

# CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA E COMPARAÇÃO DO SEU USO COM OUTROS MEIOS DE TRANSPORTE

Caroline Fernandes da Silva Andrade Campanati, Mauricio Aguilar Nepomuceno de Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro campus Macaé

## RESUMO

Neste artigo serão abordadas as características de projeto de uma bicicleta elétrica. Observando-se como os parâmetros: inclinação da ladeira, a massa do condutor, o tipo de piso, a posição do condutor, interferem na potência consumida pela bicicleta.

Também será feita uma comparação da bicicleta com veículos de combustão, utilizando como bases um modelo de carro e moto popular. A comparação será feita em relação a trajetos curtos realizados numa cidade observando-se: as velocidades alcançadas, a emissão de CO<sub>2</sub>, os custos e a energia gasta na locomoção. Os resultados mostraram que a bicicleta elétrica possui a vantagem de ser um veículo mais barato e menos poluente, e além disso seu custo por quilometro rodado é menor que o carro e o da moto.

**Palavras Chaves:** Bicicleta Elétrica, Veículos Elétricos

## DESIGN FEATURES OF AN ELECTRIC BIKE AND ITS USE COMPARED WITH OTHER VEHICLES

### ABSTRACT

In this article we will discuss the design features of an electric bicycle. Observing how the parameters: slope, the weight of the driver, type of floor and the position of the driver, interfere with the power consumed by the bicycle.

A comparison between the bicycle and combustion vehicles was made, using as basis a model of popular car and motorcycle. The comparison was made in short journeys made in a city, observing: the speeds attained, the CO<sub>2</sub> emission, the costs and the energy spent in locomotion. The results showed that the electric bicycle has the advantage of being a cheaper and less polluting vehicle, and in addition its cost per kilometer is less than the car and the motorcycle.

*Keywords:* Electric Bicycle, Electric Vehicles.

## 1. INTRODUÇÃO

Esse trabalho tem como intuito estudar as características de projeto de uma bicicleta elétrica a partir da adaptação de uma bicicleta convencional, e comparar seu uso em trajetos curtos com veículos de combustão interna quanto às velocidades alcançadas, a emissão de CO<sub>2</sub>, aos custos e a energia gasta na locomoção.

Atualmente o Brasil enfrenta uma crise econômica, e o brasileiro está buscando formas de redução de custos. O uso

da bicicleta elétrica é uma excelente opção ao comparar o seu custo com o de um carro. A bicicleta elétrica, não obriga a detenção de registro de propriedade, seguro ou licença de condução, o que a torna um veículo bastante acessível. A bicicleta não deve ser vista apenas como uma forma de lazer, mas como um meio de transporte, principalmente para os pequenos percursos.

A bicicleta elétrica é um veículo de baixo custo e dentre seus benefícios podem ser listados: o

descongestionamento do trânsito, o menor uso dos espaços de estacionamento, a melhoria da saúde e da qualidade de vida e a redução da emissão de gases poluentes.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE UMA BICICLETA ELÉTRICA.

### 2.1 Forças contrárias ao deslocamento

Para compreender as características de consumo de potência de uma bicicleta elétrica é importante entender as forças contrárias ao deslocamento.

Para que haja o deslocamento de um veículo é necessário um sistema de propulsão com capacidade de fornecer energia suficiente para vencer as forças opostas ao deslocamento, são essas: resistência do ar, a força de resistência ao rolamento, a gravidade no caso de plano inclinados, e a inércia do veículo. (SILVA, 2013). A equação 1 calcula a força de tração aplicada pelo sistema de propulsão.

$$F_t = F_r + F_D + F_g + F_i \quad (1)$$

Onde:

$F_t$  = Força de tração;

$F_r$  = Força de resistência ao rolamento;

$F_D$  = Força de Resistência aerodinâmica;

$F_g$  = Força gravítica (componente com a direção do movimento);

$F_i$  = Força de inércia.

#### 2.1.1 Força de resistência ao rolamento

As forças de resistência ao rolamento ocorrem devido às propriedades visco-elásticas dos compostos de borracha usados na fabricação dos pneus. Quando há o movimento do pneu, ele é deformado pela carga exercida sobre ele, tornando-o plano na zona de contato pneu-superfície. A força de oposição, originada pela secção plana durante o movimento gera um momento no centro da roda que se opõe ao movimento (TANAKA, 2013). O seu valor é dado por:

$$F_r = P \times f_r \cos \alpha \quad (2)$$

Onde:

P = peso aplicada no centro da roda em Newtons -N,

$f_r$  = coeficiente de resistência ao rolamento;

$\alpha$  = ângulo que a roda faz com chão;

No Quadro 1 são apresentados os valores do coeficiente de resistência ao rolamento em pneus de bicicleta de acordo com o tipo do piso.

**Quadro 1-** Coeficiente de rolamento.

Tipo de piso	Valor de $f_r$
Piso de madeira	0,001
Piso de cimento	0,002
Piso de asfalto	0,004
Piso de asfalto áspero	0,008

Fonte adaptação (SILVA, 2013)

#### 2.1.2 Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica, também conhecida como força de arrasto, ocorre devido ao movimento do ar entorno do veículo. Esta força depende da sua forma, da sua área frontal e da velocidade de deslocamento relativa. (SILVA, 2013).

Esta força é resultado de duas componentes principais: resistência de forma e fricção superficial. (TANAKA, 2013).

**Arrasto de forma:** O movimento do veículo empurra o ar em sua frente. Porém o ar não consegue sair instantaneamente do caminho e sua pressão irá aumentar, resultando em uma alta pressão de ar. Na parte traseira do veículo o ar não consegue preencher instantaneamente o espaço deixado pelo movimento para a frente do veículo, criando uma zona de baixa pressão. Portanto, há duas zonas de pressão que se opõe ao movimento. (TANAKA, 2013).

**Fricção superficial:** O ar que está próximo a superfície do veículo move-se com quase a mesma

velocidade do veículo enquanto o ar afastado do veículo encontra-se estagnado. (TANAKA, 2013).

