

Artigo

# Modelagem e simulação do trem de força de um veículo fórmula, com parâmetros variáveis, usando o software Altair Activate

Mellissa Nogueira Costa Diógenes <sup>[1]</sup>, Alex Sandro de Araújo Silva <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Aluno; mellissa301112@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Engenharia Mecânica; Orientador; alex.araujo@ufersa.edu.br

Data da defesa: 09/04/2024;

**Resumo:** O meio automobilístico apresenta altos custos referentes a testes para conhecimento do desempenho de um sistema, bem como para validações. As simulações computacionais trouxeram inovação, otimização, redução de tempo e recursos, como também colaboraram para a confiabilidade na fase de projeto. O uso de simulações facilitou o desenvolvimento de protótipos de baixo custo, como por exemplo, os veículos fórmula SAE, assim viabilizando o aperfeiçoamento ainda na etapa de projeto e dimensionamento. Dessa forma, se propõem um sistema modelado no software *Altair Activate* de um trem de força, seguindo as especificações do protótipo da equipe fórmula da Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), onde os parâmetros permitem ser alterados de acordo com a necessidade do usuário. O *software* utiliza a metodologia de diagramas de blocos, onde a modelagem se dá a partir de equações diferenciais e os resultados são processados em simulação unidimensional, o que significa maior fluidez. O trem de força conta com duas baterias em série, um inversor de frequência com uso de PWM - (*Pulse Width Modulation*) e tem o Motor Síncrono de Imã Permanente (PMSM). Os dados de alimentação do sistema são retirados de folhas de dados e podem ser facilmente alterados. Por meio desse modelo obteve-se *outputs* de velocidade angular, RPM, torque e estado de carga da bateria, validando a eficiência do uso de *softwares* de simulação.

*Palavras-chave:* Motor PMSM; Bateria; Simulação 1D; Fórmula SAE.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de um trem de força é majoritariamente constituído do motor e logo após a bateria, o motor transmite o torque necessário para movimentação do protótipo e a bateria alimenta energeticamente o mesmo. A escolha desses elementos requer estudo e análise para garantir que o trem de força do protótipo irá atender as especificidades do projeto requerido. O fórmula FEI é um veículo elétrico que atende as normas da *Society of Automotive Engineers* – SAE Brasil [1] e participa de competições anuais com outras instituições de ensino superior do país. A modelagem desses componentes pode ser realizada no software Altair Activate [2] que faz uso do método de diagrama de blocos, que obedecem a composição das equações diferenciais e descrevem o comportamento físico dos equipamentos. A simulação 1D nos dá como resultado dessa modelagem a grandeza dos cálculos de torque e potência, com o processamento altamente otimizado. A vantagem de utilizar essa metodologia por uma equipe de fórmula é a possibilidade de parametrizar seu trem de força, podendo fazer testes com alteração de parâmetros sem a necessidade do modelo físico já pronto, assim tendo decisões mais assertivas, com economia de custos.

Outra análise importante é a da dinâmica veicular, para previsões mais precisas do desempenho do veículo. Foi utilizado o software *CarSim* para realização dos testes virtuais de dirigibilidade, condução, aceleração e frenagem [3]. Para validação do método foi firmado uma parceria com a equipe Fórmula FEI, que disponibilizou os dados dos equipamentos empregados no seu protótipo, para assim analisarmos a precisão da simulação.

O uso de simulação para equipes de corrida reduz significativamente o tempo de desenvolvimento do protótipo, acarretando em melhor aproveitamento dos recursos financeiros, diminuindo a quantidade de testes, e facilita a identificação dos componentes que agregam maior influência na performance.

## 1.1 Objetivos Gerais

Realizar a modelagem e simulação do sistema de trem de força do protótipo fórmula da Equipe FEI usando o software *Altair Activate*.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Deseja-se com esse trabalho obter *outputs* de velocidade e torque do motor, bem como o resultado do estado de carga da bateria, e por fim realizar a integração com o software *CarSim* para análise da dinâmica veicular para observar se os resultados divergem com os valores dos testes reais.

