

MANASSES REZENDE SERAFIM

EXPLORAÇÃO DA VIABILIDADE DO POTENCIAL EÓLICO
RODOVIÁRIO

BACHARELADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

DOCTUM – MG

2015

MANASSES REZENDE SERAFIM

EXPLORAÇÃO DA VIABILIDADE DO POTENCIAL EÓLICO
RODOVIÁRIO

Monografia apresentada à banca examinadora do Instituto Tecnológico de Caratinga – ITC(DOCTUM) como exigência parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Msc Reginaldo Eustáquio.

DOCTUM - CARATINGA

2015

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças e saúde para que possa estudar e à minha família, pai, mãe, irmãos, por ter me apoiado durante o meu desafio acadêmico. À instituição pela oportunidade de fazer o curso e, finalmente, aos meus colegas de classe que têm me acompanhado durante esta jornada acadêmica.

RESUMO

Com o objetivo de avaliar as condições de geração de energia elétrica, pretende-se fazer uma avaliação na BR-116, próximo da cidade de Caratinga, para avaliar o potencial eólico gerado pelo trânsito de veículos automotores, para uma possível fonte de geração eólica rodoviária. A geração de energia eólica é mais aproveitada no Brasil em áreas de encostas marítimas, onde os ventos são mais fortes por causa da diferença de temperatura entre a terra e o mar, já que os ventos são formados pelo aquecimento desigual do planeta. A escolha de parques eólicos é baseada nessas propriedades, tendo como propósito da pesquisa áreas que não possuem este tipo de característica para a montagem de um sistema de geração eólica. A energia eólica está entre as modalidades de geração que resultam em menor impacto ambiental. Este projeto tem por finalidade avaliar se este trecho da BR-116, se tratando de geração eólica rodoviária tem capacidade de gerar energia elétrica de forma sustentável sem causar grandes danos ao ambiente.

Palavras – chave: Energia eólica, deslocamento eólico, veículos

ABSTRACT

In order to assess the conditions of electricity generation, we intend to make an assessment on the BR-116, near the city of Caratinga, to assess the wind potential generated by the traffic of motor vehicles, for a possible source of road wind generation. Wind power generation is taken advantage of in Brazil in areas of sea slopes, where the winds are stronger because of the temperature difference between land and sea, as the winds are formed by the uneven heating of the planet. The choice of wind farms is based on these properties, with the purpose of research in areas that do not have this type of feature for mounting a wind generation system. Wind power is among the forms of generation resulting in lower environmental impact. This project aims to assess whether this stretch of the BR-116 to evaluate whether the road wind power has the capacity to generate electricity in a sustainable manner without causing major damage to the environment.

Keywords: Wind energy, wind shift, vehicles

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Escoamento do ar em alta velocidade	23
Figura 2: Gradiente da velocidade do vento.....	24
Figura 3: Representação da influência da placa.....	24
Figura 4: Representação Camada Limite.....	25
Figura 5: Camada limite laminara e turbulenta.....	25
Figura 6: Anemômetro de Robinson.....	26
Figura 7. Medições da biruta.....	30
Figura 8. Anemômetro digital.....	30
Figura 9: Mapa do perímetro urbano de Caratinga.....	31
Figura 10: Biruta caseira.....	37

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Gráfico e Tabela 1: Potência no vento, por metro quadrado de seção.....20
transversal, a 15°C e 1 atm.

Tabela 2: Resultado do teste de medição do vento no ponto 1 de 80 Km/h...33

Gráfico 2: Linha de tendência da análise do ponto 1 da via de 80 Km/h.....33

Tabela 3: Resultado do teste de medição do vento no ponto 2 de 80 Km/h...34

Gráfico 3: Linha de tendência da análise do ponto 2 da via de 80 Km/h.....34

Tabela 4: Resultado do teste de medição do vento no ponto 1 de 50 Km/h...35

Gráfico 4: Linha de tendência da análise do ponto 1 do via de 50 Km/h.....35

Tabela 5: Resultado do teste de medição do vento no ponto 2 de 50 Km/h...36

Gráfico 5: Linha de tendência da análise do ponto 2 da via de 50 Km/h.....36

LISTA DE SÍMBOLOS

μ - Viscosidade dinâmica do fluido

A - Área de seção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento (m²)

C - Coeficiente de adequação ou coeficiente de arrasto

CL – Camada Limite

D – Dimensão de referência do objeto de estudo

DER/MG – Departamento de Estradas e Rodagens – Minas Gerais

DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

Ec - Energia cinética do vento (joules/s)

F - Forção de fluidodinâmica na direção desejada (Força de arrasto)

m - massa do corpo

n - número de mols

P - Potência disponível do vento (W)

p - Pressão

P/A - Densidade de potência (W/m²)

Pa - Pressão atmosférica

R - Constante universal dos gases perfeitos. (Rar = 287 J/Kg*K)

Re – Numero de Reynolds

T - temperatura

V - Velocidade do vento (m/s)

V - Volume

v0 - Velocidade de referência inicial

x - longitude característica do fluxo

ρ - Massa específica do ar (Kg/m³)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Energia Cinética.....	19
Equação 2 – Potencia pela derivada da energia cinética.....	19
Equação 3 – Capacidade de geração de potência de um gerador.....	19
Equação 4 – Potencia por área das pás do gerador.....	19
Equação 5 – Equação de Clapeyron ou Equação de um gás ideal.....	21
Equação 6 – Massa específica do ar.....	21
Equação 7 – Força.....	22
Equação 8 – Força, com efeito da ação do arrasto.....	22
Equação 9 – Equação de Reynolds, pela longitude característica do fluido...25	
Equação 10 – Equação de Reynolds, pela dimensão de referência do corpo26	
Equação 11 – Quadrado da velocidade do vento.....	26
Equação 12 – Energia cinética.....	27
Equação 13 – Potencia pela derivada da energia cinética.....	27
Equação 14 – Capacidade de geração de potência de um gerador.....	27
Equação 15 – Potencia por área das pás do gerador.....	27

Sumário

1-INTRODUÇÃO	11
2-CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS.....	14
3-REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1-Energia Eólica.....	19
3.2-Fluidodinâmica e Condição de aplicação.....	22
3.3-Vento.....	28
3.4-Pressão.....	28
3.5-Temperatura	29
3.6-Direção dos ventos	29
3.7-Medição da velocidade dos ventos	30
4-METODOLOGIA.....	31
4.1-Análise do Ambiente	31
4.2-Descrição do método de avaliação	32
4.3-Resultados obtidos.....	32
4.4-Massa específica por área	37
4.5-Potencia por área.....	38
4.6-Análise do experimento.....	39
5-Considerações finais	41
5.1-Conclusão	41
5.2-Trabalhos futuros	42
6-Referencias	43

1-INTRODUÇÃO

O projeto tem como propósito avaliar se o deslocamento de ar causado por veículos automotores tem condições de produção de energia eólica de baixo impacto ambiental, tendo tráfego rodoviário capaz de apresentar potencial eólico favorável para a produção de energia elétrica.

Com o projeto respondendo de forma positiva, haverá uma resposta satisfatória para a produção de energia eólica em cidades cujas características geográficas não atendem às condições para a produção de energia elétrica, dependendo unicamente da natureza, mas, que poderá ter um tráfego rodoviário que produzirá ventos suficientes para a implantação de geradores elétricos.

Com o propósito de avaliar se o potencial eólico rodoviário produzido por veículos automotores pode ser utilizado como uma fonte de geração elétrica será usado como referência para a pesquisa, a rodovia da BR-116, no perímetro urbano de Caratinga.

O objetivo do projeto é avaliar o potencial eólico rodoviário para possível geração de energia elétrica e avaliar o parecer para o desenvolvimento da geração eólica em locais com baixo potencial eólico natural, além de buscar meios alternativos para a produção da energia. Com isso o projeto busca através de veículos automotores a possibilidade de produção de energia elétrica.

Como avaliar o potencial eólico rodoviário para ver o desempenho e reação dos ventos na finalidade de obter condições de produção de energia elétrica?

Com o potencial eólico rodoviário, possibilitará a produção de energia elétrica através dos ventos, dependendo de outros fatores que não sejam dependente unicamente da natureza.

Para concluirmos o trabalho, é necessário fazer a leitura das condições de local e avaliar o potencial eólico do local. Será feito a revisão bibliográfica da pesquisa, observando na pesquisa o fluxo dos ventos, velocidade dos ventos, deslocamento do ar, fluxo do trânsito e a capacidade de geração. Com os dados recolhidos será avaliada as condições e chegaremos a um resultado de viabilidade do potencial eólico rodoviário.

O desenvolvimento do projeto se firma na característica do deslocamento causado no movimento de um corpo pelo fluido estudado em mecânica dos fluidos, onde a fluidodinâmica tem como objetivo estudar a interação existente entre um fluido e um corpo nele imerso, quando entre os dois existe movimento relativo¹, ou seja, o corpo ou o fluido, ou ambos, estão em movimento.

Fluidodinâmica também se aplica no objetivo de pesquisa, pois o ar se caracteriza como fluido, então o comportamento dele pode ser estudado por este campo da Física, realizando as mesmas aplicações matemáticas e reações dadas pela física da fluidodinâmica.

Este projeto apresentará estudos avaliando o deslocamento de ventos causados por veículos automotores, e apresentará de acordo com o mesmo, a capacidade de geração elétrica.