A força de resistência aerodinâmica pode ser calculada através da seguinte expressão

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A_f C_D \quad (3)$$

Onde:

$F_D$ : Força de resistência aerodinâmica. [N]

$\rho$ : Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$A_f$ : Área frontal do veículo [m<sup>2</sup>];




$C_D$ : Coeficiente de resistência aerodinâmica ou de arrasto

$v$ : Velocidade do veículo [m/s]

$v_w$ : Velocidade do vento medida no mesmo referencial de deslocação do veículo [m/s]

O quadro 2, apresenta como o coeficiente de resistência aerodinâmica pode variar conforme a posição do ciclista.

**Quadro 2** -Valores típicos para o coeficiente de resistência aerodinâmica para veículos de duas rodas.

Bicicleta <i>standard</i> com condutor	Coeficiente de resistência aerodinâmica ( $C_D$ )
	1,1
	1,0
	0,88

Fonte : (SILVA, 2013)

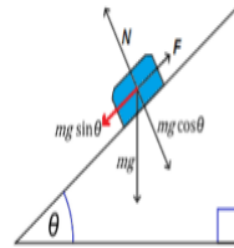
### 2.1.3 Força da gravidade

A força gravitacional que atua em um corpo no plano inclinado está dirigida para baixo, atuando como força resistente ao movimento. Caso o corpo esteja descendo, estará ajudando o movimento. A origem desse vetor é colocada no centro da massa do corpo. Sua expressão é dada por (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1)

$$F_g = Mg \sin \theta \quad (4)$$

A figura 1 exemplifica as forças atuando em um corpo num plano inclinado.

**Figura 1** - Forças atuando em um plano inclinado.



Fonte : HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1

Onde:

$F_g$ : Força gravítica [N]

M: Massa [kg]

g: Aceleração gravítica (g= 9,81m/s<sup>2</sup>)

$\theta$ : Ângulo de inclinação do plano do deslocamento com a horizontal.

### 2.1.4 Força de Inercia

“Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças impressas sobre ele”. Esse enunciado se refere à primeira lei de Newton.

O movimento de uma roda é a combinação do movimento de translação do centro de massa e de rotação. A inércia de um objeto num movimento de translação é dada pela sua massa e em um movimento de rotação é determinada pelo seu momento de inércia. A figura 2 mostra a junção desses dois movimentos (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1).

**Figura 2** –Movimento de rotação e translação e sua soma.

Fonte : (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1)

A figura.2.a) mostra a rotação pura como se o eixo de rotação estivesse estacionário, todos os pontos da rodagem giram em torno do centro com velocidade angular  $\omega$  e todos os pontos da periferia tem uma velocidade linear  $V_{CM}$ . No movimento de translação, todos os pontos da roda se movem para a direita e possuem velocidade escalar  $V_{CM}$ , ou seja, todos os pontos possuem o mesmo deslocamento num dado intervalo de tempo (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1).

A combinação desses movimentos gera o rolamento. No rolamento, somando as velocidades, a extremidade inferior da roda (ponto P) possui uma velocidade nula enquanto na extremidade superior (Ponto T) possui a maior velocidade,  $2V_{cm}$ . (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1).

O contributo da inercia provocadas pelas massas em translação e rotação devem ser consideradas.

**Massa em translação**

$$F^T = m^T \times a \tag{5}$$

Onde:

$F^T$  = Força de inércia de translação [N].

$m^T$  = Massa referente aos corpos em translação [Kg].

a = Aceleração linear [m/s<sup>2</sup>].

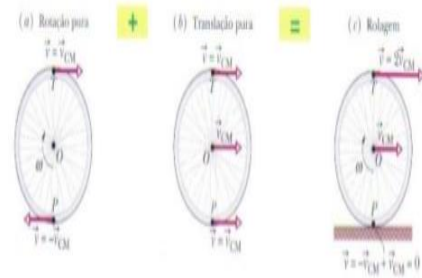
Todas as massas envolvidas na bicicleta sofrem translação, incluindo a massa do condutor.

**Massa em rotação**

No movimento de rotação, a força considerada é dada pela razão da aceleração pela massa em rotação (HALLIDAY, RESNICK, 2011, v.1)

$$F = m^r \times a \tag{6}$$

A aceleração adquirida pelo corpo é a razão da variação da sua velocidade linear em um determinado tempo.



$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{7}$$

A velocidade linear de um movimento circular é dada pela equação 3.8:

$$v = \omega \times r \tag{8}$$

Logo, a força aplicada em uma massa é dada por:

$$F = m^R \times \frac{\Delta(\omega \times r)}{\Delta t} \tag{9}$$

Um efeito rotativo será produzido (binário) ao aplicar uma força em um corpo rígido que irá girar em torno de um eixo de rotação.

$$\tau = F \times r = m^R \times r^2 \times \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \text{ e } \tau = m^R \times r^2 \times \alpha \tag{10}$$

e (11)

Onde :

$\alpha$  - aceleração angular [rad/s<sup>2</sup>].

$m^R$  - massa em rotação [kg].

r - Raio da roda [m].

a - aceleração linear [m/s<sup>2</sup>];

F - Força de inercia de translação [N];

As partes que estão em rotação são : roda, coroa, pinhão, correte, pedal. Logo:

$$m^R = m_{roda} + m_{coroa} + m_{pinhao} + m_{corrente} + m_{pedal}$$

Quando o ciclista não estiver pedalando na bicicleta elétrica, a força de inercia de rotação dos pedais é nula.

O momento de inércia  $I$  é uma medida da resistência que um corpo oferece ao movimento de rotação. Ou seja, ele faz um papel da massa no movimento linear (SILVA, 2013).

O momento de inércia da massa do corpo em relação ao seu eixo de rotação,  $z$ , é dado por (HIBBELER, 2011).

$$I = \int_m r^2 dm \quad (13)$$

Onde,  $r$  é a distância perpendicular do eixo até o elemento arbitrário  $dm$ .