## 1.2 Materiais e Métodos

### 1.2.1 Motor PMSM

Motor elétrico é um dispositivo capaz de transformar energia elétrica em mecânica e transmitir o torque para os eixos, assim dando movimento ao carro. O PMSM, vem sendo amplamente utilizado na indústria pela sua possibilidade de controle da velocidade. Consiste em um motor síncrono de ímã permanente, onde o campo magnético do estator e rotor apresentam sincronismo, ou seja, giram na mesma velocidade angular. Sua velocidade é determinada pelo número de polos e a frequência da rede de alimentação [4]. Os parâmetros nominais utilizados estão presentes na Tabela 1:

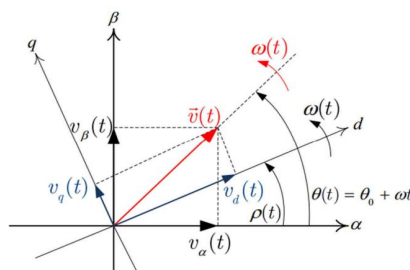
Tabela 1. Parâmetros nominais do motor PMSM

| Parâmetros                                    | Valor                | Unidade           |
|-----------------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Coefficiente de atrito viscoso (B)            | $11 \cdot 10^{-5}$   | Nm                |
| Fluxo do ímã permanente por polo ( $\phi_m$ ) | 0,0257               | Wb                |
| Indutância síncrona transversal ( $L_d$ )     | $5,2 \cdot 10^{-5}$  | H                 |
| Indutância síncrona longitudinal ( $L_q$ )    | $5,6 \cdot 10^{-5}$  | H                 |
| Momento de inércia do sistema mecânico (J)    | $25,6 \cdot 10^{-3}$ | Kg m <sup>2</sup> |
| Número de pares de polos (p)                  | 10                   |                   |
| Resistência interna ( $R_s$ )                 | $5,7 \cdot 10^{-3}$  | $\Omega$          |

Fonte: Adaptado de EMRAX (2022)

Com o objetivo de fazer o controle desse motor, é conveniente fazer a adaptação do sistema trifásico para um sistema de dois eixos rotativos, que efetuam uma transformação de coordenadas de um sistema de coordenadas estáticas [5]. A transformada de Park é uma manipulação matemática que se diz em relação a transformação do sistema com referências de coordenadas estáticas  $\alpha\beta$  fictícias para um sistema rotacional síncrono no qual as referências de coordenadas passam a ser dq [5]. Neste novo modelo os vetores são estáticos, com o referencial em rotação na mesma velocidade angular do campo girante, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Representação da Transformada de Park.



Fonte: Weingartner (2007)

### 1.2.2 Bateria

Bateria é a fonte de energia de um veículo elétrico, que armazena a eletricidade usada posteriormente para acionar as rodas, além de alimentar os sistemas eletrônicos. Uma bateria consiste em um acumulador, que transforma energia química em elétrica e vice-versa, principalmente pelo processo de oxirredução. Sua construção apresenta o polo negativo (ânodo) onde ocorre a oxidação e o polo positivo (cátodo) onde acontece a redução. As baterias utilizadas nesses veículos são do tipo recarregáveis, onde ocorre a inversão dos polos e o sentido da corrente [6].

Para a escolha da bateria primeiramente é realizada a análise da composição química das células, pois as propriedades variam com a mesma. Dentro das mais utilizadas pelas equipes de fórmula SAE estão as baterias de lítio, pois possuem alta densidade de energia na célula, pois isso implica em um veículo com menor leveza e consequentemente maiores velocidades [6].

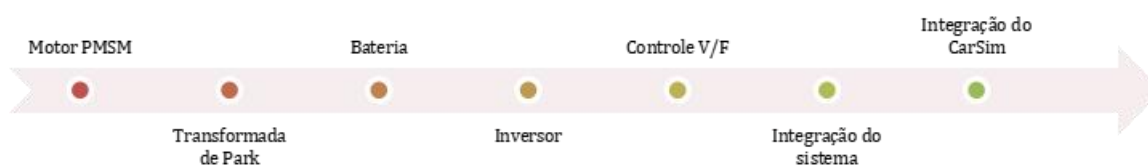
### 1.2.3 Inversor

Pode-se definir inversor de frequência como um dispositivo eletrônico capaz de controlar a velocidade de um motor trifásico, por meio da tensão fornecida ao motor, de modo a coordenar a velocidade e potência consumida. Ele também mantém o torque constante, para que não haja alteração na rotação na situação do motor com carga. Através desse controle o motor gira a velocidades variáveis (aceleradas ou reduzidas) e não constante, ou seja, é fundamental para um veículo fórmula student [7]. O funcionamento do inversor se dá por meio da conversão do sinal de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e posteriormente em CA novamente. Após a conversão, o sinal em formato CA se apresentará como pulsado e com largura modulada, assim permitindo ajuste de sua frequência e tensão [8].

