade do vento próximo à superfície do solo. Esta relação leva em conta apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera.

A Tabela 1 mostra alguns exemplos de terrenos com seus respectivos comprimentos de rugosidade Z_0.

Tabela 1 - Valores aproximados para o comprimento de rugosidade em alguns terrenos típicos.

Tipo de Cobertura e/ou uso da terra	Z_0 (m)
Áreas urbanas	0,7 – 3
Florestas	0,4 – 1
Reflorestamento	0,4-0,95
Vegetação de áreas úmidas	0,1-0,4
Culturas agrícolas	0,02 - 0,15
Pastagens	0,02 – 0,2
Solo exposto	0,001 – 0,01
Corpos de água	0,0002 – 0,001

Fonte: Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, 2014. Adaptado pelo autor.

O comportamento logarítmico da velocidade do vento pode ser usado para determinar a velocidade do vento em determinada altura, através da Equação 2.5, quando conhecida a velocidade do vento em outra altura e o comprimento de rugosidade. A Equação 2.5também pode ser utilizada para determinação do comprimento de rugosidade do local, a partir de medições de velocidade do vento em duas alturas diferentes.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)} \qquad 2.5$$

onde:
h_1eh_2 são as alturas do solo nos pontos 1 e 2, respectivamente [m];
v_1ev_2 são as velocidades do vento no ponto 1 e 2, respectivamente [m/s].

Outra forma de determinação da velocidade do vento em alturas diferentes é através do perfil exponencial, conhecida como lei da potência, dada pela Equação 2.6.

$$v_2 = v_1\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha} \qquad 2.6$$

onde:
αé o expoente de potência no local [adimensional].

O expoente α é diferente do comprimento de rugosidade Z_0 e varia de 0,06, para superfícies lisas, como o mar, até 0,6, para locais com alta rugosidade, como cidades (Custódio, 2009). Este método foi desenvolvido por Hellman (1915) e, mesmo sendo um

modelo simplificado, é vastamente utilizado para análises preliminares ou sem a necessidade de grande precisão. Para estudos genéricos, onde o terreno não é especificado, o valor o α = 1/7 (0,14) é frequentemente usado, refletindo um terreno plano e com poucos arbustos.

2.3.3. Energia gerada

A energia anual produzida por uma turbina eólica é obtida através da integração da potência extraída no período, dada pela Equação 2.7 (Custódio, 2002).

$$E = \int_t P\big(v(t)\big)dt \qquad 2.7$$

onde:
Eé a energia anual estimada [kWh];
$P\big(v(t)\big)$é a potência em função da velocidade do vento, obtida através da curva característica da máquina [kW].

Outra forma de determinação da energia gerada é pela combinação entre a estatística da velocidade do vento e a curva de potência do aerogerador. Esta análise deve ser feita para todas as velocidades do vento para obter-se a produção total de energia do aerogerador. Portanto, considerando-se que um ano contém 8760 horas, a energia anual gerada do aerogerador é dada pela Equação 2.8 (Ronaldo, 2007).

$$EAG = 8760.\sum[f(V).P(V)] \qquad 2.8$$

onde:
V é a velocidade de vento [m/s];
$f(V)$ é a frequência de ocorrência da velocidade do vento V [%];
$P(V)$ é a potência produzida pelo aerogerador na velocidade do vento V[kW].

2.3.4. Fator de capacidade

O fator de capacidade de um aerogerador é a relação entre a energia elétrica gerada e sua capacidade de produção. Pode ser calculado para qualquer período de tempo, entretanto, é usual sua verificação anual, conforme Equação 2.9.

$$\mathrm{FC} = \frac{EAG}{8760 \cdot P} \qquad 2.9$$

onde:
FCé o fator capacidade [%];

EAG é a energia anual gerada [kWh];
P é a potência nominal [kW].

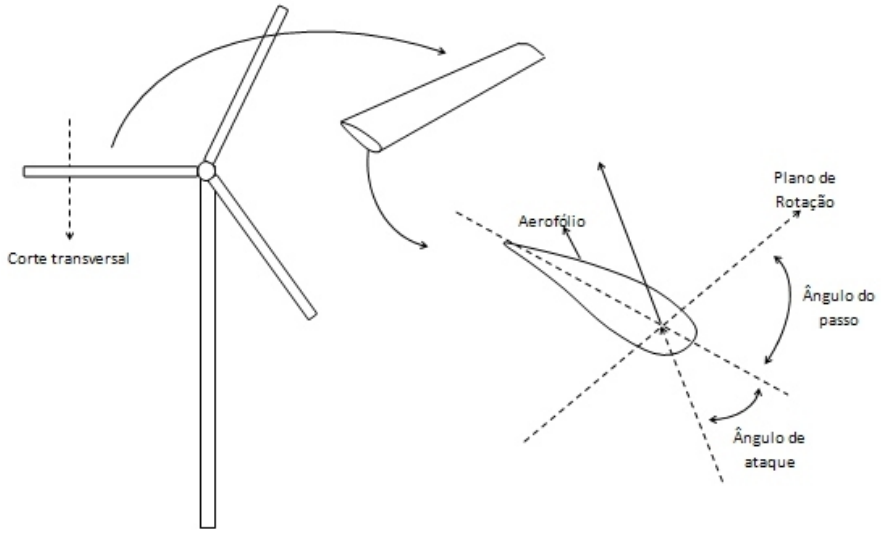
O fator de capacidade depende fortemente do perfil do vento no local onde o aerogerador é instalado, uma vez que este afeta a energia anual gerada.

2.4. Mecanismos de controle de potência em turbinas eólicas

Os sistemas eólicos de baixa solidez necessitam de dispositivos de controle de potência para garantir a confiabilidade e segurança aos equipamentos porque, embora operem com velocidades de vento bastante elevadas, quando essa velocidade supera determinados valores pode haver a sobrecarga do sistema e desgaste dos equipamentos (Faria, 2017).

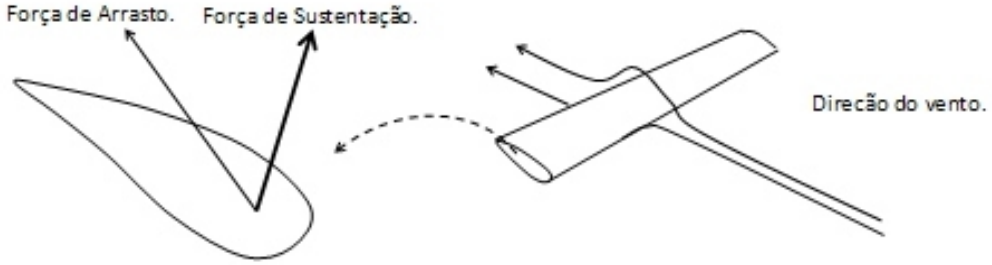
Existem dois modos de se implementar um controle de potência em rotores de baixa solidez: o primeiro consiste em um sistema de controle ativo pelo qual se altera o ângulo do passo (*picth*) e o segundo método consiste em um controle passivo ("stall" ou estol, em português) onde o aumento na velocidade do vento incide nas forças de sustentação e arrasto.