Para efetuar a construção do projeto foi pesquisado livros e trabalhos acadêmicos que se identifiquem com as necessidades do projeto. Avaliado antecipadamente como a energia eólica é gerada, características dos ventos para a geração, avaliação a respeito do comportamento dos ventos, livros relacionados de mecânicas de fluidos para avaliação da atividade e comportamento do ar em relação ao movimento de corpos, estudos sobre aerodinâmica veicular caracterizada e a características do vento quando submetido ao movimento do carro.

Firmando a teoria será feito experimento no local em que a pesquisa terá como base, utilizando anemômetros, equipamentos que são usados para medir a velocidade do vento, para que assim chegar a conclusão do projeto.

Cumprindo os requisitos citados acima, será comparada com as condições apresentadas na hipótese do potencial eólico rodoviário no uso de geração de energia e para avaliar se as condições da proposta apresentada estão de acordo. Com as observações do experimento e a tese criada a partir da hipótese, será feito a avaliação para obter-se a confirmação das respostas encontradas.

Durante todo o processo de revisão bibliográfica será feito a maior proximidade do métodos de geração de energia eólica indicado pelo marco teórico

¹BRUNETTI, Franco; Mecânica dos Fluidos;– 2. ed. rev. – São Paulo – Pearson Prentice Hall. 2008 pag. 223.

Milton Pinto em seu livro Fundamentos de Energia Eólica, para a avaliação dos valores encontrados pela pesquisa.

Após reunir os dados será avaliada a melhor forma para se obter a conclusão do projeto e a melhor área de potencial eólico disponível para a geração de energia, tendo como base as necessidades para os geradores atuais.

Com os testes em campo poderá ser avaliada adequadamente as condições reais apresentadas, apresentando assim um dado real da situação no local do experimento, tendo como o objetivo do projeto o deslocamento de ar causado pelos mesmos e área de melhor potencial eólico será a base da pauta de interesse do projeto.

Para o comprimento de tais metas a escrita da monografia se dividirá em 5 capítulos. O primeiro capítulo será representado pela introdução do projeto. O segundo apresentará a justificativa para abordar o tema.

No terceiro capítulo abordaremos as características da energia eólica juntamente com o que solicita para apresentar resultados plausíveis, além dos conceitos fundamentais para que o projeto venha acontecer.

Com a apresentação do capítulo anterior, direcionará o quarto capítulo a apresentar a pesquisa, tendo como tema principal o potencial eólico, apresentando as observações encontradas, os dados da pesquisa entre avaliações e parâmetros, demonstrando objetivamente os gráficos encontrados para a elaboração do mesmo com os resultados obtidos em geral.

E, por fim, no quinto capítulo, apresenta-se a conclusão do trabalho junto com as observações encontradas, tratando especificamente da avaliação final obtida para a pesquisa e sugestões para os próximos trabalhos acadêmicos.

2-CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS

O potencial eólico foi colocado como palavra-chave por ser o principal objetivo da pesquisa. A geração de energia eólica como estamos acostumados a ver são produzidas por fenômenos da natureza, por isso a pesquisa está sendo direcionada para avaliar uma produção alternativa de gerar energia eólica.

A outra palavra que se destaca no projeto é o deslocamento de ar por ser o combustível que irá produzir energia eólica. Sem o deslocamento de ar realizado pelo que chamamos vento, não é possível a geração de energia eólica. E por último, veículos por se tratar de nossa fonte de combustível. Será o objetivo da pesquisa, medir o deslocamento de ar feito por veículos e calcular o potencial eólico gerado pelos mesmos.

Pretende-se observar se veículos automotores podem gerar ventos para produção de energia, podendo assim aproveitar de um recurso praticamente desperdiçado e de fácil acesso.

De acordo com a lei de Newton “*se um corpo A exerce força sobre o corpo B, o corpo B reage sobre o corpo A com uma força de mesmo módulo, mesma direção e de sentido contrário*”². Essa lei é aplicada quando um veículo automotor passa pelo ar em velocidades elevadas causando o deslocamento de ar, que será o objetivo do projeto, avaliar a reação de ar em movimento quando as rodovias se encontram com tráfego de veículos.

Buscar novas formas de produção de energia sustentável e com pouco impacto ambiental é o principal objetivo do mundo. A preocupação da atualidade são as formas de produção de energia, que causam impactos ambientais que estão afetando o planeta. Com isso, a produção de energia com impactos ambientais baixos está sendo cogitada, como comentado pelo marco teórico do projeto:

As fontes de energia convencionais como o óleo, o gás natural, o carvão ou a energia nuclear são finitas e poluem o planeta. Ao mesmo tempo, há uma forte oposição popular contra o fortalecimento da energia

²CLEBSCH, Angelisa Benetti, **Propulsão Mecânica**. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/mpenf/mef004/20021/Angelisa/mecanica.html>>. Acesso em: 17 de maio de 2015

nuclear em muitas partes do mundo. Assim, devido à atenção com as questões do meio ambiente e o esgotamento dos combustíveis fósseis, foi demandada uma busca para mais fontes de energia. Nesse cenário, surgem as energias renováveis, que são limpas e abundantes e que terão que contribuir cada vez mais para a já crescente necessidade de energia no futuro. A não emissão de alguns poluentes na atmosfera terrestre por parte da geração renovável representa uma vantagem significativa comparada às usinas fósseis. Entre as fontes renováveis, a eólica ganhou certo destaque mundial, principalmente pela boa experiência ocorrida em países como Dinamarca e Alemanha.³

Para a produção de energia eólica de forma a depender da natureza, é necessário levar em consideração o terreno em que serão implantadas as turbinas geradoras de energia, pois o relevo pode alterar as condições do vento, de forma positiva ou de forma negativa.

No caso eólico, o relevo exerce distintas influências conforme o caso e a região: como obstáculo ao movimento da camada atmosférica inferior, como indutor de fenômenos de mesoescala (brisas montanha-vale) e como gerador de ondas e acelerações orográficas. Como a camada inferior da atmosfera tem espessura da ordem de 600m a 1.500m, áreas territoriais elevadas geralmente estão imersas em distintas camadas atmosféricas e regimes de vento.⁴

Caratinga por ser uma cidade de grande relevo, tem o seu potencial eólico limitado, impedindo de se ter um parque eólico natural. No Brasil, as áreas com maior potencial eólico geográfico são as litorâneas, onde recebem os ventos que vêm dos oceanos, porque a pressão que se encontra entre o mar e a terra, nas áreas marítimas, são alteradas com mais frequência à diferença de potencial na área, assim, mudando de noite quando a terra é mais fria que o mar o vento sopra para o mar e, de dia quando o mar é mais frio do que a terra o vento sopra para o mar, a direção dos ventos causando um maior movimento do vento⁵.

A região brasileira tem uma extensa região litorânea com grande capacidade de produção.

³ PINTO; Milton. *Fundamentos da Energia Eólica*, Rio de Janeiro, LTC, 2013, p. 3

⁴ AMARANTE. Odilon A. Camargo do. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*; Brasília, 2001; p. 10

⁵ Mundo Estranho, Por que os ventos sopram da terra para o mar durante o dia e, à noite, do mar para a terra?; Disponível em : <<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/por-que-os-ventos-sopram-da-terra-para-o-mar-durante-o-dia-e-a-noite-do-mar-para-a-terra>>; Acessado em: 21 de maio de 2015.

O Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que dá maior previsibilidade ao volume a ser produzido. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas. Sua operação permitiria, portanto, a “estocagem” da energia elétrica. Finalmente, estimativas constantes do Atlas do Potencial Eólico de 2001 (último estudo realizado a respeito) apontam para um potencial de geração de energia eólica de 143 mil MW no Brasil, volume superior à potência instalada total no país, de 105 mil MW em novembro de 2008.⁶

Apesar de sua vasta área para a produção de energia eólica, a geração ainda tem os seus problemas na hora de produção de energia. Apesar do vento ser abundante, não se tem controle sobre ele e não se pode garantir que os geradores estarão produzindo sempre que for necessário, pois o vento é um forçoso da natureza, do qual não se tem controle.⁷

Com a irregularidade dos ventos, torna-se a produção do mesmo inviável para o uso de geração de energia, fazendo com que a vasta área que o Brasil tem para a produção de energia eólica economicamente não se torne uma das principais fontes de produção de energia do país.

Avaliando o problema da instabilidade do sistema de geração de energia eólica, o projeto tem como objetivo avaliar se a produção de ventos em estradas e rodovias tem condições de geração e produção de energia eólica constante causando maior estabilidade na geração.

A produção de energia eólica através de rodovias está proporcionalmente ligada ao fluxo de trânsito do local. Com um grande fluxo de veículos nas rodovias maior será o potencial de geração eólico do local.

A área para a realização do estudo será o perímetro urbano de Caratinga,

Essas contagens volumétricas possibilitaram averiguar na rodovia BR 116 não apresenta grandes variações de volumes de tráfego, variando

⁶Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica.3. ed. – Brasília : Aneel, 2008. p. 81.