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizado o estudo teórico por meio de uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento dos dispositivos. Em seguida foi estudado o software Activate juntamente com participação de treinamentos ofertados pela empresa Virtual CAE. Posteriormente foi iniciado a modelagem do sistema seguindo a ordem mostrada na Figura 2:

Figura 2. Processo de construção do trem de força



Fonte: Autoria própria (2024)

### 2.1 Altair Activate

O software utilizado é uma ferramenta extremamente versátil para modelar e simular sistemas multidisciplinares na forma 1D representada por diagrama de blocos. O Activate abrange além da modelagem matemática ainda apresenta linguagem simples de *script*, facilitando assim o aproveitamento de códigos já existentes. Dentre suas vantagens está a possibilidade de integrar com ferramentas 3D e co-simulação [9]. Um exemplo da programação utilizada está exposta na Figura 3, que consiste apenas na declaração dos parâmetros dos dispositivos.

Figura 3. Código das variáveis da camada externa do sistema

```

Context Available Variables
1 uMax=sqrt(2*3);
2 f=50; %Hz
3 m=3;
4 Rs=5.7e-3;
5 Ld=52e-6; %Lq=Indutância síncrona longitudinal
6 Lq=56e-6; %Lq=Indutância síncrona transversal
7 pm=0,0257;
8 p=20; %Número de polos
9 B=11e-4; %Coeficiente de atrito viscoso
10 J=256e-4; %Momento de inercia do sistema mecânico
11 Vs = 300/sqrt(3); %Volts
12 Vr = 176; %Volts]
  
```

Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.2 Motor

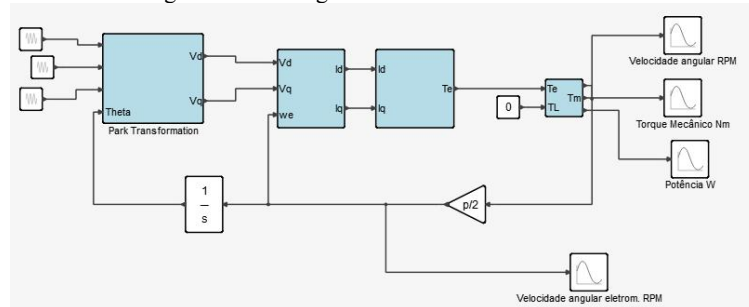
O primeiro elemento a ser modelado foi motor PMSM que é constituído de um estator bobinado e um rotor no qual contém ímãs permanentes em sua superfície [10]. Foi colocado o bloco de Transformação de Park

na entrada do motor, que segue a ordem da Equação 1, ficando então com quatro inputs, prontos para receber a alimentação trifásica da rede, bem como o ângulo de defasagem e dois outputs para alimentação do rotor a seguir, como mostra a Figura 4:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo dos sinais, abc o sinal trifásico e dq são os eixos ortogonais fictícios.

Figura 4. Modelagem do Motor PMSM

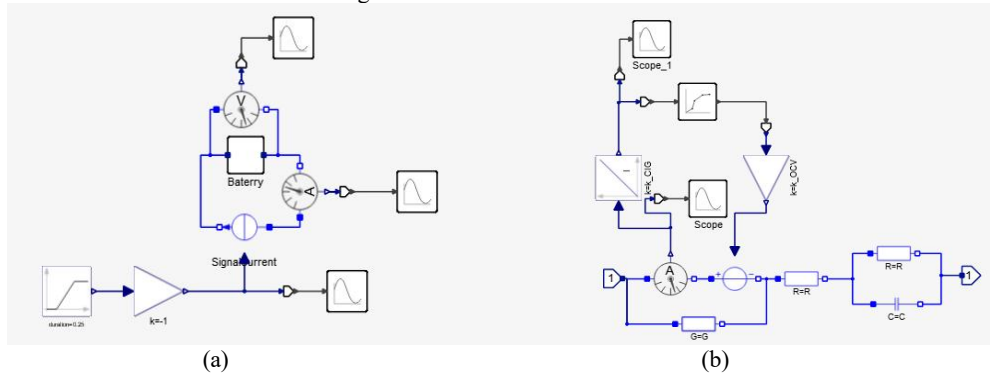


Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.3 Bateria

No modelo, temos uma bateria de Tensão de Circuito Aberto (OCV) dependente do Estado de Carga (SOC), em que esses valores estão especificados em uma tabela onde os valores são extraídos por meio do bloco “Lookup Table”. O modelo elétrico escolhido foi o de Thevenin [11], dividido em duas camadas (Figura 5) que tem um resistor R e uma associação em paralelo de resistor e capacitor, cuja funcionalidade é representar a resposta da bateria para cargas transientes, assumindo a OCV como constante [11].