Figura 99- Demonstração do ângulo de passo e de ataque em uma pá de um aerogerador.



Fonte: Faria, 2017.

Figura 10- Demonstração das forças de sustentação e de arrasto em uma pá de aerogerador.



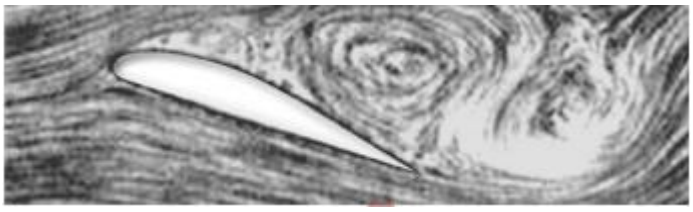
Fonte:Faria, 2017.

2.4.1. Controle por estol

O controle de estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas e não podem ser giradas em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo do passo é escolhido de tal maneira que para velocidades de vento maiores que a nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor se descola da superfície (estol), ou seja, o escoamento se afasta da superfície da pá aumentando a força de arrasto (Custódio, 2007). Onde que a força de sustentação é responsável por fazer a pás girar e a força de arrasto é responsável por fazer a pás "frear".

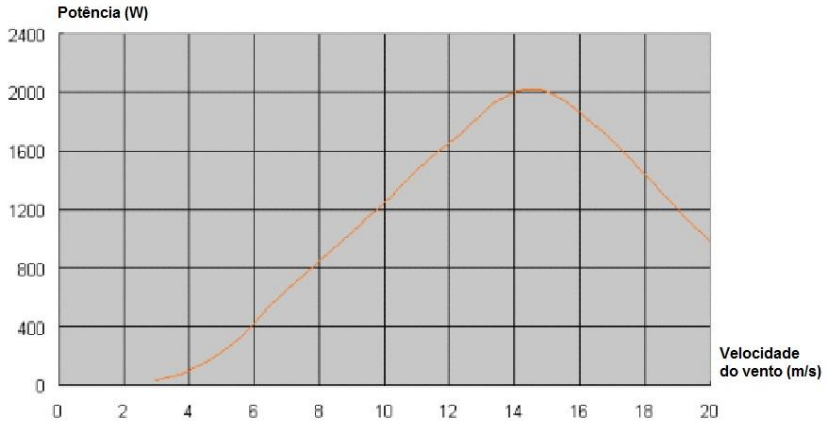
As Figuras 11 e 12 exibem, respectivamente, uma ilustração da influência do controle de estol em uma pá no fluxo de ar e uma curva típica de uma turbina com este tipo de controle de velocidade.

Figura 11 - Ilustração do controle por estol mostrando uma seção de uma pá com os fluxos de ar em seu entorno de arrasto, controlando a potencia de saída da turbina.



Fonte: CRESESB, 2008.

Figura 10 - Curva típica de um modelo de turbina com controle de potencia por estol. Curva de potência do aerogerador Modelo ELV-H3.1.



Fonte: Eletrovento Energia Alternativa.

Os aerogeradores com controle de estol são em geral mais simples que os com controle de passo, pelo fato de não necessitarem de um sistema de controle de mudança do ângulo de passo (Silva, 2012).

Este sistema tem a vantagem de uma menor necessidade de manutenção devido ao fato de terem menos peças móveis e uma estrutura do cubo do rotor mais simples. A turbina projetada com o estolamento das pás apresenta uma pequena queda de potência para velocidades maiores que a nominal (Silva, 2012).

2.4.2. Controle de passo

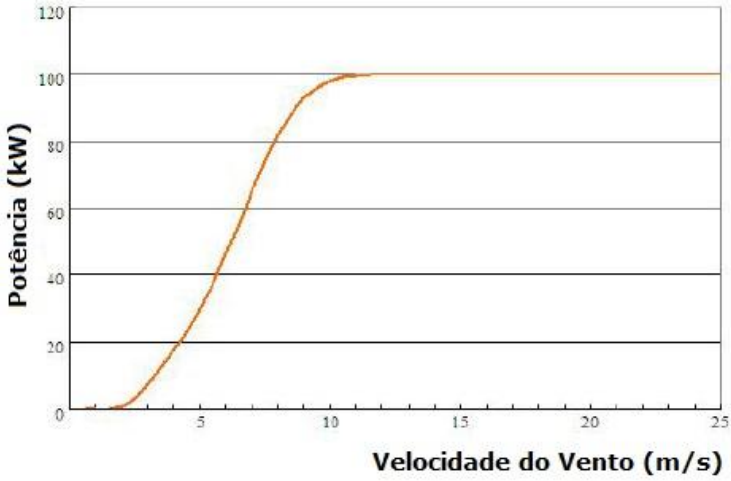
É um sistema de controle ativo, em que no momento que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido ao aumento das velocidades do vento, as pás do rotor são giradas em torno de seu eixo longitudinal, mudando o ângulo de passo para aumentar o ângulo de ataque do fluxo de ar. Isto diminui as forças aerodinâmicas atuantes e a extração de potência do vento pela turbina (Custódio, 2012). Assim, para velocidades de vento maior que a nominal tem-se que a potência produzida é constante.

A Figura 13 e 14 exibem, respectivamente, uma ilustração da influência do controle de passo em uma pá no fluxo de ar e uma curva típica de uma turbina com este tipo de controle de velocidade.

Figura 13 - Ilustração do controle de passo mostrando uma seção de uma pá com os fluxos de ar em seu entorno de arrasto.

Fonte: CRESESB, 2008.

Figura 114 - Curva típica de um modelo de turbina com controle de potencia por controle de passo. Curva de potência do aerogerador Modelo ELV-H20.8.



Fonte: Eletrovento Energia Alternativa.

3. METODOLOGIA

Como metodologia para a realização do estudo do comportamento do vento e da viabilidade de instalação de aerogeradores nas dependências da UFFS - Campus Erechim, primeiramente é realizada uma análise sobre o terreno e o revelo do campus, para determinação do perfil de velocidade do vento.