⁷ Energia Eólica; Vantagens e Desvantagens; Disponível em: <<https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/vantagens-e-desvantagens/>>; Acessado em 21 de maio de 2015

sempre entre 3,5 e 6,0 mil veículos/dia, exceto nos trechos urbanos junto às cidades de Governador Valadares e Caratinga, que apresentam fluxo de tráfego da ordem de 13,5 e 8,0 mil veículos diariamente, respectivamente. No caso de Governador Valadares e Caratinga a situação é atípica, pois grande parte da composição do tráfego é motocicletas, cerca de 25% e 10%, respectivamente. A composição do tráfego ao longo do trecho em estudo é predominante de veículos comerciais, exceto nos trechos onde a participação do tráfego urbano possui significância junto aos municípios de Teófilo Otoni, Governador Valadares e Caratinga.⁸

Será avaliado a rodovia que passa pelo perímetro urbano de Caratinga, obtendo assim, a capacidade de produção de energia elétrica através do trânsito que circula pela rodovia. Através desse trânsito de veículos obter a energia eólica, uma vez que se destaca por sua baixa taxa de impacto ambiental.

Avaliar possíveis condições de geração que não causam impacto para o meio ambiente, ao mesmo tempo que é visado de forma a gerar um retorno significativamente viável economicamente, tem sido muito cobijado nos tempos atuais. Gerar energia sem causar impactos ambientais tem sido uma das maiores áreas de pesquisa mundial. Mesmo sistemas de geração de baixa potência que têm menos impacto ambiental, têm crescido nos tempos atuais, onde se tem incentivos de residências gerarem a própria energia.⁹

Com o projeto de pesquisa, usaremos a rodovia da BR 116 para avaliar o potencial eólico e observar o deslocamento de ar, causados pelos veículos que trafegam no local.

Se a viabilidade da rodovia apresentar-se de forma positiva à implantação de um sistema de geração eólico às margens rodoviárias, o desenvolvimento da energia eólica avançará para regiões com potencial eólico baixo como Caratinga, cujo relevo da cidade com características de montanhas torna-se um obstáculo para

⁸ Sistema Rodoviário Federal – Minas Gerais, 3ª Etapa de Concessões Rodoviárias – Fase 1, 2008, p.7

⁹ ECO Brasília; Governo federal articula desoneração tributária para geração de energia solar; Disponível em: < <http://www.ecobrasilia.com.br/2015/05/20/governo-federal-articula-desoneracao-tributaria-para-geracao-de-energia-solar/>>; Acessado em: 21 de maio de 2015.

os ventos. Mesmo dentro de cidades, as construções criam paredes que dificultam a circulação do vento.¹⁰

Com isso, regiões com características semelhantes da cidade de referência, têm pouco potencial eólico disponível para a geração. Com isso o projeto está visando avaliar o potencial eólico rodoviário, para suprir esta necessidade de ventos que possam gerar energia elétrica.

¹⁰ **WATANABE**. Roberto Massaru; **A Ação do Vento nas Edificações**; Disponível em: <<http://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/index.php>>; Acessado em 21 de maio de 2015

3-REFERENCIAL TEÓRICO

3.1-Energia Eólica

O marco teórico desta pesquisa, Milton Pinto, explica no seu trabalho que a energia eólica é gerada através do deslocamento do ar, onde esse deslocamento cria uma energia cinética do vento, onde e dado pela fórmula:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (\text{Equação 1})$$

Com essa expressão, pode-se observar que a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade do vento. Se observarmos a velocidade do vento por certo período de tempo, teremos então a potência do vento. Com isso observamos que a potência P disponível pelo vento é a derivada da energia cinética pelo intervalo de tempo referente (*PINTO; Milton. P. 69*):

$$P = \left(\frac{\partial E_c}{\partial t} \right) = \frac{mv^2}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Para fazermos a medição da potência do vento, m assume a forma ρAv . Dessa forma podemos fazer o cálculo de potência gerada baseada na área que esperamos para gerar energia eólica, como as turbinas de um gerador, que é necessário saber o quanto de potência obterá na área em que as pás entrarão em contato com o vento. Dessa forma, a fórmula fica

$$P = \frac{\rho Av^3}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

Esta fórmula pode ser alterada e assim obter uma análise do fluxo de potência por área:

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho v^3}{2} \quad (\text{Equação 4})$$

P é a potência disponível do vento (W)

m é a massa do corpo

ρ é a massa específica do ar (Kg/m^3)

A é a área de seção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento (m^2)

V é a velocidade do vento (m/s)

E_c é a energia cinética do vento (joules/s)

P/A é a densidade de potência (W/m^2)

Pelas equações apresentadas, pode-se observar que a potência disponível no vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade desse vento. Significa que, basta o vento aumentar em 25% sua velocidade para que a turbina eólica tenha um aumento de praticamente 100% de potência, ou de forma inversa (PINTO; Milton. P. 69).

Velocidade do vento		Potência W/m^2
m/s	mph	
0	0	0
1	2,24	1
2	4,47	5
3	6,71	17
4	8,95	39
5	11,19	77
6	13,42	132
7	15,66	210
8	17,90	314
9	20,13	447
10	22,37	613
11	24,61	815
12	26,84	1058
13	29,08	1346
14	31,32	1681
15	33,56	2067

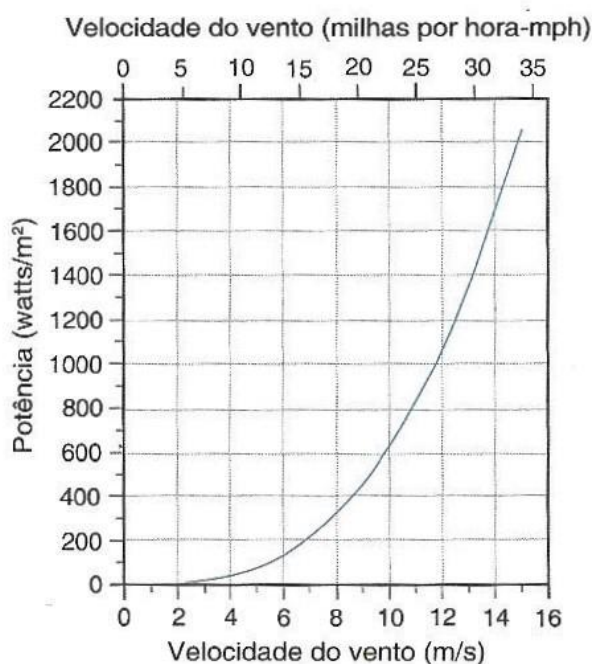


Gráfico e Tabela 1: Potência no vento, por metro quadrado de seção transversal, a 15°C e 1 atm.¹¹

A tabela representa a potência gerada por área, pela velocidade do vento, onde a temperatura é 15° C à 1 atm e o valor da massa específica do ar é igual a 1,225 Kg/m³. Pode-se observar no gráfico e tabela 2 que na aplicação da fórmula 4 encontrou-se a capacidade de geração de energia elétrica, por área da pá de uma turbina, a produção é exponencial, quanto maior for a velocidade do vento, maior será a capacidade de produção de energia por área em que se encontra as hélice da turbina.

¹¹ PINTO; Milton. *Fundamentos da Energia Eólica*, Rio de Janeiro, LTC, 2013 p. 70.

Pois o vento é um fluido e segue a lei dos gases perfeitos dada pela equação de Clayperon.

“A equação desenvolvida por Émile Clapeyron relaciona as três variáveis de estado (pressão, volume e temperatura) com a quantidade de partículas (número de mols) que compõe um gás.

A relação que ficou conhecida como Equação de Clapeyron ou Equação de um gás ideal se dá da seguinte forma:

$$pV = nRT \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- R: constante universal dos gases perfeitos. ($R = 287 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$)
- p: pressão
- V: volume
- T: temperatura
- n: número de mols

O número de mols (n) do gás é dado pela razão entre a massa do gás (m) e sua massa molar (M): $n = m/M$ ¹²

Esta equação mostra que há uma relação direta entre o potencial disponível do vento e a massa específica do ar. Por outro lado, a massa específica do ar depende da temperatura e da pressão atmosférica, de acordo com a seguinte equação:

$$\rho = \frac{P_a}{RT} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde P_a é a pressão atmosférica.

O vento tem uma natureza estocástica, significa que sua velocidade e direção variam de forma aleatória,

“A velocidade do vento varia, e varia em várias escalas: diurna, mensal e anual. Na maioria das vezes a variação de velocidade do vento

¹² FERREIRA, Nathan Augusto. "A Equação de Clapeyron"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://www.brasilecola.com/fisica/a-equacao-clapeyron.htm>>. Acesso em 29 de setembro de 2015.

*chega a 10% entre o seu valor médio anual e a média de longo prazo. A variação anual da velocidade do vento tem comportamento sazonal.*¹³

Entretanto, na construção do projeto, o vento gerado não ocorrerá de forma natural, mas sim do deslocamento do ar causado pelo movimento dos veículos.

3.2-Fluidodinâmica e Condição de aplicação

“De acordo com a segunda lei de Newton, a força líquida que atua nas partícula fluida que estamos considerando precisa ser igual ao produto de sua massa pela a aceleração.”¹⁴

$$F = m \cdot a \quad (\text{Equação 7})$$

Esta é à formula para calcular a força que um objeto exerce quando em movimento. Entretanto, quando um corpo atravessa o ar, este exerce uma força de resistência ao objeto, Esta força é denominada *força de arraste*, que tende a reduzir a velocidade do objeto.¹⁵ Então, para calcular a força que os veículos tendem quando atravessam, a fórmula se torna (*Brunetti, Franco, pag. 228*):

$$F = C \frac{\rho v_0^2 A}{2} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

F é a forção de fluidodinâmica na direção desejada (Força de arrasto)

A é a área de referência

C é o coeficiente de adequação ou coeficiente de arrasto

v_0 é velocidade de referência inicial

ρ é a massa específica do ar

A resistência do ar exerce força oposta ao movimento de um objeto que atravessa o ar, ou seja, é a força de restrição de movimento de um corpo.

