



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Luiz Flávio Martins Pereira

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA
CUSTOMIZAÇÃO DE UM SUBSISTEMA DE
MICROGERAÇÃO DE ENERGIA COM
TURBINA EÓLICA PARA VEÍCULO ELÉTRICO
À BATERIA**

Taubaté – SP

2018

Luiz Flávio Martins Pereira

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA CUSTOMIZAÇÃO DE
UM SUBSISTEMA DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA COM
TURBINA EÓLICA PARA VEÍCULO ELÉTRICO À BATERIA**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca de Defesa da Universidade de Taubaté como requisito para obtenção do Título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Grandinetti.

Taubaté – SP

2018

LUIZ FLÁVIO MARTINS PEREIRA

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA CUSTOMIZAÇÃO DE UM SUBSISTEMA
DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA COM TURBINA EÓLICA PARA VEÍCULO
ELÉTRICO À BATERIA**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca de Defesa da Universidade de Taubaté como requisito para obtenção do Título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

UNITAU – Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares

UNITAU – Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Giuliani Paulineli Garbi

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais

Assinatura: _____

Dedico este trabalho a minha querida família, pelo apoio e incentivo durante todo este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por permitir que eu tivesse esta oportunidade e condições de cursar o Mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco José Grandinetti por acreditar na minha capacidade e me orientar nesta jornada.

À minha querida esposa Gislaine pela paciência e compreensão durante esses dois anos de curso, sempre me apoiando, incentivando e me auxiliando neste trabalho.

À minha filha Caroline pela alegria que me transmite sempre com sua ingenuidade e pureza de criança.

Aos meus pais Eva e Sebastião por se preocuparem com meu futuro e me proporcionarem a base para chegar a este estágio da minha vida.

Em especial ao Prof. Dr. Giuliani Paulineli Garbi pelo apoio, orientação e colaboração deste trabalho.

Aos alunos de Engenharia Mecânica da UNITAU, Alisson e Fabricio, pela ajuda na simulação deste trabalho.

Resumo

O mundo está cada vez mais preocupado com a atual situação do meio ambiente, vários fatores são responsáveis por isso, como por exemplo: a qualidade do ar que respiramos, desastres naturais, ou até mesmo a preservação para as futuras gerações. Cada um tem seu motivo para se preocupar com o meio ambiente, o importante é que junto com as preocupações, existam ações para a melhoria ambiental. Visando a qualidade do ar, ambientalistas, governantes e fabricantes de veículos elétricos voltaram a se entusiasmar com a fabricação destes, porém continuam encontrando dificuldades com relação à autonomia. Este trabalho será de grande ajuda aos fabricantes, pois irá desenvolver um subsistema de micro geração de energia para veículos elétricos. O protótipo consta de uma turbina eólica comercial a ser implantada no veículo elétrico de forma com o banco de baterias fique sempre sendo alimentado por essa geração de energia renovável. Dessa forma, foram feitos estudos analíticos e simulações realizadas pelo software ANSYS CFX objetivando o melhor posicionamento da turbina para uma maximização da energia. O veículo elétrico trata-se de uma pickup adaptada e desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté. Diante dos primeiros cálculos podemos concluir que o melhor posicionamento encontra-se no teto do veículo, porém precisava-se determinar a região do teto. Foram pré-determinadas três posições para a instalação da turbina eólica (na frente, no centro e atrás do teto) e verificaram-se os valores da força de arrasto na traseira são maiores que as demais, descartando-se este local. Mínimas diferenças nos valores das forças de arrasto totais são encontradas na frente e no centro do teto, justificando-se uma melhor análise devido à geometria do veículo. No meio do teto, a turbina eólica pode flambar mais facilmente, ou seja, ele se encontra propício a afundar já que não se tem uma estrutura apropriada para fixação. Analisando as condições da frente do teto vê-se uma instalação mais viável por ser na junção da quina do teto com uma estrutura mais reforçada, sendo assim sua fixação será mais rígida e pode-se afirmar que o melhor posicionamento para a implantação do subsistema será à frente do teto. Finalmente o subsistema pode ser instalado na parte da frente do teto devido as suas condições de estrutura e valores de forças de arrasto menores e mais eficientes.

Palavras-chave - Veículo elétrico; Turbina eólica, Software ANSYS CFX.

Abstract

The world is increasingly concerned about the current situation of the environment and many factors are responsible for this, such as: the quality of the air we breathe, natural disasters, or even the preservation for future generations. Everyone has their reason to worry about the environment, the important thing is that along with the concerns, there are actions for environmental improvement. Aiming at air quality, environmentalists, rulers and manufacturers of electric vehicles have once again become enthusiastic about the manufacture of these ones, but they continue finding difficulties regarding to autonomy. This work will be of great help to manufacturers as it will develop a subsystem of micro generation of energy for electric vehicles. The prototype consists of a commercial wind turbine to be implanted in the electric vehicle so that the battery bank is always being fed by this generation of renewable energy. In this way, analytical studies and simulations were done, performed by the ANSYS CFX software, aiming at the best positioning of the turbine for a maximization of the energy. The electric vehicle is a pickup adapted and developed in the Department of Mechanical Engineering of the University of Taubaté. Before the first calculations we can conclude that the best positioning is in the roof of the vehicle, but it was necessary to determine the region of the roof. Three positions were pre-determined for the installation of the wind turbine (in front of, in the center and behind the roof) and it was checked that the values of the drag force in the rear are greater than the others, putting this place away. Minimal differences in the values of the total drag forces are found in front and in the center of the roof, justifying a better analysis due to the geometry of the vehicle. In the middle of the roof, the wind turbine can fall more easily, that is, it is propitious to sink since there is no suitable structure for fixing. Analyzing the conditions of the front of the roof is a more viable installation because it is in the junction of the corner of the roof with a more reinforced structure, so its fixation will be more rigid and it can be affirmed that the best positioning for the implantation of the subsystem will be the front of the roof. Finally, the subsystem can be installed in front of the roof because of its conditions of structure and smaller and more efficient drag values.

Keywords - Electric vehicle; Wind turbine, ANSYS CFX software.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Metodologia	18
2.	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	História do Veículo Elétrico	20
2.2	História do Automóvel com Sistema de Propulsão	21
2.3	Retomada do Sistema de Propulsão do Automóvel com Motor Elétrico	26
2.4	Energia Eólica	27
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1	Definições da Aerodinâmica	31
3.2	Forças Aerodinâmicas sobre Automóveis	34
3.3	Túnel de Vento	36
3.4	Aspectos Fundamentais da Dinâmica Veicular	37
3.5	Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)	42
4.	MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO	44
4.1	Veículo Elétrico Adaptado	44
4.2	Modelagem do Saveiro	47
4.3	Modelagem da Turbina Eólica Rutland 504	57
4.4	Modelagem da TE com o VE	60
5.	RESLUTADOS	62
5.1	Simulação na Frene do Teto	62
5.2	Simulação no Centro do Teto	72
5.3	Simulação na Traseira do Teto	81
6.	CONCLUSÕES	91

6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	91
	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	94

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1	Veículo elétrico a bateria.	20
Figura 2	Locomotiva com sistema de propulsão a vapor.	21
Figura 3	Veículo de propulsão com motor elétrico.	22
Figura 4	Veículo de propulsão com motor a combustão interna.	23
Figura 5	Veículo híbrido de propulsão com motor a combustão interna e motor elétrico.	23
Figura 6	Turbina eólica vertical Gorlov.	29
Figura 7	Turbinas eólicas horizontais.	30
Figura 8	Diferentes coeficientes de arrasto para diversos tipos de veículos.	33
Figura 9	Escoamento laminar e turbulento.	34
Figura 10	Escoamento na camada limite.	35
Figura 11	Forças que atuam em um perfil aerodinâmico.	35
Figura 12	Sistemas de coordenadas do veículo definido pela SAE.	38
Figura 13	As forças atuantes em um veículo.	39
Figura 14	Arranjo simples da ligação de um motor com a roda.	41
Figura 15	Veículo elétrico adaptado modelo saveiro.	44
Figura 16	(a) Motor elétrico e (b) Inversor de Frequência.	45
Figura 17	Modelagem do Saveiro utilizando o software Inventor.	48
Figura 18	Área frontal do veículo elétrico.	49
Figura 19	Força de arrasto x velocidade do modelo matemático do saveiro.	50
Figura 20	Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 2,77 m/s.	51
Figura 21	Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 5,14 m/s.	51
Figura 22	Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 7,12 m/s.	52
Figura 23	Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 10,29 m/s.	52
Figura 24	Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 12,86 m/s.	53
Figura 25	Força de arrasto com velocidade de entrada de 2,77 m/s.	54
Figura 26	Força de arrasto com velocidade de entrada de 5,14 m/s.	54
Figura 27	Força de arrasto com velocidade de entrada de 7,12 m/s.	55
Figura 28	Força de arrasto com velocidade de entrada de 10,29 m/s.	55

Figura 29	Força de arrasto com velocidade de entrada de 12,86 m/s.	56
Figura 30	Força de arrasto com velocidade de entrada de 17,82 m/s.	56
Figura 31	Força de arrasto do modelo matemático x simulação do VE.	57
Figura 32	Turbina eólica horizontal Rutland 504.	58
Figura 33	Sistema de controle de energia da turbina.	58
Figura 34	Gráfico de velocidade x força de arrasto da turbina eólica.	60
Figura 35	Gráfico corrente (A) X Velocidade (m/s).	60
Figura 36	Força de Arrasto do modelo matemático x simulação do VE+TE.	61
Figura 37	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=2,77m/s).	63
Figura 38	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=5,14m/s).	63
Figura 39	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=7,12m/s).	64
Figura 40	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=10,29m/s).	64
Figura 41	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=12,86m/s).	65
Figura 42	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=17,82m/s).	65
Figura 43	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=2,77m/s).	66
Figura 44	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=5,14m/s).	66
Figura 45	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=7,12m/s).	67
Figura 46	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=10,29m/s).	67
Figura 47	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=12,86m/s).	68
Figura 48	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE (v=17,82m/s).	68
Figura 49	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=2,77m/s).	69
Figura 50	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=5,14m/s).	69
Figura 51	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=7,12m/s).	70
Figura 52	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=10,29m/s).	70
Figura 53	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=12,86m/s).	71
Figura 54	Força de arrasto do VE + TE na frente do teto (v=17,82 m/s).	71
Figura 55	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=2,77m/s).	72
Figura 56	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=5,14m/s).	72
Figura 57	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=7,12m/s).	73
Figura 58	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=10,29m/s).	73
Figura 59	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=12,86m/s).	74
Figura 60	Vista frontal da simulação do VE + TE (v=17,82m/s).	74

Figura 61	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).	75
Figura 62	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).	75
Figura 63	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).	76
Figura 64	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).	76
Figura 65	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).	77
Figura 66	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).	77
Figura 67	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=2,77\text{m/s}$).	78
Figura 68	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=5,14\text{m/s}$).	78
Figura 69	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=7,12\text{ m/s}$).	79
Figura 70	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=10,29\text{m/s}$).	79
Figura 71	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=12,86\text{ m/s}$).	80
Figura 72	Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=17,82\text{ m/s}$).	80
Figura 73	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).	81
Figura 74	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).	81
Figura 75	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).	82
Figura 76	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).	82
Figura 77	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).	83
Figura 78	Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).	83
Figura 79	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).	84
Figura 80	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).	84
Figura 81	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).	85
Figura 82	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).	85
Figura 83	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).	86
Figura 84	Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).	86
Figura 85	Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=2,77\text{m/s}$).	87
Figura 86	Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=5,14\text{m/s}$).	87
Figura 87	Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=7,12\text{m/s}$).	88
Figura 88	Força de arrasto do VE + TE no traseira do teto ($v=10,29\text{m/s}$).	88
Figura 89	Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=12,86\text{m/s}$).	89
Figura 90	Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=17,82\text{m/s}$).	89
Figura 91	Comparação da modelagem e simulação do VE+TE.	90

Figura 92	Turbina eólica Rutland 913.	92
Figura 93	Caminhão conceito elétrico Tesla.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Ψ	angulo de inclinação
τ_{ij}	forças viscosas normais ao plano ij
τ_p	tensão de cisalhamento provocada pela pressão
F_{DTE}	força de arrasto da turbina eólica
F_{DVE}	força de arrasto do veículo elétrico
P_v	potência média do vento
μ_{rr}	coeficiente de resistência ao rolamento
Δm	deslocamento de uma massa de ar
Δt	variação de tempo energia
μ	viscosidade dinâmica do ar
a	aceleração
A	área do objeto
Ah	Ampere hora
B_{bat}	potência do banco de baterias
C_D	coeficiente de arrasto aerodinâmico (adimensional)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
C_L	coeficientes de sustentação
C_{nm}	capacidade nominal
D	arrasto
DC	corrente contínua
dF	elemento de força
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
F_{ad}	força arrasto aerodinâmico
F_{DT}	força de arrasto total
F_{hc}	força para vencer a inclinação
F_{la}	força necessária para se obter uma aceleração linear
F_{rr}	força de resistência ao rolamento
F_s	força de sustentação
F_{te}	força total de tração
F_{wa}	força necessária para se obter a aceleração angular de rotação do motor
F_x	força atuando na direção x

F_y	força atuando na direção y
g	constante gravitacional $9,8\text{m/s}^2$
G	relação de transmissão do sistema
IEA	<i>International Energy Agency</i>
kW	Quilo Watts
mg	força que o veículo exerce sobre o solo devido à sua massa m.
Nm	Newton metro
P	pressão
p	velocidade de rolagem em torno do eixo x
q	velocidade de arfagem em torno do eixo y
r	velocidade de guinada em torno do eixo z
r	raio do pneu
Re	<i>Reynolds</i>
RPM	rotações por minuto
t	tempo
T	torque no eixo
t_{desc}	tempo de descarregamento das baterias
TE	turbina eólica
t_{nom}	tempo de descarga nominal.
u	velocidade longitudinal, positivo para frente do veículo
u, v e w	velocidades do fluido nas direções x, y e z respectivamente.
v	velocidade lateral, positivo para o lado direito do veículo
V	Volts
VE	veículo elétrico
w	velocidade vertical, positiva para baixo em relação ao veículo
W	Watts
x, y e z	coordenadas cartesianas dimensionais
ρ	densidade do ar
I	corrente nominal
<i>kWh</i>	Kilo Watts hora
θ	ângulo da força resultante

1 INTRODUÇÃO

As primeiras demonstrações de veículos elétricos foram feitas por volta de 1830 em paralelo com energia elétrica comercial, ainda com uso de baterias não recarregáveis resultando na descontinuação dos carros elétricos em meados de 1930 (PILLAI, 2010).

Ainda no século XX os veículos elétricos eram fortes concorrentes para o transporte rodoviário, mostrando-se confiáveis com aceitação e utilização imediata, enquanto veículos a combustão interna estavam em aprimoramento por serem mal cheirosos e acionados por manivelas a ignição (ANDERSON, 2010; AWAL *et al.*, 2015).

De acordo com o relatório de 2007 da EPA (*Environmental Protection Agency*), cerca de 39,2% da emissão de gases são causados por atividades do setor de transporte. Dentre as conclusões desse relatório, pode-se destacar que o aumento do número dos veículos nas últimas décadas proporcionou um aumento nos riscos para a saúde da população, meio ambiente e colaborando diretamente para as mudanças climáticas (XYDIS & NAKANI, 2015; BARASSA, 2015).

Segundo Prajapati e Thakkar (2013) o efeito negativo da utilização do combustível fóssil não renovável forçou a gestão pública e setores industriais a concentrarem seus esforços em pesquisas e desenvolvimento de fontes de energias consideradas limpa, menos agressivas para o meio ambiente.

Preocupações com o meio ambiente, saúde, mudança climática, economia, ruídos e emissões de poluentes, com os avanços conquistados com a tecnologia de baterias com alta densidade elétrica e com os conversores eletrônicos, os carros elétricos tornaram-se viáveis sob o ponto de vista da produção e economia.

Assim, em busca de um transporte considerado como limpo, nos últimos 20 anos ocorreu um grande interesse para o desenvolvimento de veículos elétricos (XYDIS & NANAKI, 2015).

Passou-se meio século para desenvolver as baterias comercializadas em veículos elétricos e mesmo assim não tiveram o mesmo apreço e nem o sucesso que tiveram os veículos movidos a motor a combustão interna, motores que normalmente andam por muito mais tempo e são fáceis de reabastecer (FERDOUS *et al.*, 2011).

Anderson (2010) relata a baixa capacidade de armazenagem de energia (baixa autonomia); a pouca durabilidade da bateria, uma perda de capacidade na faixa de 10% ao ano

e uma grande dificuldade na hora do reabastecimento. Ainda essa energia não é suficiente para percorrer distâncias similares às percorridas pelos carros movidos com os combustíveis fósseis não renováveis (AWAL *et al.*, 2015).

Ferdous *et al.* (2011) defendem que uma forma de amenizar tal desvantagem baseada no conceito de que as baterias devem ser recarregadas enquanto o veículo elétrico está em movimento. Isto pode ser realizado por meio da utilização de turbina eólica na estrutura do veículo elétrico. Assim, enquanto o veículo elétrico está em movimento, a turbina eólica está gerando energia elétrica para recarregar as baterias do veículo elétrico.

Nesse trabalho apresentam-se os resultados de uma melhor localização para a implantação de um subsistema de micro geração de energia eólica através de cálculos analíticos e simulações numéricas de forças de arrasto de uma turbina eólica comercial Ruthland 504 de eixo horizontal em um veículo elétrico, *pickup VW* modelo Saveiro 1994, desenvolvido e disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Modelar e simular a localização mais adequada de uma turbina eólica horizontal comercial, no protótipo do Saveiro VW, visando o menor impacto no arrasto e melhorias na autonomia do veículo elétrico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Modelar a aerodinâmica do protótipo do Saveiro VW.
- Modelar a aerodinâmica da turbina eólica comercial a ser instalada no Saveiro VW.
- Desenvolver um estudo analítico e numérico através do *software* “ANSYS CFX” utilizando o pacote CFD (*Computational Fluid Dynamics*) da região com maior escoamento de ar de uma primeira aproximação da localização da turbina eólica dentro da região com maior escoamento.
- Apresentar simulações refinadas de possíveis pontos de instalação da turbina eólica, dentro da região com maior escoamento.
- Apresentar os resultados da melhor localização, que proporcionou o menor arrasto aumentando a autonomia e o tempo de utilização das baterias.

1.2 Justificativa

Com a justificativa de melhorar o armazenamento de energia em veículos elétricos, os quais hoje em dia, encontram-se novamente no mercado, a implantação de um subsistema de micro geração de energia eólica torna-se relevante.

A definição da turbina eólica comercial utilizada foi baseada na ampla utilização da mesma e em menores custos possíveis para aquisição e manutenção. Desta forma utilizou-se a turbina eólica horizontal encontrada no meio náutico modelo Rutland 504, a escolha deste modelo dentre os vários da Rutland foi devido ao seu peso e dimensões que se adequam melhor a um veículo de pequeno porte.

Para esta desta dissertação foi necessário formular um modelo aerodinâmico para a micro geração de energia eólica.

Os testes foram feitos em um protótipo da pickup Saveiro que se encontra no Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU. Este veículo é composto por um motor elétrico de tração de indução trifásico com uma potência nominal de 12kW e com pico de 24kW, controlado por um inversor de frequência para tração específica para controle do motor de indução trifásico de baixa tensão.

Para simular todos os resultados, iniciais e finais, do veículo, da turbina e do comportamento aerodinâmico, foi utilizado o *software* ANSYS CFX disponível no laboratório de informática do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU utilizado para o desenvolvimento.

1.3 Metodologia

A metodologia envolvida para desenvolver esta dissertação está pautada em pesquisas da literatura, modelagem matemática, simulações numéricas. Através de resultados preliminares encontrados geraram uma pesquisa mais aprofundada com objetivos exploratórios.

As literaturas baseiam-se em estudos sobre aerodinâmica, menor interferência no arrasto e veículos elétricos com sugestões para a instalação de turbinas eólicas objetivando a melhora na autonomia das baterias do veículo elétrico.

A simulação dos resultados feita através do *software* ANSYS CFX desenvolvida em um ambiente artificial e controlado, terá uma natureza aplicada com a abordagem quantitativa, pois, objetiva gerar conhecimentos para uma futura aplicação prática de

instalação de turbinas eólicas de forma a superar as desvantagens dos veículos elétricos em relação aos veículos de motor à combustão interna.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 História do Veículo Elétrico

Segundo Larmin e Lowry (2003), as primeiras demonstrações de veículos elétricos foram feitas por volta de 1830, e isso ocorreu com energia elétrica comercial, ainda com uso de baterias não recarregáveis, passando assim meio século para desenvolver as baterias comercializadas em veículos elétricos.

Contudo veículos elétricos não tiveram o mesmo apreço e nem o sucesso que tiveram os veículos movidos a motor a combustão, motores que normalmente andam por muito mais tempo e são fáceis de reabastecer.

No início do século 20, veículos elétricos eram fortes concorrentes para o transporte rodoviário do futuro, eram veículos confiáveis e começaram a ser utilizados de imediato, enquanto veículos a combustão interna estava em um momento não muito confiável, e ainda eram acionados por manivelas a ignição do motor a combustão, e mais, os motores a vapor tinham uma baixa eficiência (LARMINE & LOWRY, 2003).

A Figura 1 mostra que os taxis em meados de 1901 eram veículos elétricos.



Figura 1 – Veículo elétrico a bateria
Fonte: Fonte: Larmin and Lowry, 2003.

Hoje preocupações com o meio ambiente, como ruídos e emissões de poluentes, assim como o desenvolvimento de novas baterias e outros tipos de combustível podem acelerar a volta dos veículos elétricos.

2.2 História do Automóvel com Sistema de Propulsão

Chama-se veículo de propulsão todo aquele equipado com motor a gasolina, diesel, álcool, elétrico qualquer que seja o combustível e GNV (Gás Natural Veicular, que é um combustível alternativo para veículos e muito utilizado em frotas de táxi, vans, caminhonetes), que circule por seus próprios meios e que serve, normalmente, para o transporte viário de pessoas e objetos ou para a tração viária de veículo. O termo compreende os veículos conectados a uma linha elétrica e que não circulam sobre trilhos (ônibus elétrico).

Os autores Mowery & Rosenberg (2005) apresentam que a origem dos veículos com sistema de propulsão ocorreu entre 1780 e 1840 durante a primeira revolução industrial (1780-1840) que teve a máquina a vapor como o principal símbolo de desenvolvimento técnico.

Cowan & Hultén (1996) afirmam que o automóvel com sistema de propulsão teve sua origem na Europa, sendo que o primeiro veículo com sistema de propulsão a vapor, considerado como veículo de combustão externa, foi a locomotiva a vapor apresentada pelo engenheiro inglês Richard Trevithick em 1804 Figura 2.



Figura 2 – Locomotiva com sistema de propulsão a vapor.

Fonte: locomotiva.xpx.uol.com.br, 2016.

Segundo Geels (2005), os veículos com sistema de propulsão foram invenções sócio-técnicas que impactaram profundamente nas atividades sociais, econômicas, industriais e ambientais de todo o planeta.

Ainda Cowan & Hultén (1996), reafirmam que tais veículos influenciaram toda a dinâmica da sociedade, as formas de como as pessoas viviam, como-se deslocavam e principalmente o tempo gasto com esses deslocamentos. Com isso os veículos promoveram o crescimento das áreas suburbanas da classe média econômica e a indústria automobilística se tornou uma das maiores e mais importantes em todo o mundo.

Entre os diferentes tipos de veículos, o automóvel foi o principal símbolo de progresso técnico da segunda revolução industrial que ocorreu entre 1870 e 1930 (HOYER, 2008). Durante este período houve o estabelecimento da indústria automobilística na Europa e nos Estados Unidos da América (EUA) que foi marcado pelo amadurecimento do sistema de propulsão dos automóveis (BARAN, 2012).

Chan (2013) relata que a invenção do primeiro veículo com sistema de propulsão com motor elétrico ocorreu em 1828 pelo inventor húngaro Ányos Jedlik, que concebeu um pequeno veículo cuja propulsão ocorria a partir de um conversor eletromecânico Figura 3.



Figura 3 – Veículo de propulsão com motor elétrico.

Fonte: slideplayer.com.br, 2016.

O engenheiro alemão Karl Friedrich Michael Benz em 1885 desenvolveu o primeiro veículo baseado em um motor a combustão interna, artefato tecnológico que se tornaria dominante posteriormente (ANDERSON & ANDERSON, 2010). A Figura 4 apresenta um exemplo de veículo com sistema de propulsão à combustão interna.

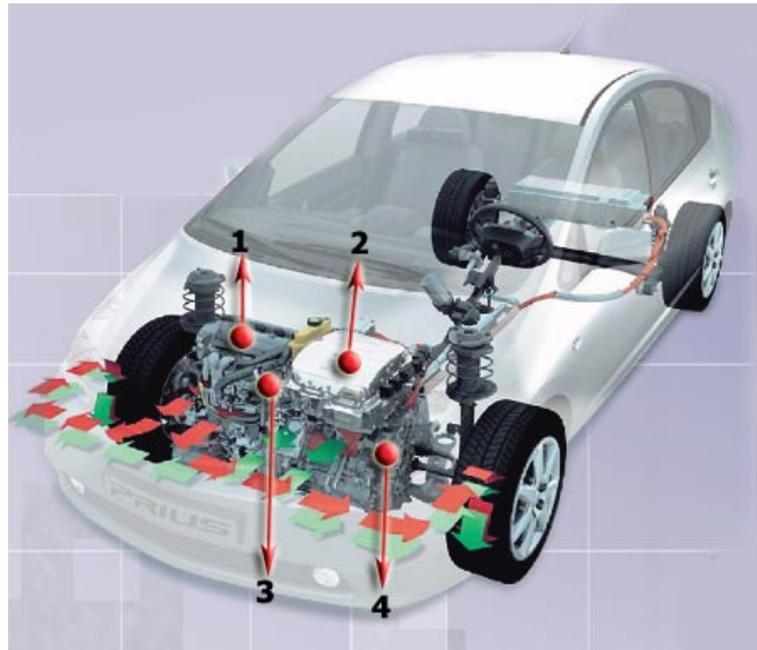


Figura 4 – Veículo de propulsão com motor a combustão interna.

Fonte: mgautonovidades.blogspot.com, 2016.

A primeira aplicação de um motor elétrico juntamente com um motor a combustão interna em um mesmo veículo (veículo elétrico híbrido) aconteceu em 1889 pelo engenheiro alemão Ferdinand Porsche, (WAKEFIELD, 1994). A Figura 5 apresenta um exemplo de veículo com sistema de propulsão híbrido.

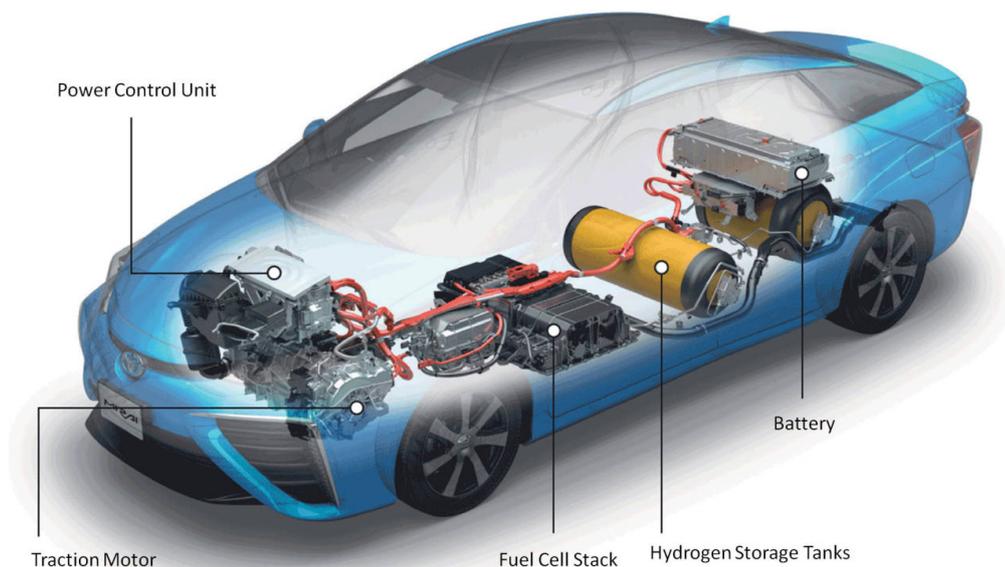


Figura 5 – Veículo híbrido de propulsão com motor a combustão interna e motor elétrico.

Fonte: motorchase.com, 2016.

A introdução do motor a combustão ocorreu devido às condições proporcionadas pelas políticas públicas e do mercado consumidor nos EUA, Barassa (2015) e Hoyer (2008). Em Flink (1970) é esclarecido que entre os anos de 1899 e 1909 a Europa continuou sua produção de automóvel para atender uma pequena parcela da sociedade com alto poder econômico, o crescimento da produção de veículos movidos à gasolina nos EUA foi sinônimo de produção em larga escala, com preços baixos e com a criação do mercado de massa.

Flink (1970), apresenta que nesse período, o mercado de automóveis nos EUA ficou dividido entre veículos elétricos e a vapor.

Alguns autores mostram as relações entre as vendas dos veículos elétricos e a vapor.

Em Schallenberg (1982) é apresentado que no ano de 1899 foram vendidos 1575 automóveis elétricos com o valor entre 1250 e 3000 dólares, 1681 automóveis a vapor com o valor entre 650 e 1500 dólares, e 936 automóveis à gasolina com o valor entre 1000 e 2000 dólares.

Ainda Nicholon (1984) relata que no ano de 1924 foram produzidos mais de três milhões de automóveis com motores a combustão interna em contraste com a produção de menos de 400 automóveis com sistema de propulsão com motor elétrico.

Entre os anos de 1920 e 1973 caracterizam-se como o período de consolidação do sistema de produção seriada de automóveis desenvolvida e implementada por Henry Ford, pois permitiu que o preço deste tipo de automóvel para o consumidor final ficasse entre 500 e 1000 dólares, o que na média representava a metade do preço de um veículo com sistema de propulsão com motor elétrico (HOYER, 2008).

Geels (2005) mostra exemplos de fabricantes e empresas responsáveis pela produção do motor à combustão interna e dos diversos componentes relacionados como transmissão, caixa de marchas e afins. Incluem-se nesta rede também, responsáveis pela manutenção do motor à combustão interna, como a infraestrutura de abastecimento dos automóveis (postos de combustíveis) e as oficinas e centros especializados em calibragem e manutenção mecânica.

Segundo Callon (1986), a partir do início da década de 1970 o veículo com sistema de propulsão com motor à gasolina é questionado sobre os aspectos dos congestionamentos que ocorrem principalmente nas grandes cidades, os elevados números de acidentes de trânsito, e a poluição do ar por causa da emissão dos gases proporcionados por este tipo de tecnologia.

Segundo Roberts (1963), as três tecnologias de propulsão dos automóveis apresentavam problemas de ordem técnica.

O autor Jamison (1974) relata que os automóveis a vapor requeriam pelos menos 20 minutos de aquecimento antes de iniciar qualquer tipo de trajetória, e ainda exigiam elevado

consumo de água não se preocupando com sua rede de abastecimento. O problema do aquecimento inicial foi solucionado após alguns anos, mas o problema do consumo de água não foi superado e permaneceu até o desaparecimento do automóvel a vapor no ano de 1920.

Os problemas técnicos dos automóveis com motor elétrico eram atribuídos à baixa capacidade de armazenamento de energia elétrica das baterias, o que proporcionava uma enorme dificuldade em subir ladeiras íngremes, baixa autonomia de rodagem e por consequência uma baixa velocidade máxima. Apesar de lentidão do desenvolvimento da tecnologia das baterias, o problema da autonomia e de baixa velocidade máxima poderia ser resolvido melhorando a eficiência de armazenagem das baterias, e no ano de 1914 a autonomia que era de 30 quilômetros passou para até 130 quilômetros porém para reabastecer os eletro postos se tornaram inviáveis, pois, no início do século XX eles precisavam de conexão permanente com a rede elétrica que ainda estava em desenvolvimento nos EUA (FLINK, 1970).

Schallenberg (1982) apresenta que os problemas técnicos do veículo com motor à combustão interna eram os elevados níveis de ruído produzidos, para ligar o automóvel era necessário o uso de uma manivela, elevado consumo de água usada para refrigeração do motor, autonomia e velocidade máxima relativamente baixa. O rápido desenvolvimento tecnológico no final da década de 1910 proporcionou reduzir o consumo de água e aumentar a autonomia e a velocidade máxima, mas, não conseguiu resolver por completo a questão dos ruídos. E no ano de 1912 com o desenvolvimento do *starting lightning ignition*, atualmente conhecido como motor de arranque foi resolvido o problema do uso da manivela para ligar o automóvel, o que também colaborou para a descontinuação das outras duas formas de sistema de propulsão.

Em Cowan & Hultén (1996), os postos de gasolina surgiram como a alternativa mais viável e que foi potencializado por elevadas investimentos da recente indústria petrolífera nos EUA.

Sobre o aspecto dos fatores políticos e mercadológicos nos EUA, de acordo com o Anderson & Anderson (2010), na década de 1920 o EUA já possuía rodovias que conectavam suas principais cidades em diferentes estados, e os veículos a combustão interna se adaptaram melhor por apresentarem maior autonomia para percorrer longas distâncias.

Ocorreu a descoberta das jazidas de petróleo no estado do Texas proporcionando a diminuição do valor do preço da gasolina para o consumidor final por parte das indústrias petrolíferas (MOWERY & ROSENBERG, 2005).

2.3 Retomada do Sistema de Propulsão do Automóvel com Motor Elétrico

Assim, de acordo com os autores Nicholon (1984), Callon (1986) e Cowan & Hultén (1996), a retomada das pesquisas e produção do veículo elétrico após ter praticamente desaparecido por 50 anos foi motivada por três fatores principais. O primeiro deles refere-se à crise do petróleo em 1973 e os graduais aumentos do preço dos combustíveis fósseis, que acabaram por encarecer o custo do automóvel com motor a combustão interna. O segundo refere-se ao plano de fundo dos debates e acordos políticos pautados pela agenda ambiental na década de 1970. E o terceiro fator envolve a questão da saúde pública dirigidos aos problemas de saúde causados pela emissão de poluentes vindos dos veículos com motor a combustão interna nas grandes cidades.