Figura 5. Camada 1 e 2 da Bateria

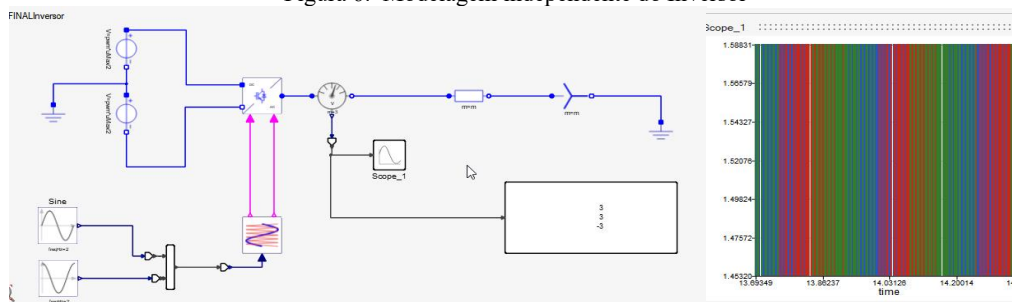


Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.4 Inversor de Frequência

O tipo de inversor escolhido foi o de tensão modulado por largura de pulso (PWM- *pulse-width modulation*). Foi utilizado o bloco *IntersectivePWM* para receber os sinais senoidais e *MultiPhase2Level\_1* que é um inversor multifásico de dois níveis, possuindo um transistor e dois diodos de roda livre. Ambos os blocos se encontram na paleta do Modelica. No inversor se tem a entrada bifásica proveniente de duas fontes, bem como a entrada dos sinais em forma de onda quadrada vinda do bloco PWM, tendo como saída o sinal trifásico defasado como mostra a figura 6. Por fim, foi inserida uma ligação estrela triângulo seguido de um aterramento.

Figura 6. Modelagem independente do Inversor

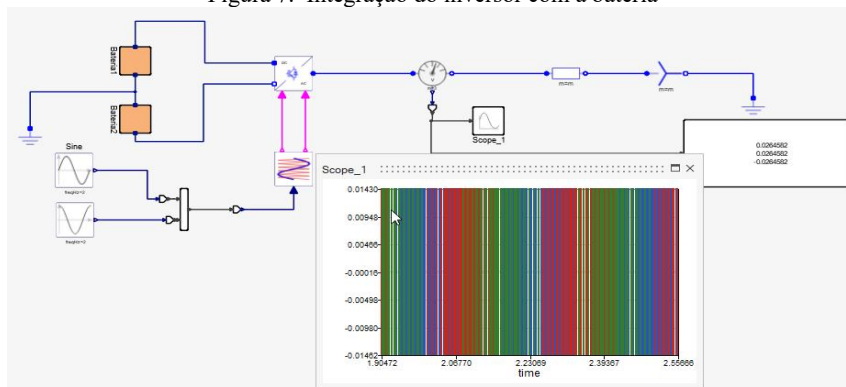


Fonte: Autoria própria (2023)

## 2.5 Integração

A integração foi realizada por partes, sendo iniciada pela bateria com o inversor, conforme mostra a figura 7. É possível observar que foram substituídas as duas fontes genéricas do modelo do inversor por duas baterias anteriormente modeladas. Pelo resultado das simulações é possível observar sucesso na integração, pois a saída do inversor apresenta comportamento semelhante.

