

## 4

### Modelamento Teórico do Veículo Elétrico Híbrido

A modelagem do Veículo Elétrico Híbrido, surge nesta dissertação como parte dos objetivos que foram propostos ao início. Sabe-se muito bem que a energia não renovável do planeta reduz-se a cada dia. Por tal motivo, as indústrias e as nações têm que ver a forma mais sustentável de administrar tal recurso escasso e, além disso, investigar novas tecnologias que sejam mais eficientes e limpas.

Neste capítulo realiza-se uma descrição total de um sistema de propulsão Elétrico Híbrido, o qual estará baseado nos requerimentos do veículo Peugeot 3008 1.6. Com base no veículo antes mencionado, propõe-se um novo Peugeot 3008 Híbrido Elétrico, o qual terá um sistema de propulsão elétrica, e um sistema térmico de geração de energia.

O sistema de propulsão elétrica é composto por motores embutidos nas rodas. Nesta dissertação se fará duas propostas: uma com quatro motores embutidos nas rodas e outra com dois motores embutidos nas rodas. A finalidade de propor estas duas alternativas é a de poder avaliar o desempenho dos modelos para, finalmente, poder fazer a avaliação da eficiência do consumo energético com relação ao veículo original.

Para realizar a avaliação da eficiência energética do modelo, faz-se um estudo do consumo de combustível do veículo, para os diferentes ciclos de condução descritos no Capítulo 2.

Para este estudo implementou-se uma bancada de teste no dinamômetro de chassis como mostra a Figura 3.1. Esta bancada permite testar diferentes ciclos de condução normalizados, seja para medir o consumo em modo urbano ou em modo estrada. Os resultados do estudo da eficiência energética do Veículo Elétrico Híbrido, são apresentados no Capítulo 5.

A seguir mostram-se as diferentes relações envolvidas no desenvolvimento do Modelo Teórico do Veículo Elétrico Híbrido.

## 4.1

### Forças que atuam sobre o Veículo

#### Resistência Aerodinâmica.

Lembrando a Equação 2-9, pode-se determinar a força de resistência aerodinâmica que o veículo tem que vencer ao longo de seu percurso.

$$F_a = 1/2\rho_a C_D A_f V^2 \quad (4-1)$$

Para o modelo o valor das variáveis são mostradas a seguir:

- $\rho_a = 1,184 \text{ (kg/m}^3\text{) a } 25^\circ\text{C [37]}$ .
- $C_D = 0,296 \text{ [32]}$ .
- $A_f = 2,652 \text{ m}^2 \text{ [32]}$ .
- $V = \text{Velocidade (m/s)}$ .

Então a Força de Resistência Aerodinâmica fica da seguinte maneira:

$$F_a = 0,465V^2 \quad (4-2)$$

#### Resistência ao Rolamento.

Lembrando a Equação 2-8, pode-se determinar a força de resistência ao rolamento que o veículo tem que vencer ao longo de seu percurso.

$$F_r = Mgf_r \quad (4-3)$$

Onde para nosso modelo o valor das variáveis dependerão dos modelos que se possam escolher:

a) Modelo de quatro motores embutidos nas rodas.

- $M_1 = 1742,2 \text{ (kg)}$ .
- $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ .

b) Modelo de dois motores embutidos nas rodas.

- $M_2 = 1845,5 \text{ (kg)}$ .
- $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ .

Em cada modelo pode-se observar que  $M_1$  e  $M_2$  são diferentes. A massa do veículo esta composta pelas massas dos seguintes elementos:

- A massa do veículo sem o motor de combustão interna e sem o sistema de transmissão é 1300 kg.

- A massa das baterias, para o primeiro modelo é 178,2 kg e no segundo modelo é 247,5 kg.
- A massa dos motores elétricos com seus respectivos redutores, para o primer modelo é 64 kg e no segundo modelo é 92 kg.
- A massa do gerador para os dois modelos é de 170 kg.
- A massa eletrônica e demais componentes, para o primer modelo é 30 kg e no segundo modelo é 36 kg.