O momento de inércia depende da massa e de como ela é distribuída em relação a um dado eixo de rotação. (SILVA, 2013).

Para um corpo que possua várias peças rotativas, o momento de inércia resultante será a soma de cada momento de inércia.

Para uma única partícula o momento de inércia é dado por:

$$I = m^R x r^2 \quad (14)$$

A segunda lei de Newton é dada substituindo a equação anterior na equação ( $\tau = m x r^2 x \alpha$ ). Logo:

$$\tau = I x \alpha \quad (15)$$

A equação 15 relaciona o binário  $\tau$  com a inércia rotacional de um corpo  $I$  e aceleração angular  $\alpha$ . Nesta equação o binário produz uma aceleração angular fazendo então o papel de uma força, e o momento de inércia faz o papel de massa. (SILVA, 2013).

A força de inércia no ponto de contato com o solo pode ser obtida dividindo o valor dado na equação ( $\tau = I x \alpha$ ) pelo raio da roda da bicicleta.

$$F^R = \frac{\tau}{r} = \frac{I x \alpha}{r} \quad (16)$$

Como a aceleração angular é dada pela forma abaixo:

$$a = \alpha x r \quad (17)$$

Tem-se que a força de rotação será:

$$F^R = \frac{I x a}{r^2} \quad (18)$$

Conforme dito anteriormente, a força de inércia total é dada pela soma da força de inércia de rotação e da força de inércia de translação, dessa forma:

$$F^i = F^R + F^T \quad (19)$$

Logo:

$$F^i = \frac{I x a}{r^2} + m^T x a \quad (20)$$

## 2.2 Potência mecânica - $P_m$

O valor da potência mecânica a aplicar na roda para vencer a força de tração,  $F_t$ , depende diretamente do valor da velocidade da bicicleta, dessa forma, quanto maior for a velocidade maior será o seu valor. Conforme mostrado na equação 21

$$P_m = F_T x v \quad (21)$$

## 2.3 Potência elétrica - $P_e$

A potência elétrica, equação 22, a fornecer ao controlador depende diretamente da potência mecânica.

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_M \eta_E} \quad (22)$$

Onde:

$\eta_E$  = Rendimento de transmissão mecânica

$\eta_M$  = Rendimento do *power drive* “controlador + motor”

Fonte: próprio autor

## 2.4 Velocidade de rotação das rodas

A velocidade de rotação das rodas, pode ser obtida, utilizando a equação abaixo, que está relacionada a velocidade da bicicleta.

$$v_r = \frac{v \times 60}{2 \times \pi \times r} \quad (23)$$

## 2.5 Potência consumida.

Para realizar todos os cálculos desse artigo, foram utilizados alguns parâmetros bases (quadro 4) em todas as contas. Quando algum desses parâmetros for modificado, será especificado no decorrer do texto.

**Quadro 4** – Parâmetros

Parâmetros	Valor	Unidade
Densidade do ar ( $\rho$ )	1,169	kg/m <sup>3</sup>
Área frontal	0,5	m <sup>2</sup>
Coefficiente de resistência aerodinâmica	1	-
Velocidade do veículo	25	km/h
Velocidade do vento	0	-
Massa do Condutor	100	Kg
Massa da bicicleta	20,98	Kg
Massa da bateria	13,7	Kg
Gravidade	9,81	m/s <sup>2</sup>
$\eta_E$	0,75	-
$\eta_M$	0,80	-
Raio da bicicleta (aro 26)	0,6604	m
Piso asfalto	0,004	

A densidade do ar escolhida foi a equivalente a temperatura de 25°C. A escolha da área frontal e o coeficiente de resistência aerodinâmica foram escolhidos com base na dissertação de mestrado “Sistema de mobilidade elétrica de duas rodas de elevada eficiência e performance.” de Silva 2013. A escolha da massa da bicicleta foi baseada no modelo Breeze S210E (SENSE BIKE)

## 3.1 Valores para a força de resistência ao rolamento.

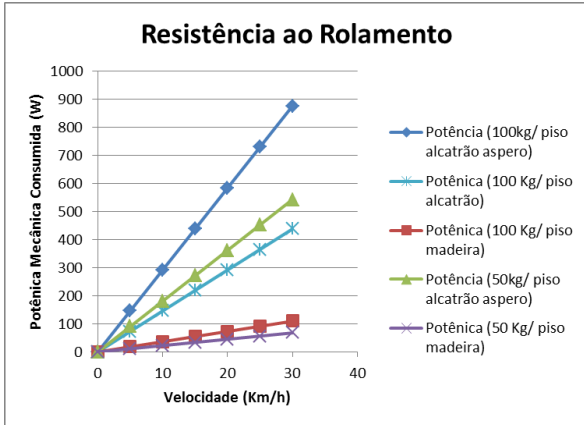
Conforme visto no capítulo anterior, através da equação 2 a força de resistência ao rolamento irá variar, de acordo com o peso total envolvido no sistema, o coeficiente de resistência ao rolamento e o ângulo que a roda faz com o chão.

Nos quadros 5, 6 e 7 são apresentadas algumas variações que a força de resistência ao rolamento para condutores de 100kg, 70kg e 50kg (sem variar a massa da bicicleta), para diferentes pisos sem haver inclinação do plano. Os nomes alcatrão e betão se referem a asfalto e cimento respectivamente em português de Portugal.

**Quadro 5**- Força de resistência ao rolamento

Inclinação da ladeira	Piso de alcatrão áspero	Piso de alcatrão	Piso de Betão	Piso de madeira
massa 100 kg	10,73	5,36	2,68	1,34
massa 70 kg	8,22	4,11	2,06	1,03
massa 50 Kg	6,65	3,33	1,66	0,83

Quanto maior a massa do condutor e mais áspero for o tipo do piso, maior será o valor da força de resistência ao rolamento, conforme pode ser visto nos quadros anteriores.