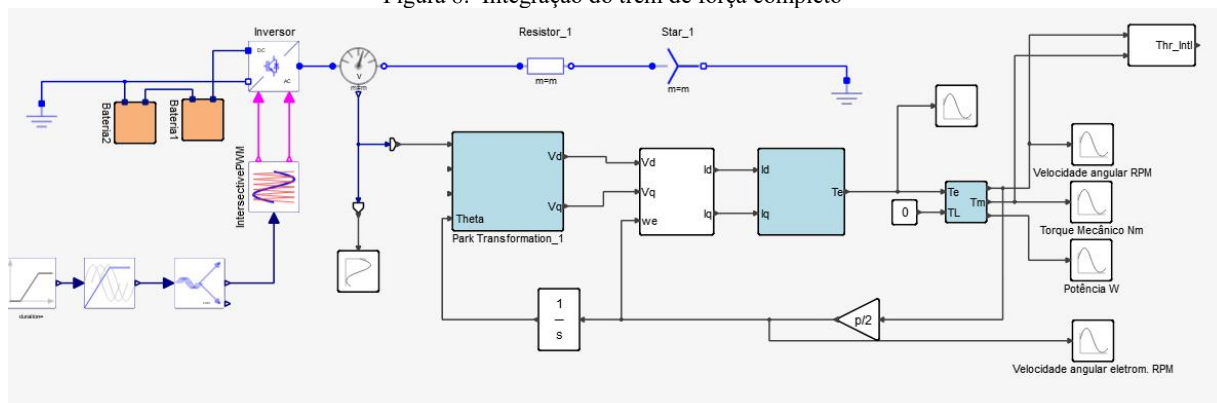
Figura 7. Integração do inversor com a bateria



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida é feita a integração com o motor e o controle foi adicionado. Foi optado por um controle Tensão por Corrente (V/F) que consiste em um método simples onde varia-se a tensão do sistema e com a mudança da frequência se tem então uma manipulação sucinta dos dados. Desse trem de força se consegue extrair dados de torque mecânico, velocidade angular mecânica e elétrica e ainda potência, como mostra a Figura 8:

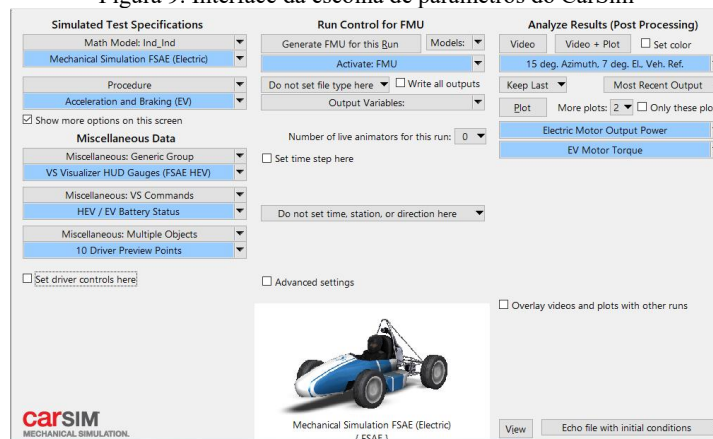
Figura 8. Integração do trem de força completo



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim foi integrado o bloco FMU do *CarSim*, onde foi selecionado o modelo de fórmula SAE da biblioteca do próprio software e escolhido os parâmetros padrão de aceleração e frenagem (Figura 9). A parametrização conta com o acionamento do pedal, ou seja, o curso do pedal que determina a situação do controle V/F. A simulação foi realizada na área *Steady-State*, ou seja, dentro da região de linearidade dos pneus, pelo que não haverá comportamentos transitórios de manobras.

Figura 9. Interface da escolha de parâmetros do CarSim

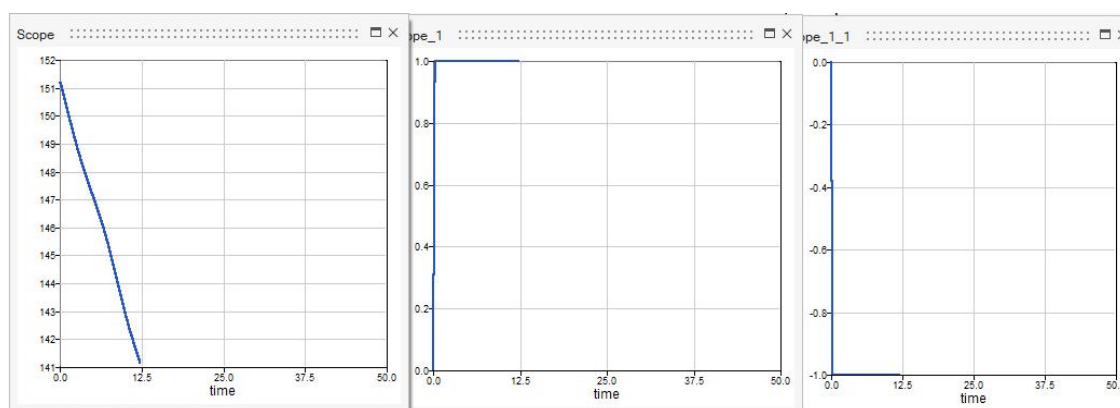


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3. RESULTADOS

Na simulação se obtêm os outputs dos sistemas integrados. Iniciando pela bateria se tem na saída o estado de carga bateria e as relações de carga e descarga pelo tempo em segundos, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Resultado da simulação da Bateria