¹³ PINTO; Milton. *Fundamentos da Energia Eólica*, Rio de Janeiro, LTC, 2013 p. 72

¹⁴ Fundamento da Mecânica dos Fluidos; Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi; tradução da quarta edição americana: Euryale de Jesus Zerbini.- São Paulo: Edgard Blücher, 2004

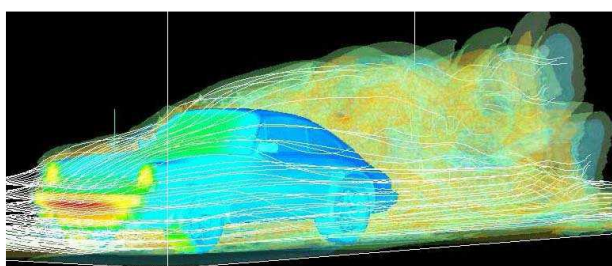
¹⁵ Domiciano Marques; Brasil Escola; FORÇAS DE ARRASTE; Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/forcas-arraste.htm>>; Acessado em 21 de maio de 2015

Para evitar esta força de restrição os veículos são construídos de forma que diminua a força de arrastamento. A aerodinâmica dos carros está relacionada diretamente com a velocidade, ao seu consumo, ventilação, entre outros, tendo assim o desejo de reduzir o coeficiente de arrasto dos veículos.

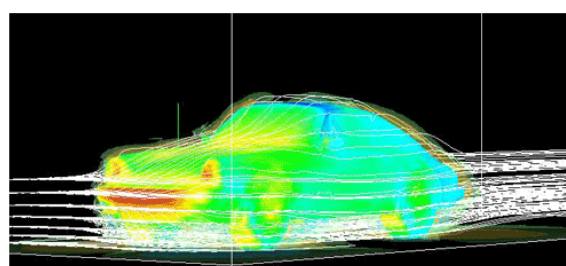
“Todos os objetos podem ter seu coeficiente de arrasto calculado, e seguindo esse coeficiente temos que o item com pior coeficiente é uma placa plana em pé, com o coeficiente igual a 2, e o com melhor é uma gota de água, igual a 0,05.”¹⁶

Como a aerodinâmica dos veículos auxilia para que o coeficiente de arrastamento seja menor, cada fabricante tende a diminuir o coeficiente de arrasto do seu modelo veicular, aumentando assim a disponibilidade de maior aceleração. A aerodinâmica dos veículos nos ajudará a identificar em qual direção é deslocado o ar.

Observando o comportamento do vento em relação a quando os veículos estão em movimento, percebemos que o carro da figura 1 (a) está a causar grande deslocamento do ar em alta velocidade. Observando também o comportamento do ar na figura 1 (a) é possível contemplar a atitude do vento no resultado do comportamento de um carro quando está em alta velocidade nas rodovias, este deslocamento causado por veículos que será avaliado no intuito de gerar energia eólica. Em contrapartida, na figura 1 (b) não é possível ver grandes efeitos do deslocamento de ar que é feito pelo veículo.



(a) alta velocidade.



(b) baixa velocidade.

Figura 1: Escoamento do ar (a) em alta velocidade, (b) baixa velocidade¹⁷

¹⁶SOUSA. Bruno Silva de; **Análise da aerodinâmica de carros populares**; Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas; Nº. 03 – Ano II – 05/2013

¹⁷ Eduardo Rufato; VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM TÚNEL DE VENTO; Figura representação do Escoamento do ar em alta velocidade obtida para simulação do porsche obtida no Clef3d.; Porto Alegre, Dezembro de 2007.

Esta turbulência depende da aerodinâmica dos veículos, variando de acordo com o formato do veículo. Comportando-se de maneira diferente para cada formato de veículo, não será tratado especificamente os modelos, apenas abordado o comportamento das turbulências das formas mais simples de corpos no deslocamento num Fluido.

Em uma placa plana posta paralelamente com o escoamento do fluido, quando percorre a placa a sua velocidade é crescente até o ponto que seja a mesma velocidade de origem. Observe a figura 2:

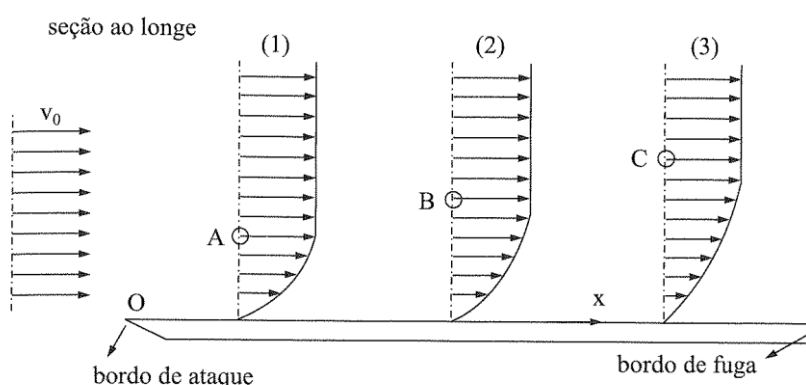


Figura 2: Gradiente da velocidade do vento¹⁸

Como mostrado na figura 2, a velocidade é crescente na gradiente 1 até o ponto A, depois assume a velocidade v_0 , seguindo o mesmo para 2 e 3, sofrendo uma influência da placa plana (Brunetti, Franco. p.165). Se for avaliado por diversas gradientes de velocidade, este crescimento geométrico é mostrado pela figura 3:

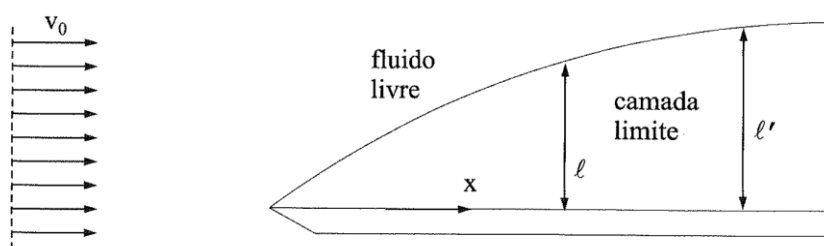


Figura 3: Representação da influência da placa.¹⁹

De acordo com a figura 3 podemos separar o fluido em dois, uma que não sofre influência da placa “fluido livre” e aquela que sofre a ação da placa “camada

¹⁸ BRUNETTI; Franco. Mecânica dos Fluidos– 2. ed. rev. – São Paulo – Pearson Prentice Hall. 2008 p. 165.

¹⁹ BRUNETTI; Franco. Mecânica dos Fluidos– 2. ed. rev. – São Paulo – Pearson Prentice Hall. 2008 p. 165

limite”. Dentro da camada limite é dividido em dois “CL laminar” e “CL turbulenta” (Brunetti, Franco. p.165), esta será encontrado com a forma do número de Reynolds que verificou do movimento do fluido é laminar ou turbulento depende do valor do número adimensional encontrado por (Brunetti, Franco. p. 69):

$$Re_x = \frac{\rho v_0 x}{\mu} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido, x é longitude característica do fluxo.

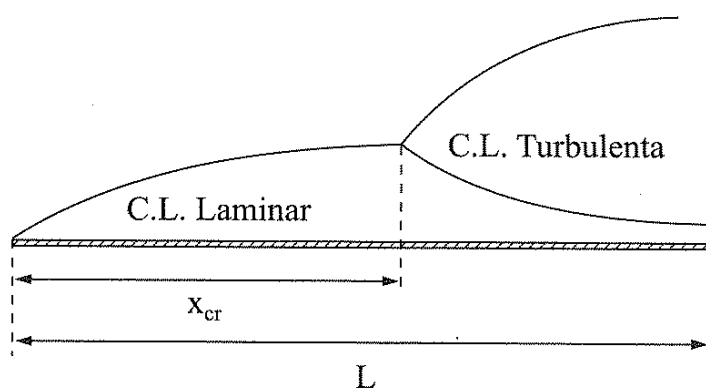


Figura 4: Representação Camada Limite²⁰

Quando C.L. Laminar o comprimento L tende ser menor que x_{cr} , caso contrário tende a ser C.L. Turbulenta.

Em um objeto cilíndrico, a área que entra em contato com o fluido há uma força de compressão, enquanto na área oposta há uma sucção (Brunetti. Franco. pag 233). Na figura 5 é possível observar a Camada Limite laminar e turbulenta, esta região de redemoinhos é chamada de esteira de deslocamento.

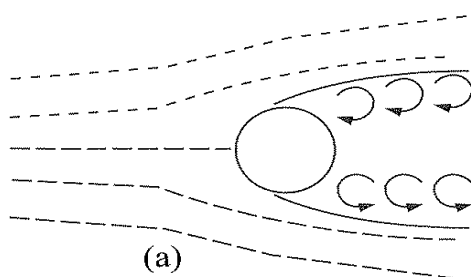


Figura 5: Camada limite laminar e turbulenta

²⁰ BRUNETTI; Franco. Mecânica dos Fluidos– 2. ed. rev. – São Paulo – Pearson Prentice Hall. 2008 p. 230.