Observa-se como o tipo do piso interfere no consumo de potência, em uma proporção maior do que o peso do condutor. Cabe destacar que a potência consumida aqui exibida é apenas a referente a força de resistência ao rolamento. Observa-se também que a variação de potência para alcançar as mesmas velocidades é da ordem de 1 hp(745,7 W) para algumas velocidades.

### 3.2 Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica, calculada pela equação 3, pode variar conforme a área frontal do veículo, o coeficiente de resistência aerodinâmico e a velocidade relativa do ar.

Com os parâmetros do quadro 4, variando a velocidade da bicicleta a velocidade do vento e o coeficiente de arrasto, isso é a posição do condutor obtemos os resultados do quadro 9.

De maneira análoga, utilizando os dados do quadro 4, variando a velocidade do vento para diferentes valores de velocidade no veículo a força de resistência aerodinâmica se comportará de acordo com o quadro 9.

**Quadro 9** - Valores da Força de Resistência aerodinâmica (N) conforme variação de velocidade do veículo e velocidade do vento.

velocidade do vento (km/h)/ Velocidade do veículo(km/h)	-10	-5	0	5	10
0	2,26	0,56	0,00	0,56	2,26
5	5,07	2,26	0,56	0,00	0,56

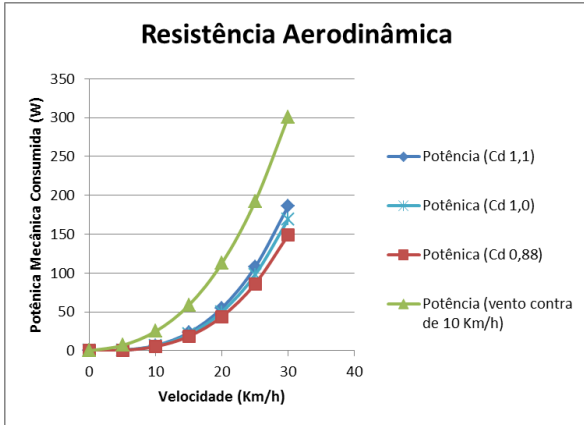
10	9,02	5,07	2,26	0,56	0,00
15	14,09	9,02	5,07	-2,26	0,56
20	20,30	14,04	9,02	5,07	2,26
25	27,62	3,49	20,30	14,04	5,07

Fonte: próprio autor

Para a última análise do comportamento da força de resistência aerodinâmica, serão utilizados diferentes valores do coeficiente de resistência aerodinâmico, conforme o quadro 10, tendo como base os valores do coeficiente de resistência aerodinâmica encontrados no quadro 7, no qual a posição do ciclista irá influenciar o valor da força de resistência aerodinâmica.

**Quadro 10-** Valores da Força de Resistência aerodinâmica (N) conforme variação de velocidade do veículo e coeficiente de resistência aerodinâmico (CD).

Cd / Velocidade do veículo (km/h)	1,10	1,00	0,88
0	0,00	0,00	0,00
5	0,62	0,56	0,50
10	2,48	2,26	1,98
15	5,58	5,07	4,46
20	9,92	9,02	7,94
25	15,50	14,09	12,40



Observa-se uma sutil contribuição da posição do condutor e um grande contribuição da presença de vento na direção contrária.

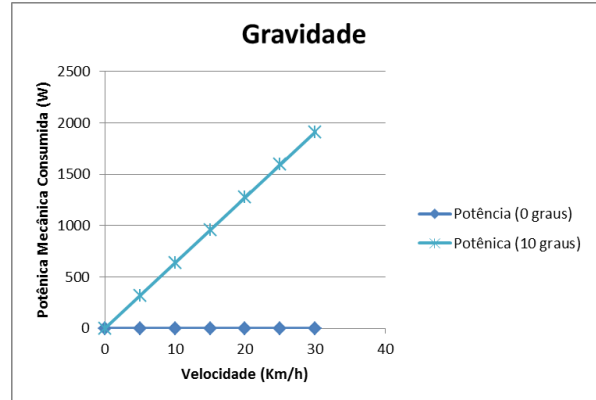
### 3.3 Valores para a Força da Gravidade

A força gravitacional varia conforme dois parâmetros: a massa do sistema e o ângulo de inclinação do plano do deslocamento com a horizontal. O quadro 11 apresenta os valores da força conforme a variação desses parâmetros.

**Quadro 11** - Valores da força de Gravidade para diferentes inclinações e massas

Inclinação da ladeira / massa do condutor(kg)	50	70	100
0°	0	0	0
1°	14,49	17,91	23,05
2°	28,97	35,81	46,07
3°	43,45	53,71	69,11
4°	57,91	71,59	92,11
5°	72,36	89,45	115,09
6°	86,78	107,28	138,03
7°	101,18	125,07	160,92
8°	115,55	142,84	183,78
9°	129,89	160,56	206,58
10°	144,14	178,19	229,25

Conforme visto no quadro anterior, a força da gravidade será nula quando não houver inclinação, e quanto maior for o grau de inclinação e a massa do condutor, maior seria o valor da força da gravidade.



Observa-se que a potência máxima de uma bicicleta elétrica é 350 W logo ela se locomoverá com velocidade menor que 5Km/h numa ladeira de 10 graus. Considerando apenas a parcela da gravidade este valor será maior quando incluir a resistência ao rolamento e aerodinâmica.

### 3.4 Valores para a força de inércia

Cabe destacar que essa força só existe quando existir aceleração. Logo ela existe até a velocidade entrar em movimento retilíneo uniforme.

A força de inércia se subdivide em duas forças, a força de inércia de rotação e de translação e seu valor total é a soma. Para melhor entendimento de como a força de inércia pode variar, será feito primeiramente uma análise separada da força de inércia de rotação e translação.

#### 3.4.1 Força de inércia dos corpos em rotação

Conforme visto em capítulos anteriores, a roda, as coroas e os pinhões além de sofrerem translação sofrem o fenômeno de rotação. A força de rotação é dada pela equação 18.