Segundo Mehrdad Ehsani [14], o cálculo do coeficiente de resistência ao rolamento, pode ser obtido utilizando a seguinte expressão, que é válida na faixa de 0 até 128 km/h (35,6 m/s).

$$f_r = 0,01\left(1 + \frac{V}{160}\right) \quad (4-4)$$

Então a Força de Resistência ao Rolamento para cada modelo fica da seguinte maneira:

- a) Modelo de quatro motores embutidos nas rodas.

$$F_{r1} = 17.090,982\left[0,01\left(1 + \frac{V}{160}\right)\right] \quad (4-5)$$

- b) Modelo de dois motores embutidos nas rodas.

$$F_{r2} = 18.143,595\left[0,01\left(1 + \frac{V}{160}\right)\right] \quad (4-6)$$

#### Resistência à Subida de um Plano Inclinado.

A Força de Resistência que o veículo experimenta quando sobe um plano inclinado pode ser descrita pela seguinte equação:

$$F_p = Mgsin \alpha \quad (4-7)$$

Se considera durante o trajeto que o grau de inclinação é igual a zero ( $\alpha = 0$ ), portanto a Força de Resistência à subida de um plano inclinado é zero.

#### Resistência à Aceleração.

A Força de Resistência que o veículo experimenta quando ele acelera ou desacelera mostra-se na Equação 4-8:

$$F_x = M\delta \frac{dV}{dt} \quad (4-8)$$

Segundo Mehrdad Ehsani [14], o cálculo do fator de correção de massas ( $\delta$ ) para um carro convencional, pode ser obtido utilizando a seguinte expressão:

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_o^2 i_{gi}^2 \quad (4-9)$$

Onde, para o modelo, o valor das variáveis são as que se mostram a seguir:

- $\delta_1 = 0,04$  [14].
- $\delta_2 = 0,0025$  [14].

Como os modelos propostos estão compostos por motores embutidos nas rodas, não se tem diferencial e tampouco caixa de marcha. Por tal motivo os valores de  $i_o^2$  e  $i_{gi}^2$  são iguais a 1. Então, a força de resistência à aceleração para cada modelo fica da seguinte forma:

- a) Modelo de quatro motores embutidos nas rodas.

$$F_{x1} = 1816,244 \frac{dV}{dt} \quad (4-10)$$

- a) Modelo de dois motores embutidos nas rodas.

$$F_{x2} = 1928,11 \frac{dV}{dt} \quad (4-11)$$

O termo  $(\frac{dV}{dt})$  na equação 4-8, é a aceleração do veículo, portanto, esta razão é calculada, para cada instante de tempo  $i$ , da forma como se mostra na equação 4-12:

$$a_i = \frac{dV_i}{dt_i} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (4-12)$$

## 4.2

### Sistema Híbrido Elétrico

O sistema Híbrido Elétrico de Propulsão e Geração de energia elétrica é composto, principalmente, por três subsistemas:

- Sistema de Transmissão
- Sistema de Armazenamento de energia
- Sistema de geração de Energia

A seguir faz-se uma descrição das principais características destes subsistemas e, além disso, a descrição da contribuição sobre todo o sistema.

### 4.2.1

#### Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão é composto pelo motor embutido na roda e a caixa de redução. Como mencionado ao início do capítulo, são duas as propostas, uma com quatro motores embutidos nas rodas, e a segunda com dois motores embutidos nas rodas do eixo traseiro do veículo.