A forma do número de Reynolds pode ser obtida através de:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde D é a dimensão de referência do objeto de estudo. É considerado camada limite turbulenta valores do número de Reynolds acima de 2400.

Foi citado acima os formas do deslocamento de fluidos na camada laminar turbulenta. Está turbulência pode ser vista na figura 1 na demonstração de um veículo que circulam em alta velocidade.

O objetivo do trabalho é avaliar o deslocamento de ar que acontece na camada laminar turbulenta de veículos em alta velocidade. A geração desta camada laminar turbulenta é de grande deslocamento de ar. Observa-se se esta turbulência ou deslocamento de ar tem condições de geração.

A velocidade do vento é medida por um instrumento chamado anemômetro. O anemômetro de Robinson é um anemômetro do tipo rotacional, basicamente um mecanismo de arrasto. A fórmula do coeficiente de arrasto pode ser aplicada no mesmo para encontrar a força do vento gerado. Aplicado de maneira inversa à fórmula de arrasto poderá ser encontrado a força do vento no local desejado.



Figura 6: Anemômetro de Robinson.²¹

O Anemômetro de Robinson possui seu próprio coeficiente de arrasto, assim pode-se calcular a Força de arrasto que se encontra no local da medição. Através disso será possível encontrar a velocidade do vento:

$$v^2 = \frac{2F}{CA\rho} \quad (\text{Equação 11})$$

²¹ Anemômetro de Robson: Foi inventado por John Thomas Romney em 1846 e aperfeiçoado por J. Patterson em 1926. Fonte: Milton Pinto, p. 141.

Na geração de energia eólica, tem como base fazer com que a energia cinética do vento movimente as turbinas de energia eólica (Milton Pinto, pag. 69).

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

A potência conseguida pelos geradores está diretamente relacionada com o deslocamento de ar, *a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade do vento. [...] Logo, a potência P disponível pelo vento é simplesmente a derivada da energia cinética para aquele intervalo de tempo:* (Milton Pinto, pag.69),

$$P = \left(\frac{\partial E_c}{\partial t}\right) = (mv^2)/2 \quad (\text{Equação 13})$$

Substituindo m por ρAv , temos o fluxo de potência eólico, também informa que *a potência do vento é proporcional à área varrida pelo rotor da turbina eólica* (Milton Pinto, pag. 70)

$$P = (\rho Av^3)/2 \quad (\text{Equação 14})$$

Modificando, temos a quantidade de energia por uma dada área, que é apenas a densidade de potência P que o vento disponibiliza em uma dada área A (Milton Pinto, pag.69):

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho v^3}{2} \quad (\text{Equação 15})$$

P é a potência disponível do vento (W)

M é o Fluxo de massa de ar (Kg/s)

ρ é a massa específica do ar (Kg/m³)

A é a área de seção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento

v é a velocidade do vento (m/s)

E_c é a energia cinética do vento (joules/s)

P/A é a densidade de potência (W/m²)

Através dos cálculos encontrados acima é possível identificar a potência gerada por área e assim avaliar o potencial eólico por área específica.

Recentemente, no ano de 2013, foi montado na Itália um teste de produção de energia eólica rodoviária:

“O investimento inicial é de 250 mil euros e mais 400 mil serão financiados se o experimentos tiverem bons resultados. Por enquanto, os resultados são encorajadores: o protótipo já produziu 3 megawatts-hora por um ano, mais ou menos o consumo de eletricidade de uma família de quatro pessoas morando em um apartamento de 80 m².”²²

O potencial eólico rodoviário já está sendo pesquisado em outros países, o Brasil pode utilizar desse recurso para melhorar a sua produção de energia elétrica. Explorar a viabilidade deste recurso aumentará muito o abastecimento elétrico do país.

3.3-Vento

Vento é ar em movimento. Simplesmente é o deslocamento de ar de um local para o outro. De acordo com o Dicionário Aurélio:

s.m. Ar em movimento, que se desloca de uma zona de altas pressões para uma zona de baixas pressões. Ar mecanicamente agitado: fazer vento com o leque. Atmosfera, ar. Fig. Influência malévola, ou benévola; fado, sorte: o vento da fortuna. Ir de vento em popa, navegar com vento favorável, e, figuradamente, ser favorecido pelas circunstâncias; prosperar.²³

3.4-Pressão

Definido como pressão atmosférica, a pressão que o ar da atmosfera exerce sobre o planeta, esta varia de acordo com a altitude do local de referência, *quanto maior a altitude menor a pressão e, conseqüentemente, quanto menor a altitude maior a pressão exercida pelo ar na superfície terrestre.*²⁴

²² Elisa Barberis, Folha de São Paulo, *Deslocamento de ar provocado por caminhões vira energia*, 22/06/2013; Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2013/06/1299402-deslocamento-de-ar-provocado-por-caminhoes-vira-energia.shtml>>; Acessado em 11/06/2015.

²³ DICIO. Dicionário Aurélio. *Significado de vento*. Disponível em: <<http://www.dicio.com.br/vento/>>. Acessado em: 19/11/2015.

²⁴ TOFFOLI; Leopoldo. Info Brasil. *Pressão Atmosférica*. Disponível em <<http://www.infoescola.com/fisica/pressao-atmosferica/>>. Acessado em: 19/11/2015

A cidade de teste, Caratinga, está situada a uma altitude de 578 metros²⁵ acima do nível do mar. A pressão atmosférica é menor que a do nível do mar, portanto os valores de potência serão diferentes dos apresentados no gráfico 1 (p. 14).

3.5-Temperatura

É a grandeza que avalia o estado térmico. A temperatura ambiente sofre alterações. Para o projeto é necessário a avaliação da temperatura ambiente no momento em questão.

3.6-Direção dos ventos

Os ventos, como já referido anteriormente, tem natureza estocástica e sua velocidade é uma variável aleatória contínua. Conhecer a direção do vento é essencial na elaboração do projeto de um parque eólico. E de modo igual, será de grande importância descobrir a direção em que o vento causado pelo deslocamento de veículos em movimento está.

Sendo assim, para que possa ser cumprido este requisito, estará sendo usado para o projeto uma *biruta caseira*. A biruta é um equipamento que serve para indicar o sentido de deslocamento do vento. Ela é feita em forma de cone, aberta em ambas as pontas com material maleável, onde a maior é colocado um anel de metal. A biruta tem a capacidade de rotação de 360°²⁶.

A biruta construída terá os valores correspondentes com a figura 7, o modelo será feito usando o tecido TNT, arame flexível e uma haste de madeira.

²⁵ Comunicações. Poder Executivo de Caratinga. *Localização e Dados Demográficos* 03/05/2013. Disponível em: < http://www.caratinga.mg.gov.br/Materia_especifica/6498/Localizacao-e-Dados-Demograficos->. Acessado em: 19/11/2015.

²⁶ FARIA; Herbert. SETON. *Pra que servem as birutas?* 20/02/2014. Disponível em: <<http://blog.seton.com.br/para-que-servem-as-birutas.html>>; Acessado em: 05/10/2015

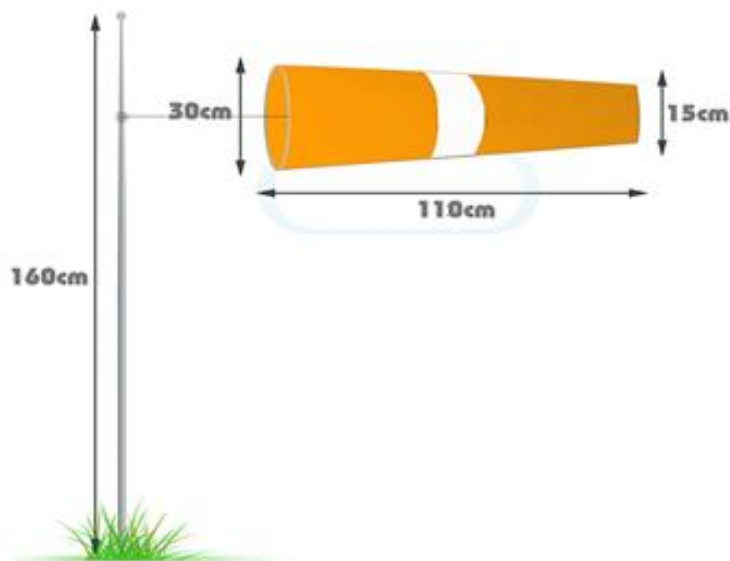


Figura 7. Medições da biruta²⁷

3.7-Medição da velocidade dos ventos

A medição do vento é feita por um equipamento chamado anemômetro, onde utiliza o cálculo do coeficiente de arrasto para determinar a velocidade do vento. O anemômetro eletrônico é capaz de realizar esse cálculo instantaneamente, transformando o sinal analógico gerado pelo vento na hélice e através de um circuito

lógico, calcula a velocidade do vento.

Para o projeto será utilizado o anemômetro da marca Akrom, modelo Termo-Anemômetro digital KR835. O modelo de anemômetro tem uma faixa de medição do ar de 0,4 à 30 m/s e exatidão de 3%. O modelo KR835 também tem a funcionalidade de medidor de temperatura, que será necessário para o estudo da potência do vento.