#### Rodas

Para o cálculo do momento de inércia das rodas, foi utilizando o momento de inércia de um cilindro oco em torno de um eixo central.

$$I = \frac{1}{2} Mx(R_{\text{interno}}^2 + R_{\text{externo}}^2) \quad (24)$$



**Quadro 12**– Dados da roda ARO 26

RODA 26 X 1.125 e 26 x 1.375	
MEDIDA INTERNA DO PNEU (m)	.599
RAIO DA RODA (m)	.3302
MASSA DA RODA (kg)	.88

Os valores da força de inércia referente à rotação das rodas, quadro 12, varia apenas com a aceleração linear sem que haja modificação da bicicleta elétrica.

**Quadro 13** – Valores da força de inercia de rotação das rodas

Aceleração linear (m/s <sup>2</sup> )	Força de inércia (N)
0	0,00
0,05	0,08
0,1	0,16
0,15	0,24
0,2	0,32
0,25	0,40
0,3	0,48
0,35	0,56
0,4	0,64
0,45	0,72
0,5	0,80
0,55	0,88
0,6	0,96
0,65	1,04
0,7	1,12
0,75	1,20
0,8	1,28
0,85	1,36
0,9	1,44
0,95	1,52
1	1,60

Fonte: próprio autor

### Coroas e pinhões

No cálculo da força de inércia de rotação, o momento de inércia das coroas e dos pinhões foram aproximados para um disco maciço. Dessa forma:

$$I = \frac{1}{2}MR^2 \quad (25)$$

Os quadros 14 e 15 apresentam os valores da força de inércia de rotação e do momento de inércia das coroas e pinhões respectivamente para uma aceleração de 1m/s<sup>2</sup>

**Quadro 14** - Força de inércia das coroas

Diâmetro (m)	Massa (kg)	Momento de inércia (kg.m <sup>2</sup> )	Força de inercia (N)
0,20	0,11	0,000556	0,0138
0,15	0,08	0,000234	0,0104
0,12	0,07	0,0001200	0,0083

Fonte: próprio autor

**Quadro 15** - Força de inércia das coroas

Diâmetro (m)	Massa (kg)	Momento de inércia (kg.m <sup>2</sup> )	Força de inércia (N)
0,12	0,07	0,000120000	0,0083
0,11	0,06	0,000092431	0,0076
0,10	0,06	0,000069444	0,0069
0,09	0,05	0,000050625	0,0062
0,08	0,04	0,000035556	0,0056
0,07	0,04	0,000023819	0,0049
0,06	0,03	0,000015000	0,0041

A força de inércia das coroas e dos pinhões, de acordo com os quadros 14 e 15, podem ser desconsideradas devido a sua ordem de grandeza.

**3.4.2 Força de inércia dos corpos em translação.**

A força de inércia de translação conforme visto na equação 5 depende apenas da massa do conjunto e da aceleração linear da bicicleta. O quadro 16 apresenta as forças de inércia de translação para diferentes valores de aceleração.

**Quadro 16-** Força de inércia de translação

Aceleração linear (m/s <sup>2</sup> )	Força de inercia de translação (N)
0	0
0,05	6,734
0,1	13,468
0,15	20,202
0,2	26,936
0,25	33,67
0,3	40,404
0,35	47,138
0,4	53,872
0,45	60,606
0,5	67,34
0,55	74,074
0,6	80,808
0,65	87,542
0,7	94,276
0,75	101,01
0,8	107,744
0,85	114,478
0,9	121,212
0,95	127,946
1	134,68

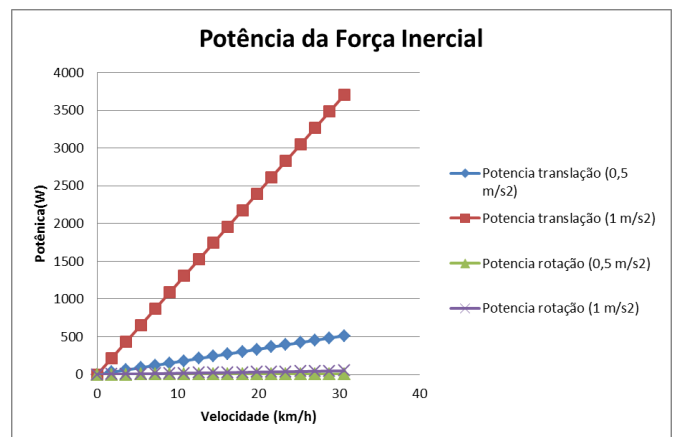
Fonte: próprio autor

**3.4.3 A soma das forças de inércia**

O quadro 17 mostra a força de inercia total, sendo a soma da força de inércia de rotação e da força de inércia de translação. A força de inércia de translação contribui com grande parte do valor da força de inercia total.

**Quadro 17 –** Força de Inércia Total

Aceleração linear (m/s <sup>2</sup> )	Força de inercia de rotação (N)	Força de inercia de translação (N)	Força de inercia total (N)
0	0,00	0	0,00
0,05	0,08	6,734	6,81
0,1	0,16	13,468	13,63
0,15	0,24	20,202	20,44
0,2	0,32	26,936	27,26
0,25	0,40	33,67	34,07
0,3	0,48	40,404	40,89
0,35	0,56	47,138	47,70
0,4	0,64	53,872	54,51
0,45	0,72	60,606	61,33
0,5	0,80	67,34	68,14
0,55	0,88	74,074	74,96
0,6	0,96	80,808	81,77
0,65	1,04	87,542	88,58
0,7	1,12	94,276	95,40
0,75	1,20	101,01	102,21
0,8	1,28	107,744	109,03
0,85	1,36	114,478	115,84
0,9	1,44	121,212	122,66
0,95	1,52	127,946	129,47
1	1,60	134,68	136,28



Observa-se que a potência consumida para poder fornecer consideradas acelerações em consideradas velocidades é muito alta e que varia de forma mais expressiva com a aceleração. Em alguns casos pode ser desprezada a componente de rotação inercial. Outros autores utilizam um

fator em cima da componente de translação a fim de simplificar esse cálculo.