#### 4.2.1.1

##### Transmissor Redutor Cicloidal

Para a determinação da relação de transmissão necessária no redutor cicloidal, quando o motor é embutido na roda, é importante ter em conta a velocidade máxima do veículo, a rotação máxima do motor e o diâmetro do pneu, Minoru Suzuki[20]. Portanto utilizam-se as seguintes equações, considerando a velocidade do veículo em km/h e a rotação em rpm:

$$\omega_{max-pneu} = \frac{(V_{max-veículo})\left(\frac{5}{18}\right)}{\frac{D_p}{2}} * \frac{60}{2\pi} \quad (4-13)$$

$$r_t = \frac{\omega_{max-pneu}}{\omega_{max-motor}} \quad (4-14)$$

##### Sistema de transmissão com quatro motores embutidos nas rodas.

Dado que se escolheu quatro motores LMC que trabalham com uma velocidade máxima 4000 RPM, o veículo chega a 150 km/h, cabe ressaltar que utiliza-se um pneu de 58cm de diâmetro. Então precisa-se que a relação de transmissão do redutor cicloidal seja 3:1. A relação de transmissão está dentro da faixa de 3:1 até 119:1. Portanto a eficiência de transmissão é de 93%, Darali [28], válida para transmissões de um só estágio.

##### Sistema de transmissão com dois motores nas rodas.

Para este caso foram selecionados dois motores UQM, que trabalham com uma velocidade máxima 6500 RPM. O veículo chega a 150 km/h e utiliza pneu similar ao anterior caso. Com isto a relação de transmissão do redutor planetário é 4,74:1. A relação de transmissão está dentro da faixa de transmissão em um só estágio. Portanto a eficiência de transmissão é de 93%, Darali [28].

#### 4.2.1.2

##### Características do Motor Elétrico

O motor elétrico será selecionado de acordo com o modelo do sistema de transmissão do veículo elétrico híbrido. A seguir mostra-se as características do motor elétrico correspondente a cada tipo de sistema de transmissão.

##### Sistema de transmissão com quatro motores embutidos nas rodas.

As características do motor utilizado nesta proposta encontram-se na Tabela 4.1. Os dados da eficiência para cada velocidade podem ser observados na Tabela A.1 que se encontra no Apêndice A.

Tabela 4.1: Características do Motor LEM200 D127.

<b>Características Gerais</b>	
Marca	LMC
Modelo	LEM200 D127
<b>Dimensões</b>	
Diâmetro (mm)	205
Comprimento (mm)	108,3
Peso (kg)	11
<b>Desempenho</b>	
Potência Pico (kW)	25,38
Potência Contínua (kW)	12,56
Torque Pico (N.m)	68
Torque Contínuo (N.m)	34
Máxima Velocidade (rpm)	4000
Máxima Eficiência (%)	90
Densidade de Potência (kW/kg)	2,31

Cópia Adaptada do Documento Técnico L.M.C Ltd Motors and Generators.  
Fonte: The Lynch Motor Company[38].

##### Sistema de transmissão com dois motores embutidos nas rodas.

As características do motor utilizado nesta proposta encontram-se na Tabela 4.2. Os dados da eficiência para cada velocidade, podem se observados nas Figuras A.1 e A.2 que se encontram no Apêndice A.

#### 4.2.2

##### Sistema de Armazenamento de Energia

Se mencionou no Capítulo 2 sobre o desenvolvimento de novas baterias de Ion Lítio com tecnologia de Nanofosfato. Atualmente a A123 system vem desenvolvendo este tipo de baterias, as quais já se encontram no mercado. Constrói-se o sistema de armazenamento de energia utilizando este tipo de baterias. Para cada configuração do sistema de tração tem-se um arranjo de

Tabela 4.2: Características do Motor Hitor UQM380.

<b>Características Gerais</b>	
Marca	UQM
Modelo	Hitor UQM380
<b>Dimensões</b>	
Diâmetro (mm)	280
Comprimento (mm)	252
Peso (kg)	41
<b>Desempenho</b>	
Potência Pico (kW)	50
Potência Contínua (kW)	30
Torque Pico (N.m)	440
Torque Contínuo (N.m)	180
Máxima Velocidade (rpm)	6500
Máxima Eficiência (%)	93
Densidade de Potência (kW/kg)	1,22

Cópia Adaptada do Documento Técnico Hitor UQM380.  
 Fonte: UQM Technologies[39].

baterias diferentes. A seguir apresenta-se o arranjo e a quantidade de baterias que serão utilizadas.