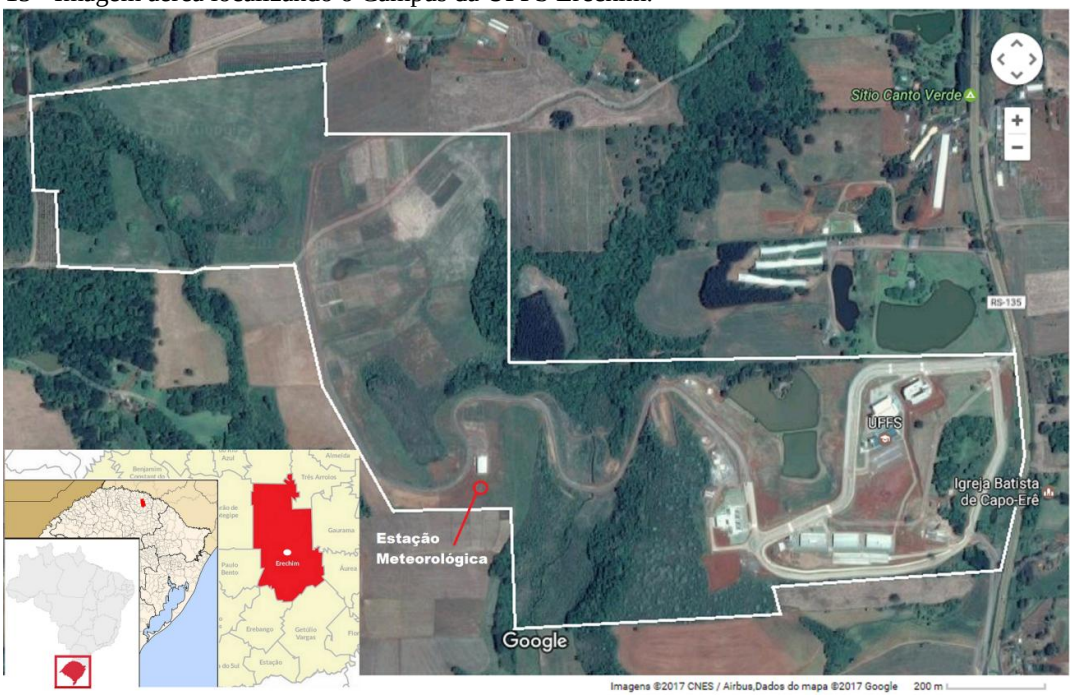
A Universidade Federal da Fronteira Sul é uma instituição de ensino superior pública brasileira sediada na cidade de Chapecó, em Santa Catarina, e com campi nas cidades de Cerro Largo, Erechim, Laranjeiras do Sul, Passo Fundo e Realeza. O *campus* sediado no município de Erechim, onde será realizado o estudo, está localizado junto à região do Alto Uruguai ás margens da Rodovia ERS-135, Km200, a cerca de 10 km do centro da cidade, comum a altitude aproximada de 770 metros.

Segundo um estudo desenvolvido por Rossato (2011), o clima regional pode ser classificado como tipo “Subtropical IV a”, que se apresenta muito úmido, com inverno fresco e verão quente. Para a autora, as chuvas na região são geradas principalmente pelos sistemas frontais, sendo esta a parte do estado com menor influência dos sistemas polares. No verão e na primavera, a região recebe a influência dos sistemas marítimos e continentais, constituindo, no total anual, médias pluviométricas em torno de 1700 a 1900 mm, distribuídas entre 110 e 140 dias por ano.

A estação meteorológica instalada no campus é fabricada pela empresa Squitter Ambiental e sua localização se encontra representada na Figura9. Ela é composta por diversos sensores, entre os quais um sensor pluviométrico de báscula modelo S2242, um sensor ultrassônico de nível modelo S2089, um sensor de pressão barométrica modelo S2021, um piranômetro de silício modelo S2082, um sensor de umidade relativa e temperatura do ar modelo S2095, um anemômetro modelo S2014, além de um módulo de proteção modelo S2068, dois *dataloggers* modelo A1201 e um módulo carregador de bateria modelo S2034, estes acondicionados dentro de gabinetes de proteção modelo S2210. A alimentação é feita através de duas baterias Unipower 12V 7Ah,carregadas por dois painéis solares modelos S2192-K de 10W.

A Figura 15 e Figura 16 exibem a localização do Campus da UFFS Erechim e da estação meteorológica.

Figura 15 - Imagem aérea localizando o Campus da UFFS Erechim.



Fonte: Google Earth, 2016. Adaptado pelo autor.

Figura 16 - Estação meteorológica da UFFS - Campus Erechim.

Fonte: Do autor.

O anemômetro modelo Squitter S2014 utiliza como forma de medição da velocidade do vento um *reed-switch* selado, que gera uma série de pulsos a uma taxa proporcional à velocidade de rotação do sensor. Construído totalmente em alumínio, apresenta faixa de operação de 0,0 a 75m/s, com limiar de partida de 0,4 m/s. Os sensores estão instalados a 2,5 metros de altura. A direção do vento é medida usando-se uma *windvane* diretamente acoplada a um potenciômetro de precisão. Variações na direção do vento produzem uma correspondente mudança de tensão no potenciômetro (Squitter Equipamentos Profissionais do Brasil, 2008). Os dados emitidos são armazenados no *datalogger* e posteriormente coletados.

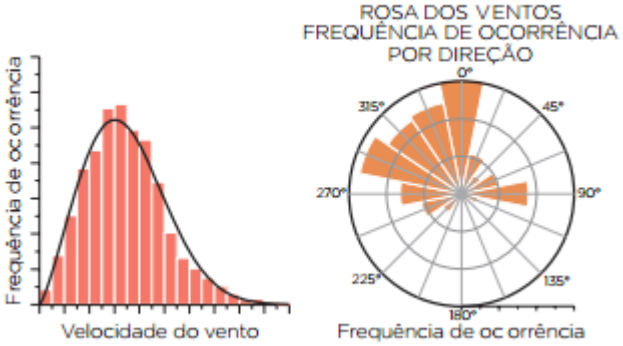
A Figura 17 exibe o anemômetro da estação meteorológica da UFFS.

Figura 17 - Anemômetro Squitter S2014 instalado nas dependências da UFFS.

Fonte: Do autor.

Os dados coletados compreendem o período de dez meses e 25 dias, do dia 09 de junho de 2016, data da instalação da estação meteorológica, até o dia 04 de maio de 2017. Estes dados são analisados estatisticamente, estudado os histogramas de velocidade do vento, e analisado as rosas dos ventos – frequência de ocorrência por direção – conforme exemplo da Figura18.

Figura 18 - Histograma de velocidade do vento e rosa dos ventos.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul, 2002.

É construída uma planilha no software Microsoft Excel, para calcular a estimativa de energia gerada e o fator de capacidade para diversas turbinas eólicas, buscando-se encontrar a mais adequada para o local.

Por fim, é realizada uma análise sobre o consumo de energia elétrica utilizada no campus e a viabilidade técnica para instalação de turbinas eólicas no local.

4. RESULTADOS

Nesta etapa são detalhados os passos do projeto de geração de energia utilizando um sistema baseado em geração eólica *ongrid* para o Campus UFFS Erechim.