Etapa	Descrição	Autonomia (h)	Autonomia (km)
1	Velocidade constante de 5km/h, sem pedalar.	18,86	94,29
2	Velocidade constante de 10 km/h, sem pedalar.	8,19	81,85
3	Velocidade constante de 15 km/h, sem pedalar.	4,47	67,11
4	Velocidade constante de 20 km/h, sem pedalar.	2,28	53,59
5	Velocidade constante de 25 km/h, sem pedalar.	1,70	42,56

### Energia Consumida.

A bateria escolhida para esse projeto foi a bateria de chumbo devido ao seu baixo custo de compra. As características da bateria são mostradas no quadro 4.8.

**Quadro 18** - características da bateria

Tipo	Chumbo - Gel com sílica
Capacidade	12Ah
Tensão (Voltagem)	36V
Tempo de carga	8 horas
Corrente máxima de carregamento	1,8 A
Durabilidade	300 ciclos de carga

	(Aproximadamente)
Peso	13,7 kg

Fonte:

<http://img.submarino.com.br/manuais/112164317.pdf>

O que define a autonomia de uma bicicleta é a sua bateria. Quanto maior sua energia maior será sua durabilidade até a próxima recarga

A autonomia da bicicleta depende da energia consumida  $E = Pot * t$ . Logo quanto maior a potência maior a energia consumida e menor a autonomia.

Vale ressaltar, que a autonomia da bicicleta elétrica está diretamente ligada ao peso da carga transportada. Os cálculos foram baseados Nos parâmetros definidos no quadro 4.

## 4. VEÍCULOS ELÉTRICOS X VEÍCULOS A COMBUSTÃO

Nesse capítulo será feita uma metodologia de comparação simplificada dos veículos elétricos com os veículos movidos a combustão interna de maneira quantitativa. Serão analisadas emissões de CO<sub>2</sub>, eficiência dos motores, quantidade de energia gasta em um determinado trajeto, velocidades alcançadas, tempo de percurso, além do peso do veículo que envolve o gasto de material em sua produção.

### 4.2 Eficiência dos motores

Os motores elétricos apresentam uma eficiência bastante elevada, podendo chegar a noventa por cento, ou seja, eles podem transformar aproximadamente noventa por cento da energia elétrica consumida em trabalho efetivo. Em contrapartida, o motor a combustão interna possui uma eficiência baixa de aproximadamente trinta por cento. (JUNIOR, 2014).

Outro ponto positivo do motor elétrico é o seu torque máximo, que ocorre em baixas rotações, o que torna sua resposta imediata ao arranque, ou seja, não é necessário esperar que ele chegue a uma determinada rotação para utilizar sua potência.

### 4.3 Emissão de CO<sub>2</sub>

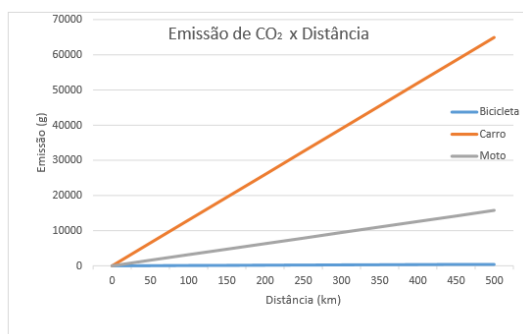
Nesta seção será feita uma análise da emissão de CO<sub>2</sub> de carro, moto e bicicleta elétrica de uma maneira sucinta, essa análise envolve apenas a emissão de CO<sub>2</sub> Na utilização do veículo. Para fazer uma análise completa é necessário avaliar todo o ciclo de vida de cada meio de transporte.

Nesse texto será apenas analisada a emissão durante a utilização. Para o cálculo da emissão da emissão de CO<sub>2</sub> na utilização das motos, será utilizando o valor intermediário dentro da faixa de 21-42 g/ km estabelecido por (CHERRY, C. et al. 2009), 31,5g/ km.

Segundo Borsari e Assunção (2006), A quantidade de massa da emissão de gases poluentes na utilização de carros a gasolina é de 129,9g/km. Esse valor está dentro da faixa conforme (CHERRY, C. et al. 2009) que vai de 47-140.

Esses valores em análise acima foram calculados de acordo com os meios de transporte da China, que podem ser equiparáveis aos carros e motos utilizados no Brasil. Porém para a bicicleta elétrica a emissão de gases poluentes em seu uso não pode ser considerada, visto que a matriz energética é diferente da China.

Na fase de uso das bicicletas elétricas, a bateria é recarregada através da energia elétrica, e para a produção dessa energia elétrica há a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, decorrente do uso de termoelétricas. Em agosto de 2014, foi estimado que a matriz energética brasileira emitiu 157,8 kg de CO<sub>2</sub> por MWh produzido de energia (CURSINO, 2016). A bateria possui 432Wh que permite percorrer 83,32km com esses valores a emissão de CO<sub>2</sub> é de 0,818g/km.



**Figura 4** - Emissão de CO<sub>2</sub> x Distância percorrida

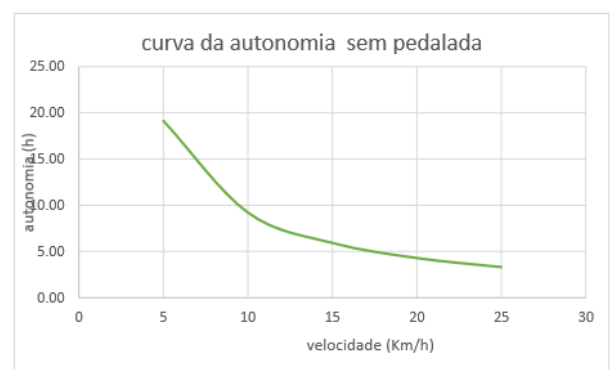
Fonte: Próprio autor

Os veículos a combustão interna, consomem a maior parte da sua energia e emitem a maior parte do seu poluente durante a fase de utilização, dessa forma a maioria dos impactos são locais. A energia da bicicleta elétrica é uma energia eficiente, ou seja, sua fase de utilização constitui uma porção menor dos impactos do ciclo de vida. Outro ponto positivo da bicicleta elétrica é não gerar poluição pelo tubo de escape. Seu uso não gera fumaça nos grandes centros urbanos o que melhora a saúde humana. (CHERRY, C. et al. 2009).