Segundo Noce (2009), ultimamente se destaca no mercado internacional e nacional interesse do aprimoramento e comercialização de veículos elétricos.

Ainda Baran (2012) destaca os problemas de saúde causados pela emissão de poluentes proporcionados pelos veículos com motor à combustão interna e as questões relacionadas ao desenvolvimento sustentável por meio da utilização de recursos naturais de forma racional e controlada.

Perujo, *et al.* (2011), relataram que em 2006, cerca de 31% de toda energia disponível é consumida pelo setor de transportes, sendo que 82% são destinados ao transporte rodoviário que é responsável pela emissão de 25% de CO₂. No ano de 2007 o setor de transportes foi responsável pela emissão de 71% de CO₂, e os automóveis emitiram 63% de CO₂ segundo a *International Energy Agency* (IEA), indicando que o setor de transportes foi responsável por 17% de toda emissão de CO₂ relacionadas à energia.

Para as pessoas que vivem em regiões com alta concentração de poluentes, entre os problemas de curto prazo (um e cinco anos), podem-se destacar as irritação nas mucosas do nariz, nos olhos, na garganta e ainda problemas respiratórios com agravamento de enfisema pulmonar e bronquite. E entre os problemas de médio prazo (cinco e quinze anos), podem-se destacar os problemas pulmonares e cardiovasculares, diminuição da expectativa de vida em até dois anos e potencializar patologias fisiológicas e psicológicas (ARBEX, 2012).

Sobre o aspecto da sustentabilidade, os derivados de petróleo são os principais combustíveis utilizados pelos veículos automotores em todo o mundo, mas novas fontes de energia estão sendo desenvolvidas, e a tendência é o petróleo perder progressivamente sua prevalência, e aos poucos sendo substituído por fontes de energia renovável. Isso indica que as próximas décadas podem marcar o fim da era dos combustíveis fósseis, proporcionados

uma dinâmica econômica ambiental com foco na sustentabilidade em todo o mundo (ALVES, 2011).

O veículo elétrico é colocado como uma das soluções possíveis para o problema da emissão de poluentes dos veículos, dado que o veículo elétrico puro não emite qualquer poluente nocivo à atmosfera. A característica de emissão zero de poluentes tem sua justificativa no grande rol de inovações dos componentes, exemplificados pelas baterias e motores elétricos. Mesmo os veículos elétricos híbridos, os quais contemplam um motor a combustão interna em sua configuração mecânica emite níveis de poluentes abaixo dos veículos dedicados ao motor à combustão interna (COALITION, 2014).

Em um cenário, onde a procura de uma maior economia de combustível e, a redução dos níveis de emissões sem o sacrifício no desempenho do veículo, a segurança, a confiabilidade e a manutenção, o carro híbrido foi um dos maiores desafios da indústria automobilística, visando uma sustentabilidade maior e emitindo menos poluentes na atmosfera (QUEIROZ, 2006).

Segundo IPEA (2015) existem tecnologias possíveis em veículos que tenham nenhuma ou pouca emissão de gases, os carros elétricos, os veículos com células de hidrogênio e os veículos de combustão de hidrogênio se destacam. Entretanto, substituição dos atuais veículos movidos a combustíveis fósseis é uma atividade complexa, pois, existem outros fatores que devem ser considerados como o custo dos veículos elétricos, disponibilidade de energia elétrica e os níveis de emissões requeridos para gerá-la; redes de manutenção, as preferências dos consumidores, os aspectos relacionados a segurança e os fatores econômicos dos veículos elétricos.

2.4 Energia Eólica

A energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Com isto o seu aproveitamento ocorre em meio de uma conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, isto tudo ocorre com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade (ou cata-ventos), e moinhos, para trabalhos mecânicos como bombeamento de água (COSTA, 2009).

A energia eólica já vem sendo utilizada há milhares de anos para moagem de grãos, para mover barcos impulsionados por velas, para bombeamento d'água, entre outras aplicações mecânicas.

O consumo de energia elétrica tem crescido nas últimas décadas nas áreas residenciais e industriais, dessa forma os governantes de todo o mundo se viram obrigados a estudar novas fontes de fornecimento de energia, fontes renováveis de energia (TOLMASQUIM, 2003).

Segundo Argentino e Beppu (2007) a energia eólica ou dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares no mundo, sua utilização para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e um dos precursores para esta tecnologia foi a indústria aeronáutica, evoluindo rapidamente.

No início da década de 70, houve um grande interesse dos países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que pudesse ajudar a diminuir a dependência do petróleo e carvão.

Ocorreu também um espantoso aumento da capacidade de geração de energia eólica na Europa, especialmente na segunda metade da década de 90, isso devido a queda do uso do carvão como uma alternativa principal para a geração de eletricidade, juntamente com o desenvolvimento tecnológico dos projetos de energia eólica surgiram sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas.

A conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade é feita através de aerogeradores, que são constituídos, basicamente, por: turbina ou rotor eólico; sistemas integrados ou auxiliares, sistema de orientação, caixa de multiplicação de velocidade, o sistema de segurança e um gerador elétrico.

A principal forma de caracterizar um aerogerador é quanto à configuração do eixo do rotor. Existem, basicamente, dois tipos de aerogeradores: com rotor de eixo vertical ou com rotor de eixo horizontal.

As turbinas de eixo vertical são montadas verticalmente em relação ao seu eixo, o que significa que elas operam em altitudes mais baixas, recebendo o fluxo de ar próximo ao solo com maior turbulência. Por isso, devem operar em frequência mais lenta, resultando em menor eficiência de extração energética, não necessitam de um mecanismo de orientação em relação à direção do vento incidente, pois sempre estão permanentemente alinhadas ao vento tornando seu custo é mais baixo.

A Figura 6 apresenta um exemplo de uma turbina vertical em uma configuração helicoidal.



Figura 6 - Turbina eólica vertical Gorlov.

Fonte: solar-wind-nature-energy.com/win_turbines_vt.html, 2017.

As turbinas de eixo horizontal Figura 7 necessitam do mecanismo de orientação usado para girar o rotor e mantê-lo de frente para o vento, extraíndo o máximo de energia eólica, tornando o custo mais elevado, porém apresentam maior eficiência e rendimento, por isso, são os mais conhecidos e os mais utilizados na geração de energia elétrica em larga escala.

Este tipo de turbina contém uma torre para alçar os componentes da turbina a uma altura ideal para a velocidade do vento, ocupando muito pouco espaço no solo, as turbinas eólicas de eixo horizontal podem ser de uma, duas, três, quatro pás ou múltiplas.

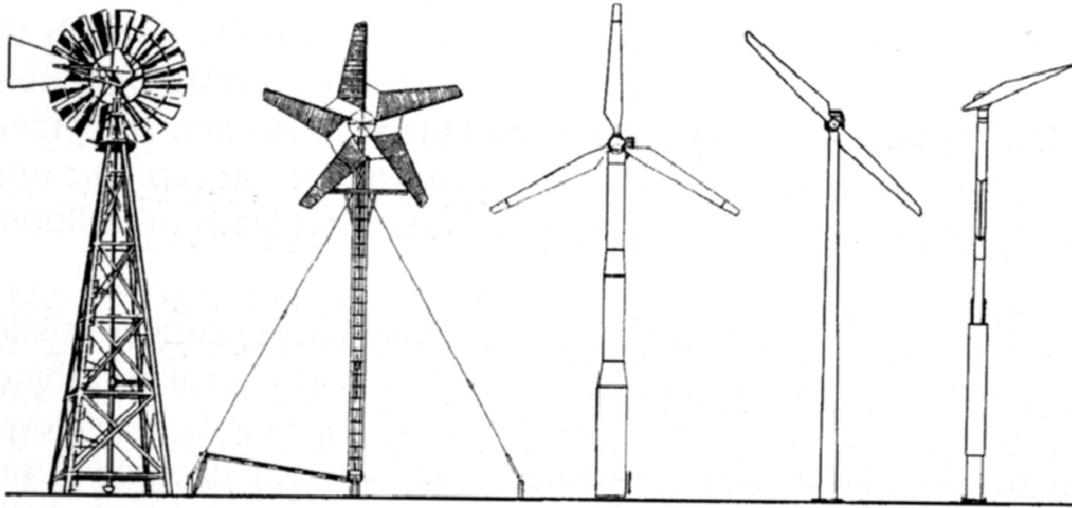


Figura 7 - Turbinas eólicas horizontais.
Fonte: Marques, 2004.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Definições da Aerodinâmica

Segundo Sousa e Gonçalves (2013) o escoamento sobre corpos imersos é uma área da mecânica onde se estuda a passagem de um fluido envolvido por um objeto sólido, porém quando o fluido é o ar, a análise desse escoamento recebe o nome de aerodinâmica. Assim, a aerodinâmica é a área da mecânica dos fluidos que estuda a passagem de ar envolvendo a superfície de um objeto e os efeitos provocados por ela.

Musson *et al.* (2004), analisaram a influencia que a forma do corpo imerso exerce no escoamento do ar, sendo que os corpos aerodinâmicos como aerofólios e carros de corrida provocam pouco efeito no escoamento se comparado com os corpos robustos, como os de para quedas e edifícios. Entretanto, também existem casos em que os objetos é que se movem em direção ao fluido, como os aviões e automóveis.

Quando temos um corpo em movimento através de um fluido, sempre vai haver uma interação entre o corpo e o fluido, esta interação pode ser descrita por forças que estão atuando na interface fluido-corpo, que por sua vez, podem ser descritas em função da sua tensão de cisalhamento, “ τ ”, provocadas pelos efeitos viscosos, e da tensão normal que geralmente é provida da pressão “ p ” (BRUNETTI, 2005). Observa-se as equações 1 e 2:

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_p dA)\sen\theta \quad (1)$$

$$dF_y = -(pdA)\sen\theta + (\tau_p dA)\cos\theta \quad (2)$$

Em que :

F_x = força atuando na direção x;

F_y = força atuando na direção y;

p = pressão;

τ_p = tensão de cisalhamento provocada pela pressão;

A = área do corpo em estudo;

θ = ângulo da força resultante

Portanto a integral da força resultante na direção “x” gera o arrasto D”, que é uma componente na direção do escoamento e a integral da força resultante na direção “y” gera a sustentação “L”, que atua na direção normal ao escoamento (Eq. 3 e 4).

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_p \sin \theta dA \quad (3)$$

$$L = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_p \cos \theta dA \quad (4)$$

Ao observar as equações 3 e 4 vê-se que é preciso conhecer o formato do corpo em estudo, e conseqüentemente a distribuição de pressão ao longo da superfície, o que normalmente é complexo, devido às geometrias. Como alternativa utiliza-se os coeficientes de sustentação “ C_L ” e de arrasto “ C_D ” que são obtidos e analisados através de túneis de vento (mais em 3.3), lugares fechados e contendo enormes ventiladores, que controlados provocam o deslocamento do ar sobre uma superfície em estudo (SOUSA, 2013), (Eq. 5 e 6):

$$C_D = \frac{D}{0,5\rho v^2 A} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{L}{0,5\rho v^2 A} \quad (6)$$

Onde:

D = força de arrasto;

L = força de sustentação;

ρ = densidade do ar;

v = velocidade do objeto;

A = área do objeto.

A princípio, todos os objetos podem ter seu C_D calculado, Gonçalves (2013), e Leitman e Brant (2009), na década de 1980 determinam o coeficiente de arrasto (C_D) dos veículos Figura 8.

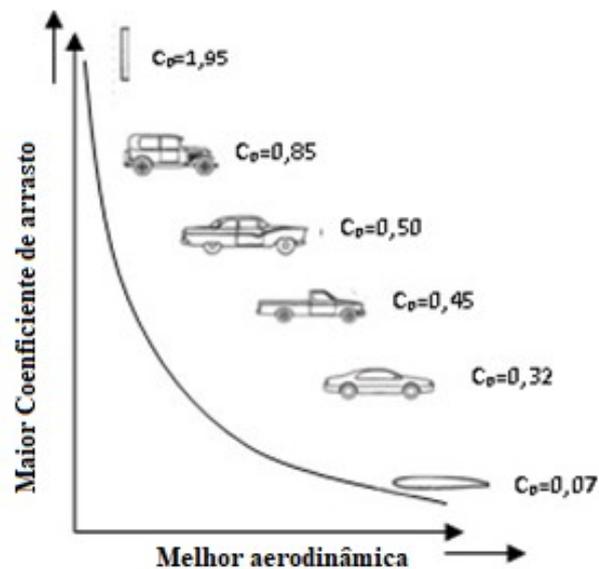


Figura 8 - Diferentes coeficientes de arrasto para diversos tipos de veículos.

Fonte: Leitman e Brant, 2009.

Observa-se na Figura 8, que quanto menor o C_D melhor será o desempenho na aerodinâmica dos veículos, vê-se que a placa plana em pé tem o $C_D = 1,95$ e a aerodinâmica melhor é uma forma de uma gota de água, $C_D = 0,05$.

Dessa forma, C_D depende unicamente número de *Reynolds* “*Re*” porque o escoamento sobre os corpos sólidos dependem também da geometria do corpo, da velocidade do escoamento e das propriedades do fluido. A maneira de descrever o comportamento do escoamento é a utilização do, que é um parâmetro adimensional definido pela equação 7:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (7)$$

Em que:

v = velocidade do escoamento;

ρ = densidade do ar;

μ = viscosidade dinâmica do ar;

L = comprimento do corpo.

O escoamento na camada limite pode ser laminar ou turbulento, o escoamento é laminar quando apresenta um aspecto organizado, isto ocorre quando as partículas do fluido se movem em trajetórias bem definidas e paralelas entre si. Já no escoamento turbulento

ocorre quando as partículas se movem de maneira desorganizada, com movimentos aleatórios e em trajetórias irregulares, como mostra a Figura 9 (SOUSA & GONÇALVES 2013).

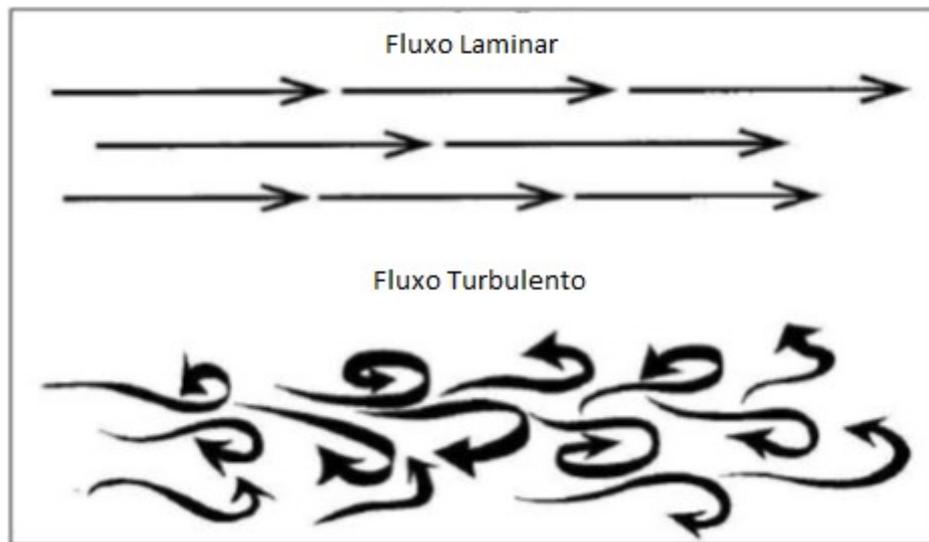


Figura 9 - Escoamento laminar e turbulento.

Fonte: Ribas, 2008

3.2 Forças Aerodinâmicas sobre Automóveis

Segundo Sousa & Gonçalves (2013), os carros em movimento provocam uma perturbação no fluxo de ar, sofrendo ações de algumas forças que interferem diretamente no seu comportamento. Essas forças são provocadas por efeitos viscosos e por diferenças de pressão.

A força de arrasto tem uma grande influência na dirigibilidade e no consumo de combustível. Quando o carro está em movimento é como se ele tivesse que passar por uma parede de ar que está em sua frente obstruindo sua locomoção. Durante a passagem do fluxo de ar pelo automóvel com uma velocidade constante pode-se criar o efeito que chamamos de viscosidade da camada limite. O escoamento nessa camada é laminar até o chamado ponto de transição, e a partir daí o escoamento passa a ser turbulento e o aumento repentinos da espessura da camada limite observados na Figura 10 (SOUSA & GONÇALVES, 2013).

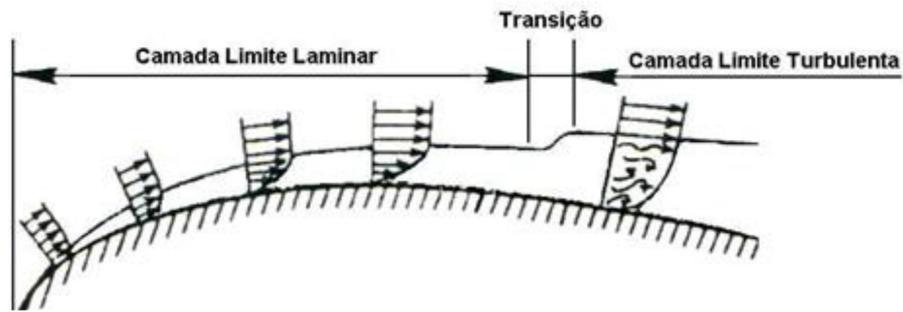


Figura 10 - Escoamento na camada limite.

Fonte: Sousa, 2005.

Um dos fatores que influenciam o ponto de transição é o número de *Reynolds*, quanto maior é o espaço percorrido pelo escoamento laminar, devido a uma superfície rugosa, mais rápida será a transição do escoamento laminar para o turbulento, claro que exceto alguns objetos como a bola de golfe, em que a rugosidade ajuda em seu escoamento (SOUSA, 2013).

De acordo com Girardi (2002) para os automóveis o interessante é obter uma sustentação negativa, que é chamada de *downforce*. Esta sustentação indica que a velocidade do fluxo de ar que passa na parte inferior do veículo deve ser maior que na parte superior, diminuindo assim a sua pressão e fazendo com que o veículo fique mais aderente ao chão ao invés de suspê-lo, como acontece com os aviões. Porém, estes fluxos de ar geram forças de atrito, que dão origem a força de arrasto (F_D) (Eq. 8).

Observa-se contudo, que a sustentação é uma força que não tem muita influência nos veículos terrestres, mas com base na Figura 8, deve-se levar muito em consideração no projeto de um automóvel a força de arrasto, como mostra a Figura 11.

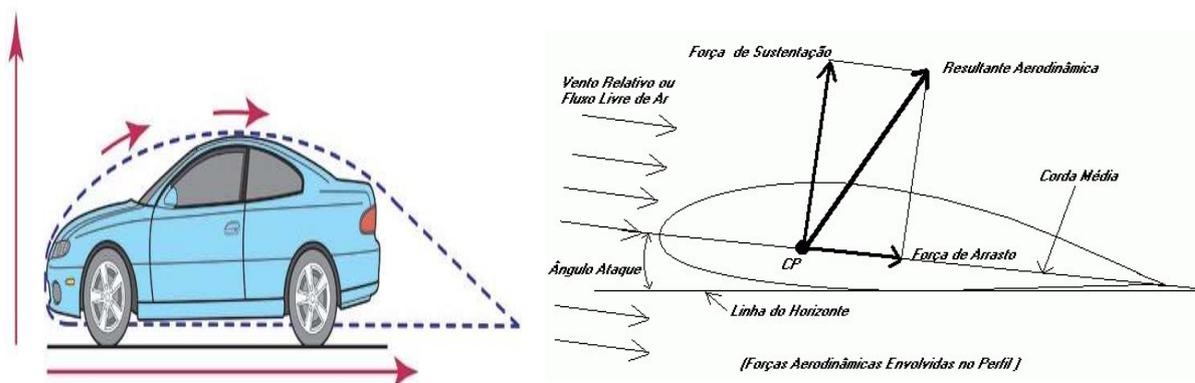


Figura 11 – Forças que atuam em um perfil aerodinâmico.

Fonte: Adaptado de Dantas, 2012.

Para Bosch (2005) parte da força de arrasto (F_D) é devida à fricção do corpo do veículo que se desloca através do ar, agindo na área frontal do veículo e desta forma saliências como espelhos laterais, dutos e passagens de ar, *spoilers* afetam esta força. A determinação da F_D é dada pela Equação 8:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot v^2 \quad (8)$$

Em que:

ρ = densidade do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

A = área frontal (m^2)

v = velocidade. (m/s)

C_D = coeficiente de arrasto (adimensional).

Segundo Larminie e Lowry (2003), a densidade do ar naturalmente varia com a temperatura, altitude e umidade, mas é convencionados valores de acordo com a variação das temperaturas podendo chegar a -10°C na casa de $1,342 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a 30°C $1,165 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, esta variação esta obedecendo às unidades no Sistema Internacional.

3.3 Túnel de vento

Na década de 80, a busca por coeficientes de arrasto aerodinâmicos cada vez menores levou as montadoras a investir na construção de túneis de ventos automotivos para a aplicação dos métodos de otimização dos detalhes de formas nos veículos, pois já eram utilizados no seguimento aeronáutico, (CASTEJON, 2001).

Crolla (2009) salientou que hoje em dia a maioria dos carros novos desenvolvidos passa por um significativo programa de testes em túnel de vento. Existem configurações diferentes de túnel de vento, alguns com testes comparativos que têm demonstrado consistentemente que as forças e momentos obtidos a partir de diferentes instalações podem diferir consideravelmente nos resultados.

Os túneis de vento, são classificados em dois grupos, devido às diferenças geométricas: os túneis de circuito fechado e os de circuito aberto (CASTEJON, 2011).

- **Túneis de circuito aberto** estão constantemente renovando o ar utilizado durante o ensaio. São constituídos basicamente por uma seção convergente, seção de testes,

difusor e na parte final do tudo um motor, que juntamente ao ventilador promove o fluxo de ar. O ar captado pela atmosfera passa por uma espécie de colméia que visa diminuir a turbulência, em seguida, este “ar acelerado” na parte convergente envolve o protótipo analisado e gera os esforços aerodinâmicos (KATZ, 1995).

- **Túneis de circuito fechado** possuem uma massa de ar que ao passar pelas hélices é conduzida novamente à região convergente, sendo assim não há uma interação com o ar atmosférico. Os ventiladores são posicionados na região anterior a seção convergente para que a temperatura não tenha um aumento gradativo. A vantagem desta configuração é uma menor potência do motor para movimentar a massa de ar, que possui certa velocidade, e tendo uma redução no seu custo operacional (HUCHO, 1998).

Para Katz (1995) túneis mais avançados apresentam uma seção de testes com características intermediárias de seção aberta e fechada que são denominados de **túneis de vento de parede estolada**. Estes túneis permitem que o ar passe pelo o protótipo de forma que as linhas de correntes não sofram alterações e não comprometam a análise aerodinâmica. Estas paredes são compostas por placas articuladas e ajustadas dependendo das dimensões do protótipo que será estudado, no caso destes túneis até 30% da área das paredes podem ser abertas para se testar os protótipos maiores.

3.4 Aspectos Fundamentais da Dinâmica Veicular

Em um dado instante de tempo o veículo está sujeito a uma ação da aerodinâmica atuando em pontos e direções diferentes. Para calcular estas direções é necessário definir um sistema de coordenadas pela qual os movimentos do veículo e ações aerodinâmicas possam a ser referenciados (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995).

Para mensurar as mudanças no movimento do veículo, e descrever a sua trajetória em relação à Terra, existem dois sistemas de coordenadas mencionados pela SAE (Society of Automotive Engineers): sistema fixo no veículo e o sistema inercial (BRAND, 2010).

O sistema de coordenada fixo no veículo tem a sua origem no centro de gravidade e se movimenta com ele, originalmente estudo na dinâmica de aviões. As propriedades de inércia deste permanecem constantes em relação ao sistema.

O sistema de coordenadas inercial permanece fixo em relação a um observador externo e é utilizada como referência para o movimento do veículo. A trajetória do veículo é

definida em relação ao sistema ortogonal sendo que a sua origem geralmente coincide com a origem do sistema de coordenadas do veículo no início da manobra.

Para alinhar os dois sistemas, o sistema inercial é inicialmente rotacionado primeiramente em torno do eixo z, depois em torno do eixo y e por último e torno do eixo x através dos ângulos de Euler.

A Figura 12 mostra como o sistema de coordenadas x, y e z se aplica.

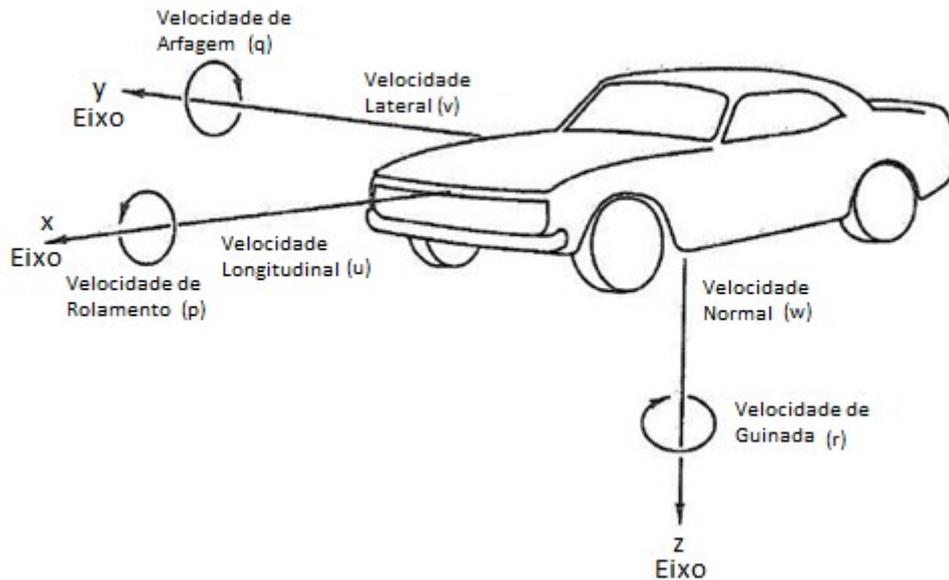


Figura 12 – Sistemas de coordenadas do veículo definido pela SAE.

Fonte: Milliken; Milliken, 1995.

Estes sistemas de coordenadas do veículo são definidos como:

u = velocidade longitudinal, positiva para frente do veículo;

v = velocidade lateral, positiva para o lado direito do veículo;

w = velocidade vertical, positiva para baixo em relação ao veículo;

p = velocidade de rolagem em torno do eixo x;

q = velocidade de arfagem em torno do eixo y;

r = velocidade de guinada em torno do eixo z.

Leitman (2009) e Costa (2009) informam que a primeira etapa para a modelagem do veículo elétrico é equacionar a força de tração total, que propulsiona o deslocamento do veículo para frente e é transmitida para o solo através do acionamento das rodas. Esta força tem que superar a resistência ao rolamento; superar o arrasto aerodinâmico; superar o seu peso ao atingir uma inclinação; acelerar o veículo quando a velocidade não for constante (LARMINE & LOWRY, 2003).

A Figura 13 mostra as forças de atuação sobre o veículo considerando a sua massa “ m ”, a sua velocidade acima de uma inclinação de ângulo Ψ .

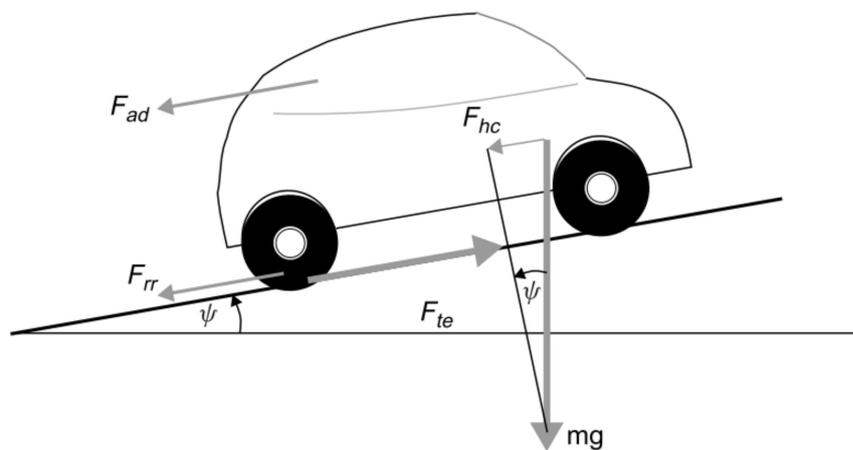


Figura 13 - As forças atuantes em um veículo.

Fonte: Laminie e Lowry, 2003.

A equação 9 expressa a força de tração total do veículo elétrico:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{wa} \quad (9)$$

Onde:

F_{te} = força total de tração;

F_{rr} = força de resistência ao rolamento;

F_{ad} = força de arrasto aerodinâmico;

F_{hc} = força para vencer a inclinação;

F_{la} = força necessária para se obter uma aceleração linear;

F_{wa} = força necessária para se obter a aceleração angular de rotação do motor;

mg = força que o veículo exerce sobre o solo devido à sua massa m .

A resistência ao rolamento (Eq.10) é constante proporcional ao seu peso e acontece devido ao atrito dos pneus do veículo em contato com uma superfície, a sua fricção em rolagem é também desempenhada pelo sistema de engrenagem que ameniza este atrito (LARMINIE & LOWRY, 2003):

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (10)$$

Onde

μ_{rr} = coeficiente de resistência ao rolamento;

g = constante gravitacional $9,8\text{m/s}^2$.

Os principais fatores que controlam o μ_{rr} são: os tipos de pneus, a pressão que é calibrada os pneus e o tipo de superfície de contato.

Para Bosch (2005), o valor de μ_{rr} pode facilmente ser encontrado medindo a força necessária para o veículo tracionar a uma velocidade muito baixa e constante. O valor típico de μ_{rr} para um pneu radial é 0,013 é cerca de 0,002 para pneus desenvolvidos especialmente para veículos elétricos. Também em subidas a força necessária para o veículo vencer a inclinação " F_{hc} " depende do componente peso do veículo " m ", que atua ao longo da subida de inclinação ψ (Eq.11):

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \text{sen}\psi \quad (11)$$

Para Larminie e Lowry (2003) a velocidade do veículo muda de acordo com a sua aceleração, então teremos uma força que será aplicada em adição às forças da Figura 13, esta força irá fornecer a aceleração linear " a " do veículo dada pela segunda lei de Newton (Eq.12).

$$F_{la} = m \cdot a \quad (12)$$

Portanto, para uma força acelerar o veículo, é necessário considerar também a força para fazer as partes rotativas do mesmo girar mais rápido, no entanto é preciso considerar a aceleração de rotação, bem como a aceleração linear. Vale ressaltar que o motor envolvido é elétrico tendo momento de inércia elevado e altas velocidades angulares.

O torque no eixo “T”, está relacionado diretamente com o raio do pneu “r” e o esforço de tração transmitido pelo trem de força “F_{te}” porem inversamente relacionado a relação de transmissão do sistema “G”: Já a força de tração efetiva “F_{tef}” necessária na entrada da transmissão é diretamente relacionada com o torque e com “G” porem inversamente proporcional ao raio (Eq.13).

$$T = \frac{F_{te} \cdot r}{G}$$

$$F_{tef} = \frac{G}{r} \cdot T = \frac{F_{te}}{G} \quad (13)$$

A Figura 14 exemplifica de forma simples a ligação do motor com a roda

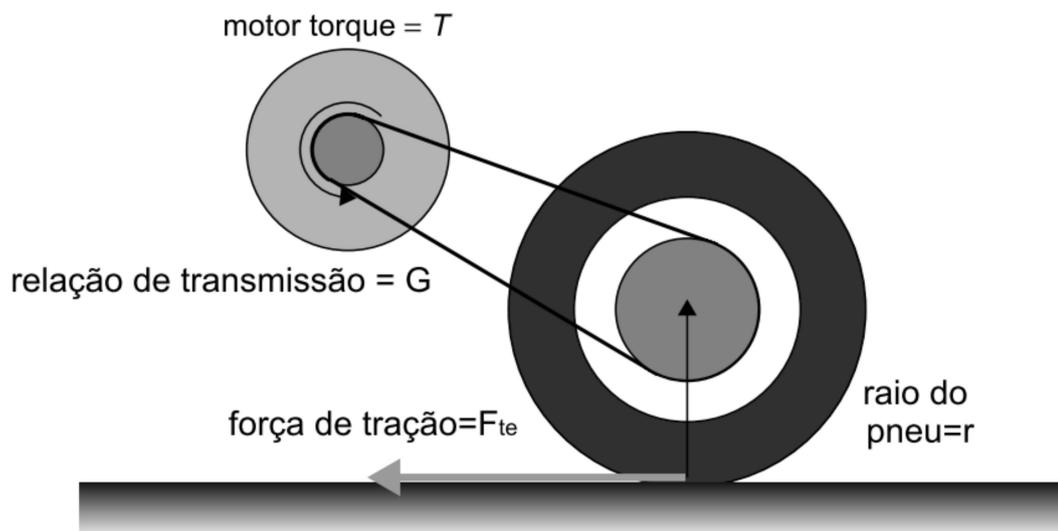


Figura 14 - Arranjo simples da ligação de um motor com a roda.

Fonte: Larminie e Lowry, 2003.

Com relação à velocidade angular, observa-se seu relacionamento direto com a relação de transmissão e velocidade do veículo (Eq.14). Esta equação é usada também para desenvolver equações finais para o desempenho do veículo.

$$\omega = G \cdot \frac{v}{r} \quad (14)$$

Dessa forma a aceleração angular do motor dá se pela equação 15.

$$a = \frac{\omega r}{G} \quad (15)$$

Portanto, o torque requerido pela aceleração angular que é visto na equação 16, relaciona-se com o momento de inércia do rotor:

$$T = I \cdot G \cdot \frac{a}{r} \quad (16)$$

A força necessária às rodas para fornecer a aceleração angular (F_{wa}) pode ser encontrada através da combinação das equações 14 e 16, sendo:

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} \cdot I \cdot G \cdot \frac{a}{r} = I \cdot \frac{G^2}{r^2} \cdot a \quad (17)$$

3.5 Dinâmicas dos Fluidos Computacional (CFD)

A Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma área de grande interesse para a solução de muitos problemas práticos, podemos citar como exemplos problemas de aerodinâmica, termodinâmica, hidráulica, dentre outros.