Na simulação do sistema com regeneração de energia considera-se um percentual de 30% de regeneração. O percentual de energia regenerada vai depender da capacidade do sistema elétrico para armazenar de forma rápida a energia. Normalmente utiliza-se um conjunto de ultra-capacitores conectados em paralelo aos bornes da bateria.

#### Sistema de transmissão com quatro motores embutidos nas rodas.

De acordo com as características do motor (LEM200 D127) e a demanda de energia do veículo, o arranjo do conjunto de baterias mostra a seguinte informação:

- Marca: A123.
- Modelo: Nanophosphate<sup>®</sup> AMP20M1HD-A.
- Tensão: 2 - 3,6 V.
- Energia: 20 Ah.
- Massa: 0,495 kg/ unidade.
- Quantidade: 360 unidades.
- Tensão de Trabalho: 62,4 - 79,2 V
- Configuração: 20 em série x 18 em paralelo.

Sistema de transmissão com dois motores embutidos nas rodas.

De acordo com as características do motor (Hitor UQM380) e a demanda de energia do veículo, o arranjo do conjunto de baterias mostra a seguinte informação:

- Marca: A123.
- Modelo: Nanophosphate<sup>®</sup> AMP20M1HD-A.
- Tensão: 2 - 3,6 V.
- Energia: 20 Ah.
- Massa: 0,495 kg/ unidade.
- Quantidade: 500 unidades.
- Tensão de Trabalho: 325 - 412,5 V
- Configuração: 125 em série x 4 em paralelo.

**4.2.3****Sistema de Geração de Energia Elétrica**

O sistema de Geração Elétrica é composto por um motor de combustão interna de 20 KW, o qual é ativado quando se atinge um nível mínimo de carga da bateria, e só se desliga quando alcança um nível máximo. Os limites são dependentes do tipo de arquitetura que se escolhe. Na Tabela 4.3, pode-se observar os níveis para as duas arquiteturas em estudo. O trabalho do gerador começa quando o nível de energia na bateria está com 50% do nível máximo e finaliza no momento que 90% do nível máximo de energia na bateria é atingido.

Tabela 4.3: Níveis de Energia no Sistema de Armazenamento de Energia

<b>Energia</b>	<b>Sistema com 4 motores</b>	<b>Sistema com 2 motores</b>
Nominal	23,760 kWh	33,000 kWh
Limite máximo	25,920 kWh	36,000 kWh
Limite mínimo	12,960 kWh	18,000 kWh

Cópia adaptada com base na quantidade de baterias que se utiliza em cada modelo.

Fonte: A123 Systems[25].

#### 4.2.4 Eficiência Energética

A eficiência energética descrito neste trabalho esta representado pela Equação 4-15:

$$\eta_{ene} = \frac{\text{Quantidade de energia utilizada}}{\text{Quantidade de energia fornecida}} \quad (4-15)$$

A quantidade de energia utilizada, refere-se à quantidade de energia que os pneus de tração precisam para se trasladar de um ponto A até um ponto B. A quantidade de energia fornecida vai depender do tipo de arquitetura que o veículo tenha. Para cada caso, que será posteriormente mostrado nos resultados, a eficiência energética tem as seguintes considerações:

- A eficiência energética num veículo elétrico é calculada como o razão da quantidade de energia que utiliza, entre a quantidade de energia fornecida pela bateria.
- A eficiência energética num veículo elétrico híbrido é calculada como o razão da quantidade de energia que utiliza, entre a quantidade de energia fornecida ao sistema de geração de energia elétrica.
- A eficiência energética num veículo convencional é calculada como o razão da quantidade de energia que utiliza, entre a quantidade de energia fornecida ao motor de combustão interna.