Figura 8. Anemômetro digital.²⁸

²⁷ Funflap. *Como fazer uma biruta*; 12/01/2015. Disponível em: <<http://www.fullflap.com.br/como-fazer-uma-biruta/>>. Acessado em: 28/10/2015.

²⁸ Fonte: Elaborada pelo autor.

4-METODOLOGIA

4.1-Análise do Ambiente

O local selecionado para análise de testes foi a BR 116 junto ao perímetro urbano da cidade de Caratinga.

A análise foi empregada onde os limites de velocidade da rodovia alcançam as velocidades de 80 Km/h e 50 Km/h. Estes são os valores de velocidades na BR-116, perímetro urbano de Caratinga, onde será feito o estudo, avaliando-se as velocidades de ventos causados por veículos que passaram pelo local a uma distância de cinco (5) metros da pista onde transitarão os veículos.



Figura 9: Mapa do perímetro urbano de Caratinga²⁹

²⁹ GOOGLE EARTH-MAPS. Mapa de Caratinga. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Caratinga,+MG/@-19.7840931,-42.143234,12z/data=!4m2!3m1!1s0x00ba9895ec84dbb7:0x38dc71b09b9e5763>>. Acesso em 19/11/2015.

O equipamento usado para o estudo, foi o já citado anemômetro digital e a biruta caseira que mostra o sentido em que os ventos se deslocam.

Foram escolhidos quatro pontos de observação, dois pontos em uma via com velocidade máxima de 80 Km/h e outras duas de velocidade máxima de 50 Km/h. Cada ponto esteve sob observação no período de 1 hora.

4.2-Descrição do método de avaliação

Optou-se pela a utilização de anemômetros que possam fazer a leitura da velocidade do vento, cujo o funcionamento já foi citado anteriormente. E junto com o anemômetro, uma biruta para que possa ser indicado em qual direção o vento está percorrendo. A medida foi realizada a uma distância lateral de 5 metros da rodovia, distância utilizada para que não haja interferência no trafego de veículos.

4.3-Resultados obtidos

Durante os testes, pode-se notar que o anemômetro não registrou resultados para veículos automotores modelos de carros populares e motocicletas, a turbulência gerada pelos mesmos não foi suficiente para causar deslocamentos de ar significativos a uma distância de cinco metros. Portanto, o deslocamento de ar causado pelos carros populares e motocicletas sozinhos não dão resultados em rodovias inferiores a velocidades máximas de 80 Km/h.

As medições realizadas estão apresentadas pelos seguintes gráficos 2,3,4 e 5 e tabelas 2,3,4 e 5. Para cada ponto foram realizadas quatorze medições separadas para se obter uma média geral de quanto é o deslocamento de ar feito pelos veículos automotores.

A tabela 2 refere-se ao ponto de medição 1 para a via de velocidade de 80 Km/h, localizada na BR 116 as proximidades do Km 535.

Tabela de medições de velocidade dos ventos na rodovia com velocidade máxima de 80 Km/h - Ponto 1		
Medições	Temperatura (C°)	velocidade dos ventos (m/s)
1	36	8,3
2	36	7,7
3	36	7
4	35,9	1
5	35,7	5,3
6	35,7	6,7
7	35,4	5,5
8	35,4	4,2
9	35,4	5,8
10	35,3	3,8
11	35,1	7,1
12	35	3,3
13	35	3,8
14	35	3,1
Média	35,49285714	5,185714286
Variância	0,151483516	4,307472527
Des. Padrão	0,389208834	2,07544514

Tabela 2: Resultado do teste de medição do vento no ponto 1 de 80 Km/h

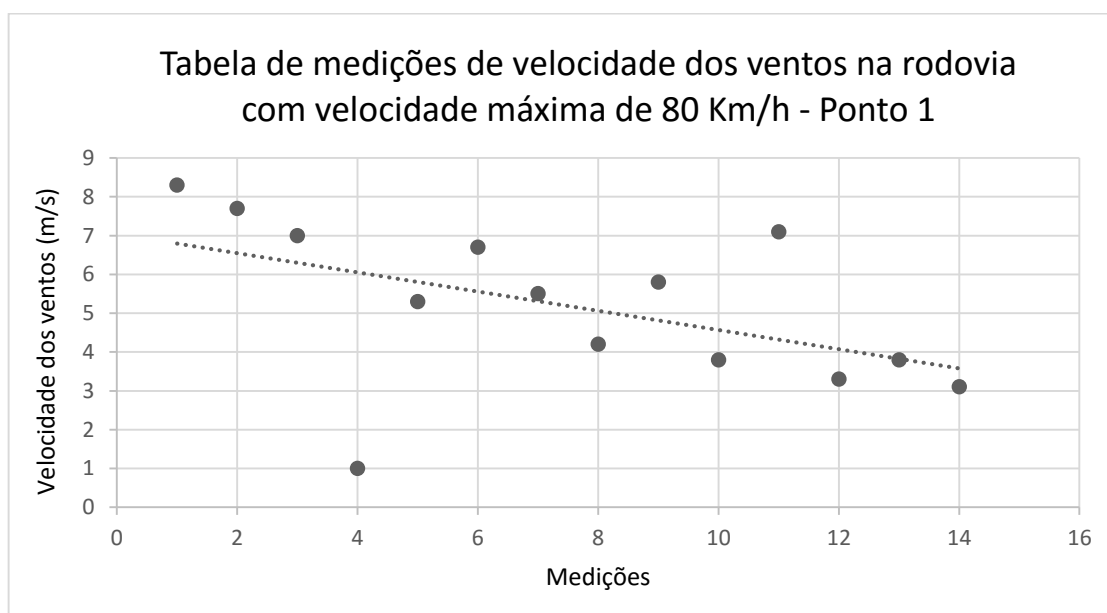


Gráfico 2: Linha de tendência da análise do ponto 1 da via de 80 Km/h

Com base na tabela e gráfico 2, pode-se notar resultados variados. Esses valores foram obtidos de forma separada. Os melhores resultados foram adquiridos quando o fluxo de trânsito estava mais constante.

A tabela e gráfico 3 mostram o ponto 2 para a via de velocidade de 80 Km/h, localizada na BR 116 nas proximidades do Km 521.

Tabela de medições de velocidade dos ventos na rodovia com velocidade máxima de 80 Km/h - Ponto 2		
Medições	Temperatura (C°)	Velocidade dos ventos (m/s)
1	33	2,9
2	33	3,2
3	32,9	2,5
4	32,9	4,4
5	32,4	5
6	32	1
7	31,9	1
8	31,5	5,1
9	31,3	4
10	31,3	2,2
11	30,9	1,4
12	30,3	3,2
13	30	3
14	30	3,5
Média	31,67142857	3,028571429
Variância	1,200659341	1,780659341
Des. Padrão	1,09574602	1,334413482

Tabela 3: Resultado do teste de medição do vento no ponto 2 de 80 Km/h

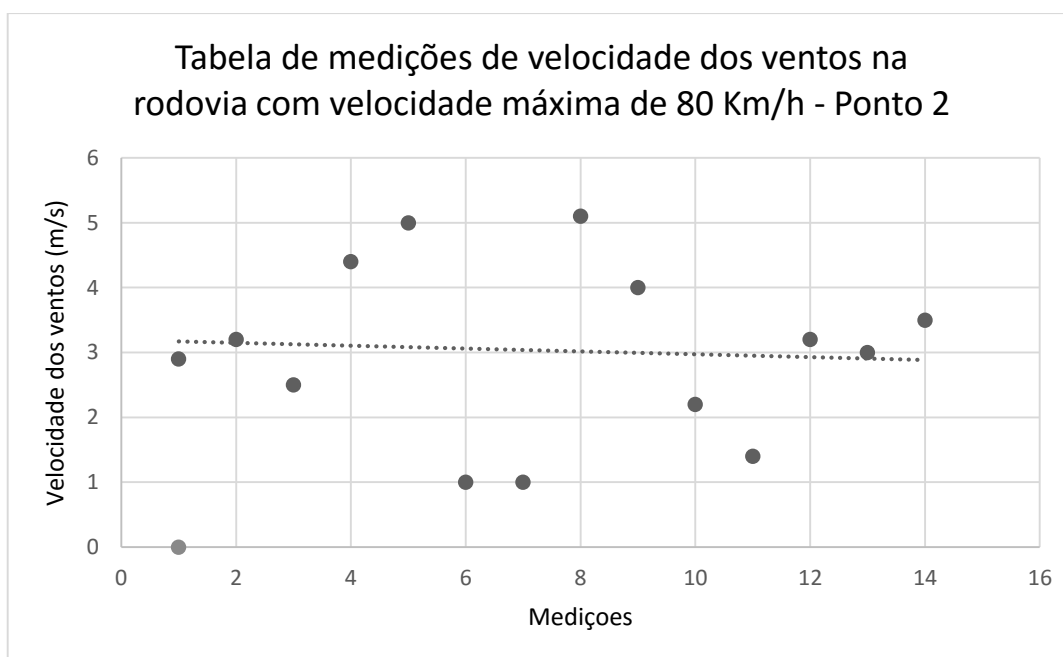


Gráfico 3: Linha de tendência da análise do ponto 2 da via de 80 Km/h

A tabela e gráfico 4 refere-se ao ponto 1 para a via de velocidade 50 Km/h, localizada na Rio-Bahia próximo ao nº444, bairro N.S. Das Graças. Caratinga/MG.