Os experimentos nesta área de pesquisa são embasados em métodos teóricos e desenvolvidos através de métodos computacionais aplicados à Dinâmica dos Fluidos.

O escoamento de fluido, e o modelo matemático são estabelecidos com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia e estas equações, quando submetidas a condições de contorno e iniciais apropriadas, representam matematicamente um problema particular (SHAMES, 1973). A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos simples, para se analisar problemas reais utilizam-se os métodos numéricos.

O CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como é um *software* comumente conhecido para o cálculo de dinâmica dos fluidos, fornecendo resultados quantitativos definidos os seguintes parâmetros:

- Geometria (forma e tamanho do domínio, entradas e saídas, blocos);
- Propriedades dos fluidos (viscosidade, densidade, condições térmicas);
- Condições iniciais (quando o escoamento é dependente do tempo);
- Condições de contorno (especificações de entrada e saída de massa, momento e energia no domínio da simulação).

Gaylard (2009) destacou que o CFD, assim como em análise em um túnel de vento possui suas vantagens e desvantagens, assim deve-se encarar como uma ferramenta complementar ao túnel de vento e não concorrente.

4. MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO

4.1 Veículo Elétrico Adaptado

No Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté encontra-se disponível uma *pickup VW Saveiro* 1994 Figura 15, em fase de instalação um motor elétrico de tração e indução trifásico Figura 16 (a), com uma potência nominal de 12kW (16 CV) com pico de 24kW, com um torque nominal mínimo de 65Nm e máximo de 130Nm com uma rotação que varia entre as faixas de 1700rpm a 6000rpm.



Figura 15 – Veículo elétrico adaptado modelo saveiro.

A conversão do veículo elétrico (VE) é realizada através do aproveitamento da parte de transmissão do Saveiro e de toda a estrutura mecânica e elétrica originais de fábrica.

Deste modo o motor elétrico Figura 16 (a) será controlado por um inversor de frequência Figura 16 (b) conectado a 72V DC, sendo alimentado por um banco de seis baterias tracionárias de tensão nominal de 12V ligadas em série, totalizando 72V e uma potência de 8,28kW. Cada bateria tem a capacidade de 115Ah, proporcionando assim uma autonomia ao VE de aproximadamente 17 minutos em condições máximas de sua operação.

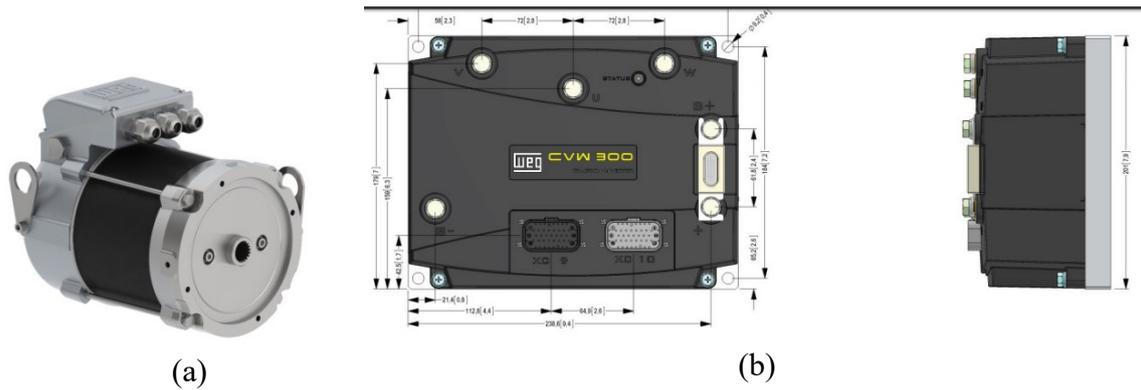


Figura 16 – (a) Motor elétrico e (b) Inversor de Frequência.

Fonte: WEG

Segundo Freitas (2015), o rendimento de uma bateria é dado pela relação entre a energia que ela fornece e a energia necessária para repor as condições iniciais. Dessa forma, ao se falar em rendimento de uma bateria engloba-se o rendimento da carga e da descarga. O tempo de descarga (em horas) de uma bateria para uma temperatura ambiente proposto por Peukert, pode ser calculado através da equação 18:

$$t_{desc} = \frac{C_p}{I^n} \quad (18)$$

Onde:

C_p , n = constantes de Peukert determinadas através de testes de profundidade de descarga;

t_{desc} = tempo de descarga em horas;

I = corrente nominal.

O cálculo da corrente nominal é feito pela equação 19:

$$I = \frac{C_{nom}}{t_{nom}} \quad (19)$$

Onde:

C_{nom} = capacidade nominal (em Ah);

t_{nom} = tempo de descarga nominal.

Para o cálculo da corrente nominal a real autonomia da bateria tracionaria, deve-se olhar a referencia do fabricante em relação às duas capacidades de descarga, Larminie *et al.* (2003) e resolver a equação 19.

Como exemplo de cálculo da profundidade de descarga, tem-se uma bateria tracionaria de 12V e os cálculos serão feitos para $C_{20} = 115\text{Ah}$ e $C_5 = 90\text{Ah}$

$$I_1 = \frac{C_{nom}}{t_{nom}} \rightarrow I_1 = \frac{115}{20} \rightarrow I_1 = 5,75A$$

$$I_2 = \frac{C_{nom}}{t_{nom}} \rightarrow I_2 = \frac{90}{5} \rightarrow I_2 = 18A$$

Para o cálculo da constante n de *Peukert*, temos $I_1^n \times t_{desc1} = I_2^n \times t_{desc2}$ que é determinada pela equação 20.

$$n = \frac{\log(t_{desc2}) - \log(t_{desc1})}{\log(I_1) - \log(I_2)} \quad (20)$$

Substituindo os valores, obtêm-se:

$$n = \frac{\log(5) - \log(20)}{\log(5,75) - \log(18)} \rightarrow n = 1,214$$

Com estes valores é possível calcular a outra constante de *Peukert*, c_p , presente na equação 18:

$$t_{desc} = \frac{C_p}{I^n} \rightarrow c_p = t_{desc} \times I^n \rightarrow C_p = 18^{1,214} \times 5 \rightarrow C_p = 167,05 \text{ Ah}$$

Por fim, para uma dada corrente nominal com 192A, o tempo estimado de descarga da bateria para o veículo utilizar a sua configuração máxima de potência dá-se resolvendo a equação 20:

$$t_{desc} = \frac{C_p}{I^n} \rightarrow t_{desc} = \frac{167,05}{192^{1,214}} = t_{desc} = 0,2824 \text{ horas} \approx 17 \text{ min.}$$

A equação 21 mostra o calculo da energia estimada para a corrente nominal do motor elétrico:

$$kWh = \frac{B_{bat} \cdot C_{nm} \cdot t_{desc}}{h} \quad (21)$$

Onde:

B_{bat} = potência do banco de baterias;

C_{nm} = corrente nominal do motor

t_{desc} = tempo de descarregamento das baterias.

Portanto aplicando valores tem-se:

$$kWh = \frac{72 \cdot 192 \cdot 17}{60} \rightarrow kWh = 3,92$$

Esses cálculos mostram o tempo de descarga da bateria e o consumo de energia que o veículo elétrico irá utilizar sem a implantação de nenhum subsistema de micro geração de energia. Porém com a instalação de uma turbina eólica tem-se um pequeno acréscimo na geração da energia máxima do veículo.

De acordo com Marlec (2008) a turbina eólica gera uma potência de 80W a mais para o banco de baterias do VE ao atingir a velocidade de entrada de 17,82 m/s.

4.2 Modelagem do Saveiro

A modelagem utilizada para se obter os cálculos do veículo elétrico é feita através das equações de Navier Stokes, um conjunto de equações diferenciais não lineares que descrevem o escoamento de um fluido e conservação de massa (Eq.22 e 23, respectivamente). Estas equações são internas ao *software ANSYS CFX 2018* que realiza técnicas numéricas iterativas a fim de aproximar-se do resultado de um escoamento real.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (23)$$

Sendo:

ρ = massa específica;

t = tempo;

x, y e z = coordenadas cartesianas dimensionais;

τ_{ij} = forças viscosas normais ao plano ij ;

u, v e w = velocidades do fluido nas direções x, y e z respectivamente.

A Figura 17 apresenta a modelagem e as suas respectivas dimensões do protótipo do saveiro, confeccionadas através do *software INVENTOR 2017*.

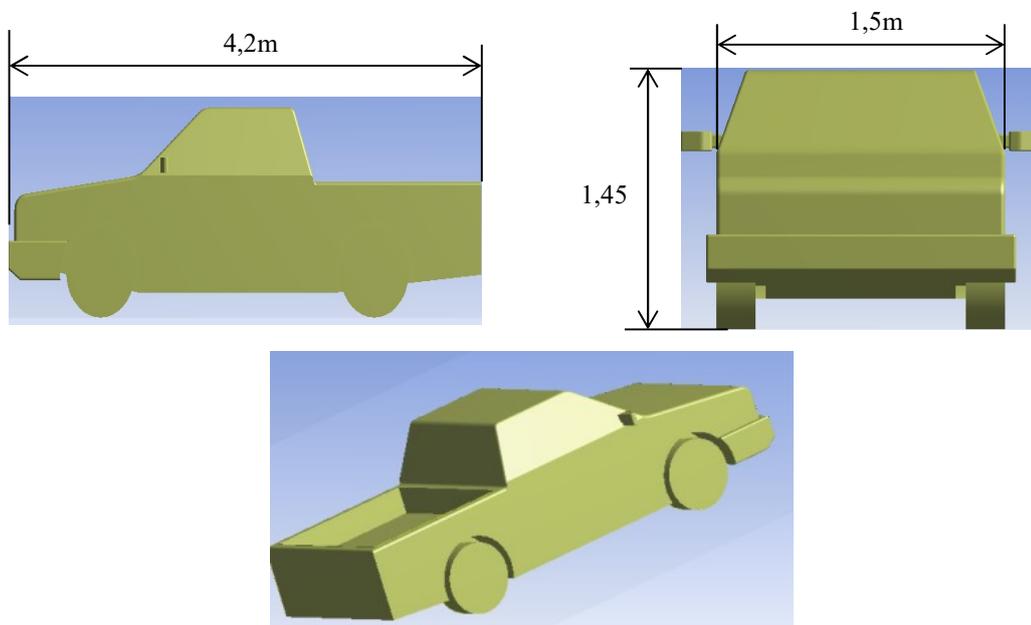


Figura 17 - Modelagem do Saveiro utilizando o software Inventor.

Primeiramente avaliamos na literatura o perfil e o desempenho do veículo a ser implantado ao subsistema.

Para Souza (2013), é preciso conhecer o formato (área) do corpo em estudo “A”, a densidade do ar “ ρ ”, a força de arrasto “ F_D ” e a velocidade do objeto “ v ” para se obter os coeficientes de arrasto C_D e sustentação C_L (Eq. 24 e 25).

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho v^2 A} \quad (24)$$

$$C_L = \frac{F_D}{0,5\rho v^2 A} \quad (25)$$

Através de medidas tomadas no veículo, vistas na Figura 18 obtêm-se as áreas utilizadas no cálculo da modelagem da força de arrasto (F_D).

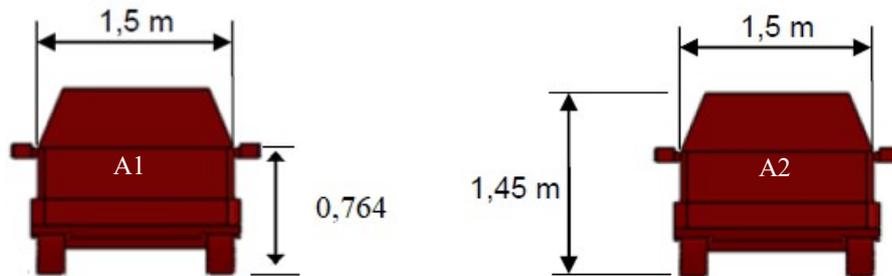


Figura 18 – Área frontal do veículo elétrico.

De posse do C_D (Fig. 8) e das áreas medidas podemos calcular as Forças de arrasto através das equações 26 e 27.

$$F_{D1} = C_D \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_1 \quad (26)$$

$$F_{D2} = C_D \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_2 \quad (27)$$

Em que:

C_D = o coeficiente de arrasto;

F_D = a força de arrasto medida em (N);

ρ = a densidade do ar (kg/m^3) 1,18 para temperatura de 25°C;

v = a velocidade do objeto (m/s);

A = área de projeção do objeto m^2 .

Unificando as forças tem-se a força de arrasto do veículo elétrico, mostrada na Equação 28:

$$F_{DVE} = F_{D1} + F_{D2} \quad (28)$$

Para fins práticos, as velocidades testadas foram retiradas do manual técnico Marlec (2008) da turbina eólica a ser implantada no veículo.

A Figura 19 mostra o gráfico da modelagem utilizando a equação 28 variando-se as velocidades.

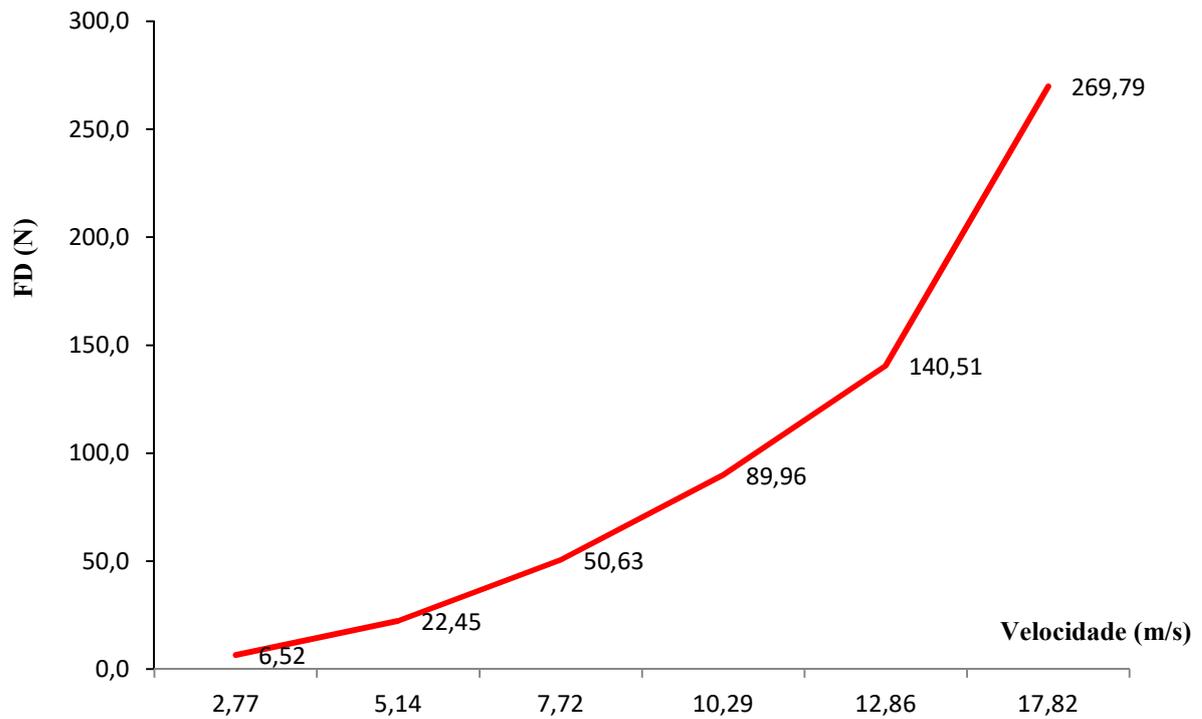


Figura 19 – Força de arrasto x velocidade do modelo matemático do saveiro.

Para cada valor de velocidade de entrada especificada foram realizadas simulações de desempenho de força de arrasto a fim de se localizar o ponto de maior velocidade para um melhor aproveitamento da energia eólica, apresentados nas Figuras 20 a 24.

A Figura 20 apresenta uma simulação do veículo elétrico com uma velocidade de entrada de 2,77m/s e observa-se que o fluido de ar passando pelo veículo tem seu maior valor no teto.

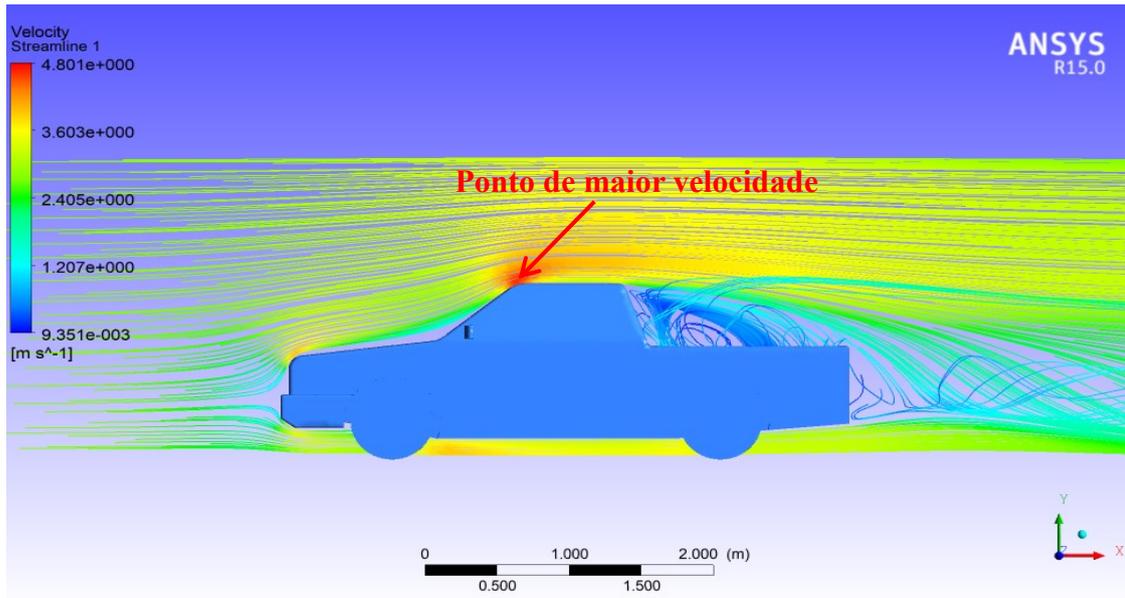


Figura 20 – Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 2,77 m/s.

A Figura 21 apresenta a velocidade de entrada de 5,14 m/s e também observa-se a maior velocidade no teto.

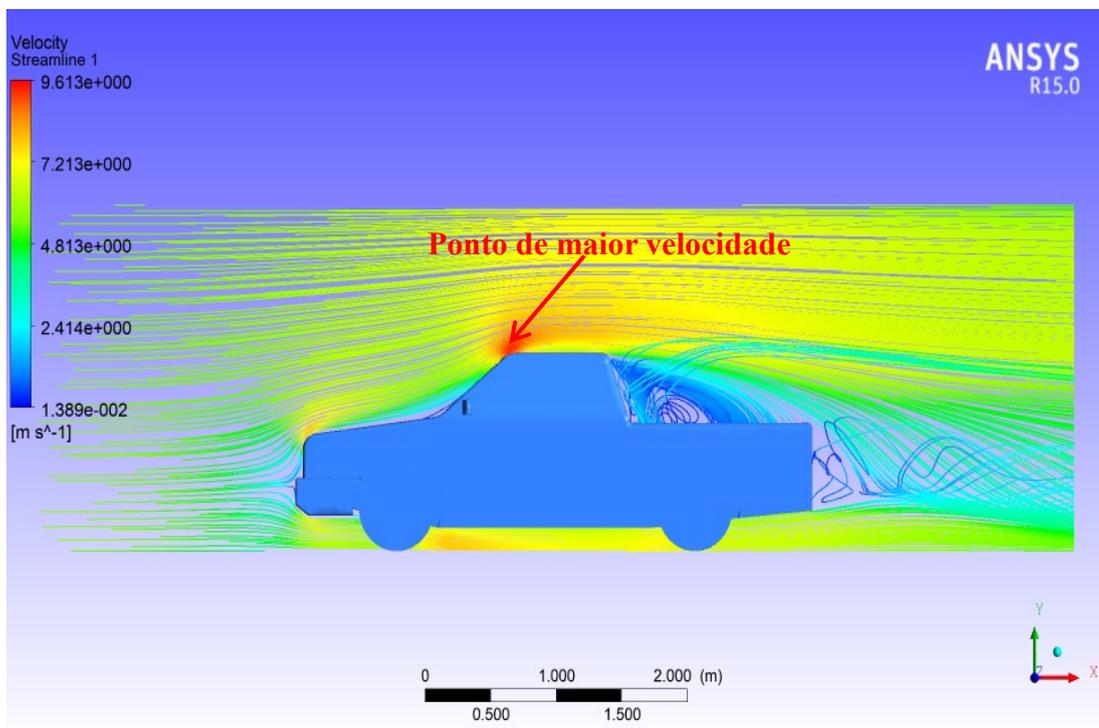


Figura 21 - Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 5,14 m/s.

A Figura 22 continua mostrando que a maior velocidade encontrada é no teto, para a velocidade de entrada de 7,12 m/s.

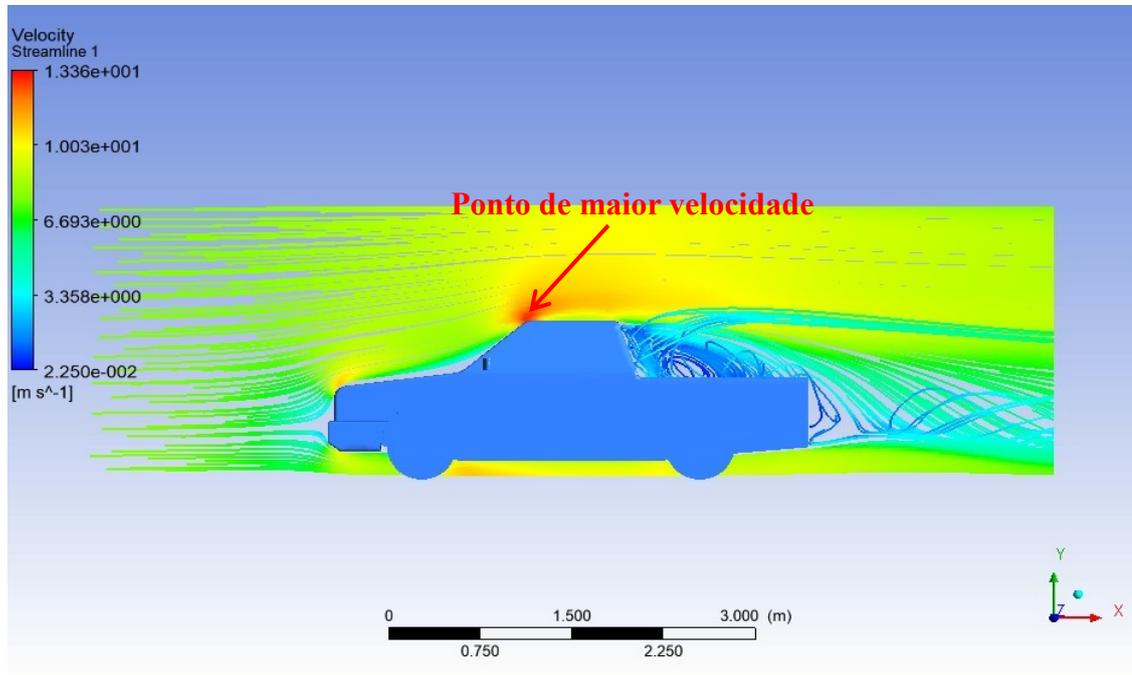


Figura 22 - Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 7,12 m/s.

Com a velocidade de entrada de 10,29 m/s, a Figura 23, confirma que o ponto de maior velocidade é no teto.

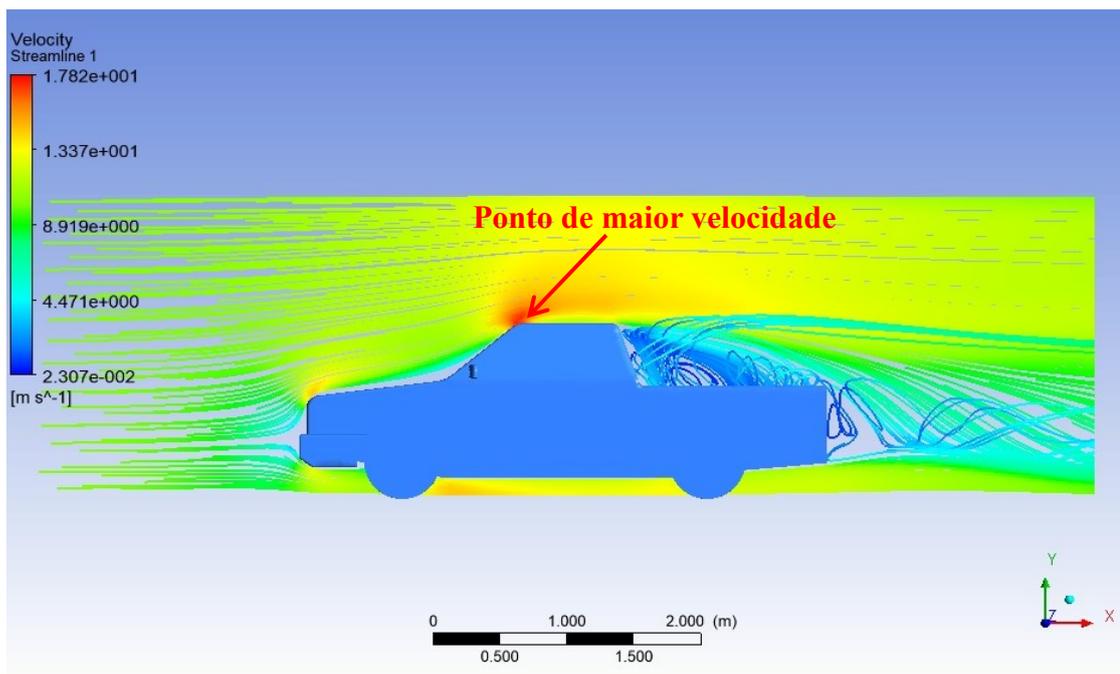


Figura 23 - Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 10,29 m/s.

Na Figura 24, observa-se um ponto ligeiramente acima do teto que define que o valor exato da velocidade no teto do veículo é de 21,5364 m/s. Esta simulação foi realizada com a velocidade de entrada de 12,86 m/s.

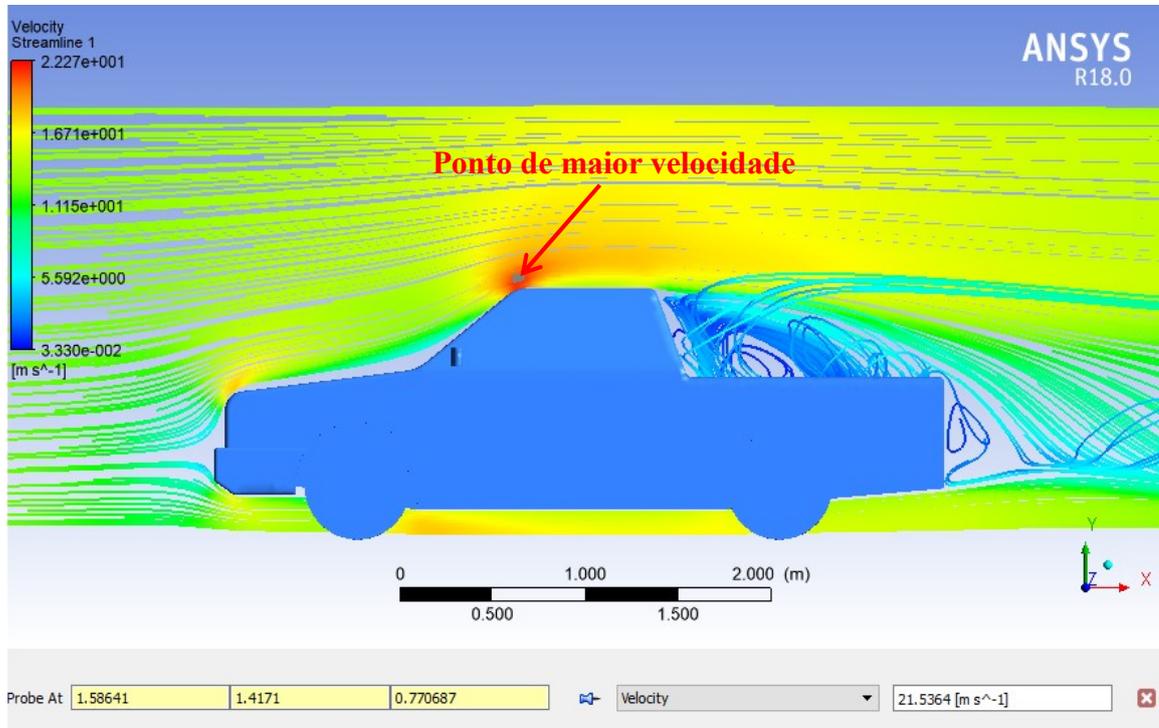


Figura 24 - Simulação do fluido ar com velocidade de entrada de 12,86 m/s.

Analisando os fluxos de velocidade, pode-se concluir que no teto esta a maior passagem de ar, sendo assim em primeira análise seria possível a instalação da turbina eólica.

As Figuras 25 a 30 mostram gráficos da força de arrasto “ F_D ” variando com as velocidades de entrada em cada simulação. Para facilitar a comparação de resultados utiliza-se valores sempre na mesma iteração, no caso 80°, compatível à 80%..

A Figura 25 mostra o gráfico da “ F_D ” com velocidade de entrada de 2,77 m/s.

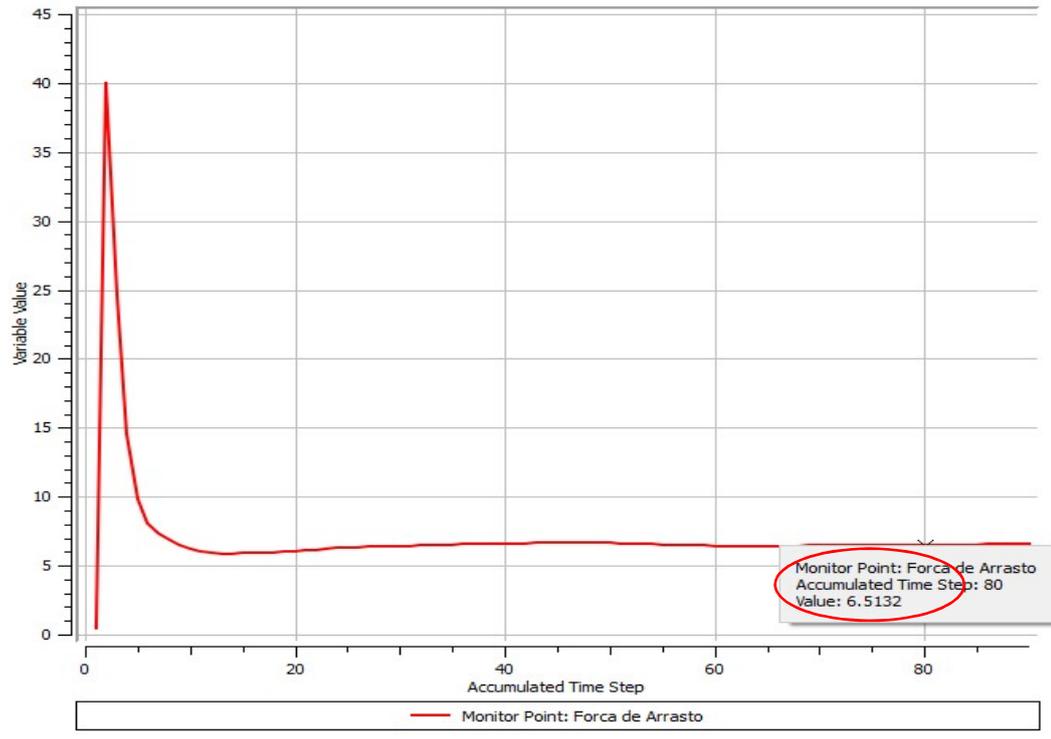


Figura 25 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 2,77 m/s.

Na Figura 26 vê-se o gráfico com velocidade de entrada de 5,14 m/s.

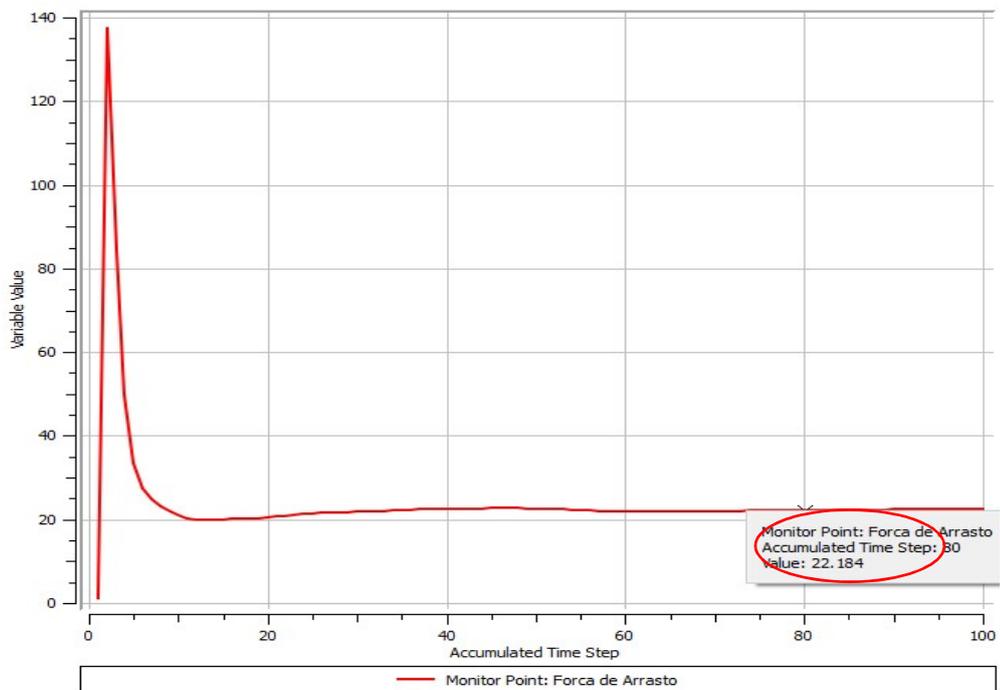


Figura 26 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 5,14 m/s.