Para o calculo da eficiência energética em cada caso, precisa-se de conhecer a energia consumida e a energia fornecida. Portanto, o calculo respectivo descreve-se a seguir:

##### Veículo com sistema de tração elétrico:

A energia consumida calcula-se mediante a simulação, esta energia é a que os pneus de tração precisam para mover o veículo. Calcula-se seguindo os seguintes passos:

1. Suma-se as forças de resistência que o sistema de propulsão deve vencer. Esta é a força total.
2. A força total multiplica-se pela velocidade do pneu para obter a potência nas rodas de tração.

3. Para obter a energia consumida, se faz uma integral da potência ao longo do tempo de duração do percurso determinado.

A energia fornecida pela bateria calcula-se seguindo os seguintes passos:

1. Divide-se a potência de tração nas rodas entre a eficiência do sistema de transmissão. Esta é a potência fornecida ao sistema de transmissão.
2. Divide-se a potência fornecida ao sistema de transmissão entre a eficiência do motor elétrico. Esta é a potência fornecida ao motor.
3. Para obter a energia fornecida ao motor, se faz uma integral da potência fornecida ao motor ao longo do tempo de duração do percurso determinado.
4. Considera-se uma eficiência de transmissão de energia elétrica entre o motor e a bateria de 1. Portanto a energia fornecida ao motor é a mesma energia que fornece a bateria.

#### Veículo com sistema de tração elétrico híbrido:

A energia consumida é calcula mediante a simulação, esta energia é a que os pneus de tração precisam para mover o veículo. Calcula-se seguindo os seguintes passos:

1. Suma-se as forças de resistência que o sistema de propulsão deve vencer. Esta é a força total.
2. A força total multiplica-se pela velocidade do pneu para obter a potência nas rodas de tração.
3. Para obter a energia consumida, se faz uma integral da potência ao longo do tempo de duração do percurso determinado.

A energia fornecida ao sistema calcula-se seguindo os seguintes passos:

1. Divide-se a potência de tração nas roda entre a eficiência do sistema de transmissão. Esta é a potência fornecida ao sistema de transmissão.
2. Divide-se a potência fornecida ao sistema de transmissão entre a eficiência do motor elétrico. Esta é a potência fornecida ao motor.
3. Para obter a energia fornecida ao motor, se faz uma integral da potência fornecida ao motor ao longo do tempo de duração do percurso determinado.

4. Considera-se uma eficiência de transmissão de energia elétrica entre o motor e a bateria de 1. Portanto a energia fornecida ao motor é a mesma energia que fornece a bateria.
5. Utiliza-se um sistema de geração de energia elétrica, o qual é um motor a combustão interna acoplado a um gerador. Este sistema trabalha à sua máxima eficiência de 35%.
6. Considera-se também uma eficiência de transmissão de energia elétrica entre o sistema de geração e a bateria de 1. Portanto a energia fornecida à bateria é a mesma que fornece o sistema gerador de energia elétrica.
7. Divide-se a energia fornecida à bateria entre a eficiência máxima do sistema gerador, 35%. Esta energia é aquela fornecida ao sistema de geração de energia elétrica.
8. Divide-se a energia fornecida ao sistema de geração de energia elétrica entre o poder calorífico do combustível. Esta é a quantidade de combustível utilizado no percurso determinado. Para obter o volume de combustível, multiplica-se a quantidade de combustível por sua densidade.

#### Veículo com sistema de tração elétrico híbrido:

A energia consumida é calcula mediante o estudo experimental. Neste estudo experimental determina-se, para cada ciclo de condução, o consumo instantâneo de combustível e a potência do veículo para cada instante de tempo.

Portanto a energia que consome o veículo convencional calcula-se mediante a integração da potência registrada do veículo ao longo do percurso.

Para calcular a energia fornecida ao sistema do veículo convencional se realiza primeiro uma integração do consumo de combustível instantâneo ao longo do percurso, logo a quantidade de combustível multiplica-se pelo poder calorífico do combustível. Esta é a quantidade de combustível utilizado no percurso determinado. Para obter o volume de combustível, multiplica-se a quantidade de combustível por sua densidade.