Tabela de medições de velocidade dos ventos na rodovia com velocidade máxima de 50 Km/h - Ponto 1		
Medições	Temperatura (C°)	Velocidade dos ventos (m/s)
1	34,3	2,8
2	34	3
3	34	2,8
4	33,9	3,1
5	33,4	2,3
6	33,1	2,6
7	33	3,2
8	33	0,6
9	32,9	0,6
10	32,9	0,6
11	32,6	0,7
12	32,4	1,5
13	32,4	2,5
14	32,4	3,1
Média	33,16428571	2,1
Variância	0,427087912	1,116923077
Des. Padrão	0,653519634	1,056845815

Tabela 4: Resultado do teste de medição do vento no ponto 1 de 50 Km/h

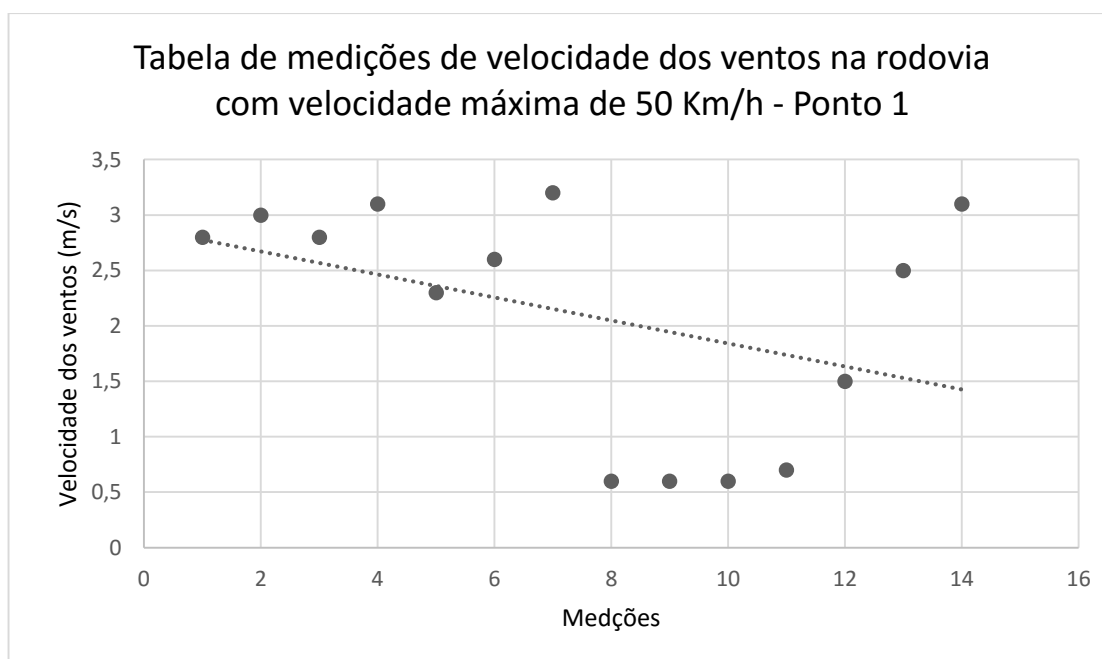


Gráfico 4: Linha de tendência da análise do ponto 1 do via de 50 Km/h

A tabela e gráfico 5, representa o ponto 2 na via de velocidade 50 Km/h, localizada na Rio-Bahia nº2050, bairro Zacarias, Caratinga/MG.

Tabela de medições de velocidade dos ventos na rodovia com velocidade máxima de 80 Km/h - Ponto 2		
Medições	Temperatura (C°)	Velocidade dos ventos (m/s)
1	34,7	1,2
2	34,7	3,7
3	34,7	5
4	34,2	2
5	34,1	2,7
6	34	1,7
7	33,8	7,7
8	33,8	3
9	33,6	0,8
10	33,5	5,6
11	33,5	1,6
12	33,4	2,6
13	33,2	2,6
14	33,2	3,6
Média	33,88571429	3,128571429
Variância	0,285934066	3,585274725
Des. Padrão	0,53472803	1,893482169

Tabela 5: Resultado do teste de medição do vento no ponto 2 de 50 Km/h

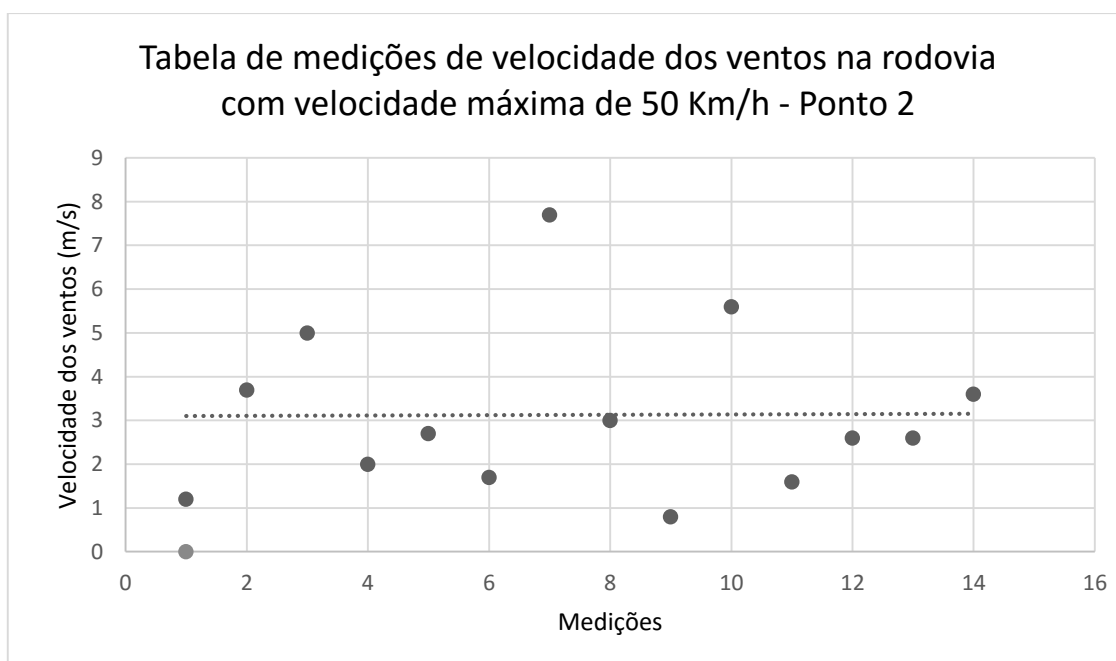


Gráfico 5: Linha de tendência da análise do ponto 2 da via de 50 Km/h

Os gráficos 2,3,4 e 5 e tabelas 2,3,4 e 5, são representações da velocidade dos ventos que foram registrados com o anemômetro durante o estudo. O período de registro dos dados foram de 1 hora, onde os veículos passavam de forma alternada durante este período de tempo. À altura em que o anemômetro estava a uma altura entre 1 a 2 metros de altura a partir do chão. Houve em todos os registros, uma grande variação da velocidade do vento, essa variação é decorrente do fluxo de veículos. Em momentos que o fluxo de veículos que causa o deslocamento de ar for baixo, a velocidade dos ventos também será baixa. Em contra proposta, quanto maior o fluxo de veículos, o deslocamento de ar será



melhor, causando a velocidade de vento gerada aumentar para valores que poderão ser aproveitados na geração de energia elétrica, por meio do potencial eólico rodoviário.

Foi observado também, com a ajuda de um transferidor, que os ventos deslocados percorreram paralelos à pista, variando entre 0° a 30° . A biruta também sofreu ação dos deslocamentos causados do lado oposto da pista de medição, entretanto o seu efeito sobre a mesma, foi anulado quando sofreu ação da via em que se localizava ao lado.

Figura 10: Biruta caseira³⁰

4.4-Massa específica por área

De acordo com o site de previsão de tempo WeatherOnline³¹, a pressão atmosférica de Caratinga no dia que foi realizada a pesquisa estava marcando a

³⁰ Fonte: Elaborada pelo autor.

³¹ Previsão meteorológica. Weather Online. Disponível em: < <http://www.weatheronline.pt/>>. Acessado em 22/11/2015.

pressão em 1010 hPa³² (Hectopascal). Transformando-se para atm o valor será aproximadamente 0,997 atm.