A velocidade de entrada de 7,12 m/s é mostrada na Figura 27.

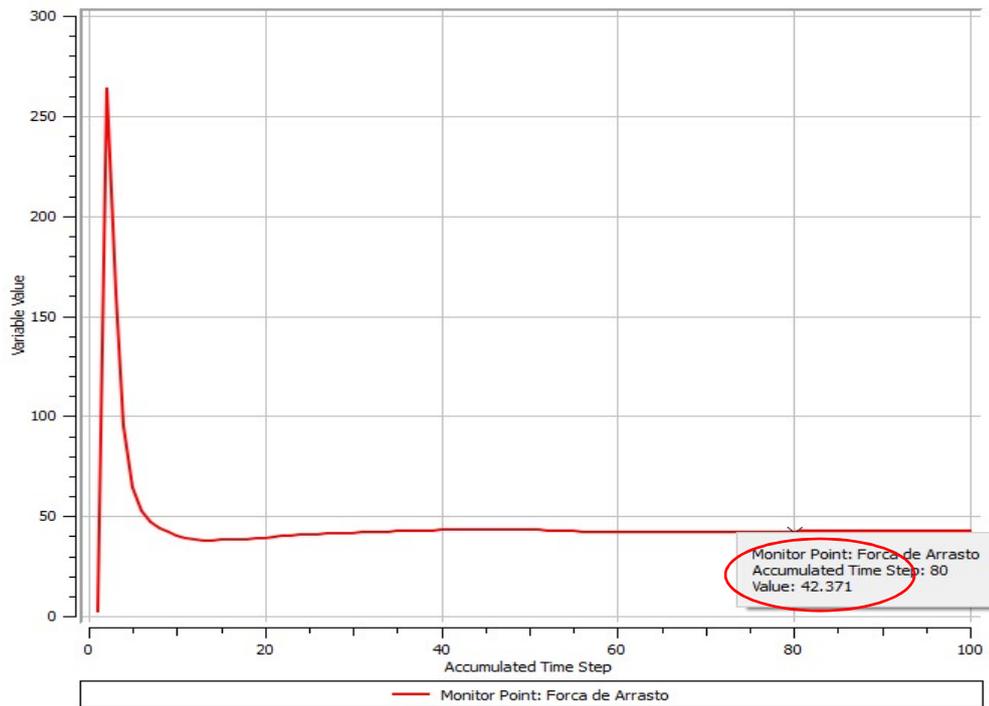


Figura 27 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 7,12 m/s.

Com velocidade de entrada de 10,29 m/s, pode-se observar a Figura 28.

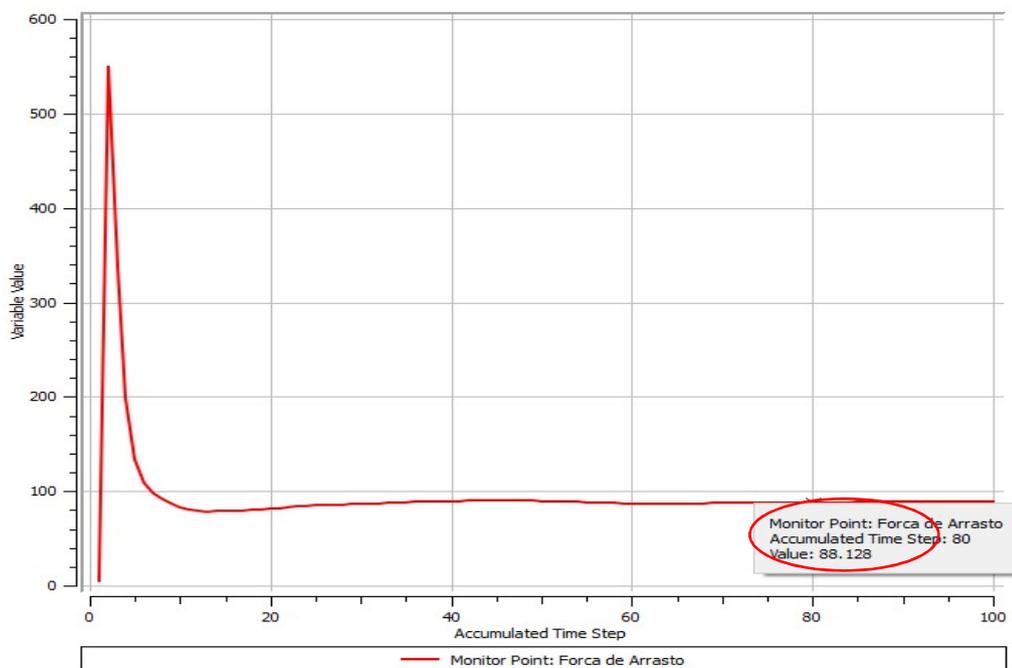


Figura 28 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 10,29 m/s.

Ainda, vê-se a Figura 29 mostra com velocidade de entrada de 12,86 m/s

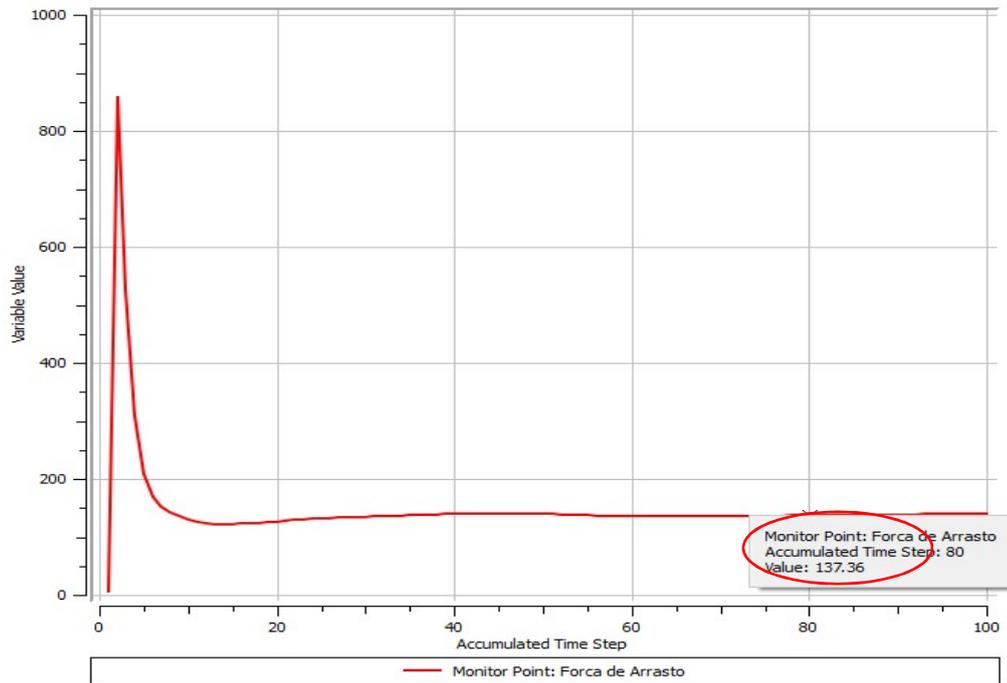


Figura 29 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 12,86 m/s.

Por fim, vê-se o gráfico com velocidade de entrada de 17,82 m/s através da Figura 30.

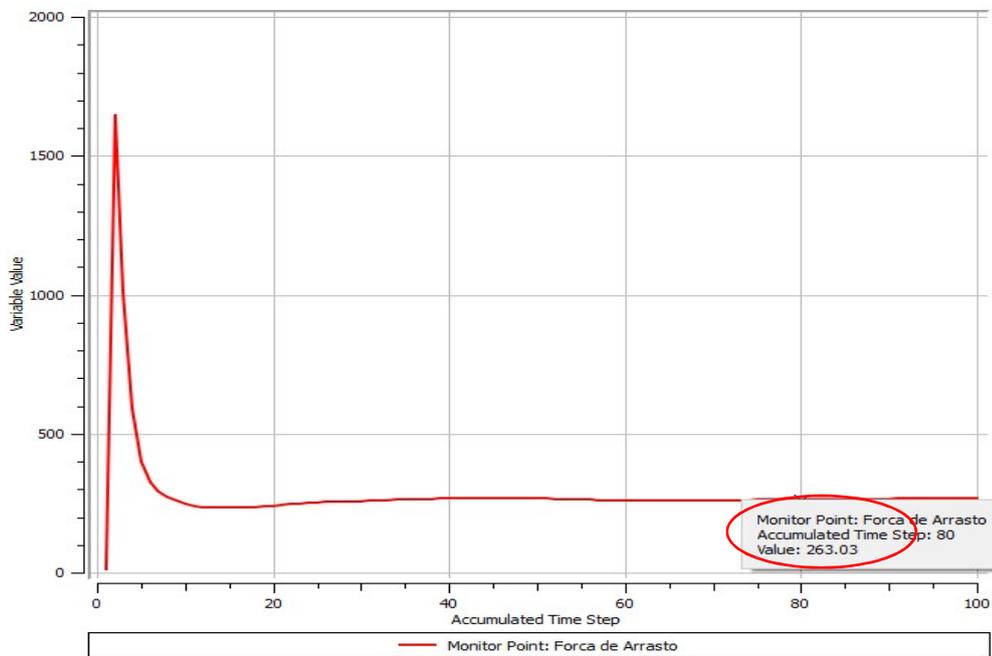


Figura 30 – Força de arrasto com velocidade de entrada de 17,82 m/s.

Nota-se em todos os gráficos a presença de uma constante linearidade durante os intervalos de 10 a 100 iterações para a determinação da força de arrasto.

A Figura 31 apresenta a mesma comparação em forma de gráfico para melhor visualizar a eficiência do *software*.

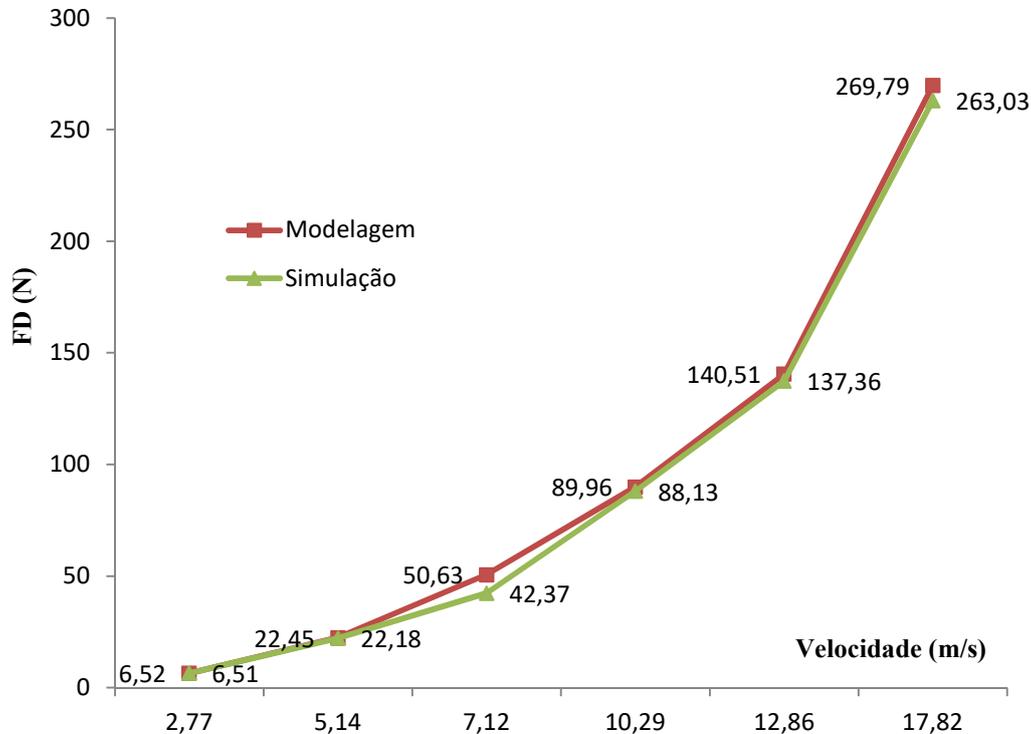


Figura 31 – Força de arrasto do modelo matemático x simulação do VE.

Analisando a Figura 31 pode-se concluir que os valores encontrados para o modelo matemático e os valores simulados pelo *software* são praticamente os mesmos, concretizando a equação 28.

4.3 Modelagem da Turbina Eólica Rutland 504

A turbina eólica efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. Para realizar a simulação dos efeitos da turbina eólica também se utiliza o *software* “ANSYS CFX” com o pacote CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

A turbina eólica em estudo é de pequeno porte com eixo horizontal, do tipo *UpWind* (recebe o vento frontalmente), modelo Rutland 504 encontrada no mercado náutico conforme a Figura 32.



Figura 32 – Turbina eólica horizontal Rutland 504.

Fonte: Marlec, 2008.

A turbina eólica horizontal Rutland 504 é constituída por: um rotor, pás, respectivas ligações mecânicas ligados a um regulador de carga e este ligado a uma bateria, conforme a Figura 33.

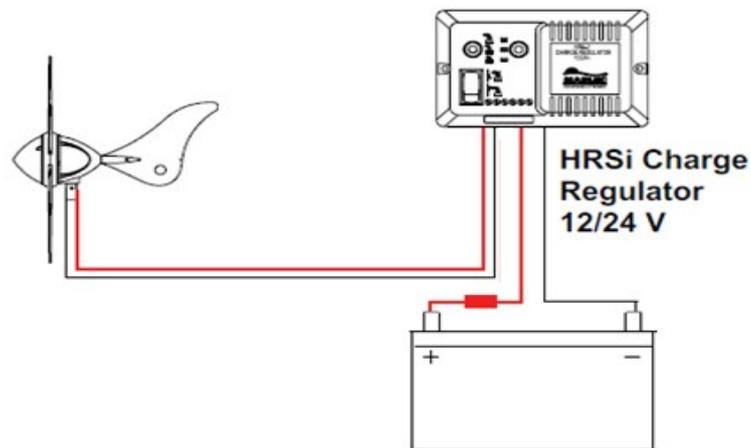


Figura 33. Sistema de controle de energia da turbina.

Fonte: Marlec, 2008.

A quantidade de potência disponível no vento que pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica é chamada de coeficiente de potência (C_p). Este coeficiente é utilizado para comparar a eficiência de diferentes turbinas eólicas.

Em uma determinada variação de tempo (Δt), energia que o vento transfere para o rotor dependerá da densidade do ar (ρ), da área de varredura do rotor (A) e do deslocamento de uma massa de ar (Δm) a uma velocidade (v). A potência do vento (P_v) associada ao deslocamento da massa é definida pela equação 29:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot v^2 \quad (29)$$

O fluxo de ar que atravessa as pás do rotor é dado pela equação 30:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot v \quad (30)$$

Fazendo as substituições matemáticas, a potência mecânica disponível no vento poderá variar com o cubo da velocidade (Eq.31):

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (31)$$

Onde:

P_v = potência média do vento em Watts (W);

ρ = densidade do ar ;

A = área da varredura do rotor (m^2);

v = velocidade média do vento (m/s).

Para o cálculo da força de arrasto da turbina eólica horizontal em estudo, tem-se a equação 32:

$$F_{DTE} = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{TE} \quad (32)$$

Definido o modelo matemático geram-se o gráfico da força de arrasto da turbina eólica variando suas velocidades de entradas Figura 34.

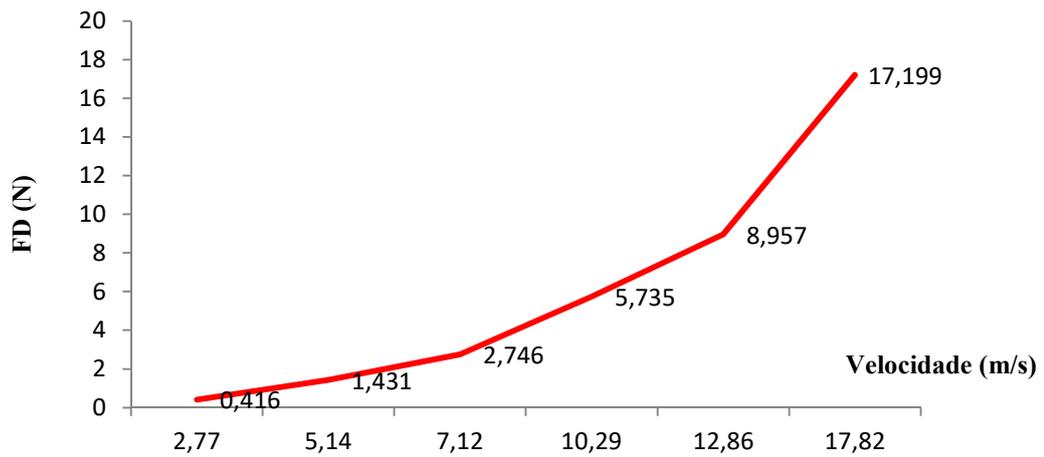


Figura 34 – Velocidade x força de arrasto da turbina eólica.

A Figura 35 mostra um gráfico corrente x velocidade de acordo com especificações técnicas do fabricante (MARLEC, 2008).

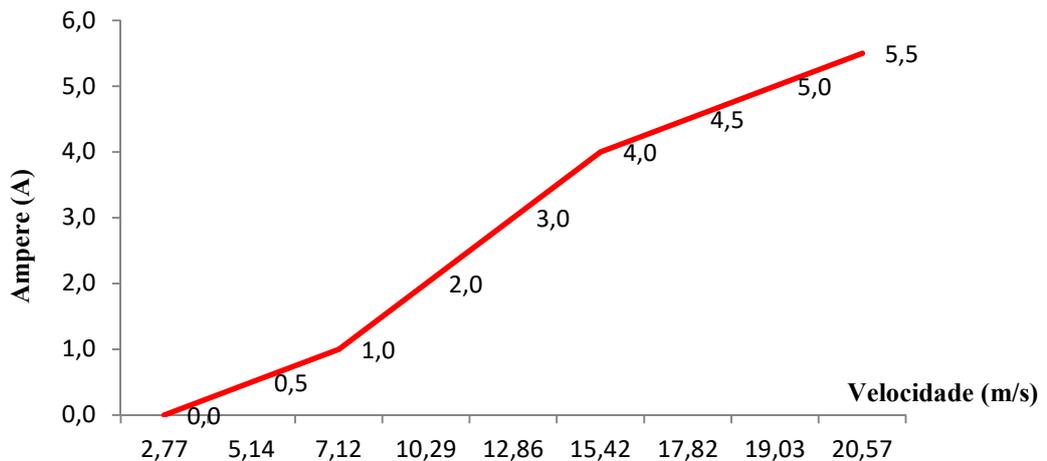


Figura 35 - Corrente (A) x velocidade (m/s).

Fonte: Adaptado de Marlec, 2008.

4.4 Modelagem da TE com o VE

Integra-se os sistemas VE+TE e somam-se as forças de arrasto de ambos (Eq.28+Eq.32) gerando a força de arrasto total (F_{DT}) observada na equação 33.

$$F_{DT} = F_{DVE} + F_{DTE} \quad (33)$$

Novamente faz-se a comparação entre o modelo analítico da força de arrasto em relação a velocidade e a simulação Figura 36.

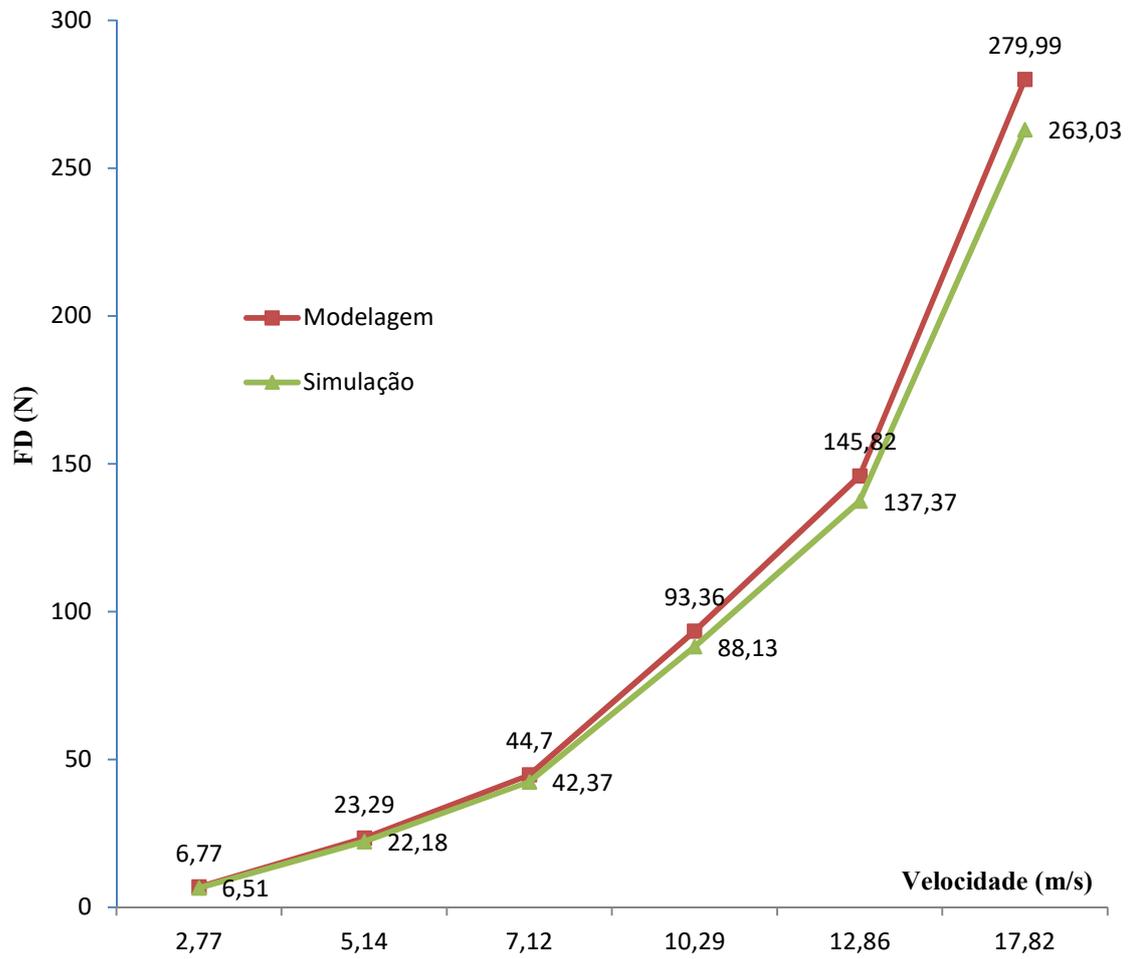


Figura 36 – Força de Arrasto do modelo matemático x simulação do VE+TE.

5 RESULTADOS

Diante do estudo realizado no capítulo 4 Figura 24 e da integração do sistema VE + TE foi realizado um estudo em três possíveis lugares de implantação da TE (na frente, no centro e na parte traseira do teto) objetivando a melhor localização para a instalação da TE em conjunto com menor força de arrasto (F_D) sem interferir na geração de energia para o carregamento do banco de baterias do VE.

Foram realizadas simulações do posicionamento da TE com relação às diferentes velocidades de entrada e ao mesmo tempo as figuras indicam a velocidade real de passagem do fluxo de ar.

Serão mostradas a seguir, simulações com velocidade de entrada: 2,77 m/s; de 5,14 m/s, 7, 12m/s, 10,29 m/s, 12,86m/s e 17,82m/s para cada uma das três configurações possíveis (frente, centro e traseira do teto) para se definir o valor real da velocidade e os valores da força de arrasto em cada configuração. Para fazer uma comparação de valores todos as forças de arrasto foram obtidas na 80ª iteração da simulação.

Dessa forma tem-se a informação precisa da melhor localização de implatação do subsistema de energia do VE+TE.

5.1 Simulação na Frente do Teto

As figuras deste tópico mostram as simulações realizadas com a turbina eólica (TE) fixada na frente do teto do veículo elétrico (VE) nas diversas velocidades de entrada.

As Figuras 37 a 42 mostram a vista frontal do posicionamento da turbina eólica fixada na parte da frente do teto do veículo elétrico com diferentes velocidades de entrada.

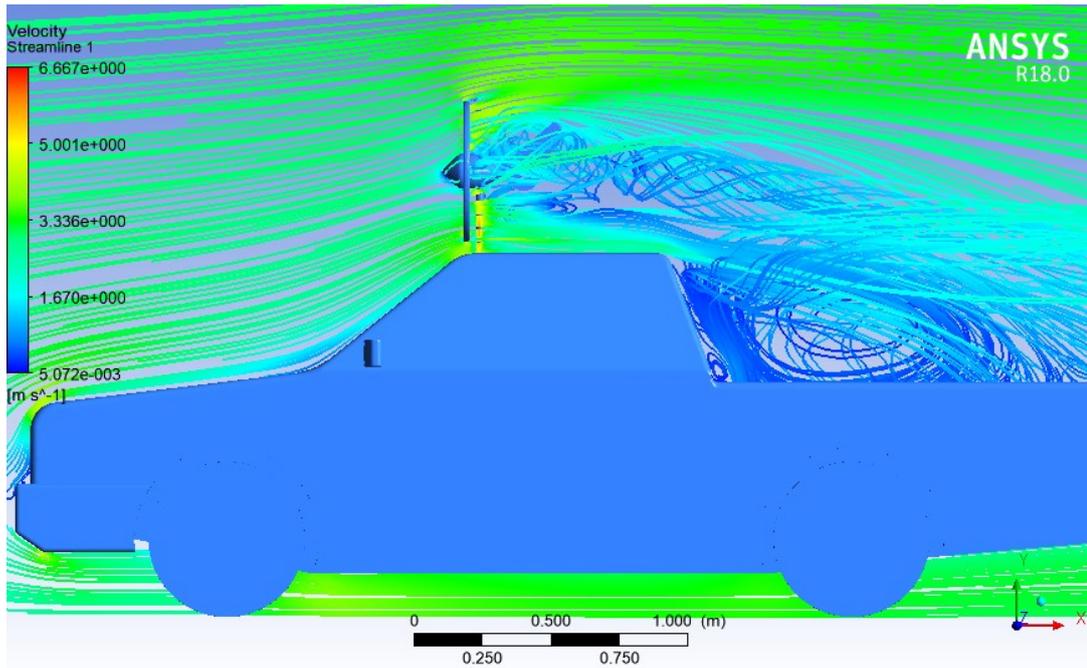


Figura 37 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

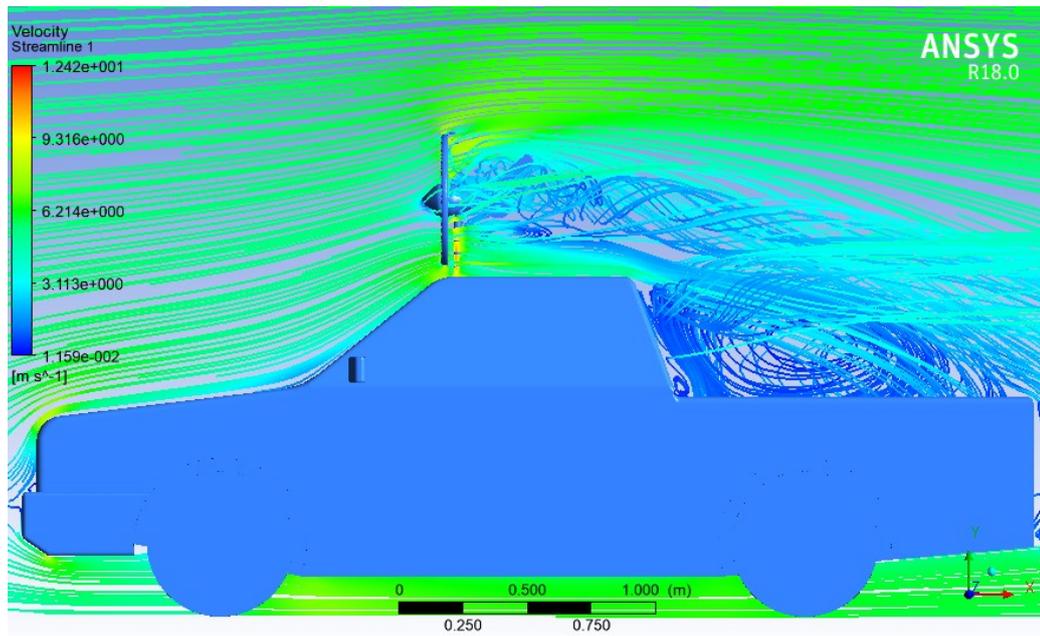


Figura 38 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

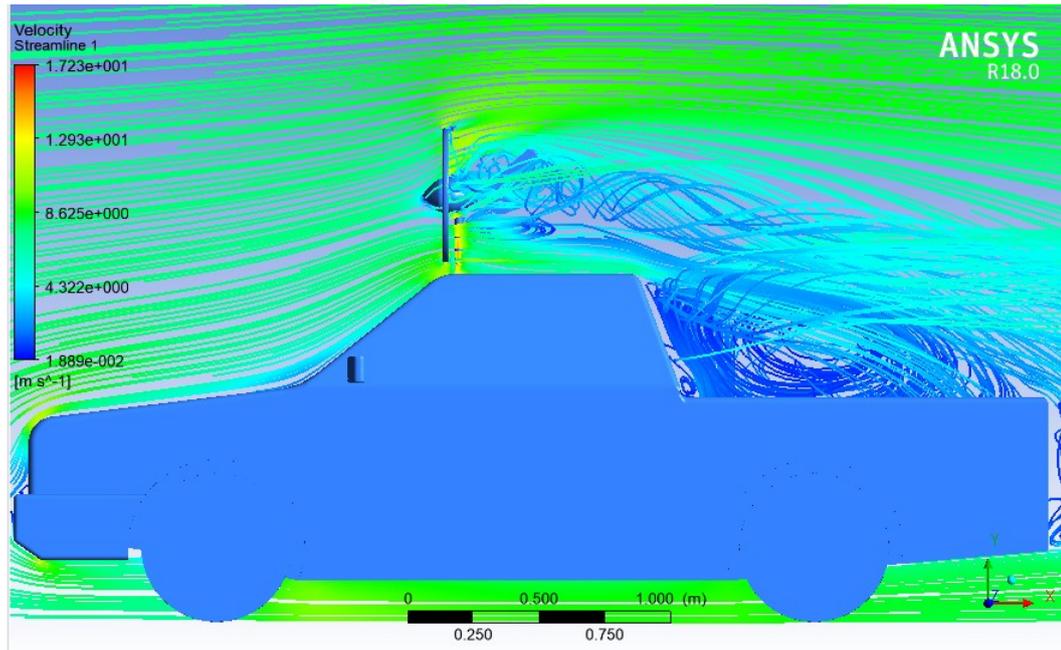


Figura 39 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

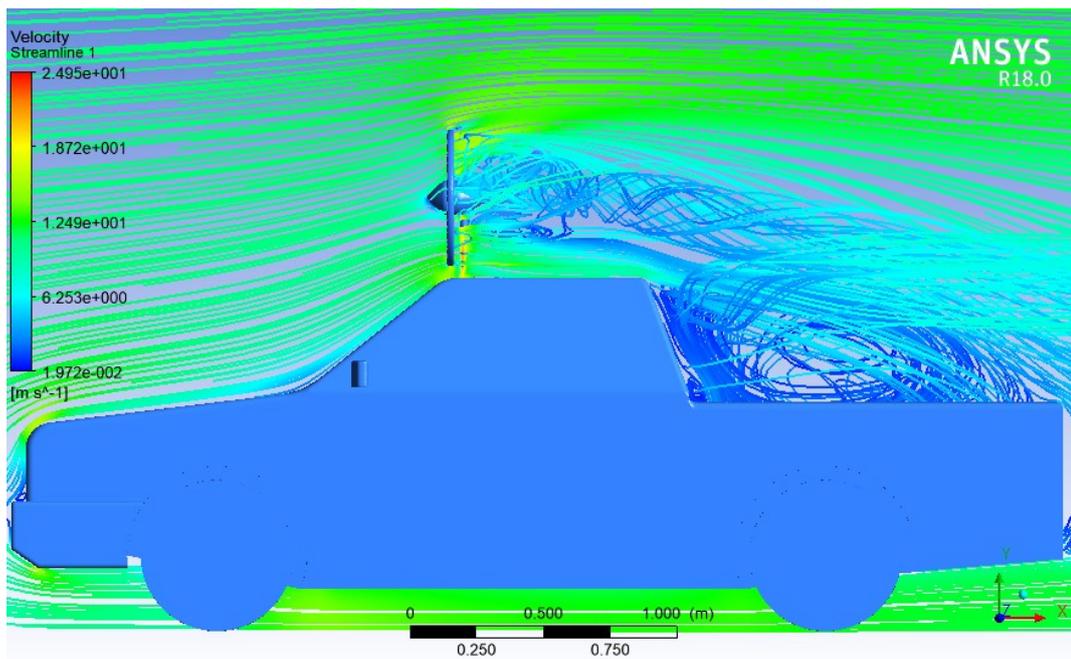


Figura 40 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).

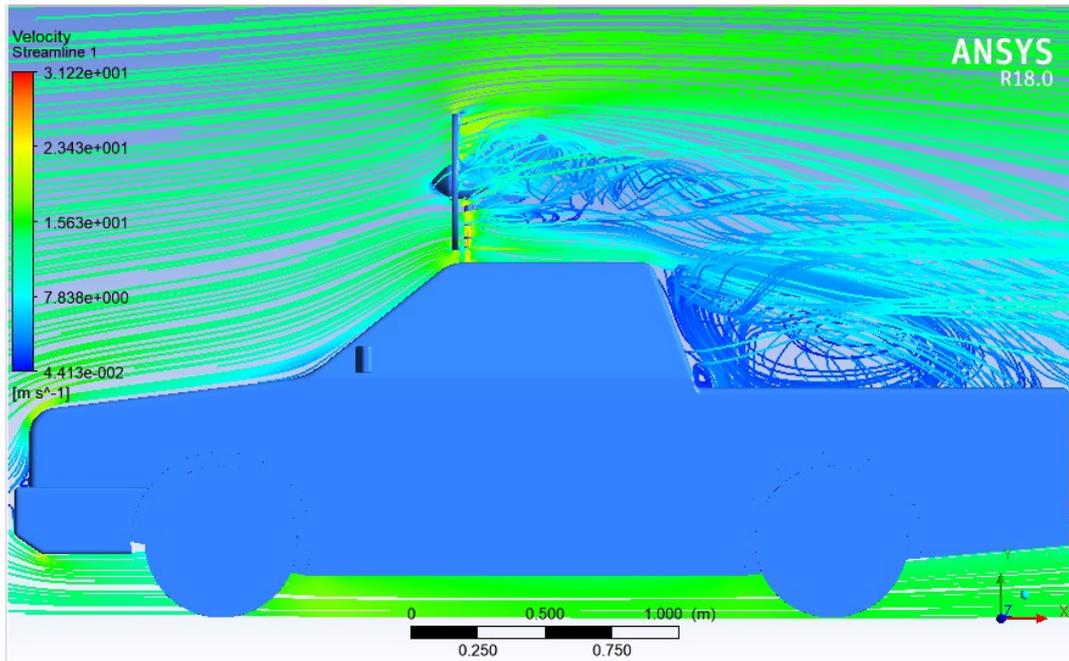


Figura 41 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).