### 4.4 Custo financeiro para aquisição e realizar percursos

O consumo de energia da bicicleta elétrica está relacionado com a potência exigida pelo motor. Conforme visto no capítulo anterior, a autonomia da bicicleta depende da capacidade da bateria e do trajeto efetuado.

Na figura 5, tem-se a autonomia em horas que a bicicleta em análise é capaz de realizar para uma dada velocidade.



**Figura 5** - autonomia da bicicleta sem pedalada.

Fonte: Próprio autor

O valor base do KWh é de R\$ 0,83884, utilizado na cidade de Macaé no estado do Rio de Janeiro.

$$0,432KWh \times \frac{R\$0,83884}{KWh} = R\$ 0,36$$

O custo por quilometro andado está diretamente ligado à velocidade da bicicleta. O quadro 38 apresenta esse custo financeiro na bicicleta em estudo.

**Quadro 20** - custo financeiro de locomoção da bicicleta elétrica.

Velocidade (km/h)	Gasto (R\$/km)	Gasto financeiro em 100km rodados (R\$)
5	0,003788791	0,38
10	0,00392891	0,39
15	0,004069028	0,41
20	0,004209146	0,42
25	0,004349265	0,43

Fonte: Próprio autor

Com a finalidade, de comparar o gasto da bicicleta elétrica com os veículos a combustão, foi selecionado um modelo de carro e moto popular. O quadro 21 apresenta suas principais informações de custo para realizar um percurso.

O valor utilizando como base para o litro da gasolina foi R\$ 3,9 /l

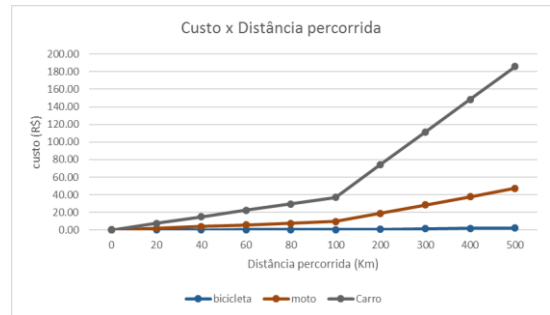
Meio de transporte	Gasto (km/l)	Gasto (R\$/km)	Valor gasto em 100km (R\$)
Moto Honda CG Titan 150 flex gasolina	1,2	0,094660194	9,47
Gol G5 1.0 Trend gasolina	0,5	0,371428571	37,14

**Quadro 21** - custo financeiro de locomoção dos veículos.

Fonte: adaptação de [www.consumocombustivel.com.br](http://www.consumocombustivel.com.br)

A figura 6 faz um comparativo dos gastos relacionados a cada veículo com distintas quilometragens. O

custo para se locomover com um carro é o mais caro de todos, em seguida a moto, e por último a bicicleta que possui um gasto muito baixo. No quadro 21, foram utilizados os custos relacionados à velocidade de 25km/h para os cálculos.



**Figura 6** - Comparativo do custo x distância percorrida para diferentes meios de transporte.

Para realizar a aquisição do carro e moto em análise, segundo a tabela Fipe (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas), o custo será de R\$33.255,00 e R\$9.848,00 respectivamente. A bicicleta em análise não se encontra no mercado para venda, logo o seu valor será uma estimativa, com valor de R\$ 3 mil a 4 mil reais. Vale ressaltar que a moto é capaz de locomover além do passageiro uma pessoa, e o carro, quatro.

#### 4.5 Energia Gasta por distância percorrida.

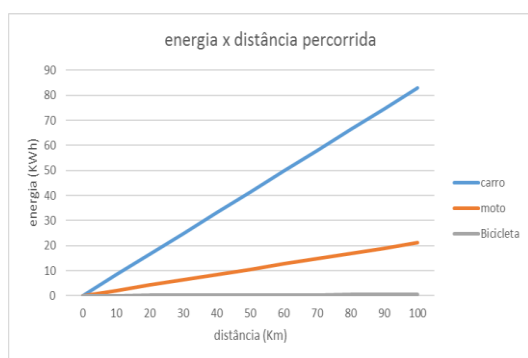
Para que o carro e a moto realizem movimento, energia deve ser liberada através da reação de combustão. Na queima de 1 litro de gasolina, 31 300 KJ são liberados (NOVA ESCOLA). Nos veículos elétricos a energia gasta é dada por meio da energia contida na bateria, e a durabilidade dessa energia dependerá da potência elétrica gasta para realizar o percurso.

Para realizar as comparações energéticas, na bicicleta elétrica foi utilizando a potência elétrica gasta em percursos sem ladeiras com velocidade de 25 km/h.

A figura 7 mostra que a energia gasta para a locomoção nos carros é bastante elevada ao se comparar com

a energia gasta para a moto e para bicicletas. A energia necessária para percorrer 100km em uma bicicleta é de 0,52KWh enquanto para carros e motos são respectivamente 82,80KWh e 21,10KWh.

**Figura 7** - Comparativo energia x distância percorrida para diferentes meios de transporte. .



Fonte: Próprio autor

#### 4.5 Velocidades alcançadas e tempos de percurso

A bicicleta possui inúmeras vantagens, conforme pode ser visto no decorrer do projeto, porém seu principal ponto negativo está relacionado com a velocidade. Diferente dos carros e motos, a bicicleta elétrica não consegue atingir velocidades muito altas. No entanto em grandes centros urbanos essa desvantagem é muito pequena, devido aos congestionamentos.