Como já relatado anteriormente (p.19), a massa específica do ar, ρ , sofre alterações pela região e temperatura ambiente. Foi aplicada a fórmula matemática $\rho = P_a/RT$, onde $R = 287 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$. Para o cálculo da massa específica, transformaremos a grandeza pressão atmosférica física *atm* para o respectivo valor em Pascal *Pa*, e a temperatura de Celsius para Kelvin para não haver erros na hora do cálculo, pelo fato de que a constante universal dos gases, sua escala de temperatura é Kelvin. Usando a média de temperatura das áreas, temos para cada local que foi feito a pesquisa, o valor de ρ igual a:

- Ponto 1 Velocidade Máxima de 80 Km/h:

$$\rho = \frac{101000 \text{ Pa}}{287(\text{J/Kg} \cdot \text{K}) * 308,65 \text{ K}^\circ} = 1,14 \text{ Kg/cm}^2$$

- Ponto 2 Velocidade Máxima de 80 Km/h:

$$\rho = \frac{101000 \text{ Pa}}{287 (\text{J/Kg} \cdot \text{K}) * 304,95 \text{ K}} = 1,154 \text{ Kg/cm}^2$$

- Ponto 1 Velocidade Máxima de 50 Km/h:

$$\rho = \frac{101000 \text{ Pa}}{287 (\text{J/Kg} \cdot \text{K}) * 306,31} = 1,149 \text{ Kg/cm}^2$$

- Ponto 2 Velocidade Máxima de 50 Km/h:

$$\rho = \frac{101000 \text{ Pa}}{287 (\text{J/Kg} \cdot \text{K}) * 307,04 \text{ K}} = 1,146 \text{ Kg/cm}^2$$

4.5-Potência por área

Usando a média das velocidades em que o vento percorreu e com o valor da massa específica para cada localidade, encontra-se a capacidade de geração elétrica. Através do valor da média da velocidade do ventos gerado, pode-se

³² Weather Online. Previsão do tempo de Caratinga/MG. Disponível em: <<http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?WMO=83592&CONT=namk&LAND=BZ&ART=LDR&LEVEL=150>>. Acesso em 22/11/2015.

determinar a média de potência gerada por área das pás de um gerador, localizado a 5 metros da margem da rodovia no momento dos testes.

Seguindo pela equação apresentada anteriormente e aplicando os valores encontrados, determina-se a capacidade média de potência encontrada pelos valores encontrados.

- Média de potência no ponto 1 de velocidade 80 Km/h

$$\frac{P}{A} = \frac{1,14 \text{ Kg/cm}^2 * 5,19^3 \text{ m/s}}{2} = 79,69 \text{ W/m}^2$$

- Média de potência no ponto 2 de velocidade 80 Km/h

$$\frac{P}{A} = \frac{1,154 \text{ Kg/cm}^2 * 3,03^3 \text{ m/s}}{2} = 16,05 \text{ W/m}^2$$

- Média de potência no ponto 1 de velocidade 50 Km/h

$$\frac{P}{A} = \frac{1,149 \text{ Kg/cm}^2 * 2,1^3 \text{ m/s}}{2} = 5,32 \text{ W/m}^2$$

- Média de potência no ponto 2 de velocidade 50 Km/h

$$\frac{P}{A} = \frac{1,146 \text{ Kg/cm}^2 * 3,13^3 \text{ m/s}}{2} = 17,57 \text{ W/m}^2$$

4.6-Análise do experimento

Durante o experimento pode-se notar que se tratando de veículos modelos de carros populares e motocicletas, o deslocamento de ar não foi suficiente para realizar alteração a uma distância de 5 metros na lateral da rodovia. Com esta deficiência, esses modelos de veículos, quando se locomovem sozinhos, tornam o sistema de potencial eólico ineficiente.

Veículos automotores de grande porte, como ônibus, caminhões e carretas, mostraram também ineficiência quando transitam na rodovia sozinho. Os melhores resultados destes veículos quando transitam independentes, alcançou a marca de 3,1 m/s.

Entretanto, quando os veículos transitam em grupos, a turbulência aumenta. Veículos de grande porte que são acompanhados, independentemente se forem carros populares ou até mesmo outros de grande porte, têm a turbulência aumentada consideravelmente. Os valores de deslocamento do ar, apresentaram resultados maiores quando a quantidade de veículos também aumentava. É possível afirmar que quanto maior o fluxo de carros, maior vai ser o deslocamento de ar.

De acordo com o decreto nº43.932 de 21/12/2004³³, a faixa de domínio das áreas adjacentes da rodovia seja de 15 metros o seu limite. Com esta distância, com a instalação de geradores, o potencial eólico será bastante reduzido. Para se aproveitar melhor o potencial eólico, o empreendedor ou companhia que estiver disposto a investir neste recurso, recomenda-se buscar uma licença no DER/MG, onde será analisado e avaliado o projeto. O *Manual de procedimentos para a permissão especial de uso das faixas de domínio de rodovias federais e outros bens públicos sob jurisdição do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes - DNIT*³⁴, foi realizado pelo DNIT para o caso de solicitação para a utilização da área da faixa de domínio. Para um melhor resultado do sistema de potencial eólico rodoviário, recomendo a solicitação da utilização da faixa de domínio.

³³ LegisWeb. Decreto nº 43.932 de 21/12/2004, 22/12/2004. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=140761>>. Acesso em 25/11/2015.

³⁴ Brasil. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Infra-Estrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias. Manual de Procedimentos para a Permissão Especial de Uso das Faixas de Domínio de Rodovias Federais e Outros Bens Públicos sob Jurisdição do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT. – Brasília, 2008. 91p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/faixa-de-dominio/manual-procedimentos-faixa-dominio-ocupa-jan-09.pdf>>. Acesso em 25/11/2015.

5-Considerações finais

5.1-Conclusão

Conclui-se que um sistema de potencial eólico rodoviário em Caratinga não é viável. O fluxo de trânsito no local não é economicamente viável para a produção de energia. A suposta geração de energia eólica seria muito baixa, pois o fluxo de veículos é muito baixo, com isso geraria pouca potência.

Um sistema de potencial eólico rodoviário tem capacidade de ser implantado na geração de energia eólica. Através da análise, observou-se que o deslocamento de ar, aumenta de acordo com o trânsito. Veículos de grande porte têm capacidades melhores para deslocar o ar, entretanto quando se locomovem sozinhos, o resultado do deslocamento não se torna viável para a geração de energia, igualmente carros populares ou motocicletas, apresentam resultados onde a viabilidade não é positiva. Entretanto, com base nos testes realizados, o deslocamento de ar causado quando o número de veículos aumentam, pode se tornar viável dependendo onde o sistema de geração eólico rodoviário é implantado.

Com análise dos dados, constatou-se que a viabilidade do sistema potencial eólico rodoviário onde a velocidade máxima dos veículos é menor do que 50 Km/h mostrou-se incapaz de mostrar resultados positivos, a menos que, na via, o tráfego dos veículos seja constante com poucas interrupções, o que não é na cidade de Caratinga.

Nas vias de velocidade máxima de 80 Km/h mostrou resultados mais satisfatórios, mas a viabilidade ainda é baixa se o fluxo de veículos também não for constante.

Através do estudo, viu-se que para o sistema potencial eólico rodoviário pode ser utilizado futuramente como um sistema auxiliar de geração elétrica de baixa potência, pois poderia ser utilizado em outros lugares onde atende a necessidade de um fluxo constante de veículos, ajudando o já atual sistema de geração e distribuição de energia. Mas, para que possa funcionar de forma altamente significativa, necessitará realizar um estudo de caso onde o tráfego de veículos seja da melhor forma constante.

5.2-Trabalhos futuros

Ao realizar o trabalho, os resultados apresentam novas portas para a expansão e desenvolvimento. A contribuição para o sistema de potencial eólico rodoviário poderá ser feita com, por exemplo, pesquisas de rodovias que supram a necessidade para o sistema, geradores que possam ser usados para tal geração de energia eólica, como também seria o melhor sistema da rede de distribuição.

6-Referências

3ª Etapa de Concessões Rodoviárias – Fase 1. Sistema Rodoviário Federal – Minas Gerais. Relatório Executivo. 2008.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.

Atlas de energia elétrica do Brasil/ Agência Nacional de Energia Elétrica. Ed.- Brasília: Aneel, 2008.

BARBERIS, Elisa. Folha de São Paulo, **Deslocamento de ar provocado por caminhões vira energia, 22/06/2013**; Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2013/06/1299402-deslocamento-de-ar-provocado-por-caminhoes-vira-energia.shtml>>; Acessado em 11/06/2015.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2 ed. rev. – São Paula: Pearson Prentice Hall, 2008.

FOX, Robert W. **Introdução a mecânica dos fluidos** / Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard; tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina França. – Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MARQUES, Domiciano; **Brasil Escola; FORÇAS DE ARRASTE**; Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/forcas-arraste.htm>>; Acessado em 21/05/2015

MUNSON, Bruce R. **Fundamentos da mecânica dos fluídos**/ Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okiishi; tradução da quarta edição americana: Euryale de Jesus Zerbini. – São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos da energia eólica** – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RAMOS, Márcio de Oliveira. **Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular, visando a melhoria de consumo de combustível e redução de emissão de poluentes aplicadas a veículos de passeio**. São Caetano do Sul. SP. CEUN, 2012.

RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energias Renováveis: Energia Eólica**. Livro digital. 2011.

ROSILHO, Vinicius. **Diminuição do Arrasto Aerodinâmico E Economia De Combustível de um Veículo Devido A Substituição dos Espelhos Retrovisores Externos Por Câmeras**. São Caetano do Sul. SP. CEUN-CECEA, 2013.

RUFATO, Eduardo; POLETTO, Roger; BARTEX, Sérgio. **Visualização de Escoamento de Fluidos em Túnel de Vento**; Porto Alegre, Dezembro de 2007.

SANTOS, Alison Alves dos; **Projeto de geração de energia eólica**/ Alison Alves dos Santos, Daniel Silva Ramos, Nilson Tadeu Fernandes dos Santos, Pedro Porto de Oliveira. Universidade Santa Cecília - Santos, 2006.

SOUSA. Prof. MSc. Bruno Silva de. **Análise da aerodinâmica de carros populares**; Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas; Nº. 03 – Ano II – 05/2013