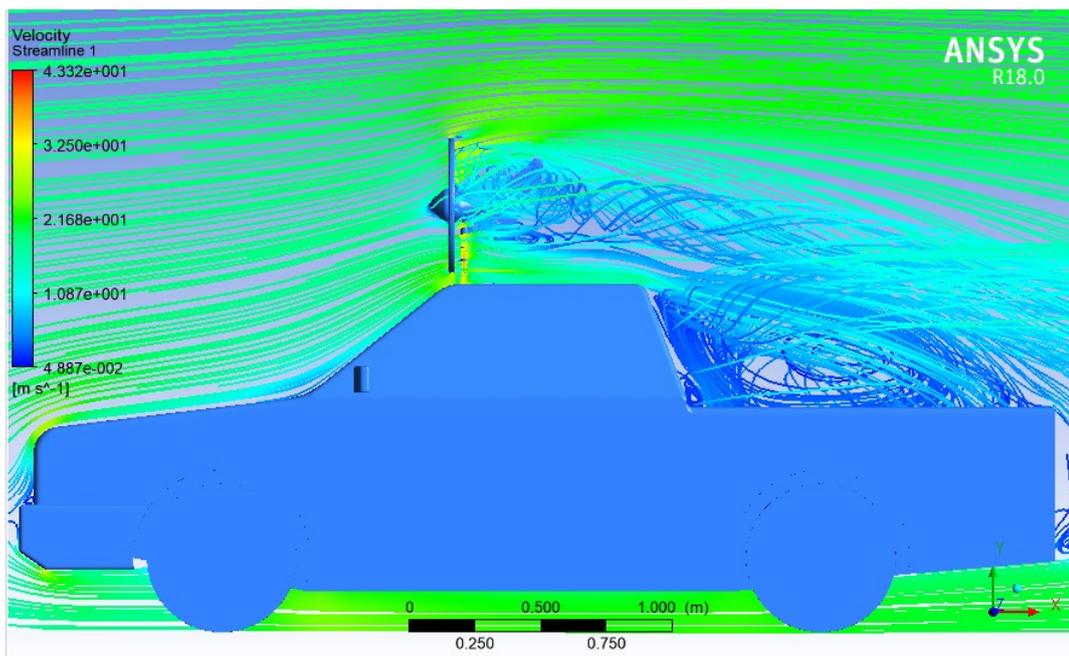


Figura 42 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).

Ampliando a vista frontal, observa-se melhor o fluxo de ar passando pela turbina eólica e a velocidade real conforme a legenda e as linhas de fluxo da simulação de cada velocidade Figura 43 a 48.

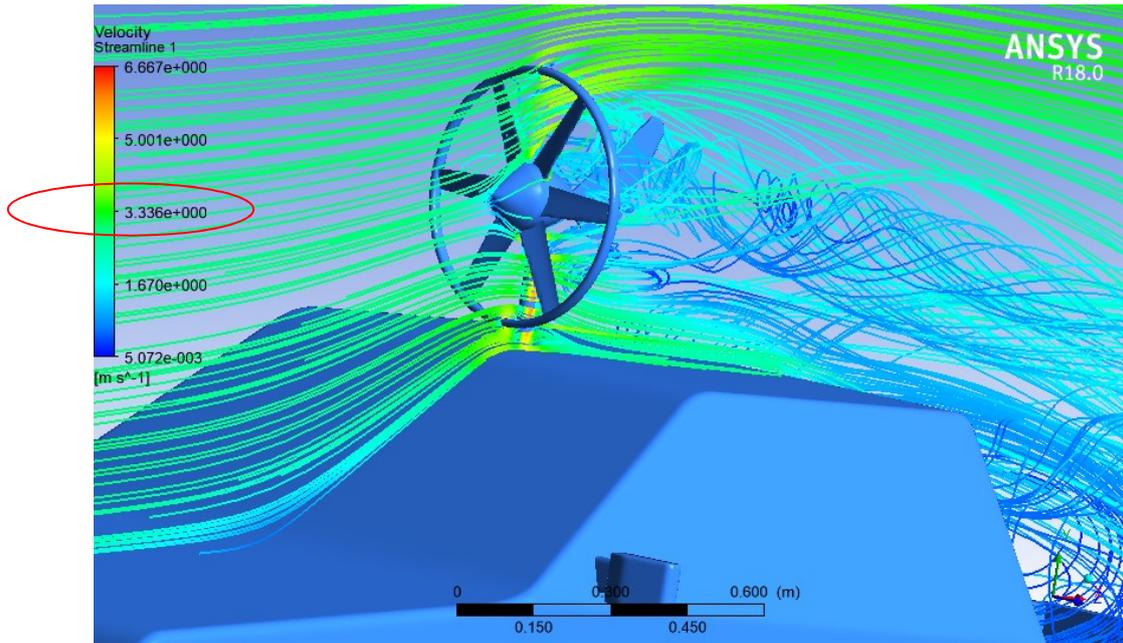


Figura 43 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

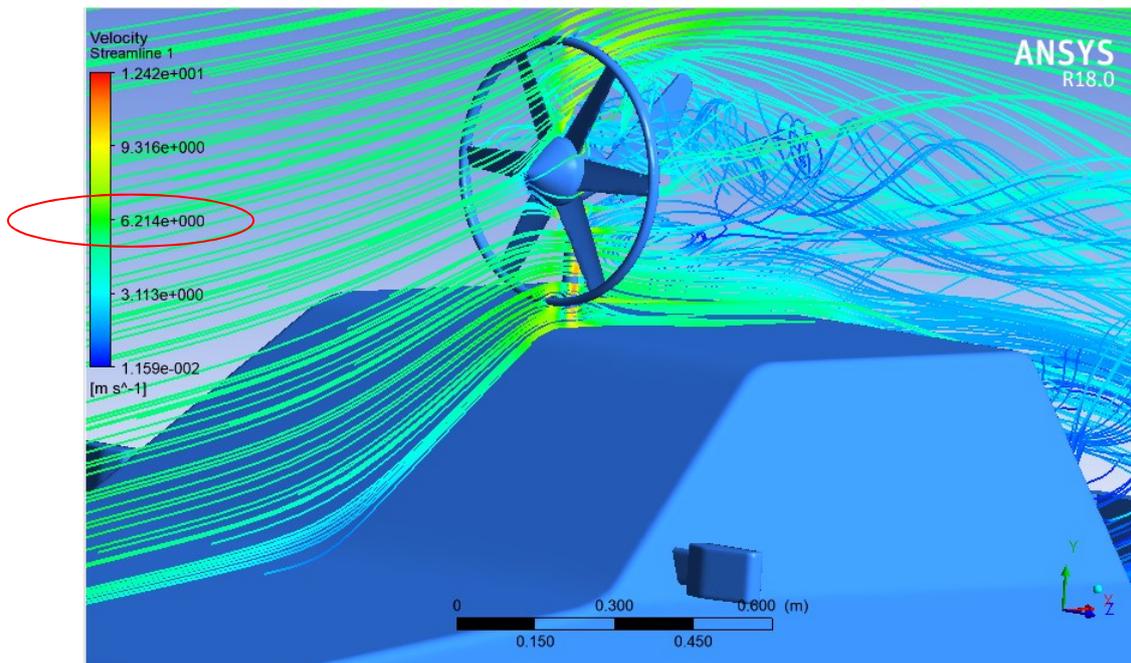


Figura 44 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

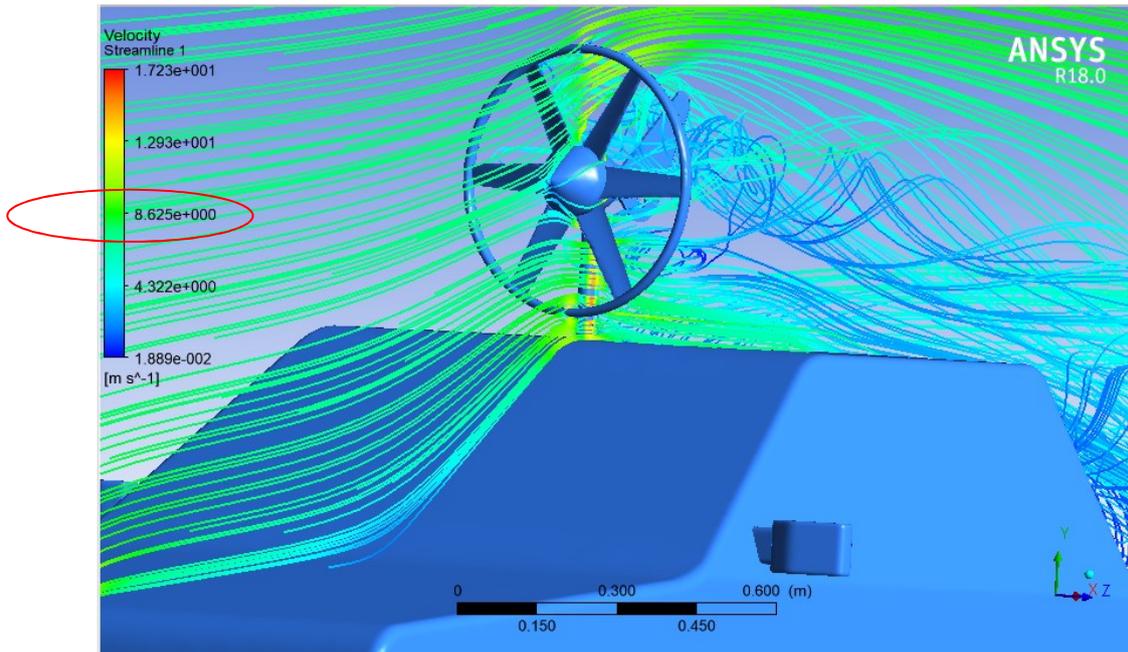


Figura 45 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

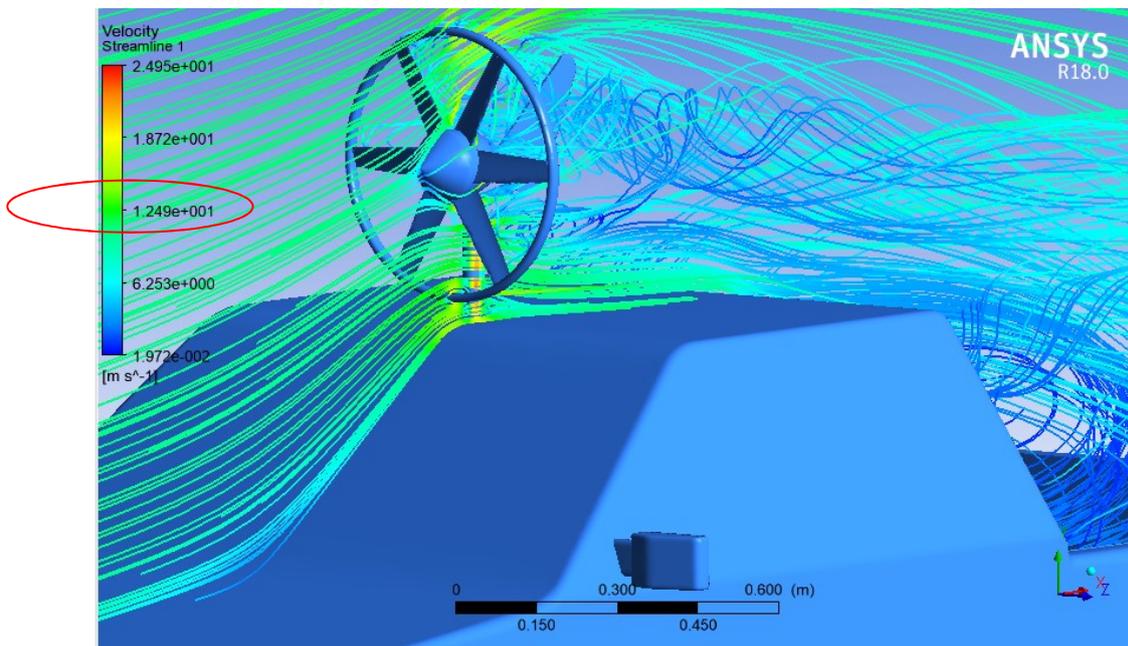


Figura 46 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($V=10,29\text{m/s}$).

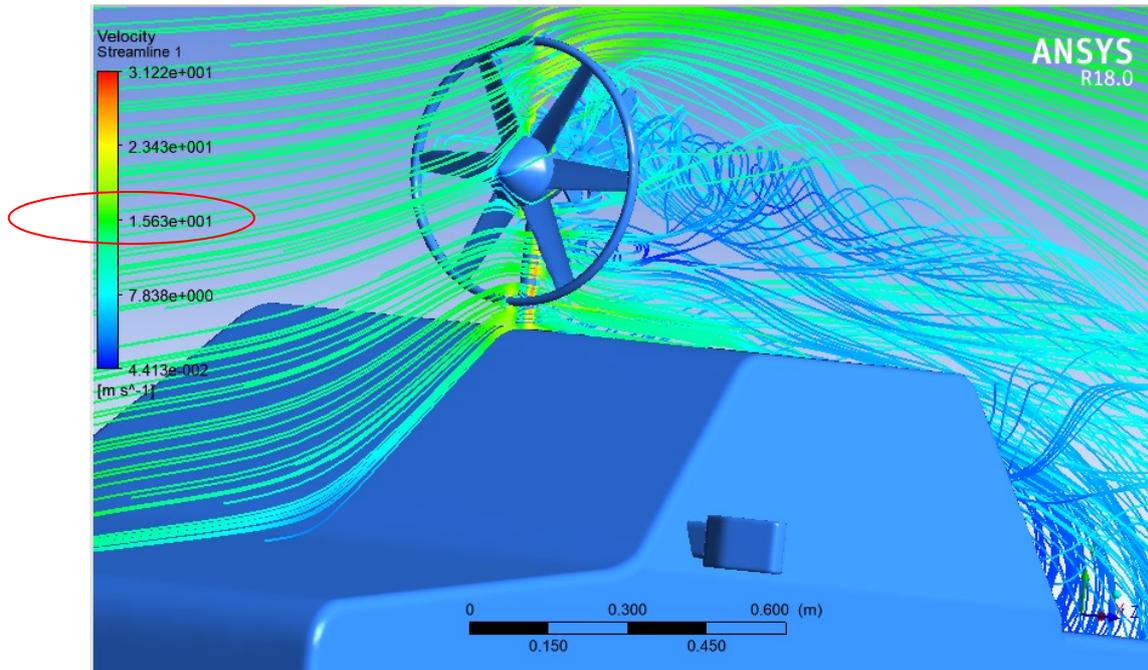


Figura 47 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).

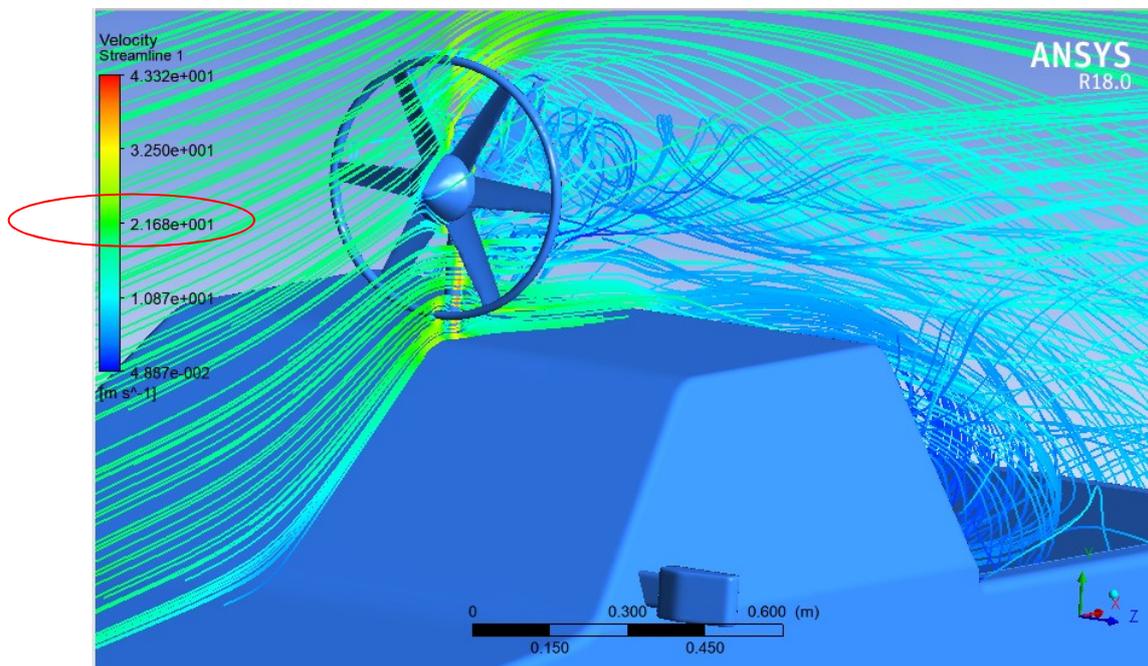


Figura 48 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).

Também são simulados e quantificados valores para força de arrasto do conjunto VE + TE fixada na parte da frente do teto, com as varias velocidades de entrada. Para se tornar possivel uma comparação de valores tomou-se como valor de força de arrasto os obtidos na 80^a iteração Figura 49 e 54.

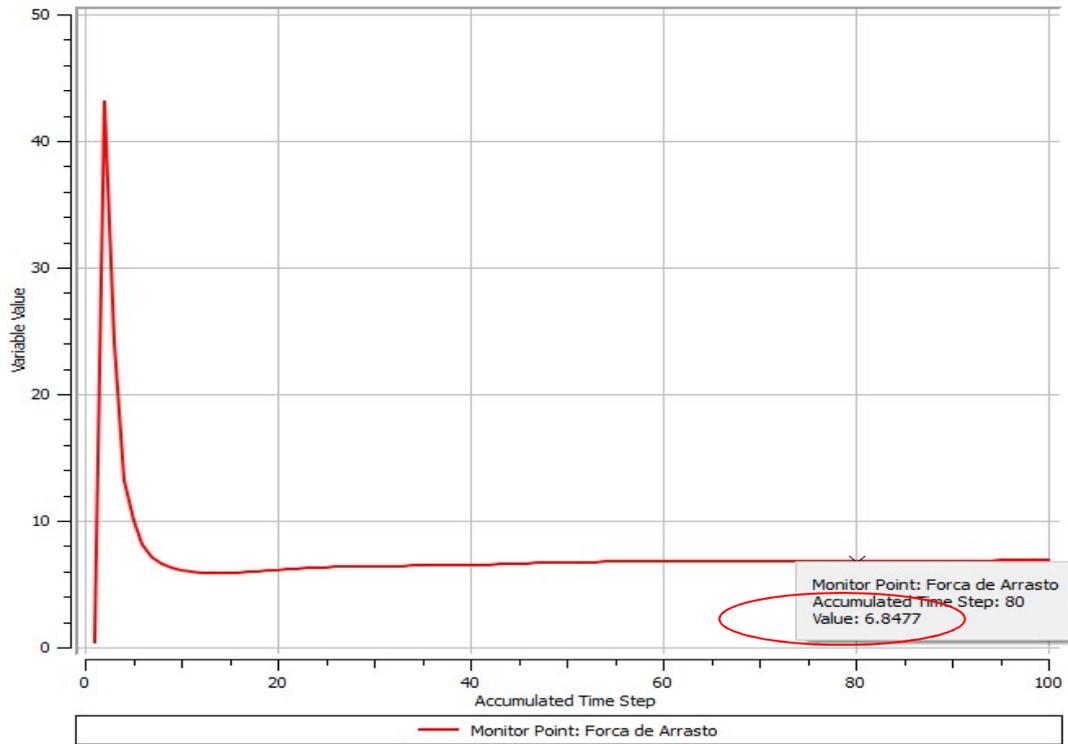


Figura 49 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=2,77\text{m/s}$).

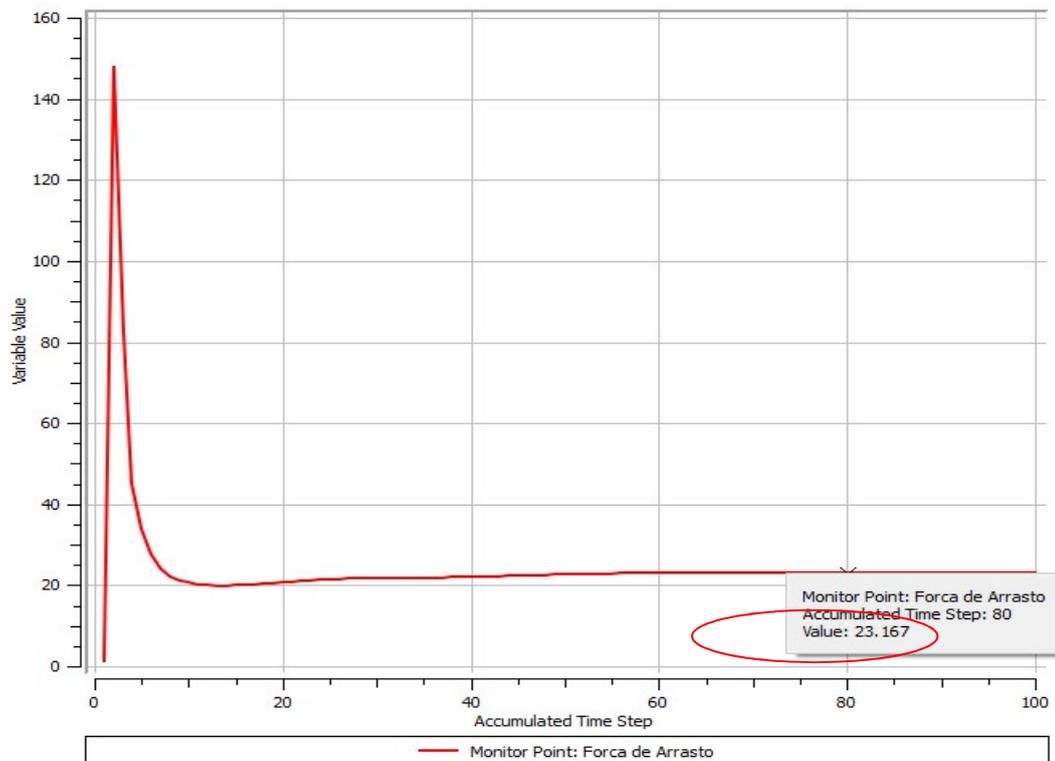


Figura 50 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=5,14\text{m/s}$).

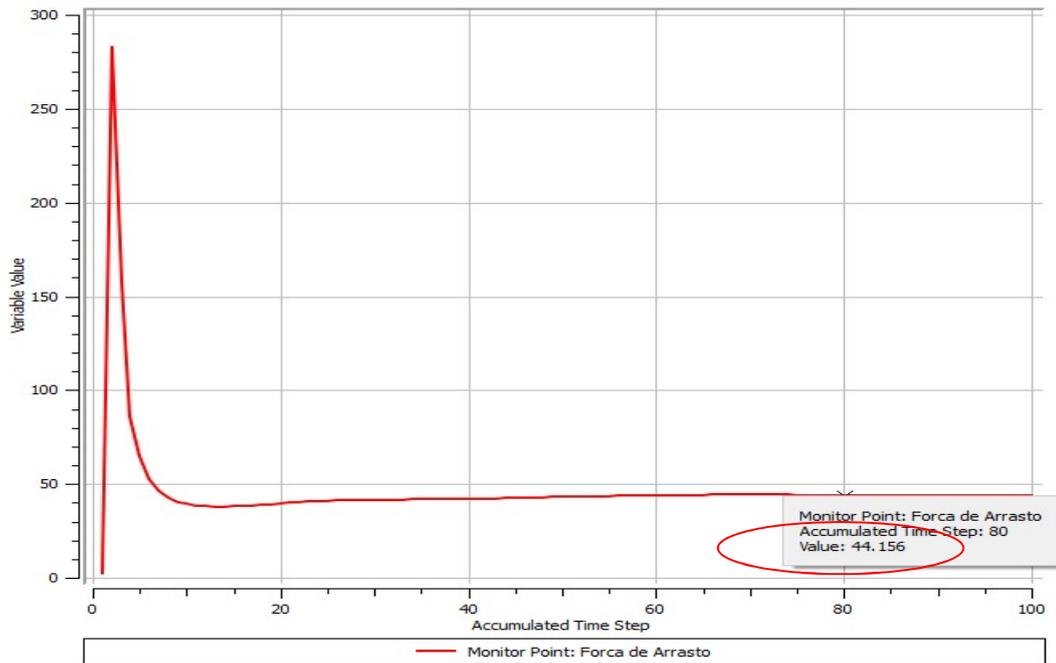


Figura 51 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=7,12\text{m/s}$).

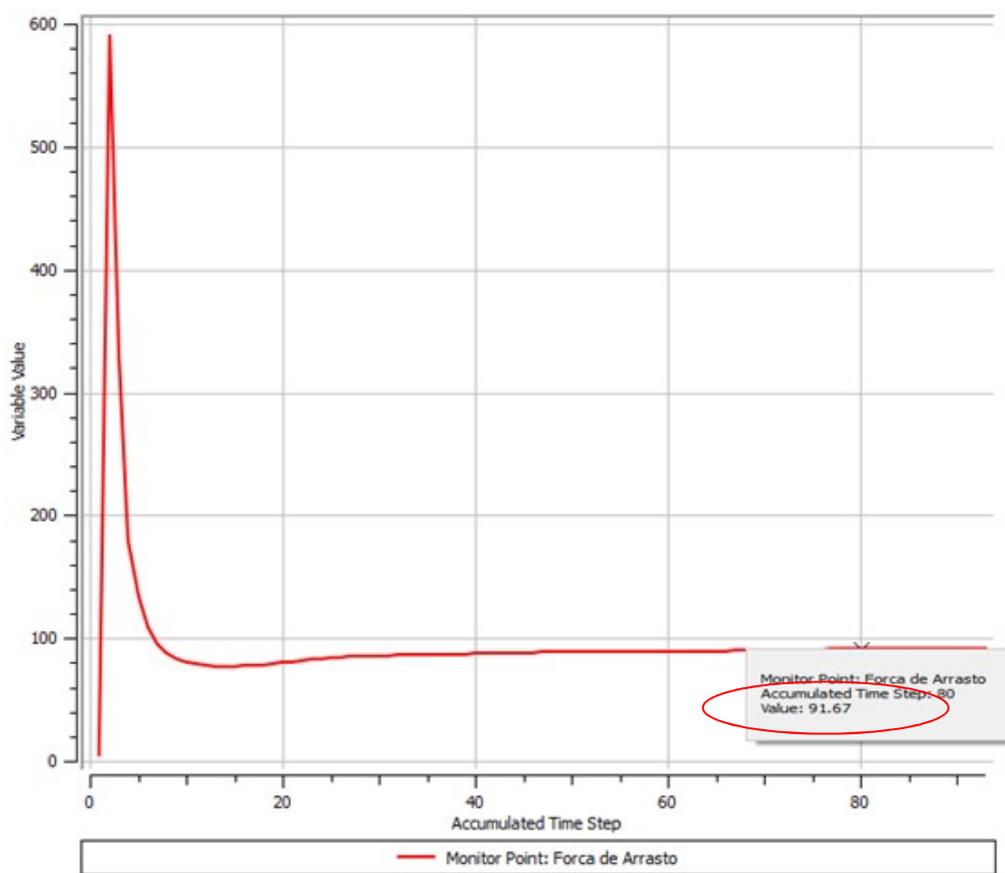


Figura 52 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=10,29\text{m/s}$).

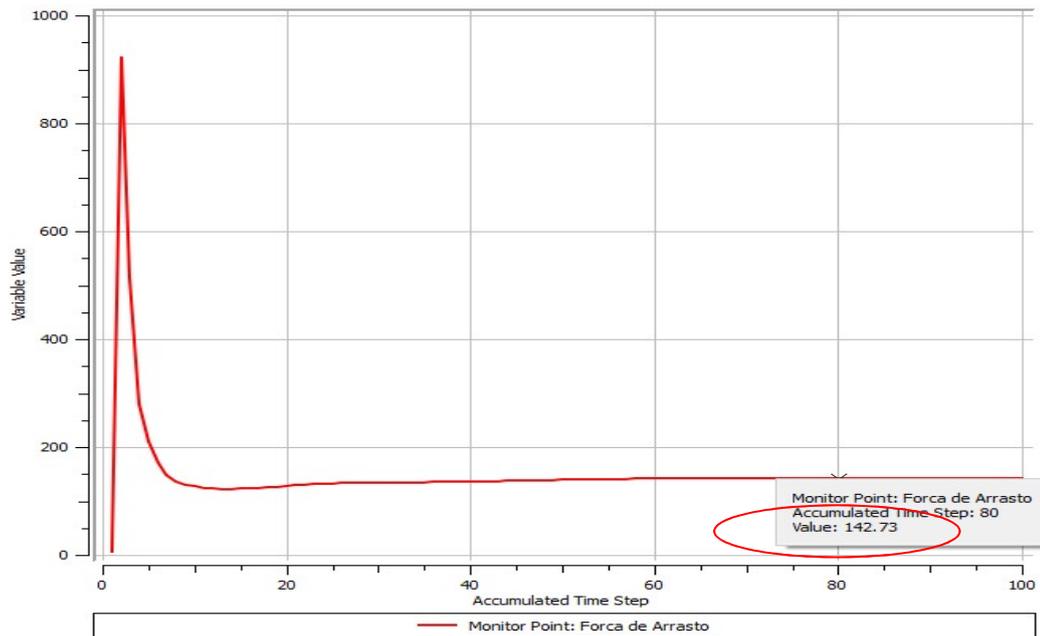


Figura 53 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=12,86\text{m/s}$).

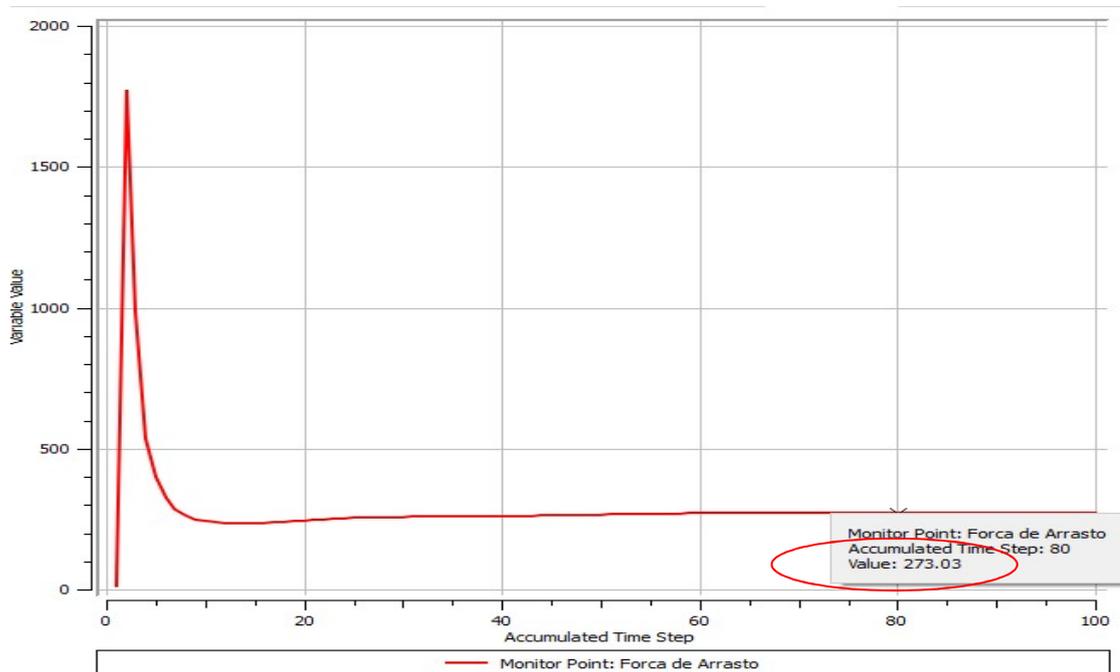


Figura 54 – Força de arrasto do VE + TE na frente do teto ($v=17,82\text{ m/s}$).

5.2 Simulação no Centro do Teto

As figuras deste tópico mostram as simulações realizadas com a turbina eólica (TE) fixada no centro do teto do veículo elétrico (VE) nas diversas velocidades de entrada.

A vista frontal do posicionamento da turbina eólica fixada no centro do teto com diferentes velocidades de entrada é mostrada nas Figuras 55 a 60.