Os grandes centros urbanos enfrentam grandes congestionamentos de carro devido ao excesso de veículos nas ruas. Entre as principais cidades que sofrem desse problema, está São Paulo, em uma notícia publicada no G1, a velocidade média dos veículos nas vias monitoradas pela CET (Companhia de Engenharia de Tráfego) era de 17km/h no ano de 2011 com congestionamentos na parte da manhã 56km de extensão (G1 SÃO PAULO, 2013).

Apesar da bicicleta elétrica possuir a desvantagem de velocidades não muito elevadas, esse fator não é bastante prejudicial, ao comparar seu uso com os carros quando utilizados em períodos de pico e em locais de grande movimentação.

#### 4.6 Massas dos meios de transporte

A bicicleta elétrica, a moto e o carro o em estudo possuem massas equivalentes à: 34,68kg, 117kg, e 934kg respectivamente. Ou seja, para locomover uma pessoa com um carro será necessária uma massa de 934 kg, enquanto para realizar o mesmo percurso com uma moto é necessária uma massa oito vezes menor e para uma bicicleta elétrica vinte sete vezes menor.

Para produzir um meio de transporte, matéria prima deve ser tirada do meio ambiente, e após isso sofrer vários processos até chegar ao produto final, e no decorrer disso, serão gerados resíduos que deveriam ser descartados na natureza. De maneira intuitiva, quanto maior a massa do veículo maior serão os resíduos gerados.

Ao final da vida útil dos meios de transporte, cada material é separado, classificado buscando diferentes destinos para as sucatas. Com o aumento da frota de veículos essas etapas serão um desafio considerável. As etapas de desmontar, separar e despoluir e recuperar as partes do veículo para recolocar as matérias na cadeia produtiva se tornou um problema complexo. (PASSOS, 2013).

O Brasil não possui regulamentação específica para o descarte dos veículos velhos e sem condições de circulação e nem há empresas especializadas neste serviço. Por esse motivo, os veículos são levados para desmanches e depósitos expostos poluindo o meio ambiente. (PASSOS 2013).

### 5. Conclusões ou Considerações Finais

Muito se fala que a primeira iniciativa para cuidar do meio ambiente deve partir de cada um, e o somatório de todas essas iniciativas é um ótimo começo para preservar o meio ambiente. Nesse projeto com bases nos estudos desenvolvidos percebe-se que a utilização da bicicleta elétrica como meio de transporte ajuda a diminuir as emissões de CO2 geradas pelos principais veículos movidos a combustão.

De acordo com as análises feitas, cada bicicleta elétrica irá atuar de maneira distinta para situações distintas. A autonomia de uma bateria para um condutor que enfrenta ventos contrários ao seu deslocamento não será a mesma para

um condutor que percorre apenas locais planos sem a presença significativa dos ventos. E também, de maneira distinta, o tempo para a próxima recarga da bateria para um ciclista que sobe inúmeras ladeiras será menor do que aquele que quase não sobe ladeiras.

Entre os principais parâmetros que diminuem a autonomia está a massa do condutor, a velocidade do veículo e principalmente se há a presença da força de inércia. A força de inércia é a força que mais contribui para o valor final da força total atuando na bicicleta elétrica em percursos com valores muito baixos de inclinação. Quando a inclinação aumenta, o valor da força de gravidade poderá aumentar bastante, tornando-se maior que o valor da força de inércia. Quando essas forças chegam a valores muito elevados, o motor não conseguirá atuar sem o auxílio da pedalada para movimentar o condutor.

## 6. Referências Bibliográficas

CHERRY, Christopher . WEINERT, Jonathan. Xinmiao, Yang. **Comparative environmental impacts of electric bikes in China** . Jornal Elsevier. Disponível em <[www.elsevier.com/locate/trd](http://www.elsevier.com/locate/trd)> . 2008.

CURSINO, Arthur. **Emissão de CO2 pela geração de eletricidade no Brasil superam em 2014 a previsão do governo para o ano de 2030**. 2016. Disponível em <<http://www.mitsidi.com/emissoes-de-co2-pela-geracao-de-eletricidade-no-brasil-superamem-2014-a-previsao-da-epe-para-o-ano-de-2030/?lang=pt-br>>. Acesso em 14/07/2016.

ESCOLA, Nova. **Combustão de combustíveis alternativos**. Disponível em: <<http://rede.novaescolaclub.org.br/planos-de-aula/combustao-de-combustiveis-alternativos>>.

Acesso em 15/07/2016.

HALLIDAY, David. RESNICK, Jearl Walker. **Fundamentos da Física**- volume 1 . 8ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC. 2011.

HIBBELER, R.C. **Momentos de Inércia. Estática: Mecânica para Engenharia**. 12ª edição.

São Paulo: Editora Pearson. 2011.

JUNIOR, H'elder Alves de Almeida. **an'alise comparativa de ve'iculos elétricos com motor de combustão interna**. 2014. 115f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia de Energia). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte.

PASSOS, Eduardo Romanini dos. **Reciclagem dos automóveis**. 2013. 58f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia Automotiva para obtenção do título em Especialista ). Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul

SENSE, Eletric Bike . **Manual do proprietário**. Disponível em < [www.sensebike.com.br](http://www.sensebike.com.br)>

. Acesso em 10/07/2016

SÃO PAULO, G1. **Velocidade média dos veículos cai para 12% no trânsito paulista em 2012**. 2013 Disponível em: <<http://g1.globo.com/sao-paulo/anda>

sp/noticia/2013/07/velocidade-media-de-veiculos-cai-12-no-transito-paulistano-em2012.html> Acesso em 15/07/2016.

SILVA, M. José Carlos. **Sistema de mobilidade elétrica de duas rodas de elevada eficiência e performance**. 2013. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – energia e automação industrial) . Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu , Portugal.

TANAKA,N. Carlos. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para**

**veículos elétricos**.2013.106f. Dissertação ( Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo. São Paulo.