Os dados foram coletados na estação meteorológica da Universidade Federal da Fronteira Sul localizada dentro do Campus, no interior da cidade de Erechim-RS, nas coordenadas 27º43’44”S 52º17’32”W. A estação está em operação desde a data de 09 de junho de 2016, coletando médias de dados em intervalos de uma hora. As medições foram realizadas da data de instalação até a data de 04 de maio de 2017.

4.1. Estimativa do potencial eólico

4.1.1. Velocidade média no período de medições

Coletados os dados de velocidade e direção, com o auxílio do software MS Excel pode-se organizá-los adequadamente, calculando sua velocidade média e frequência de incidência.

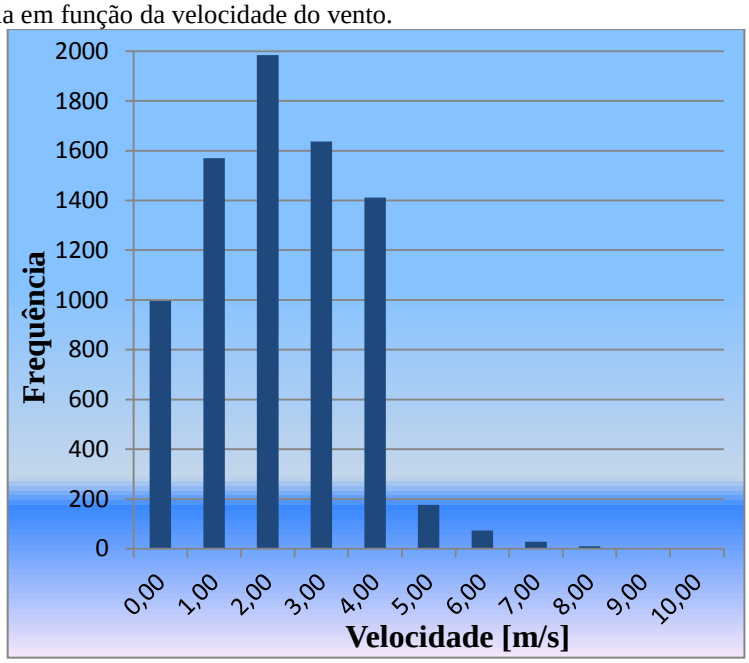
A velocidade média calculada do período de medição para a altura de 2,5 metros é de 1,87 m/s. A Tabela 2 apresenta os dados de velocidades do vento e sua frequência relativa de incidência, coletado pelo anemômetro em sua altura original, 2,5 metros. A Figura 19 mostra o gráfico da frequência em função da velocidade do vento.

Tabela 2 - Velocidade, frequência e frequência relativa de incidência dos ventos coletado pela estação meteorológica da UFFS Erechim.

Veloc. Vento [m/s]	Frequência	Freq. Relat. [%]
0	996	12,62197
0-1	1570	19,89608
1-2	1984	25,14257
2-3	1637	20,74515
3-4	1412	17,89380
4-5	176	02,23039
5-6	74	0,93778
6-7	29	0,36751
7-8	11	0,13940
8-9	2	0,02535
9-10	0	0,00000

Fonte: Do autor.

Figura 12 - Frequência em função da velocidade do vento.



Fonte: Do autor.

4.1.2. Comparativo dos dados coletados com os dados obtidos do INMET

Como validação, comparou-se os dados registrados na estação da UFFS com dados obtidos através da plataforma online do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para o município de Erechim. Os dados de medição do INMET foram registrados pela estação

meteorológica automática, nas coordenadas de latitude -27.657710º, longitude -52.305805º, a 10metros de altura em relação ao solo e 777 metros acima do nível do mar.

A Figura 20 mostra a estação meteorológica automática do INMET no município de Erechim.

Figura 13 - Estação meteorológica do INMET, situada no município de Erechim.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia 2017.

As velocidades do vento devem estar na mesma altura para uma comparação adequada. Portanto, deve-se extrapolar a velocidade do vento da altura da torre da estação meteorológica da UFFS para a altura de comparação desejada, através da equação 3.5. Utiliza-se um coeficiente de rugosidade (Z_0) de 0,4 metros, referente ao valor da rugosidade para a região, conforme a Figura 17.

A média das velocidades do vento coletadas pela estação do INMET no período de 08 de julho de 2016 á 04 de maio de 2017 foi de 1,83 m/s, enquanto que a média do vento extrapolada para a altura de 10metros na estação meteorológica da UFFS, neste mesmo período foi de 3,28 m/s.

A variação entre as velocidades médias da estação do INMET e da UFFS pode ocorrer devido ao local de medição ser diferente. A estação da UFFS se situa no topo de uma elevação no relevo e posteriormente a uma depressão com cerca de 40 metros na direção de maior frequência de incidências dos ventos. Esse tipo de interferência do relevo faz com que a velocidade no local seja acelerada (maior).

O valor encontrado quando a velocidade média da estação da UFFS é extrapolada para a altura de 100 metros, fica próximo ao observado no Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul (entre 6 e 7 m/s) como pode ser observado na Figura 21.

Conforme verificado, as velocidades medidas, quando comparadas com os dados do INMET, estão superdimensionadas. No entanto, quando comparadas com os valores do atlas, estão subdimensionadas. Considerando a grande variação que a velocidade do vento pode ter de acordo com a sua localização específica, os valores medidos são considerados adequados para o projeto eólico.

A Figura 21 exibe o perfil de velocidades médias para altura de 100 metros na região de Erechim.

Figura 14 - Perfil de velocidades médias em alturas de 100m para a região de Erechim-RS.

Fonte: Atlas do Potencia Eólico do Rio Grande do Sul- 2014.

4.1.3. Médias mensais e por estações do ano

Os dados de velocidades do vento são organizados tanto por mês quanto estações do ano, para poder-se calcular sua média e analisar sua incidência relacionada aos índices pluviométricos na região.

A Tabela 3 demonstra uma comparação mensal entre a velocidade média do vento e o índice pluviométrico de junho de 2016 á maio de 2017.

Tabela 3 - Comparativo entre as velocidades mensais médias e índice pluviométrico mensal, entre junho de 2016 e maio de 2017.

Ano	Mês	Veloc. Média [m/s]	Chuva Mensal [mm]
2016	Jun	1,65*	190,4*
2016	Jul	1,88	127,4*
2016	Ago	1,76	179,8
2106	Set	1,94	55,0
2016	Out	2,23	227,6
2016	Nov	2,19	61,0
2016	Dez	1,92	191,4
2017	Jan	1,66	211,6
2017	Fev	1,48	156,0
2017	Mar	1,76	151,8
2017	Abr	2,00	191,4
2017	Mai	1,81*	463,2

Fonte: Do autor.