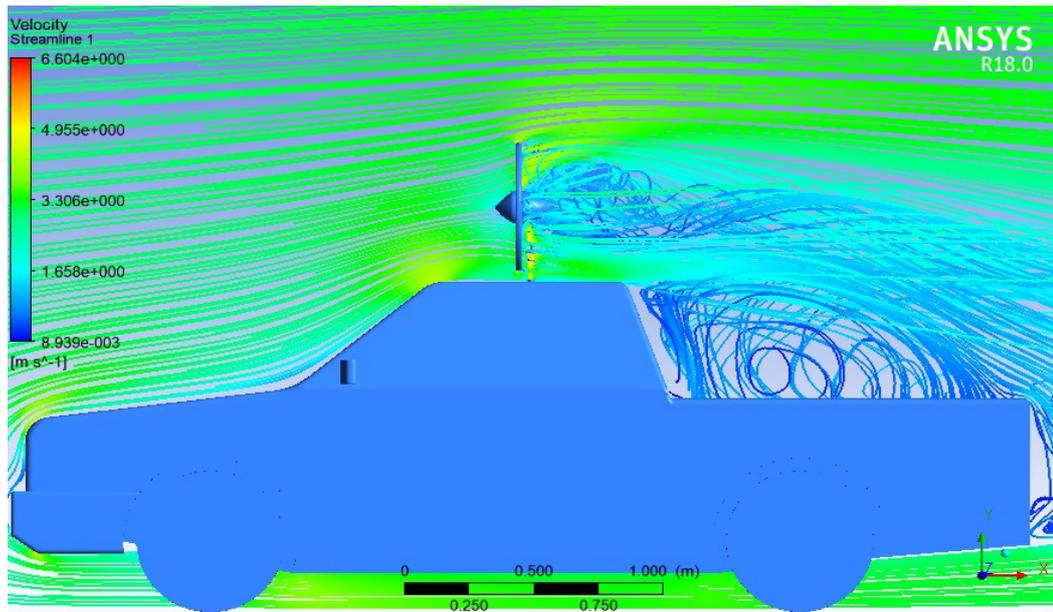


Figura 55 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

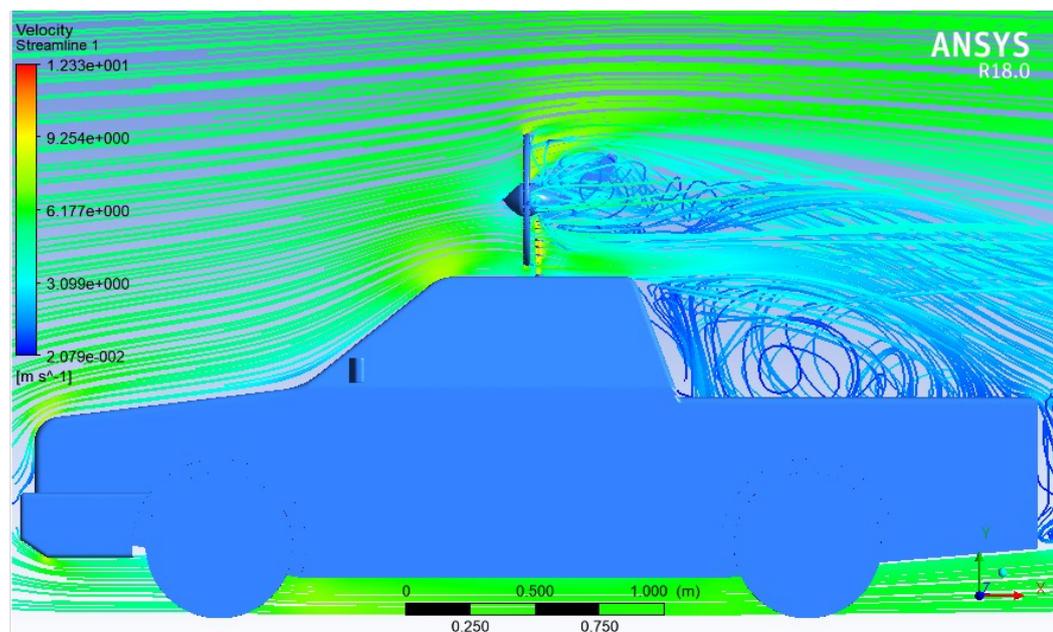


Figura 56 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

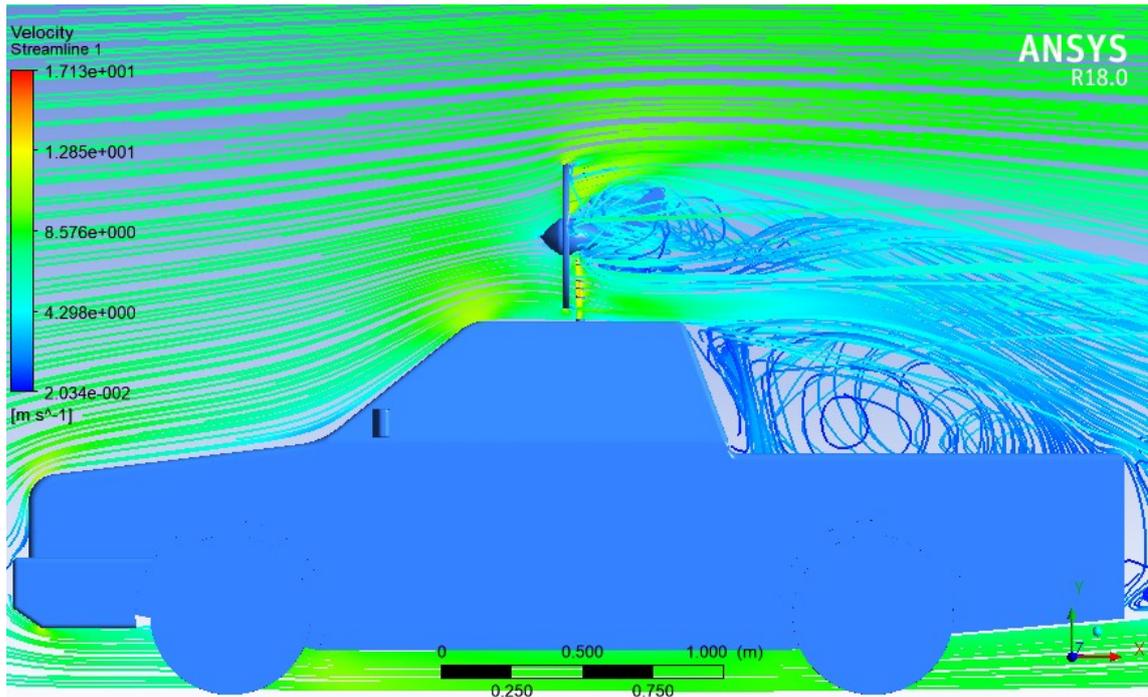


Figura 57 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

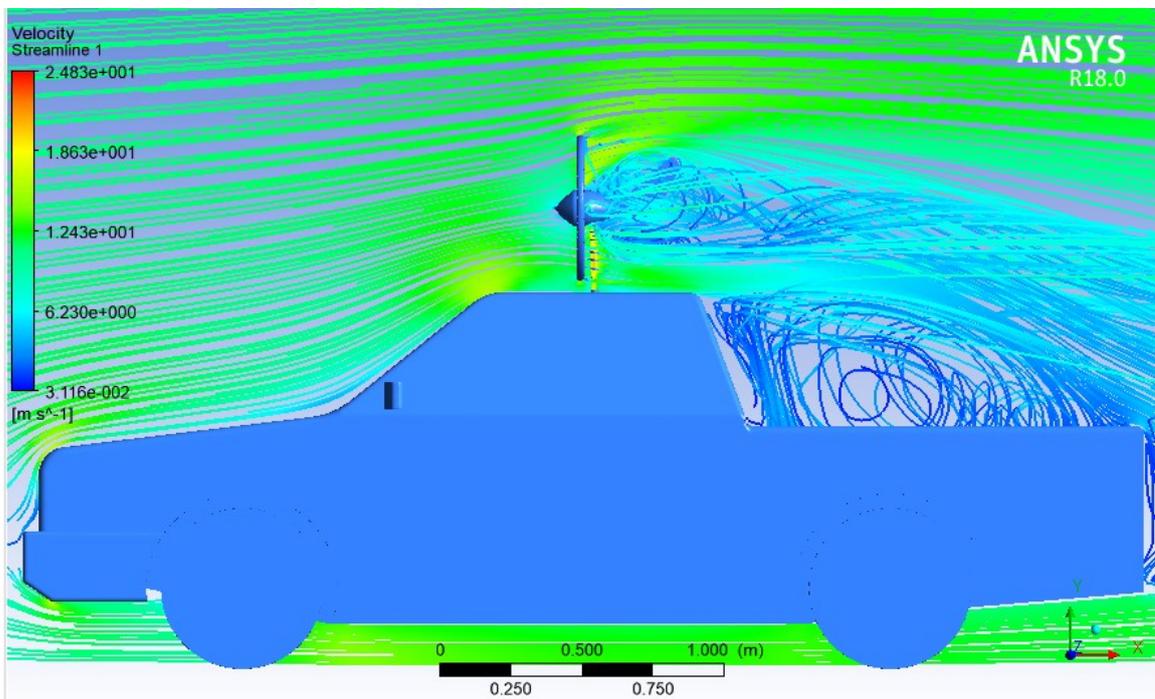


Figura 58 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).

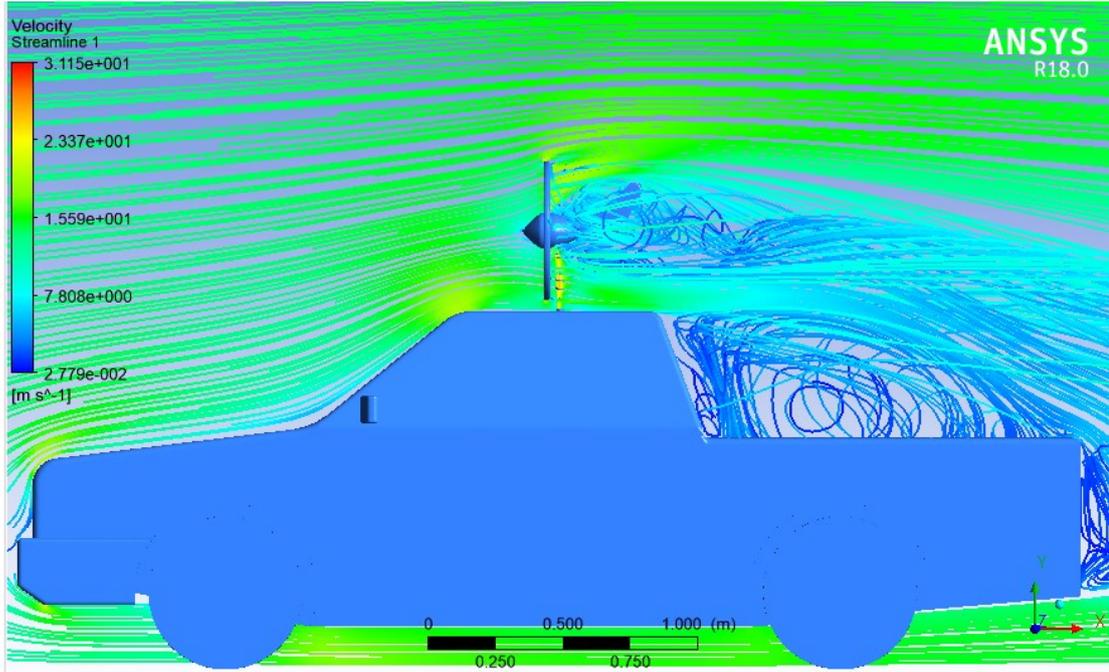


Figura 59 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).

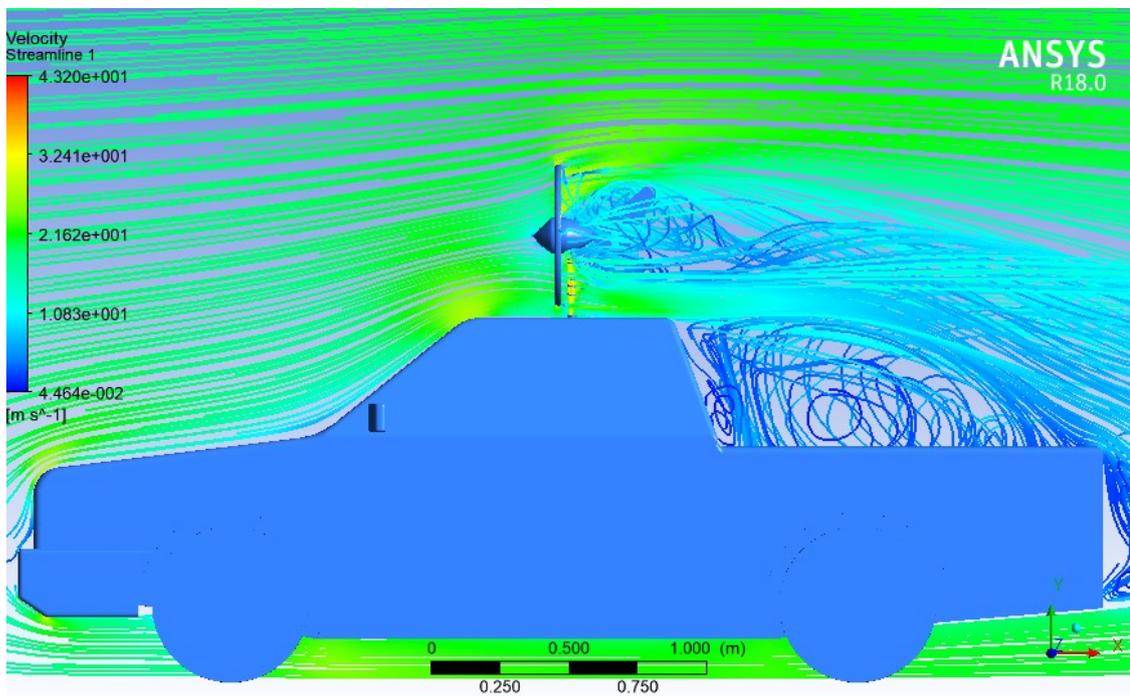


Figura 60 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=17,82\text{ m/s}$).

Observa-se melhor o fluxo de ar passando pela turbina eólica e a velocidade real ampliando a vista frontal e simulações de cada velocidade podem ser vistas nas Figuras 61 a 66.

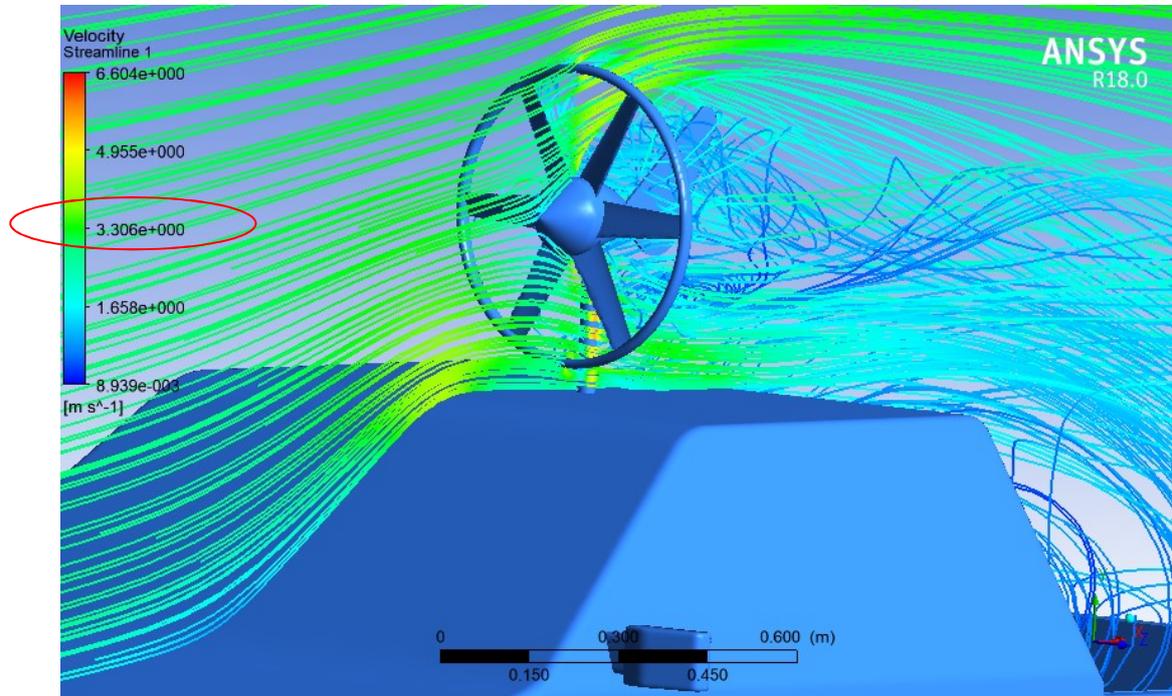


Figura 61 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

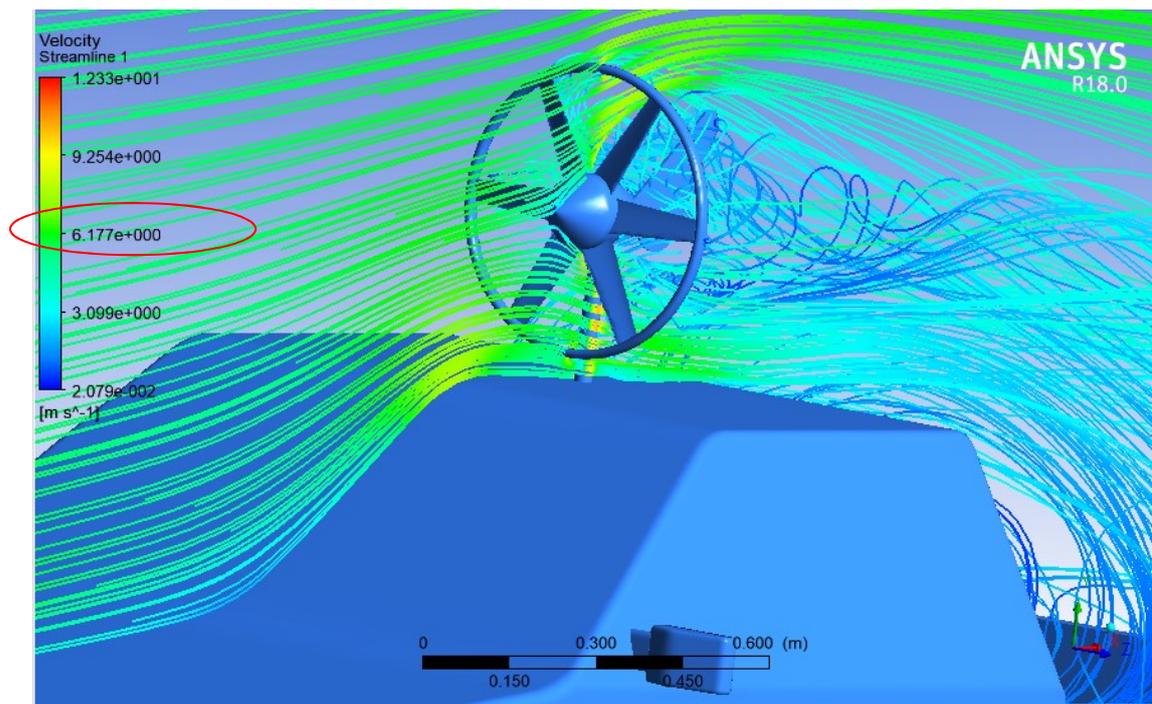


Figura 62 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

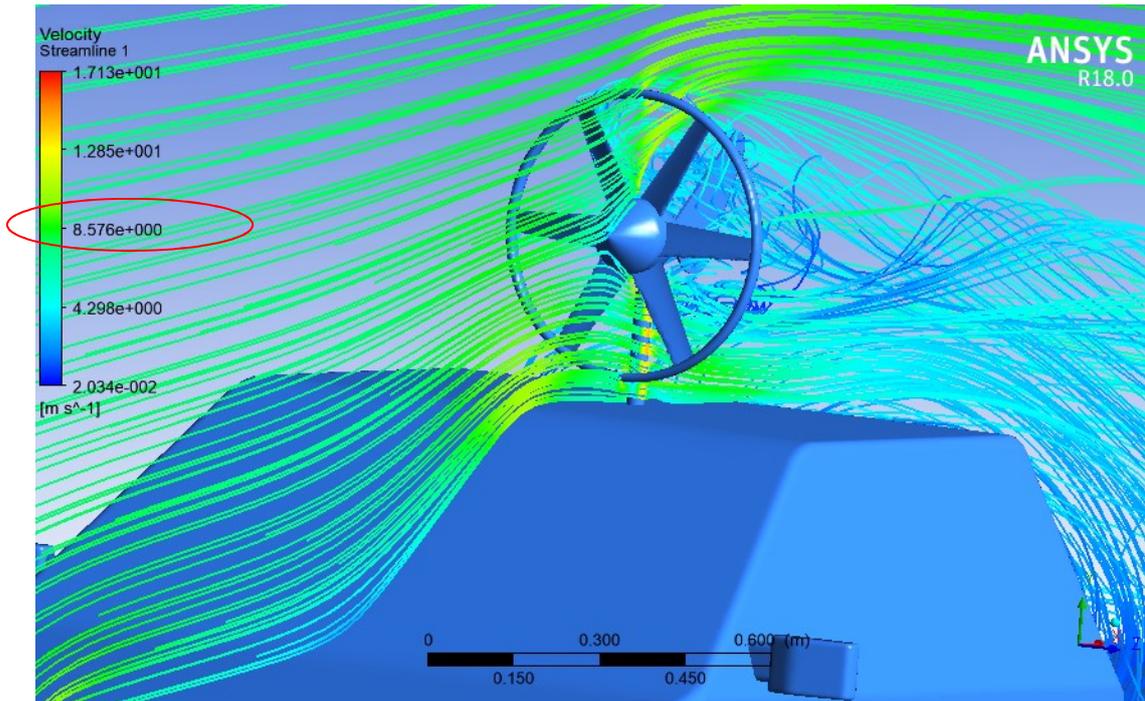


Figura 63 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

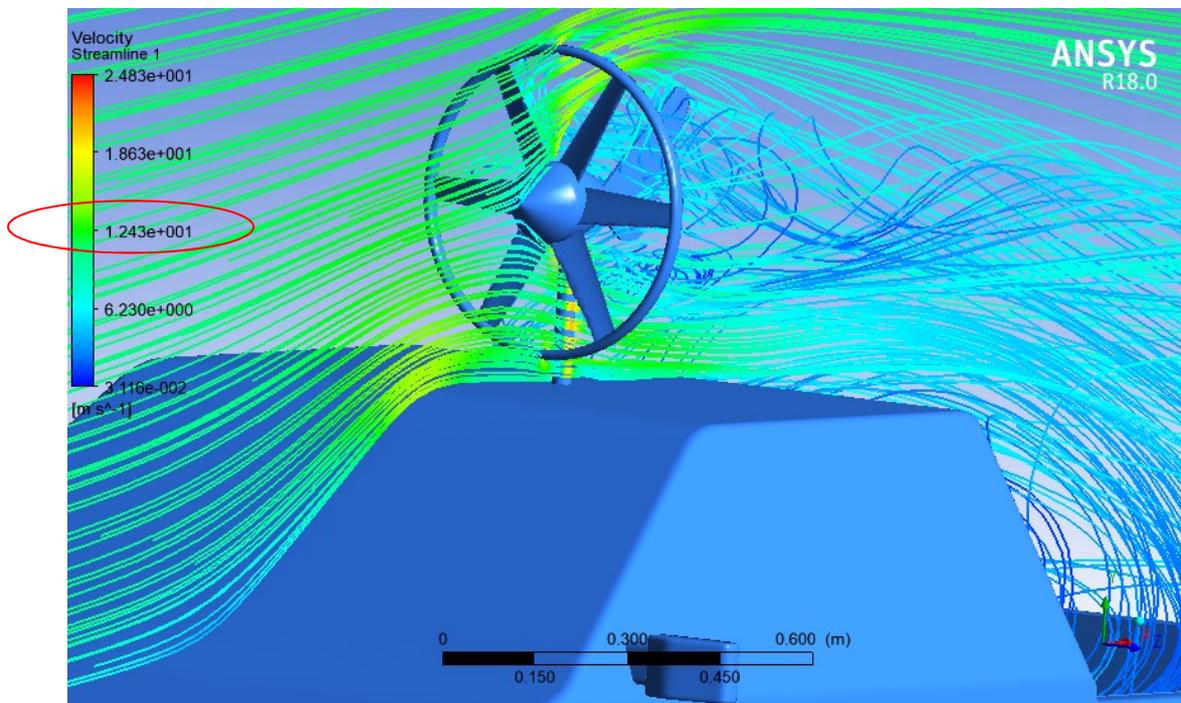


Figura 64 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).

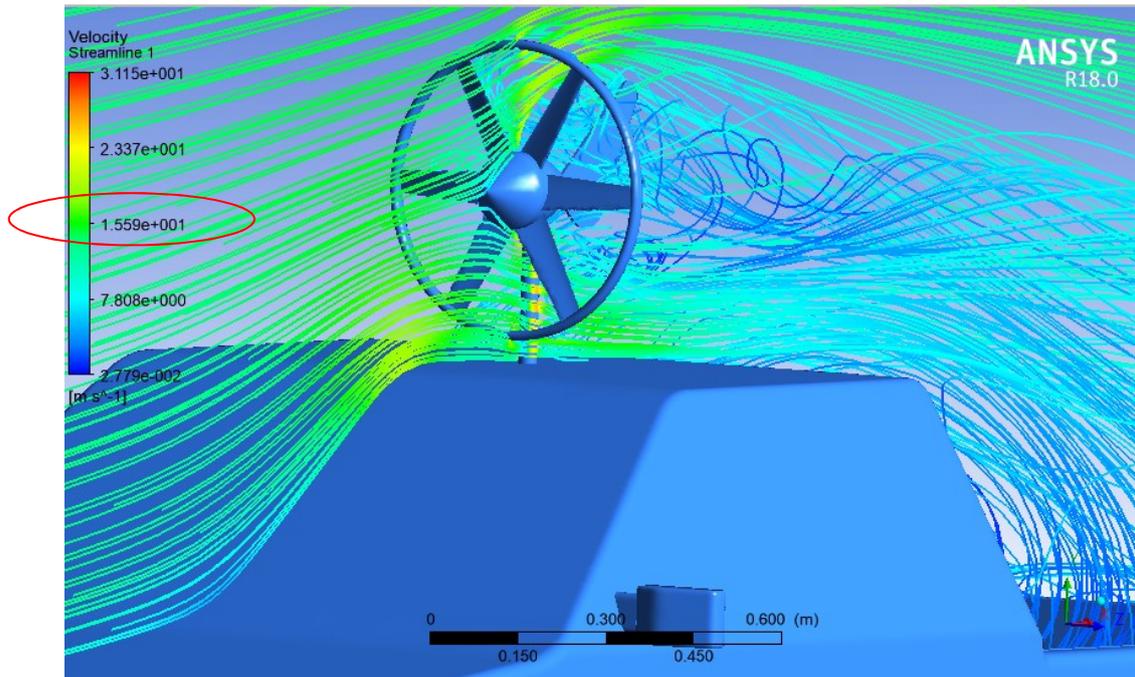


Figura 65 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).

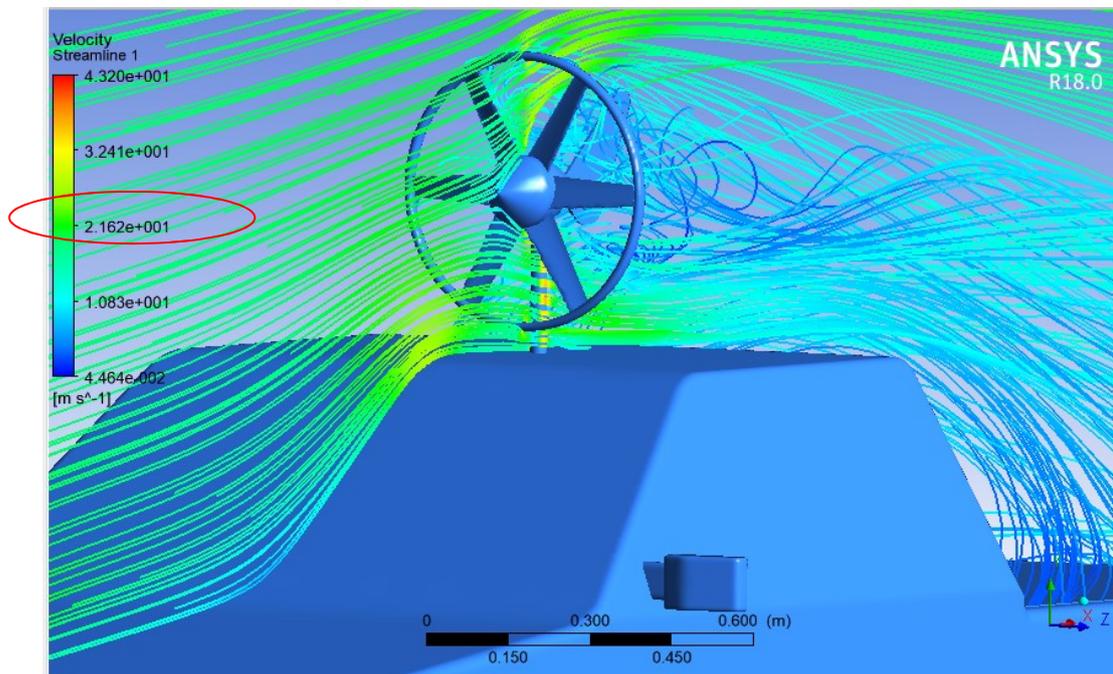


Figura 66 - Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).

Nas figuras 67 a 72 notam-se valores da força de arrasto desse conjunto. Ve-se que na 80ª iteração os valores da força de arrasto em cada velocidade de entrada.

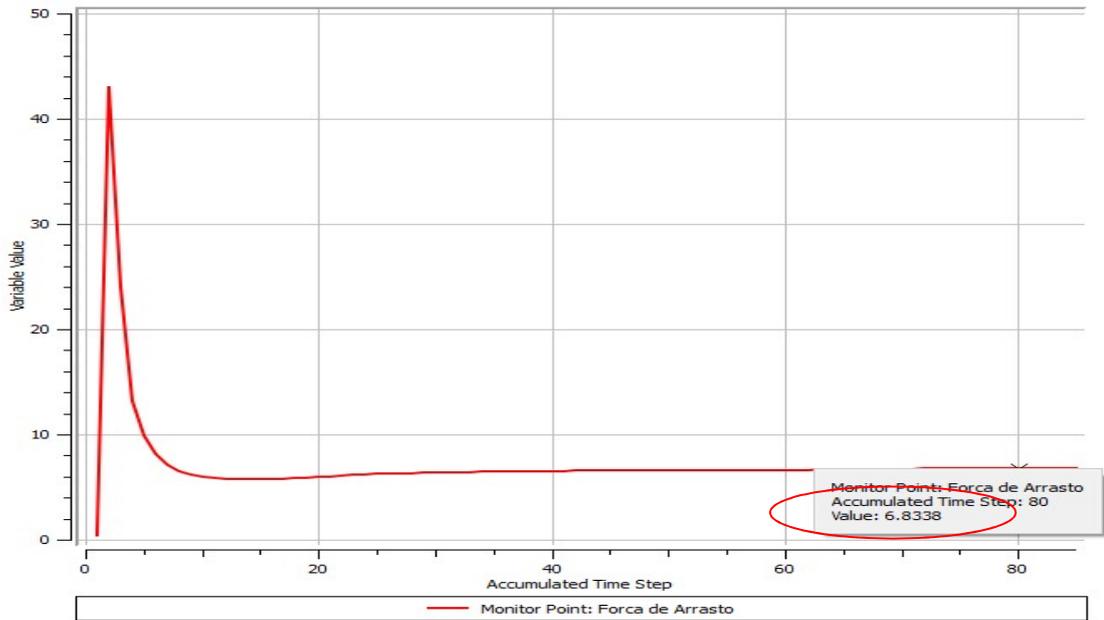


Figura 67 – Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=2,77\text{m/s}$).

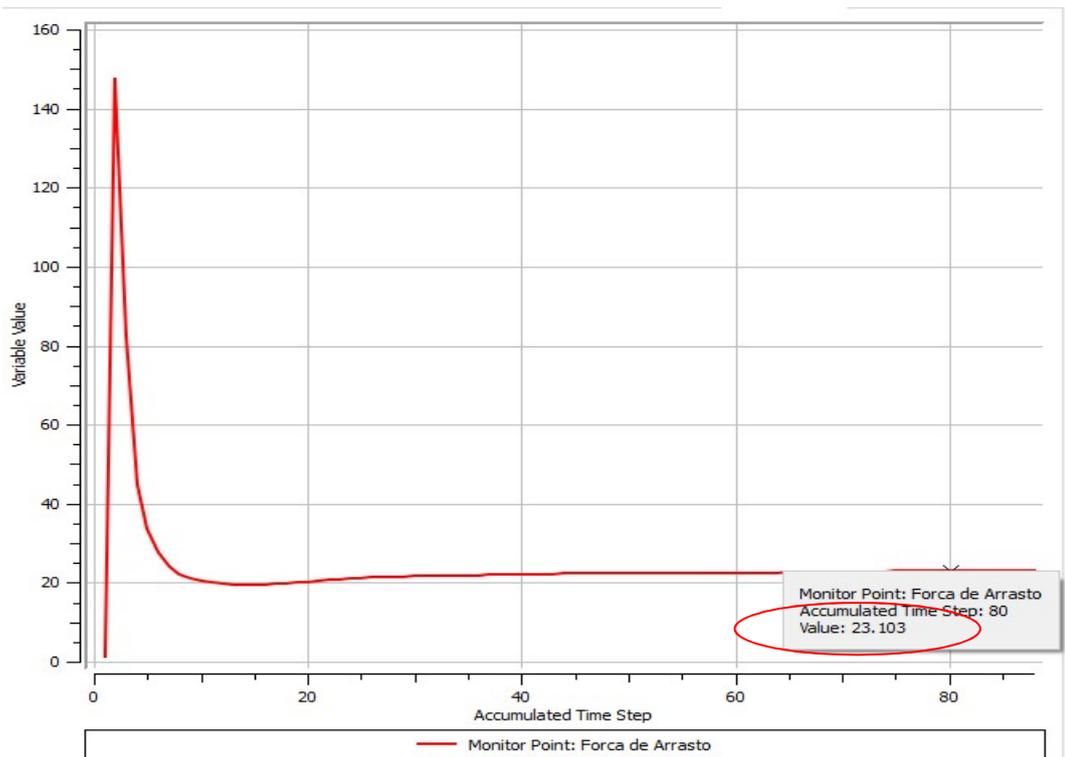


Figura 68 – Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=5,14\text{m/s}$).

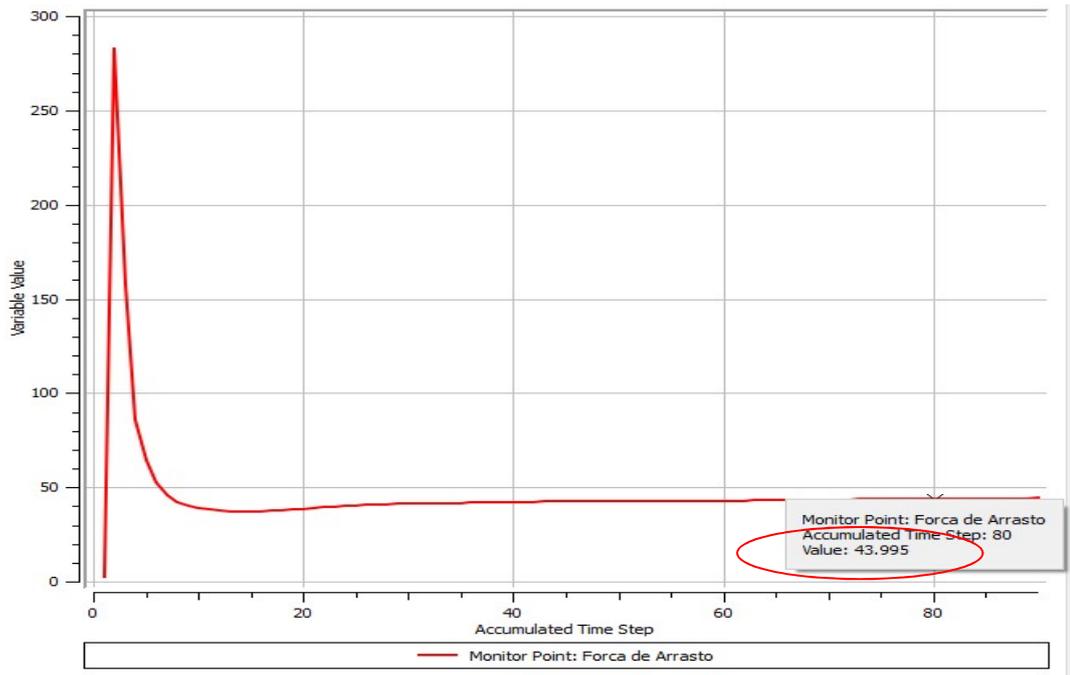


Figura 69 – Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=7,12$ m/s).

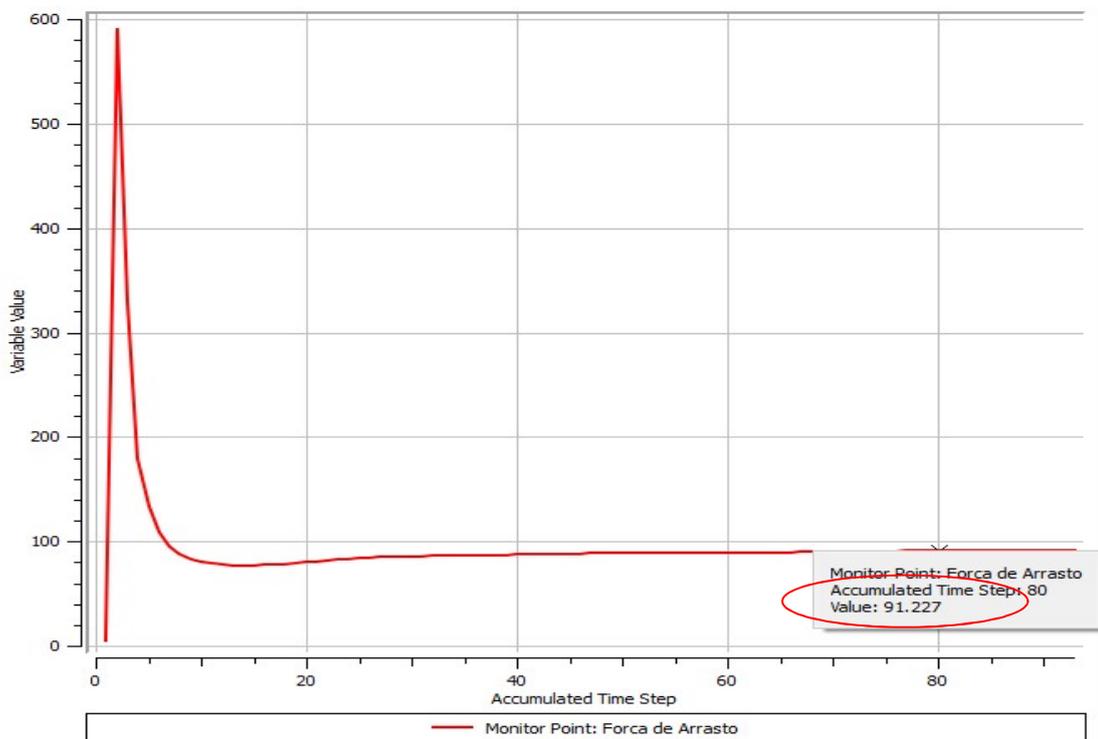


Figura 70 – Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=10,29$ m/s).

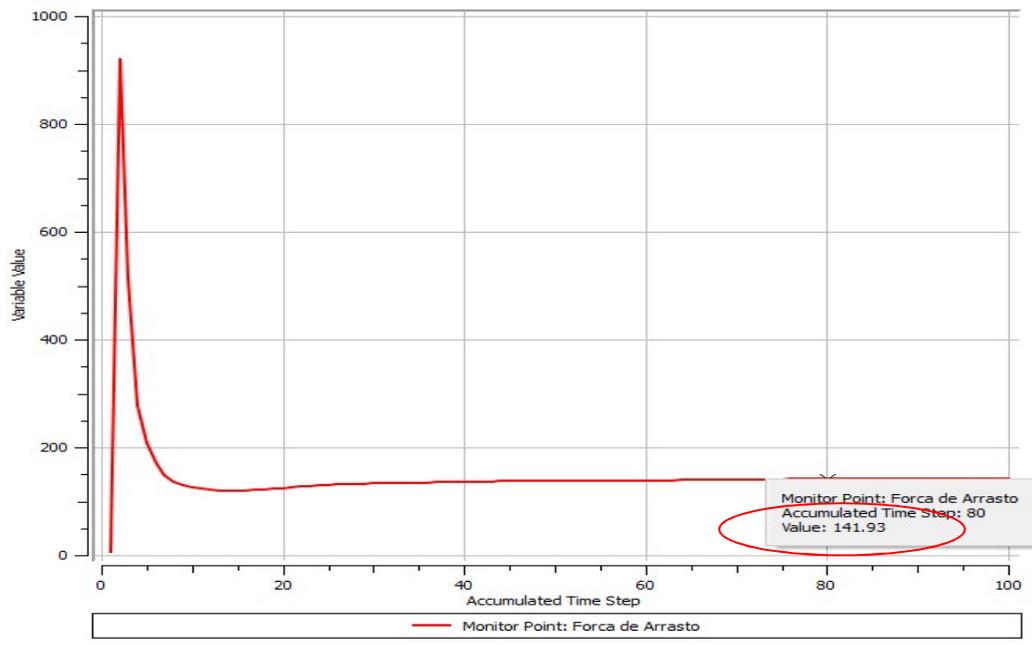


Figura 71 – Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=12,86$ m/s).

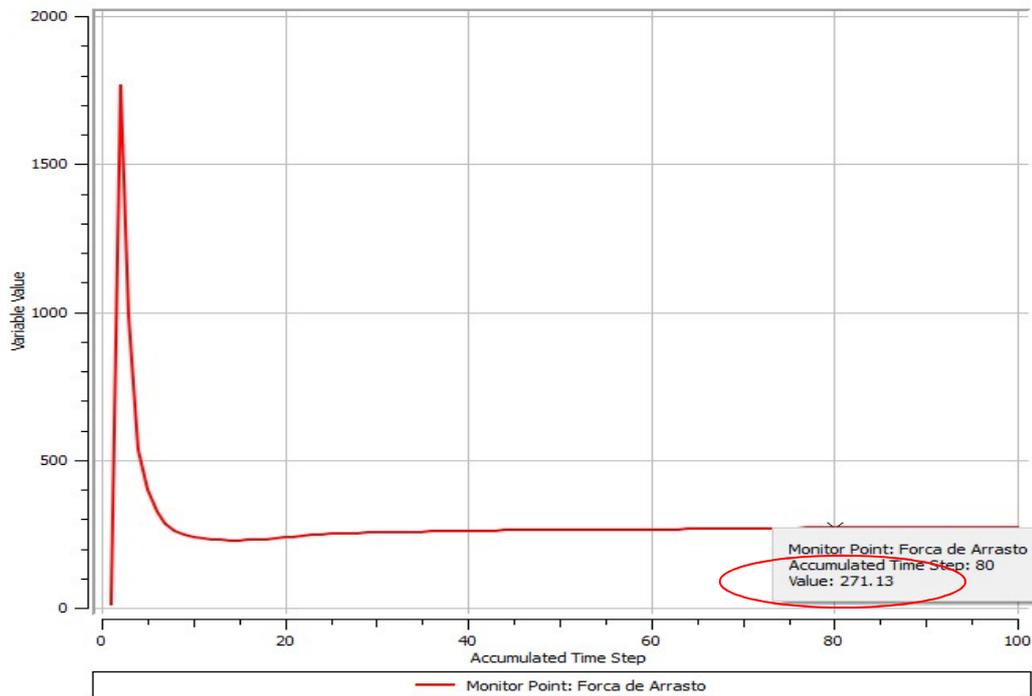


Figura 72– Força de arrasto do VE + TE no centro do teto ($v=17,82$ m/s).

5.3 Simulação na Traseira do Teto

Este tópico refere-se à turbina eólica fixada na parte traseira do teto do veículo elétrico, variando as velocidades de entrada.

A vista frontal do fluxo de ar é visto nas Figuras 73 a 78 variando as velocidades e de entrada.

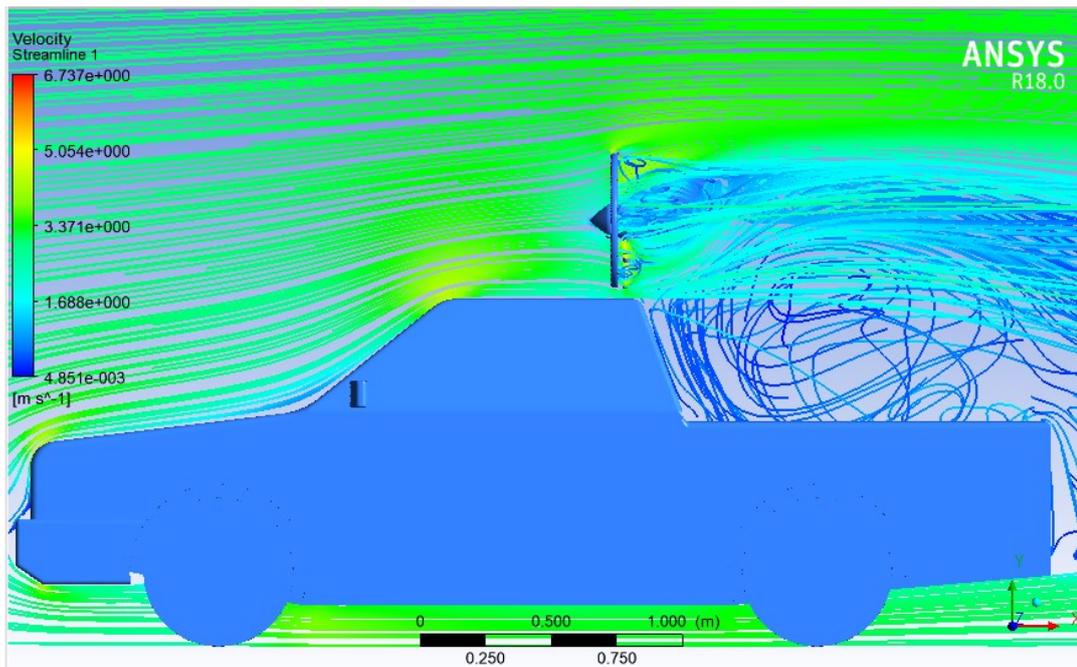


Figura 73 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

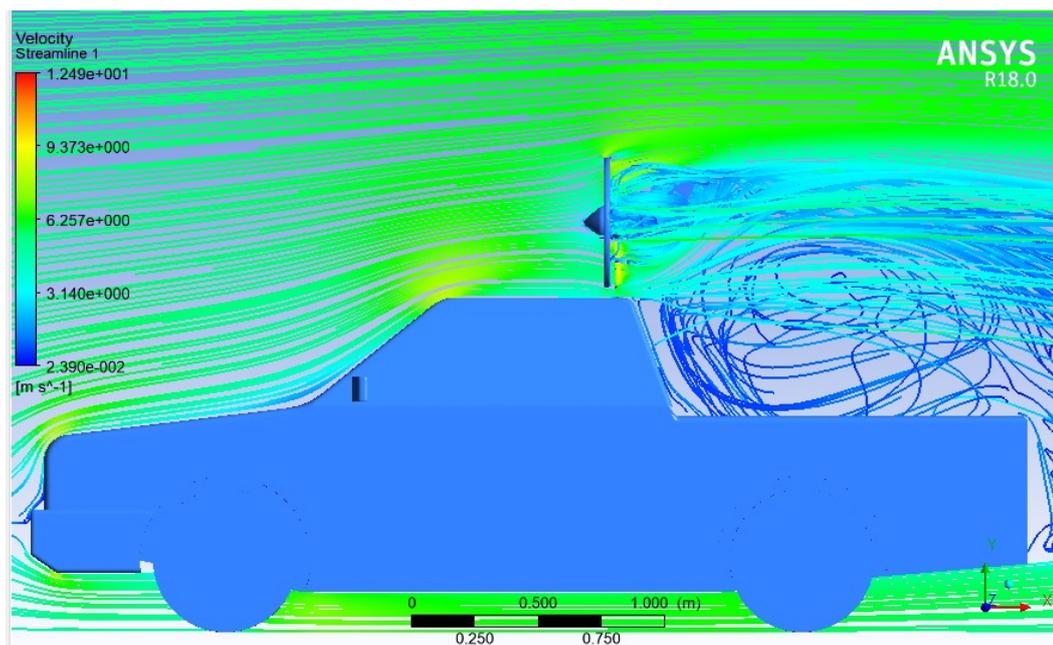


Figura 74 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

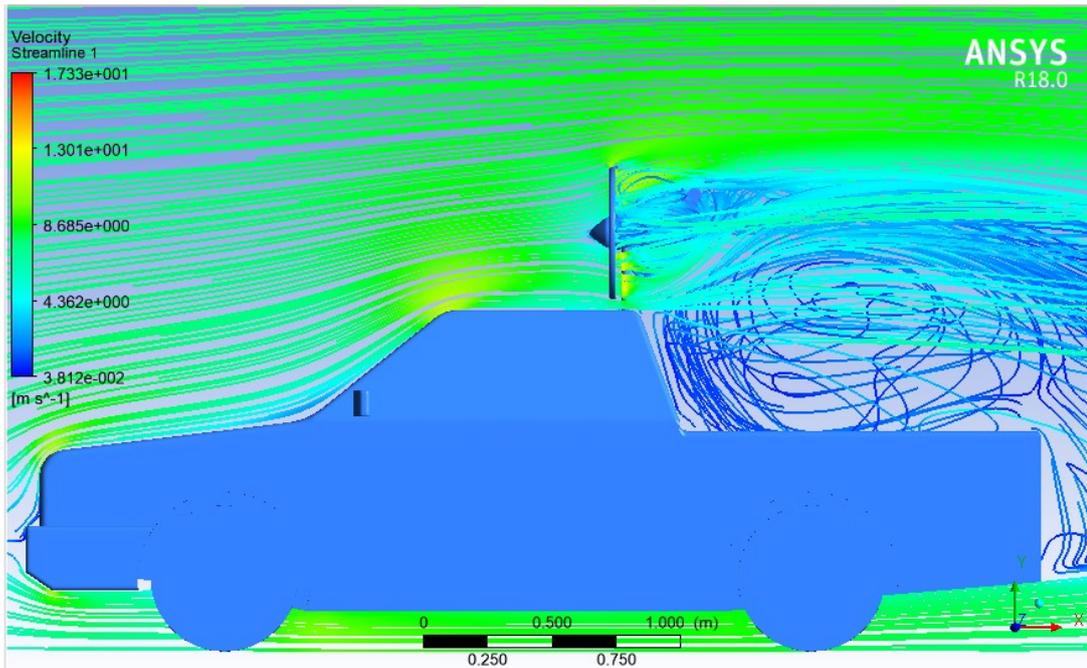


Figura 75 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

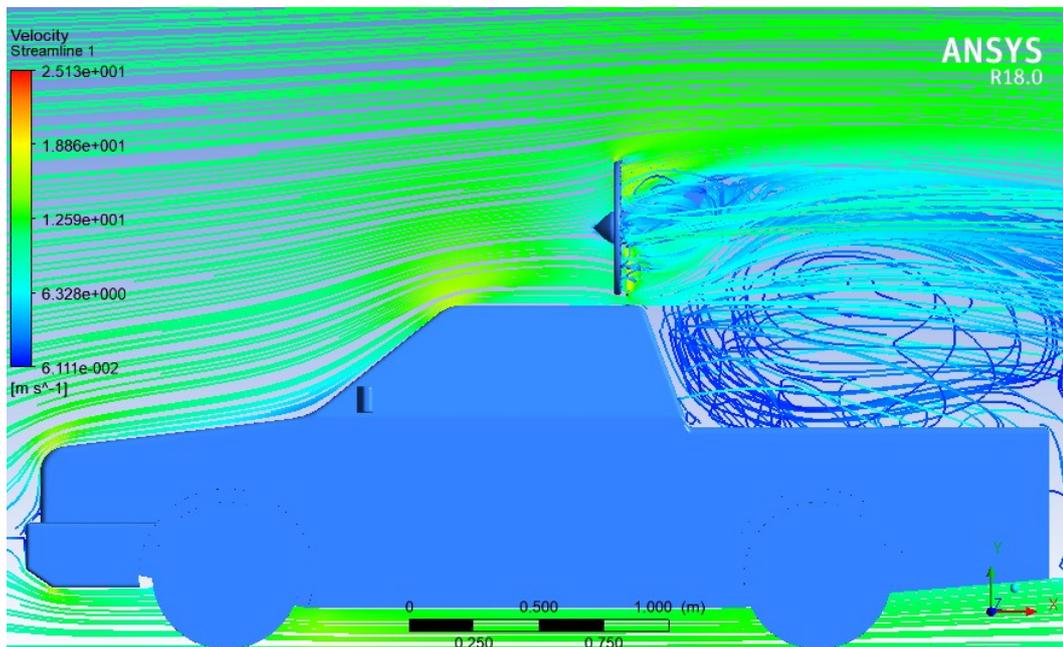


Figura 76– Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).

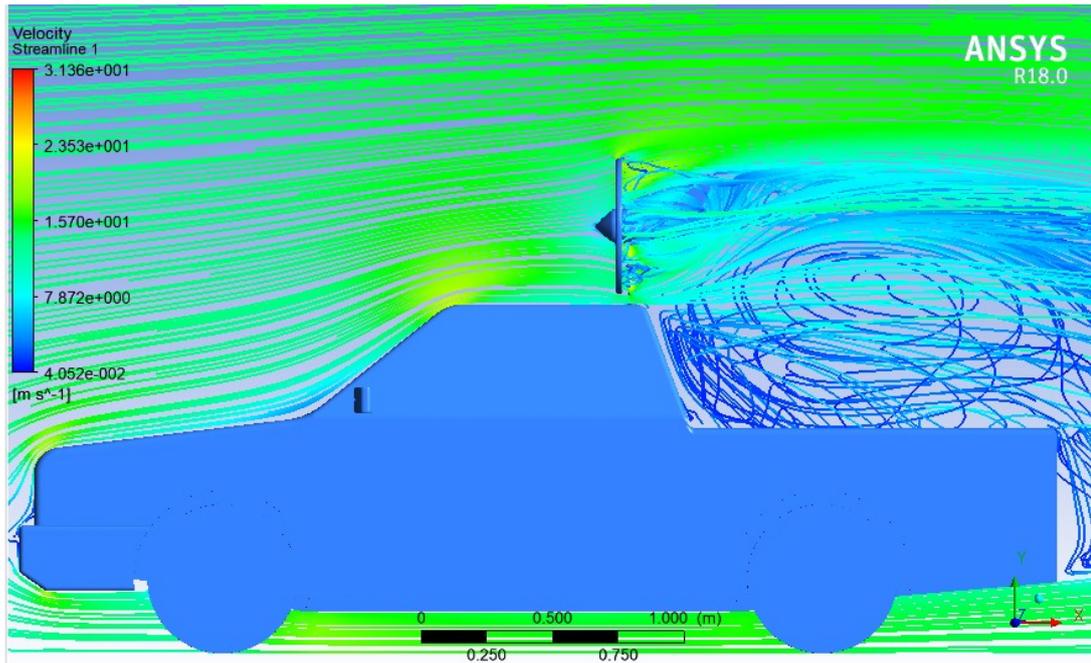


Figura 77 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$)

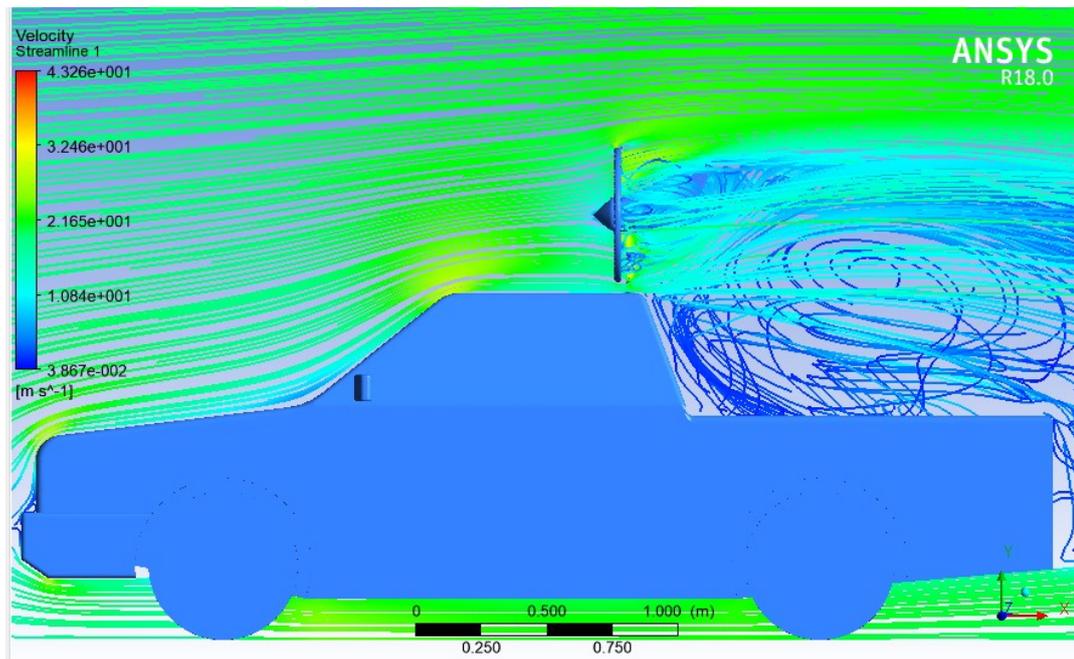


Figura 78 – Vista frontal da simulação do VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).

Nas Figuras 79 a 82 observa-se o fluxo de ar passando pela turbina eólica e as velocidades reais conforme a legenda.

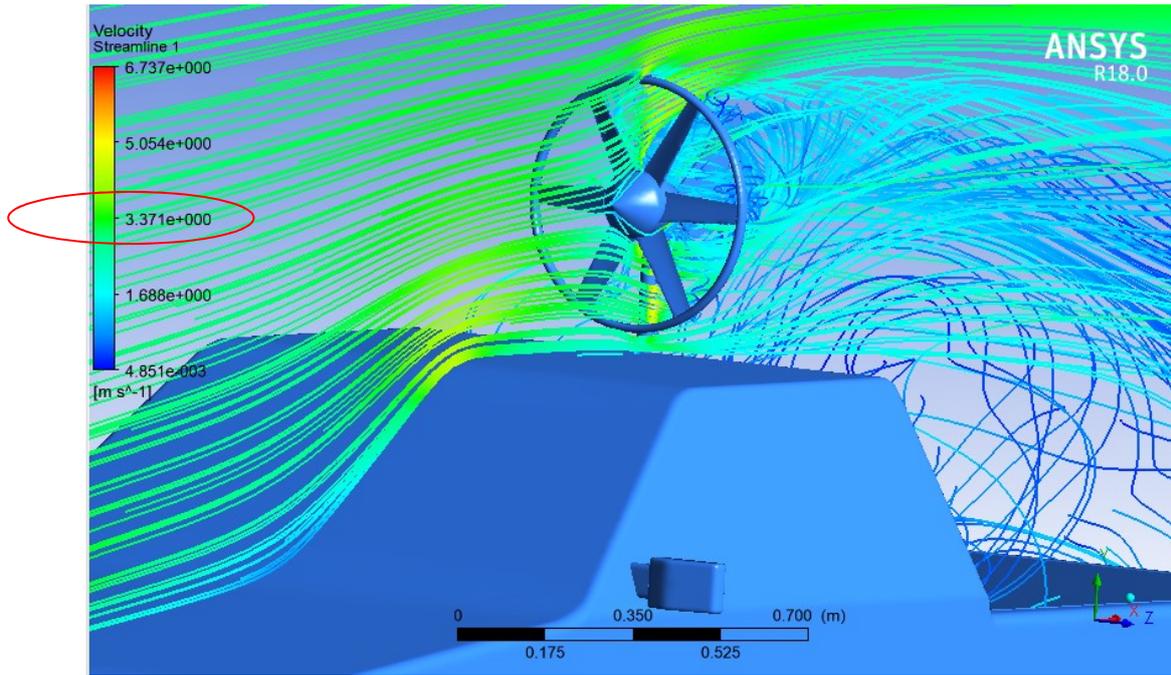


Figura 79 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=2,77\text{m/s}$).

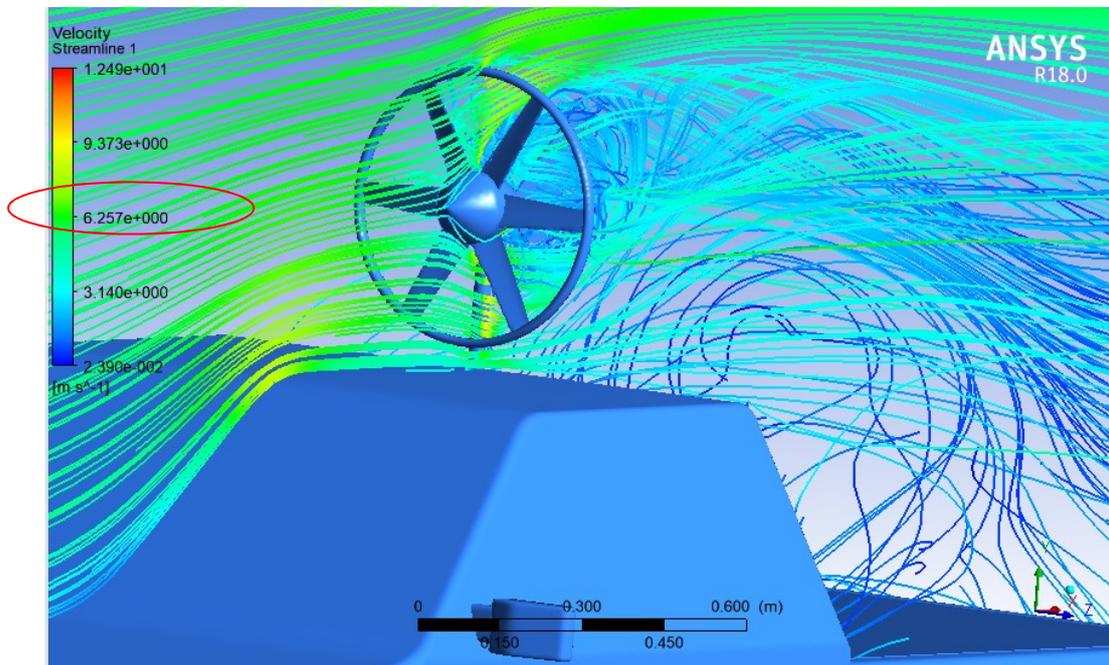


Figura 80 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=5,14\text{m/s}$).

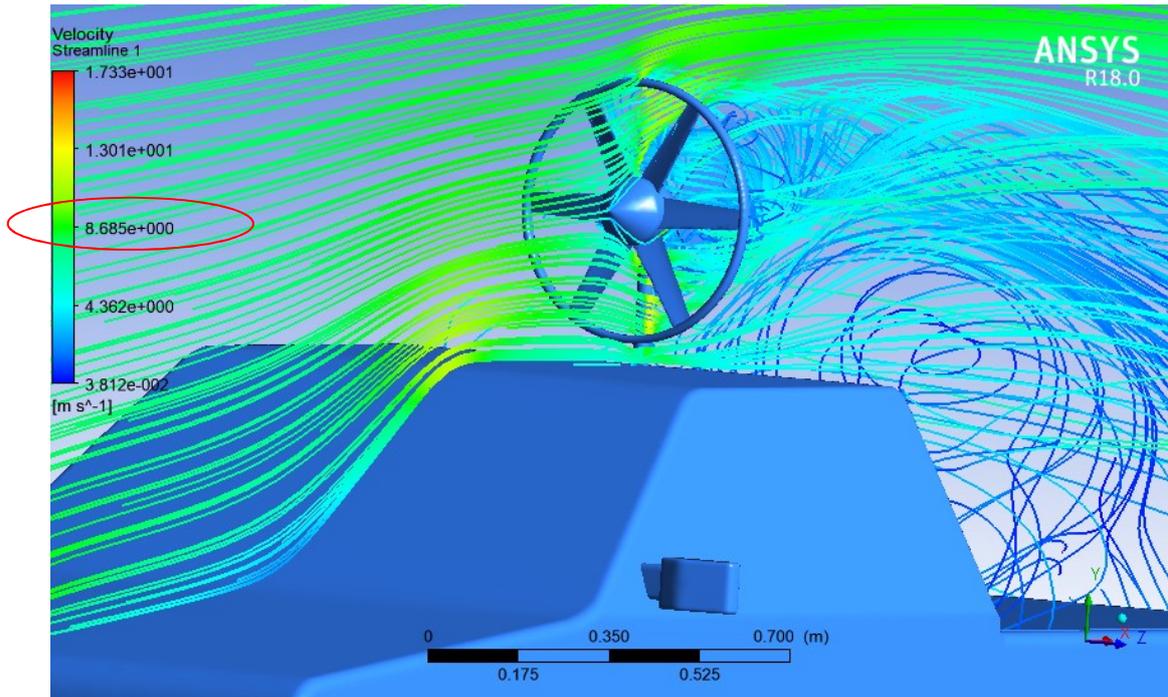


Figura 81 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=7,12\text{m/s}$).

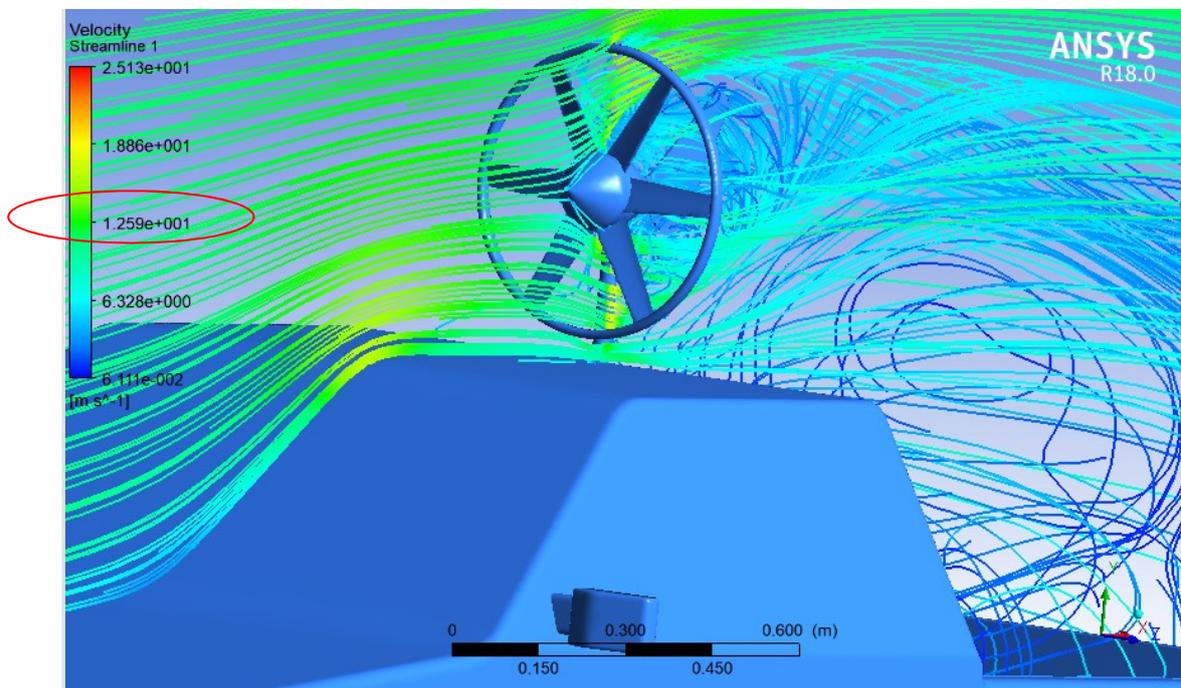


Figura 82 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=10,29\text{m/s}$).