No mês de junho de 2016 há uma carência de dados de velocidade do vento em nove dias e de quinze dias na incidência pluviométrica. No mês de julho de 2016 há oito dias de

carência de dados para o índice de chuvas. Já no mês de maio de 2017, a média de velocidade conta apenas com dados de medição de quatro dias.

Tabela 4 - Velocidade média do vento em cada estação do ano para a região de Erechim.

Estação do Ano	Veloc. Média [m/s]
Primavera	2,11
Verão	1,64
Outono	1,85
Inverno	1,86

Fonte: Do autor.

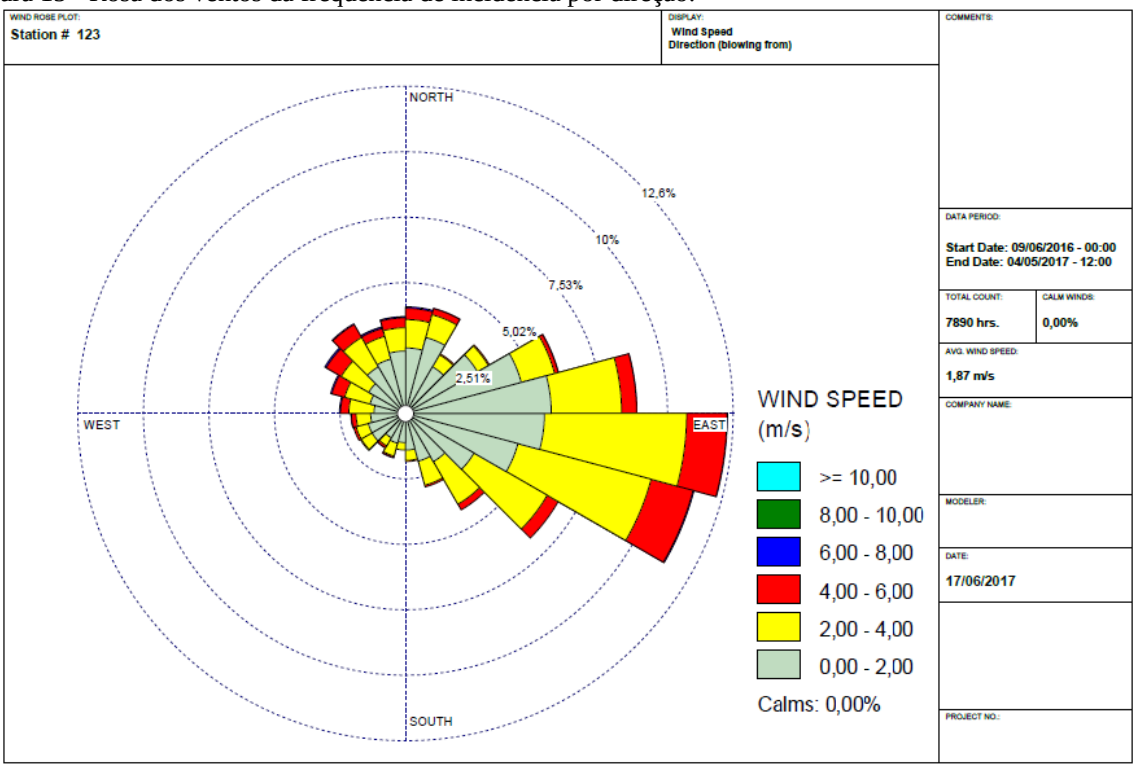
Como podemos observar na Tabela 3 e na Tabela 4 os maiores valores das velocidades médias tanto mensais quanto nas estações do ano ocorrem justamente nos períodos em que os índices pluviométricos são menores.

4.1.4. Direção do vento

Com o auxilio do software WRPLOT View da Lakes Environmental, é plotado a rosa dos ventos para as direções, apresentada na Figura 22. Pode-se perceber que as incidências de maiores frequências ficam entre 90 a 120º, na qual condiz com as direções de leste/ leste – sudeste.

A Figura 22 exibe a rosa dos ventos da frequência de incidência pela direção.

Figura 15 - Rosa dos ventos da frequência de incidência por direção.



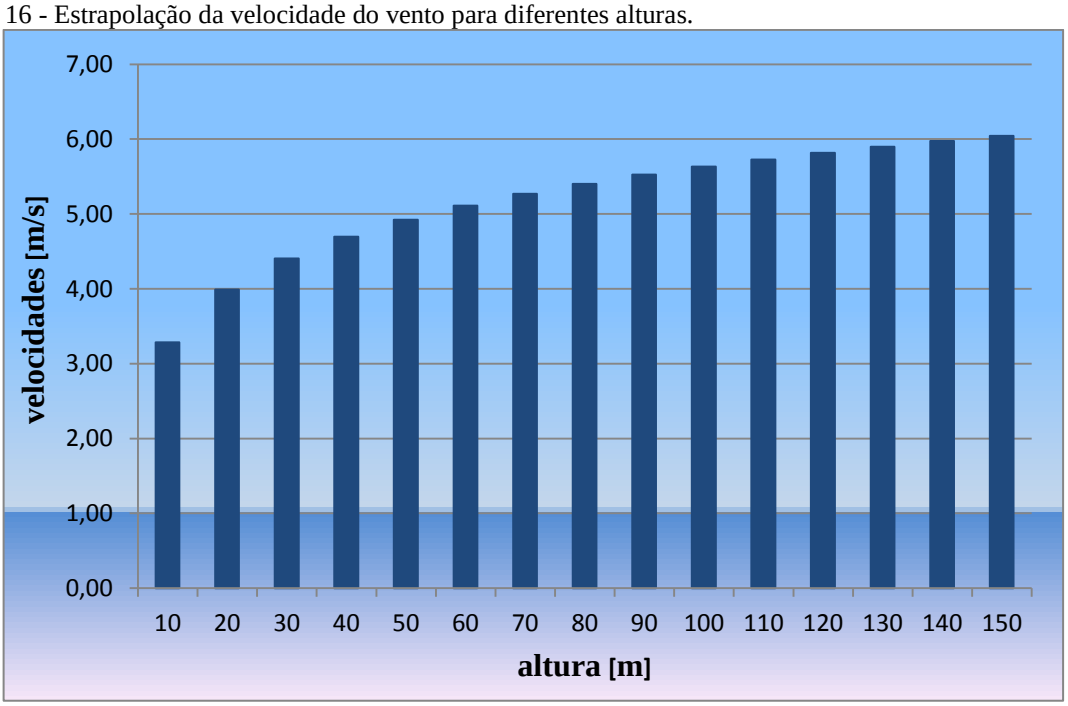
Fonte: Do autor.

4.1.5. Estrapolação da velocidade do vento para diferentes alturas

Os valores de velocidades foram extrapolados para diferentes alturas, utilizando a Equação 2.5 e um coeficiente de rugosidade (Z_0) de 0,4 metros referente ao valor da rugosidade para a região conforme a Figura 17.