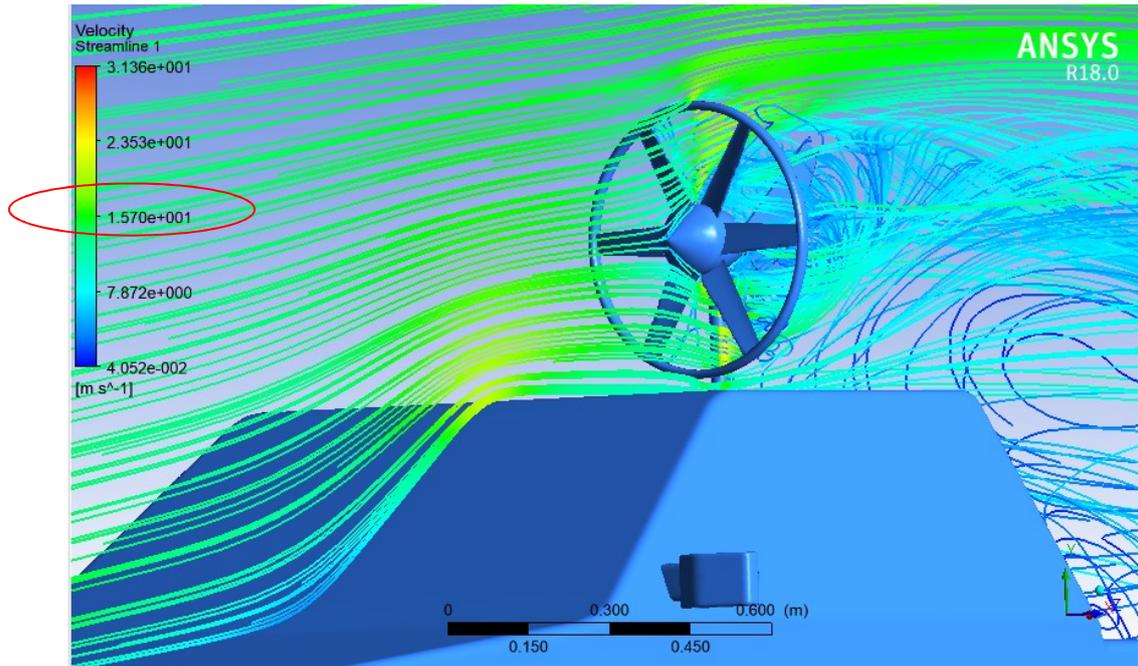


Figura 83 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=12,86\text{m/s}$).

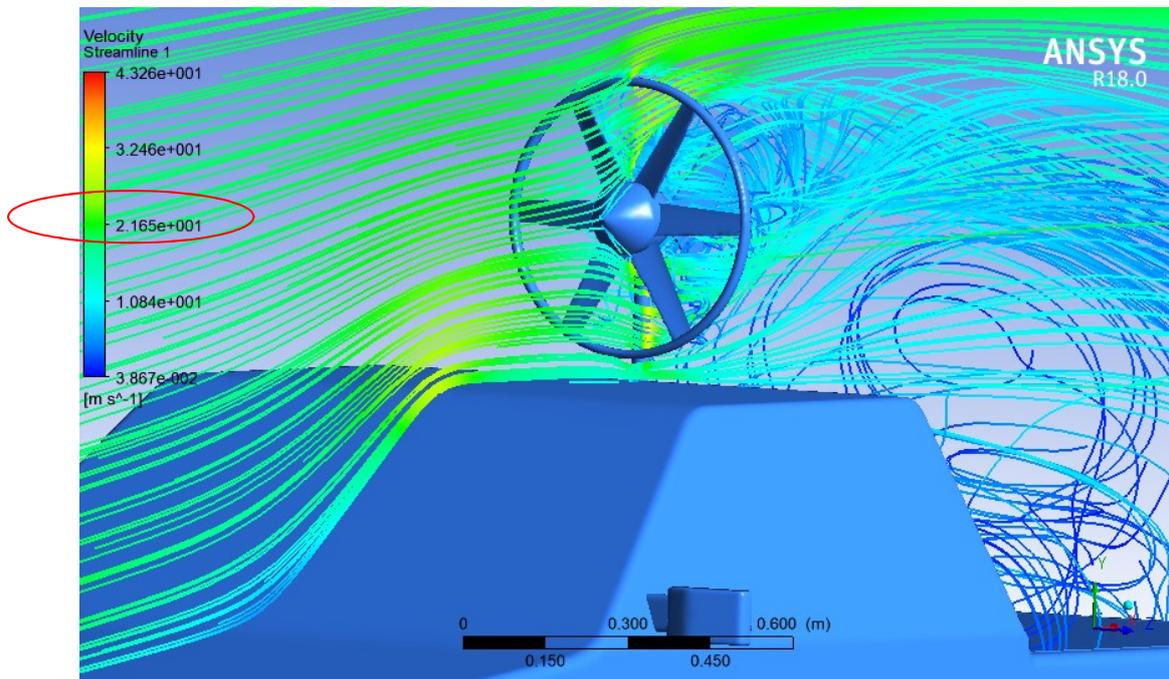


Figura 84 – Vista ampliada da passagem do fluido pelo VE + TE ($v=17,82\text{m/s}$).

Os valores da força de arrasto estão visualizados nas Figuras 85 a 90 e o valor utilizado para comparação dos resultados é obtido na 80ª iteração.

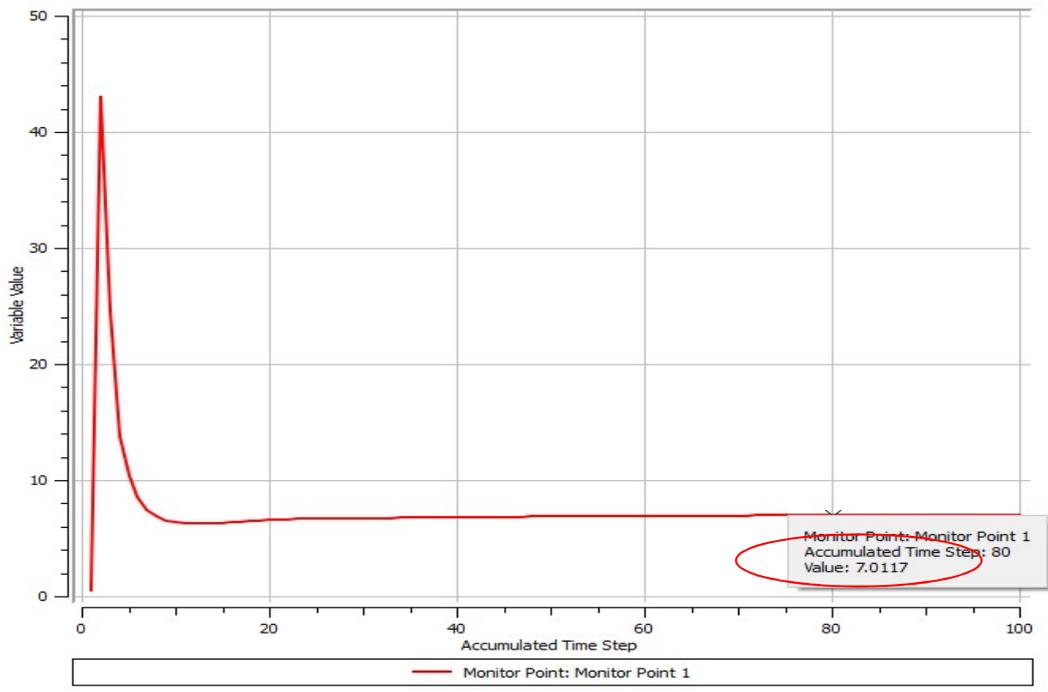


Figura 85 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=2,77\text{m/s}$).

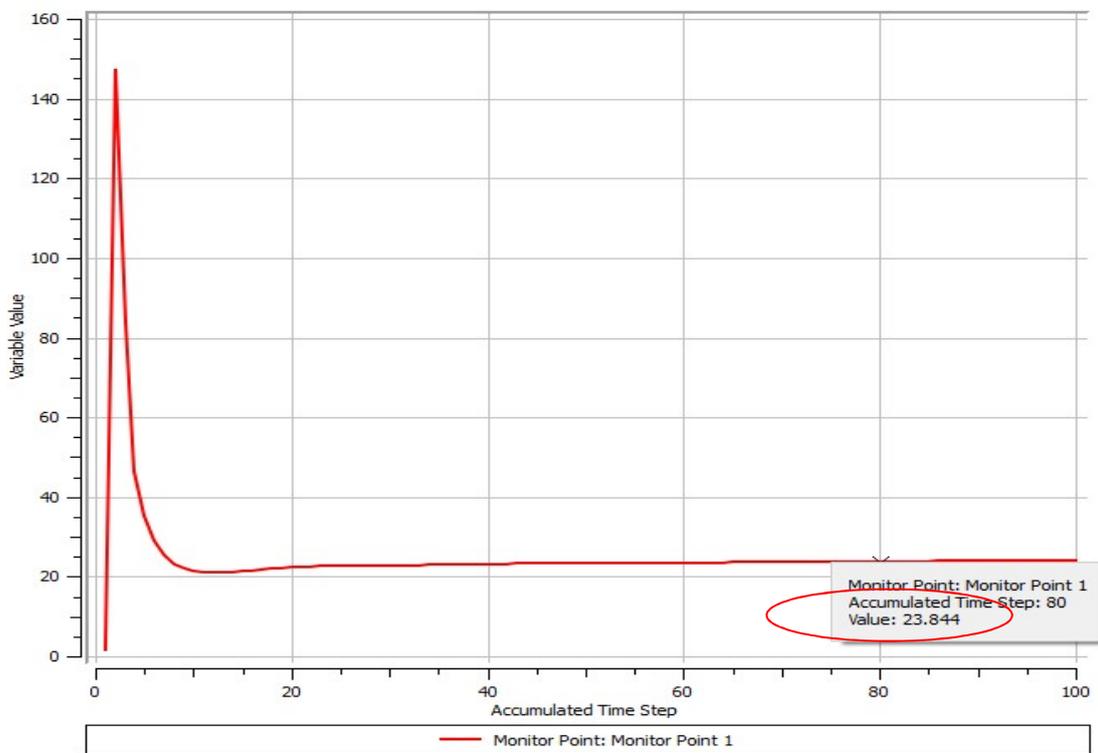


Figura 86 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=5,14\text{m/s}$).

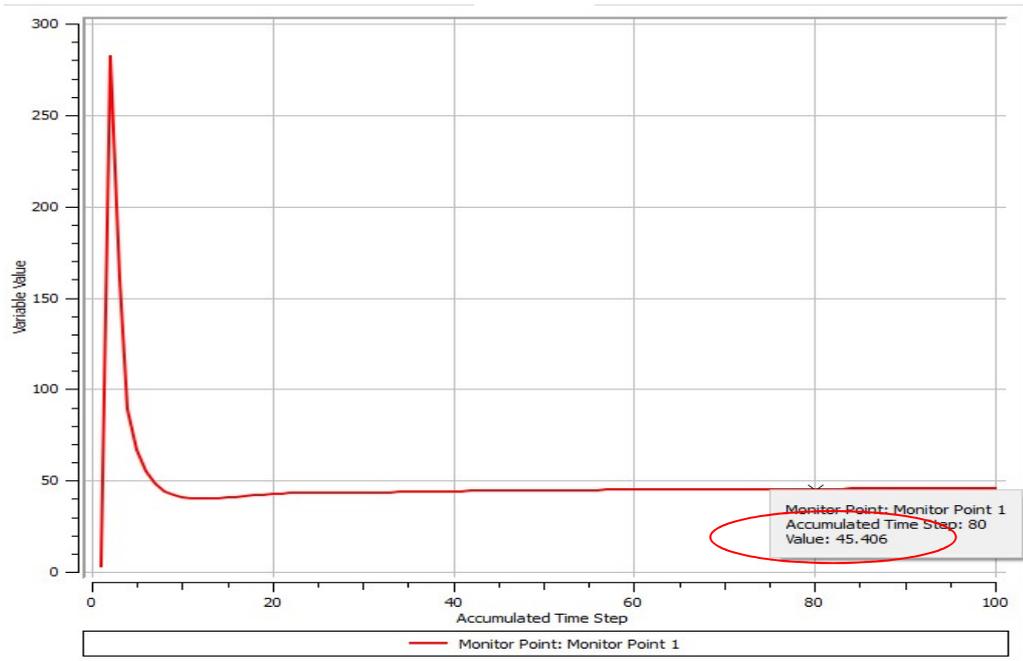


Figura 87 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=7,12\text{m/s}$).

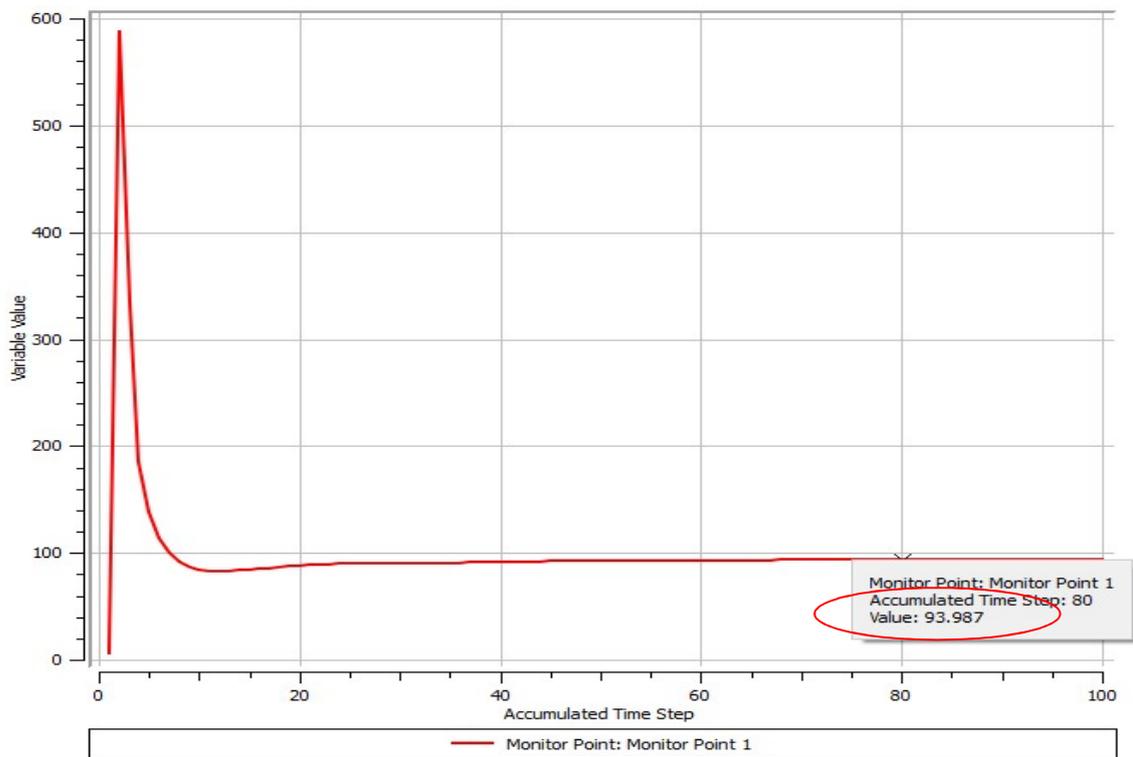


Figura 88 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=10,29\text{m/s}$).

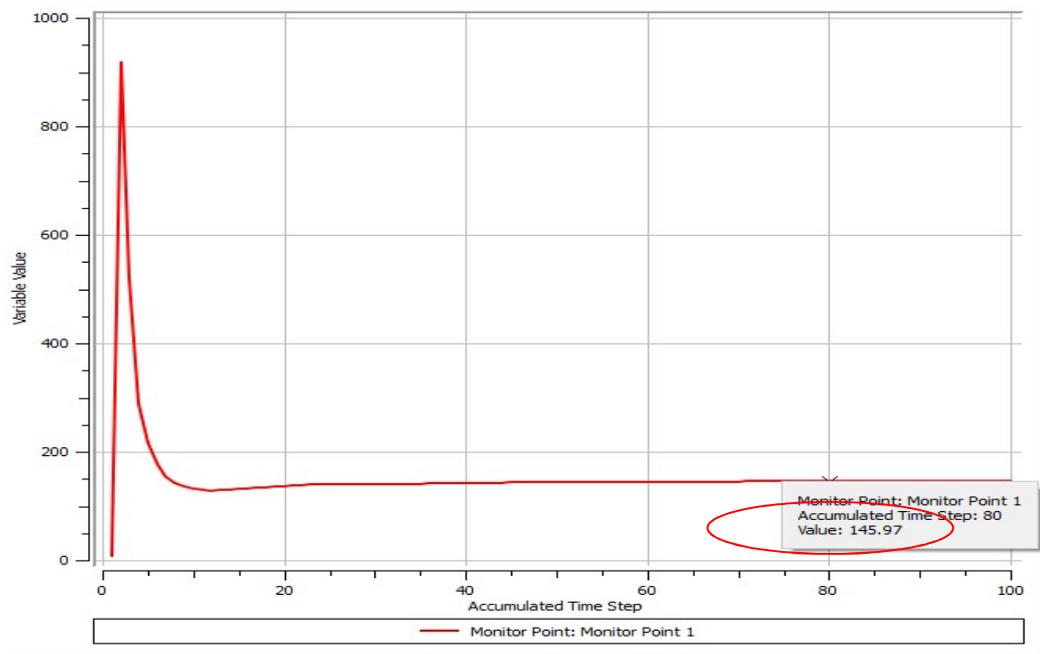


Figura 89 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=12,86\text{m/s}$).

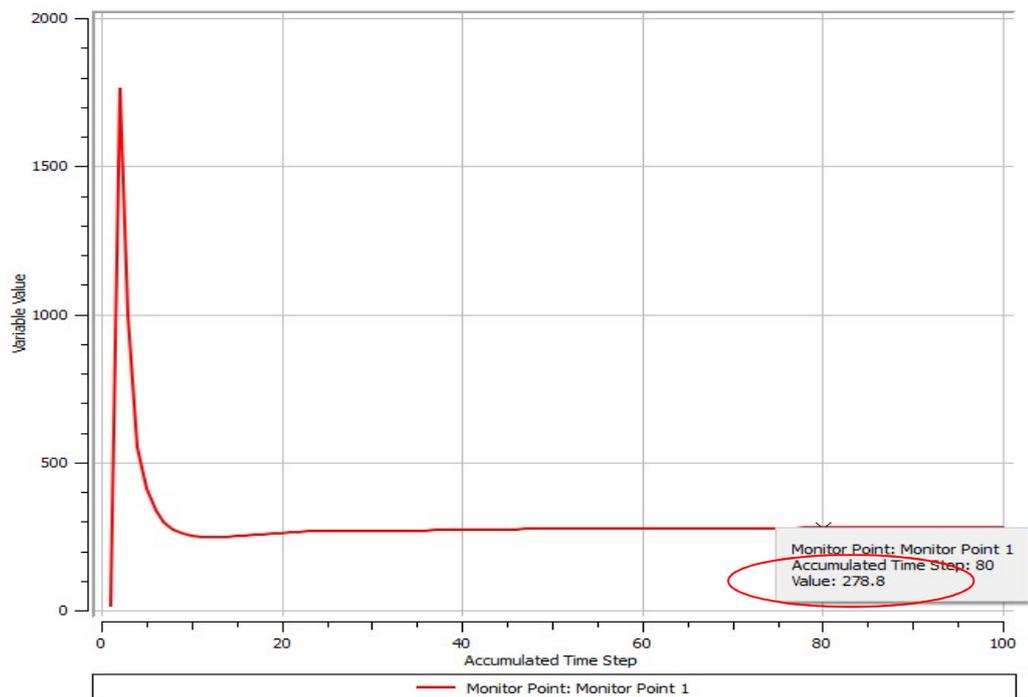


Figura 90 – Força de arrasto do VE + TE na traseira do teto ($v=17,82\text{m/s}$).

A fim de agrupar, melhor visualizar e comparar os resultados das forças de arrasto obtidos nas simulações e na modelagem matemática, a Figura 91 mostra o gráfico das forças

de arrastos (F_D) das três posições definidas nesse trabalho em comparação com a modelagem matemática de acordo com a equação 33.

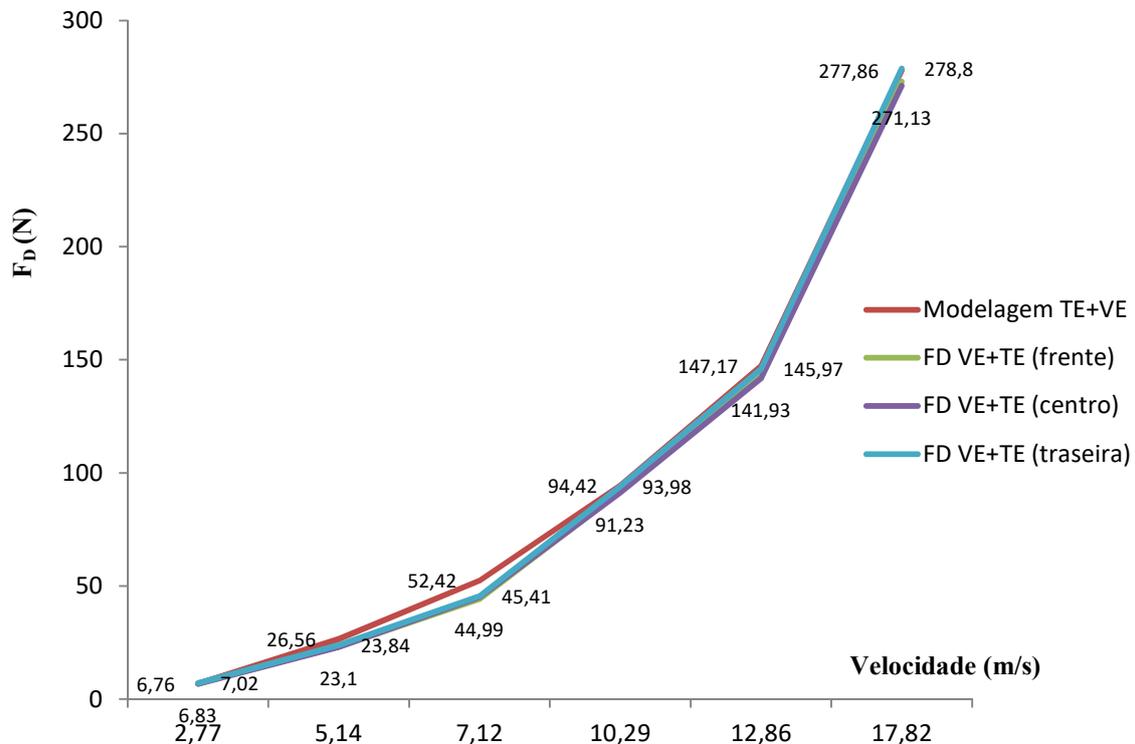


Figura 91 – Comparação da modelagem e simulação do VE+TE.

Na figura 91 pode-se observar que os valores da força de arrasto na traseira são maiores que as demais, descartando-se este local para a instalação da turbina eólica.

Mínimas diferenças nos valores das forças de arrasto totais são encontradas na frente e no centro do teto, porém justifica-se uma melhor análise devido à geometria do veículo.

No centro do teto, a turbina poderá flambar mais facilmente, ou seja, ele se encontra propício a afundar já que não se tem uma estrutura apropriada para fixação.

Analisando as condições da frente do teto vê-se uma instalação mais viável por ser na junção da quina do teto com uma estrutura mais reforçada, sendo assim sua fixação será mais rígida e pode-se afirmar que o melhor posicionamento para a implantação do subsistema é à frente do teto.

Uma velocidade de entrada de 17,82m/s do veículo elétrico corresponde a 64 km/h a qual é possível transitar em vias expressas dentro das cidades. Esta velocidade fornece a velocidade real de 21,68m/s Figura 48 que corresponde a 80 km/h, a eficiência máxima da turbina (MARLEC, 2008).

6 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que este trabalho teve uma relevante contribuição na medida em que se modelou um subsistema de geração de energia eólica com a ideia de aumentar o desempenho do banco de baterias de um veículo elétrico, fazendo com que este aumente sua autonomia tornando viável num futuro próximo a implantação e utilização do mesmo. Porém diante dos resultados observa-se que a melhora foi satisfatória diante dos resultados obtidos, dando margem a futuras pesquisas para melhoria do desempenho.

Para dar credibilidade compararam-se os modelos analíticos com as simulações realizadas.

Diante das análises de escoamento de fluídos e arrasto observa-se a eficiência do fluxo de ar no teto do veículo abrindo possibilidade para diferentes posicionamentos e velocidades de entrada.

Estudos aprimorados foram feitos para a melhor localização da turbina aproveitando ao máximo a energia eólica para a implantação da turbina eólica Ruthland 504 de eixo horizontal em uma *pickup* VW modelo Saveiro 94 disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Finalmente o subsistema pode ser instalado na parte da frente do teto devido as suas condições de estrutura e valores de forças de arrasto menores e mais eficientes.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugestões que podem ser feitas para futuras extensões deste trabalho:

- a) Implantação prática da turbina eólica no veículo elétrico a fim de validar os resultados;
- b) Implantação de uma turbina eólica com maior capacidade de potência, por exemplo, utilizar o modelo Ruthland 913, como observado na Figura 92;



Figura 92 – Turbina eólica Rutland 92.

- a) Verificação do melhor posicionamento da turbina que aproveite ao máximo a velocidade do fluxo de ar de entrada;
- b) Modelagem e simulação de veículos comerciais de maior porte, como ônibus e caminhões elétricos com a aerodinâmica da Figura 93, visto que estes veículos necessitam de maior desempenho;



Figura 93 – Caminhão conceito elétrico Tesla.

- Verificação do melhor posicionamento da turbina nos modelos sugeridos visando uma melhora em sua autonomia;

- Implantação prática da turbina eólica em caminhões e ônibus elétricos para validar os resultados.
- Uma dificuldade encontrada para a realização deste trabalho foi na simulação, onde cada ensaio levou aproximadamente de 2 à 3h, em um computador com configurações mínimas com uma memória Ram de 8G com um processador CORE i5 e 1 Tb de HD.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFIA

- ALVES, Marcelo Ivanildo dos Santos. Fontes de energias alternativas e os desafios para a cadeia produtiva automotiva. **Dissertação de Mestrado**, Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do Paraná. 2011.
- ANDERSON, J.; ANDERSON, C.D. **Electric and Hybrid Cars: A History**. McFarland & Co., London, UK. 2010.
- ARBEX, M. A; SANTOS, U. P; MARTINS L. C; SALDIVA P. H. N; PEREIRA, L. A. A; BRAGA, A. L. F. **A poluição do ar e o sistema respiratório**. J. bras. pneumol. vol.38 no.5 São Paulo set./out. 2012.
- ARGENTINO, F. L.; BEPPU, S. K. Projeto e construção de turbina eólica para instalações comerciais e residenciais. **Projeto de pesquisa** apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica. 2007.
- AWAL, M. R.; JUSOH, M.; SAKIB, M. N.; HOSSAIN, F. S.; BESON, M. R. C.; ALJUNID, S. A. **Design and Implementation of Vehicle Mounted Wind Turbine**. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 10, N 19, 2015.
- BARAN, Renato. A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil - Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade. **Tese de doutorado** do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2012.
- BARASSA, Edgar. Trajetória Tecnológica do Veículo Elétrico: Atores, Políticas e Esforços Tecnológicos no Brasil. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 2015.
- BRAND, G.L. Influência de carregamentos aerodinâmicos na estabilidade direcional de veículos rodoviários. São Carlos, 2010.

- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- BRUNETTI, Franco. *Mecânica dos Fluidos*. 2 ed. São Paulo: **Pearson**, 2005. 410 p.
- CALLON, M. The Sociology of an Actor-Network: **The Case of the Electric Vehicle**, in Callon, M., Law, J. and Rip, A., ed., *Mapping the Dynamics of Science and Technology*, Macmillan, London, 1986.
- CASTEJON, D. V., Método de Redução do Arrasto e seus Impactos Sobre a Estabilidade Veicular. **Dissertação de Mestrado**, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011
- COALITION, E. **State of the Plug-in Electric Vehicle Market: EV Market Outlook**. Disponível:<http://www.electrificationcoalition.org/sites/default/files/EC_State_of_PEV_Market_Final.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2014.
- COSTA, W. Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica, **Dissertação de Mestrado**, UERJ, 2009.
- COWAN, R.; HULTÉN, S. **Escaping Lock-in: The Case of Electric Vehicle**. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 53, pp. 61-79, 1996.
- CHAN, C.C. The Rise and Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned. **Proceedings** of the IEEE, vol. 101, no. 1, pp. 206-212, 2013.
- CROLLA, David A. **Automotive Engineering**. 1. Ed. Oxford: Elsevier, 2009. 827 p.
- DANTAS, A; *Fórmula 1: Evolução, Competitividade e Regulamentos*, 2012.
- EPA, 2007. **Light-Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends: 1975 through 2007**. United States Environmental Protection Agency. United States, 2007.

FERDOUS, S. M; KHALED, W. B.; AHMED, B.; SALEHIN, S.; OVY, E. G. **Electric Vehicle with Charging Facility in Motion using Wind Energy**. World Renewable Energy Congress 2011, Sustainable Transport, Linköping, Sweden, 2011.

FLINK, J. J. **America Adopts the Automobile: 1895-1910**, Cambridge Mass, 1970.

FREITAS, D. J. B. Estudo e Aplicação de Modelos Analíticos na Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis: Proposição de Extensões aos Modelos Tradicionais. 2015. 88 f. **Dissertação** (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS. 2015.

GAYLARD, A. P., The Appropriate Use of CFD in the Automotive Design Process. SAE Paper No. 2009-01-1162, **Society of Automotive Engineers**, Warrendale, Pa., 2009.

GEELS, F. W. The Dynamics of Transitions in Socio-technical Systems: A Multi-level Analysis of the Transition Pathway from Horse-drawn Carriages to Automobiles (1860–1930). **Technology Analysis & Strategic Management** Vol. 17, No. 4, 445–476, 2005.

HOYER, K. G. **The History of alternative Fuels in Transportation: The Case of Electric and Hybrid Cars**. *Utilities Policy*, v. 16, 63-71, 2008.

HUCHO, W. H. SOVRAN, GINO. Aerodynamics of Road Vehicles, **Annual Review of Fluid Mechanics**, 1998.

IPEA, **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Impactos Ambientais e Econômicos dos Veículos Elétricos e Híbridos Plug-In: uma Revisão da Literatura. 2015.

JAMISON, A. **The Steam-Powered Automobile**. An Answer to Air Pollution, Indiana University Press, London, 1974.

KATZ, J. **Race Car Aerodynamics – Design for Speed**, 2nd Edition, Bentley Publisher, Cambridge, USA, 1995.

- LARMINE J., LOWRY J. **Electric Vehicle Technology Explained**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 296 p.
- LEITMAN, Seth; BRANT, Bob. **Electric Vehicle**. 2. ed. New York: Mc Graw Hill, 2009. 350 p.
- MARLEC RENEWABLE POWER, The Rutland 504 Windcharger. Manufactured in the UK by: Marlec Eng Co Ltd. England, 2008. 3p. **MODEL – MANUAL**.
- MARQUES, Jeferson. Turbinas Eólicas: Análise, e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação. **Dissertação de Mestrado** em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Maria. 2004.
- MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. Race Car Vehicle Dynamics, **Society of Automotive Engineers**, Warrendale, Pa., 1995.
- MOWERY, D. C.; ROSENBERG, N. Trajetórias da Inovação – mudança tecnológica nos Estados Unidos da América no século XX. **Clássicos da Inovação**. Editora da Unicamp, 2005.
- MUSSON, B.R. Fundamentos da mecânica dos fluidos: **Escoamentos sobre corpos imersos**. Editora; 4ª ed.; São Paulo; editora Edgard Blücher; 2004.
- NICHOLON, A. **Le véhicule électrique. Mythe ou réalité**: Éditions de la maison des sciences de l'homme, Paris, 1984.
- NOCE, Toshizemom. Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento. **Dissertação de Mestrado**, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2009.
- PERUJO, A.; THIEL, C.; NEMRY, F. Electric vehicles in urban context: environmental benefits and techno-economic barriers. *In*: SOYL, S. (Ed.). **Electric vehicles: the benefits and barriers**, 2011.

- PILLAI, Jayakrishnan R. Electric Vehicle Based Battery Storages for Large Scale Wind Power Integration in Denmark. Doctorate thesis, **Faculty of Engineering**, Science and Medicine, Aalborg University, 2010.
- PRAJAPATI, V. M.; THAKKAR, K. H. Determination of Energy Produced By Wind Mill on Running Vehicle. **International Journal of Engineering Research and Applications**, Vol. 3, Issue 1, pp.106-110, 2013.
- QUEIROZ, Juliana de Freitas. Introdução do veículo híbrido no Brasil: Evolução tecnológica aliada à qualidade de vida. **Dissertação de Mestrado**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.
- RAMOS, Denis Fernando. Tração em Veículo Elétrico: influência da força de arrasto no cálculo da força de tração dos veículos elétricos. **Dissertação de Mestrado**, Universidade de Taubaté. 2013.
- RIBAS, D.M; **Projeto aerodinâmico de um veículo para competições de Rali Cross Country**. São Paulo, 2008.
- ROBERTS, P. **Veteran and Vintage Cars**. Paul Hamlyn, London, 1963.
- SOUSA, B.S. **Projeto de perfis aerodinâmicos usando técnicas de otimização**. Itajubá, 2005.
- SOUZA, B. S; GONÇALVES, H. H. A., Análise da aerodinâmica de carros populares. Revista Vozes dos Vales da UFVJM: **Publicações Acadêmicas** – MG – Brasil – Nº 03 – Ano II – 05/2013.
- SCHALLENBERG, Richard H. Bottled energy: electrical engineering and the evolution of chemical energy storage, Philadelphia: **American Philosophical Society**, 1982.
- SHAMES, I. H. **Princípios Básicos dos Fluidos – Análise de Escoamentos**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 1973, 534p.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003, 515p.

WAKEFIELD, E. H. *History of the Electric Automobile: Battery-Only Powered Cars*. **Society of Automotive Engineers Inc.**, Warrendale, PA, USA, 1994.

XYDIS, George.; NANAKI, Evanthia. *Wind Energy Based Electric Vehicle Charging Stations Sitting - A GIS/Wind Resource Assessment Approach*. *Challenges*, 6, 258-270, 2015.

<<http://www.locomotivaavapor.xpg.uol.com.br/>>, Acesso em 20 de setembro 2016.

<<http://www.slideplayer.com.br/slide/2300332>>, Acesso em 5 de outubro 2016.

<<http://mgautonovidades.blogspot.com.br/>>, Acesso em 10 de outubro de 2016.

< <http://motorchase.com/pt/2016/03/revolucao-carro-parte-1-motores-eletricos>>, Acesso em 15 de outubro 2016.

<http://solar-wind-nature-energy.com/win_turbines_vt.html>, Acesso em 7 de novembro de 2017.

<<http://www.bdbatteries.com/peukert.php>>, Acesso em 22 de fevereiro de 2018.