A Figura 23 demonstra o perfil de velocidade média quando extrapolado para diferentes alturas.

Figura 16 - Estrapolação da velocidade do vento para diferentes alturas.



Fonte: Do autor.

4.1.6. Consumo energético local

Com as contas de energia elétrica do Campus, pode-se chegar a uma média mensal e um total anual de consumo. Assim, é possível avaliar quantas turbinas são necessárias para suprir parcialmente ou totalmente o consumo interno do Campus.

A Tabela 5 exibe o consumo e gastos mensais com energia elétrica para o Campus da UFFS Erechim.

Tabela 5 - Consumo e gastos com energia elétrica no decorrer de um ano no Campus UFFS – Erechim.

Ano	Mês	Consumo [kWh]	Gastos [R$]
2016	Jun	69.534,00	44.842,58
2016	Jul	66.474,00	39.844,53
2016	Ago	60.106,00	34.262,71
2016	Set	59.032,00	35.588,46
2016	Out	53.623,00	32.682,81
2016	Nov	54.614,00	32.023,94
2016	Dez	35.989,00	21.934,58
2017	Jan	40.228,00	24.272,10
2017	Fev	36.536,00	20.834,31
2017	Mar	42.249,00	25.357,72
2017	Abr	53.786,00	33.599,03
2017	Mai	55.870,00	33.532,54
Média mensal		**52.336,75**	**31.564,61**
Total anual		**628.041,00**	**378.775,30**

Fonte: Do autor.

4.1.7. Opções de aerogeradores

Para a escolha de um modelo mais indicado de turbina para suprir as necessidades energéticas do campus, são analisados diversos modelos de diferentes potências e diâmetros de rotor, em sua maioria fabricados pela empresa Eletrovento ltda. A Tabela 6 apresenta a relação e características dos modelos estudados.

Tabela 6 - Modelos e características dos aerogeradores analisados para possível implantação no Campus UFFS Erechim.

Modelo	Pot. Nom. [kW]	Pot. Máx. [kW]	Diâmetro [m]	Rotações [RPM]
ELV-H2.7	0,5	1	2,7	600
ELV-H3.1	1	2	3,1	500
HummerH3.1	1	2	3,1	500
Ecosolar Aero 100	1	3	2,9	500
Razec 266*		1,5	2,0	60-180
ELV-H3.8	2	3,2	3,8	450
ELV-H4.6	3	4,5	4,6	400
ELV-H6.4	5	7,5	6,4	240
ELV-H8.0	10	15	8,0	200
ELV-H13.2	20	20	13,2	150
ELV-H13.2	30	30	13,2	110
ELV-H16.5	50	50	17,0	85
WEG AGW 100	95	95	24,4	60
ELV-H20.8	100	100	21,0	60

*Aerogerador de eixo vertical.

Fonte: Do autor.

4.1.8. Cálculo da Energia Anual Gerada e Fator de Capacidade

Partindo-se das medições de velocidade do vento no local e da curva de potência do aerogerador, calcula-se, através da Equação 3.8, a energia anual gerada. Com os valores da energia anual gerada obtidos para cada aerogerador, aplica-se a Equação 3.9 do fator de capacidade. O fator de capacidade de um aerogerador é a relação entre a energia elétrica gerada e sua capacidade de produção, que vai determinar qual a melhor escolha de equipamento para o perfil de velocidade medido.

A Tabela 7 mostra os valores calculados de energia anual gerada e o fator de capacidade para cada modelo de aerogerador analisado.

Tabela 7 - Energia anual gerada e fator de capacidade para cada modelo de aerogerador analisado.

Modelo	EAG [kWh]	FC [%]
ELV-H2.7	2.984,6	68,1
ELV-H3.1	4.111,0	46,9
HummerH3.1	4.162,6	47,5
Ecosolar Aero 100	6.129,8	69,9
Razec 266*	2.435,6	18,5
ELV-H3.8	7.974,8	45,5
ELV-H4.6	97.54,3	37,1
ELV-H6.4	15.676,6	35,8
ELV-H8.0	31.716,1	36,2
ELV-H13.2	72.443,3	41,3
ELV-H13.2	94.086,5	35,8
ELV-H16.5	169.591,0	38,7
WEG AGW 100	258.147,0	31,0
ELV-H20.8	381.209,0	43,5

*Aerogerador de eixo vertical.
Fonte: Do autor.

As turbinas analisadas com potência iguais ou inferiores a 10 kW utilizam controle de potência por estol, alcançando potências maiores que a nominal, diferente das turbinas com controle de passo que alcançam apenas a potência nominal e se mantém nela com velocidades elevadas. Portanto, a análise e comparação do fator de capacidade entre estas turbinas devem ser feitas com ressalvas.

4.1.9. Escolha do Aerogerador e estimativa de produção

Quanto maior o valor do FC, melhor é o aproveitamento da turbina no regime de ventos estipulado. As turbinas analisadas que apresentam os maiores fatores de capacidade são os modelos Ecosolar Aero 100 e ELV-H2.7. Porém, levando-se em consideração o consumo interno de energia elétrica no Campus, seria inviável a instalação de algum desses modelos, pois necessitaria de uma grande quantidade de turbinas para suprir uma parcela considerável do consumo. Sendo assim, desconsideram-se modelos de potência inferiores a 10 kW e os modelos restantes estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Energia anual gerada e fator de capacidade para modelo de aerogeradores com potência maior que 10KW.

Modelo	EAG [kWh]	FC [%]
ELV-H8.0	31.716,1	36,2
ELV-H13.2	72.443,3	41,3
ELV-H13.2	94.086,5	35,8
ELV-H16.5	169.591,0	38,7
WEG AGW 100	258.147,0	31,0
ELV-H20.8	381.209,0	43,5

Fonte: Do autor.

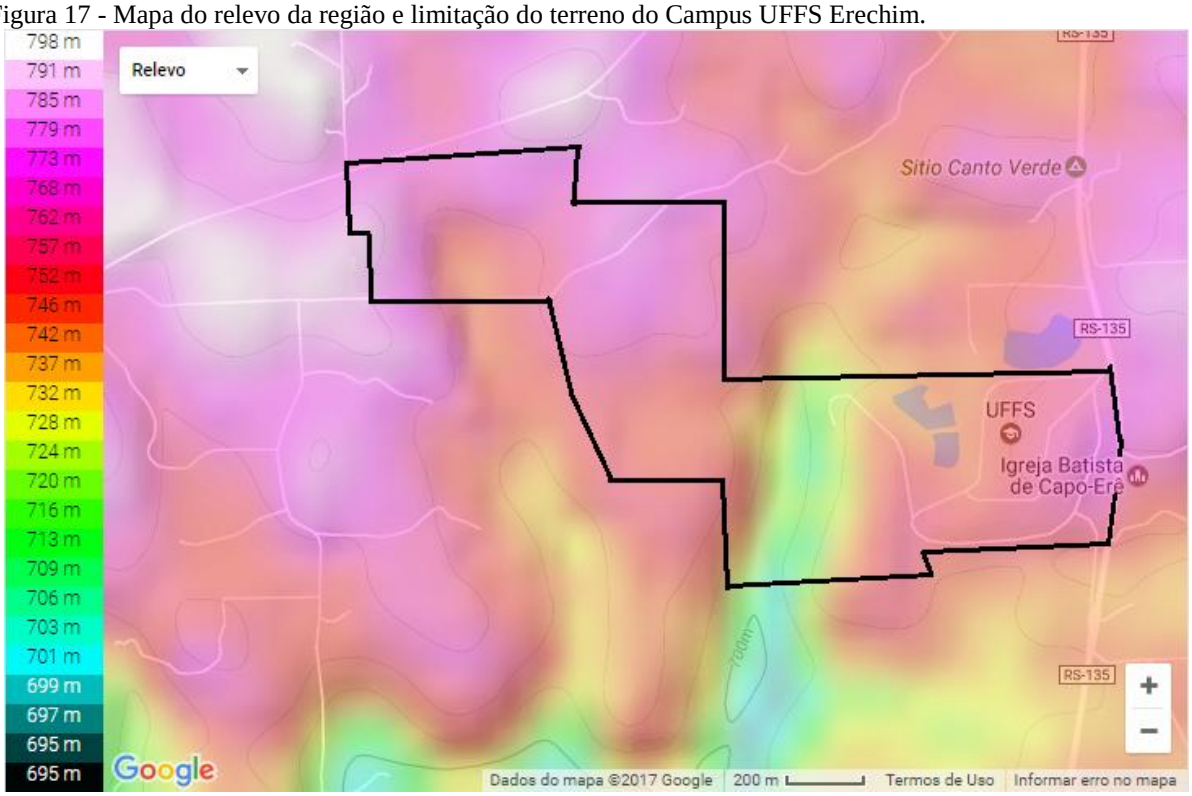
Analisando-se somente as turbinas com potências consideráveis, pode-se observar que o modelo com maior fator de capacidade (43,5%) é o ELV-H20.8 de 100 kW, com uma estimativa de geração de energia elétrica anual de mais de 380 mil kWh.

Considerando que o consumo anual no Campus da UFFS Erechim fica em torno de 630 mil kWh, é indicada a utilização de duas torres eólicas do modelo escolhido. Assim, a estimativa de geração anual de energia é superior a 760 mil kWh, gerando um superávit energético de cerca de 134 mil kWh. Como a instalação seria de modo *ongrid*, esse excedente pode ser vendido para a concessionária de energia, gerando lucros para a Universidade.

4.1.10. Posicionamento dos aerogeradores

A Figura24mostra o mapa de relevo e limitação do terreno do campus UFFS Erechim.

Figura 17 - Mapa do relevo da região e limitação do terreno do Campus UFFS Erechim.

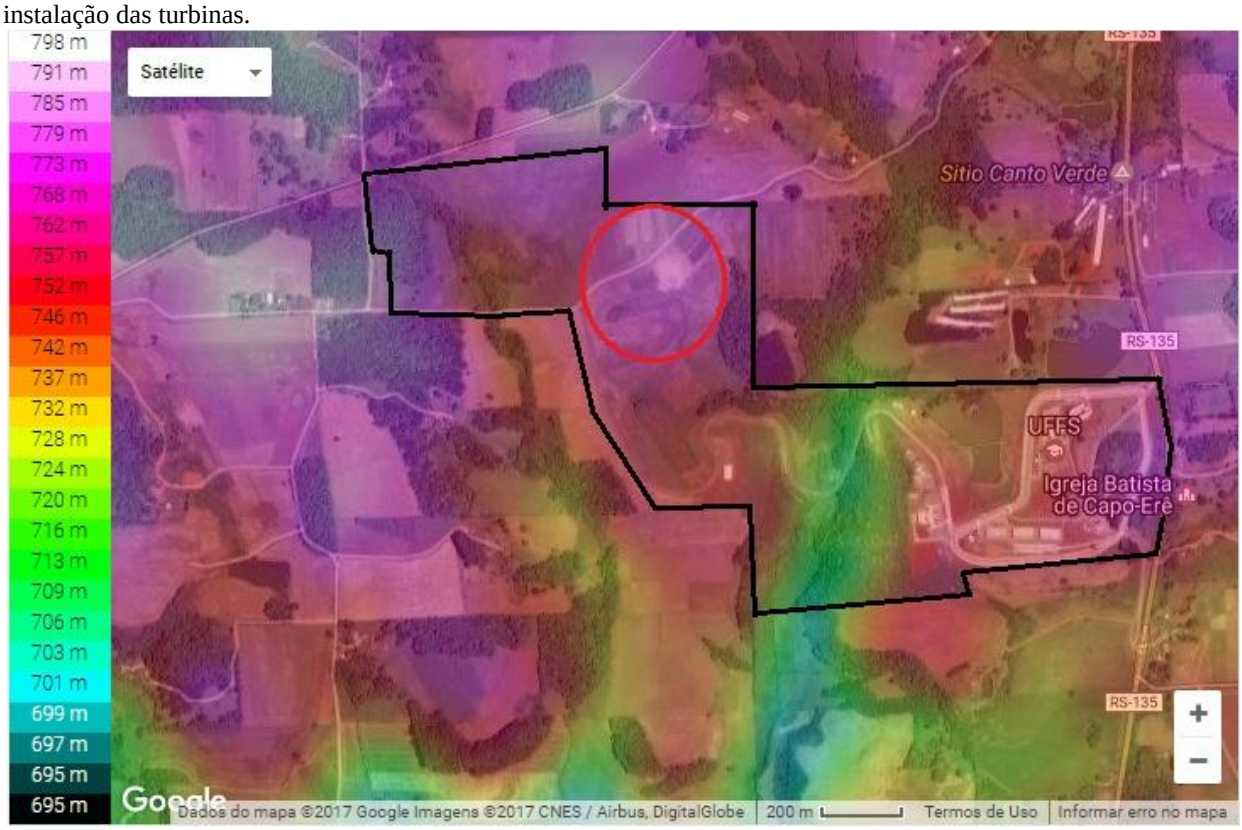


Fonte: Topographic-map.com. Editado pelo autor.

Analisando-se o mapa de relevo e as condições do terreno e vegetações na propriedade da UFFS, chega-se a conclusão de que o melhor local para instalação dos aerogeradores é na área indicada na Figura 25.

A Figura 25 indica a melhor região dentro dos limites do Campus para a instalação dos aerogeradores.

Figura 18 - Mapa do relevo da região com limitação do terreno do Campus UFFS Erechim e local indicado para instalação das turbinas.



Fonte: Topographic-map. Editado pelo autor.

O local é privilegiado por conta de sua maior altitude comparado ao restante do terreno disponível. Outros fatores observados na escolha do local são a inexistência de vegetação alta ou outros obstáculos que causam interferências na circulação do vento, e a distância em relação aos blocos da universidade, evitando a percepção de ruídos provenientes das turbinas.

Quando o escoamento atravessa as pás da turbina eólica, parte de sua energia cinética é extraída causando um efeito conhecido por esteira, este efeito resulta em uma região turbulenta e com a presença de vórtices. Como a direção predominante do vento é leste-sudeste, a esteira da turbina não atingirá os blocos na maior parte do tempo.

Figura 19 - Efeito de esteira em um parque eólico *offshore* na Dinamarca.

Fonte: Caldas, 2010.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual cenário econômico mundial, devido aos avanços tecnológicos no decorrer dos anos, requer que a oferta de energia disponível acompanhe este desenvolvimento. Sendo, principalmente, a dependência de energia oriunda de combustíveis fósseis cada vez mais questionada, por ser uma fonte considerada não renovável e aos grandes impactos ambientais proveniente do uso deste meio energético, buscam-se novos meios de geração ambientalmente corretos.

Diante dessa necessidade, a energia eólica é uma realidade na matriz energética mundial, e a tendência é que cada vez mais este tipo de geração de energia venha a se consolidar como uma das principais alternativas para a continuidade do desenvolvimento.

Analisando os países europeus em que hoje esta fonte já tem uma participação considerável na matriz energética, as dificuldades na disponibilidade das fontes tradicionais os levaram ao desenvolvimento prematuro das fontes energéticas alternativas.

O Brasil tem a sua matriz energética em sua grande maioria proveniente das Usinas Hidrelétricas, considerada uma fonte de energia limpa, renovável e de baixo custo, porém, os impactos causados pelas enormes áreas alagadas vêm requerendo políticas públicas dos governantes de incentivo a fontes de energias mais limpas. É claro que levando em consideração a condição geográfica e hidrológica do Brasil, a geração hidroelétrica não deve ser negligenciada, sendo possível afirmar que esta fonte geradora sempre comporá a matriz como energia primária, especialmente pelos seus custos de produção. No entanto é preciso avançar no sentido de novas fontes para o aproveitamento energético nacional.

A geração eólica no aspecto ambiental, de grande importância nos tempos atuais, é considerada a energia mais limpa. Mesmo que a área necessária para implantação de parques de alta capacidade de geração seja considerável, é possível manter as atividades agropecuárias nas áreas destes parques geradores.

Pela analise técnica realizada, é viável a instalação dos aerogeradores nas dependências da UFFS Erechim, sendo que o projeto atenderia a demanda de energia interna do *campus*. Porém, o trabalho apresentado possui diversos limitadores que influenciaram quanto à veracidade do potencial eólico calculado para o local, entre eles a disponibilidade de tempo de pesquisa e conhecimento sobre o tema, sendo indicado o aprofundamento no tema e na coleta de dados, utilizando torres anemométricas no local onde seriam instaladas as turbinas, com medições de velocidade de vento em duas alturas diferentes para a adequada modelagem do perfil vertical do vento, para que os resultados possam contribuir com o desenvolvimento da área estudada.

6. REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002. 156 p.

AMARANTE, O. A.. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001.

BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 10 Jun. 2017.

BRASIL. INMET. Nota Técnica nº 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. **Apresenta as regras de Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 15 Mar. 2017.

CALDAS, D. M. Estudo **do Potencial Eólico e Estimativa de Geração de Energia de um Projeto Eólico na cidade do Rio de Janeiro utilizando o WindPro e o WAsP**. Monografia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000767.pdf>. Acesso em: 28 Mar. 2017.

CAMARGO, O. A. et al. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEMC, 2002.

CARVALHO, P. **Geração eólica. Fortaleza: Imprensa Universitária,** 2003. 146 p.

CRESESB. **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. Ricardo Marques Dutra. 2008. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>. Acesso em: 13 Jun. 2017.

CUSTÓDIO, R.S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. 280 p.

DUTRA, R. **Energia eólica: Princípios e tecnologias**. CRESESB, 2008.

Eletrosul - Centrais Elétricas S.A. Disponível em: <http://www.eletrosul.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/novo-atlas-eolico-coordenado-pela-eletrosul-e-lancado-no-rio-grande-do-sul>. Acesso em: 8 Mai. 2017.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia eólica.**Barueri, SP: Manole, 2011. 285 p.

FARIA, C. **Controladores (Energia Eólica).** Disponível em: < http://www.infoescola.com/tecnologia/controladores-energia-eolica/>. Acesso em: 17 Jun. 2017.

GLOBAL WIND REPORT 2016 | GWEC. Disponível em: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/>. Acesso em: 6 Jun. 2017.

INMET - Estações Automáticas. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTgyOA==>. Acesso em: 2 Jun. 2017.

JERVELL, J. T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Disponível em: < http://paginas.fe.up.pt/~em02090/Documentos/final2.pdf>. Acesso em: 4 Jun. 2017.

LUNELLI, T. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica de instalação de microturbina eólica**. Monografia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

PAC. **Novo Atlas Eólico mede potencial dos ventos do Rio Grande do Sul em terra, nas lagoas e no mar**. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/noticia/04758c38>. Acesso em: 8 Mai. 2017.

MARQUES, F.C.P. et al. **Energia Eólica no Brasil**. Disponível em: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/energia-eolica-no-brasil/>. Acesso em: 8 Mai. 2017.

FAPESP. **Potencial eólico em terra do Brasil pode ser seis vezes maior do que o estimado**. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/potencial_eolico_em_terra_do_brasil_pode_ser_seis_vezes_maior_do_que_o_estimado/24053/>. Acesso em: 8 Mai. 2017.

RONALDO, S.C. **Energia Eólica para a Produção de Energia Elétrica**, Brasil, 2007.

SCHUBERT, C. et al; Eletrosul Centrais Elétricas. **Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2014.

SILVA, R. F. **Emulação de uma turbina eólica e controle vetorial do gerador de indução rotor gaiola de esquilo para um sistema eólico**. Graduado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005198.pdf>. Acesso em: 4 Jun. 2017.

Squitter Equipamentos Profissionais do Brasil. **Sensor de vento modelo S2014**. São Paulo, 2008.

Topographic-map.com. (2017). **Mapa topográfico Relevo.** Disponível em: <http://pt-br.topographic-map.com/places/Relevo-3550473/>. Acesso em: 19 Mai. 2017.

WRPLOT View. Lakes Environmental, 2017. SOFTWARE.