(a) Estado de carga da bateria

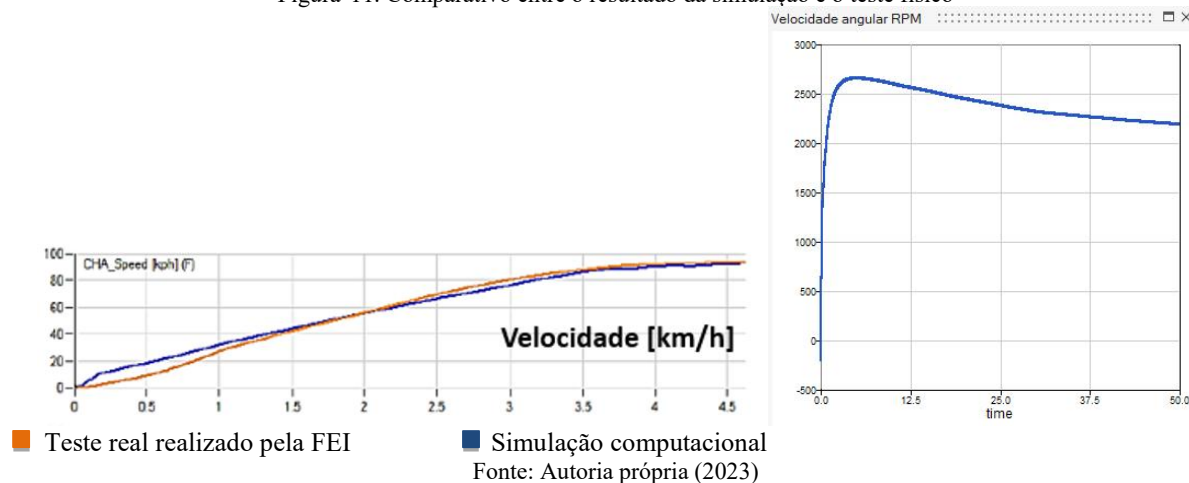
(b) Relação de carga

(c) Relação de descarga

Fonte: Autoria própria (2023)

No motor o primeiro dado abordado é a velocidade angular, tendo um valor máximo de aproximadamente 2600 RPM, valor este dentro da faixa apresentada pelo fabricante [11]. Foi realizado ainda o comparativo com o teste realizado pela equipe FEI (Figura 11).

Figura 11. Comparativo entre o resultado da simulação e o teste físico

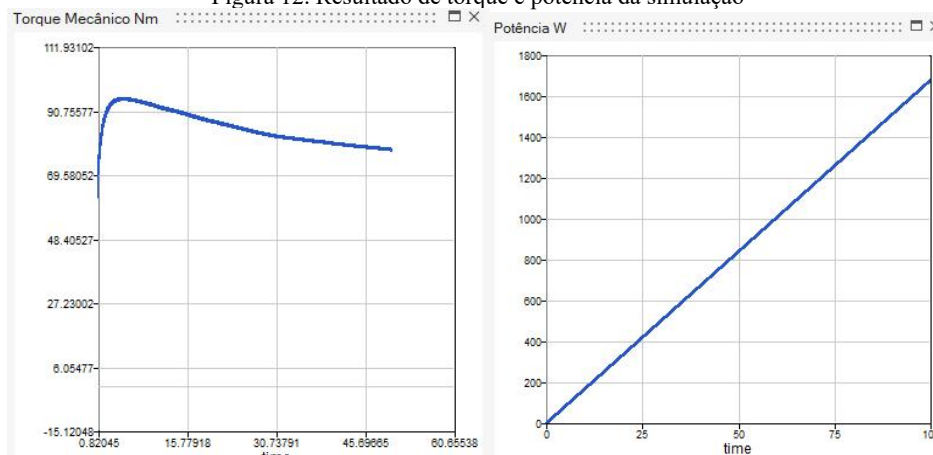


■ Teste real realizado pela FEI

■ Simulação computacional  
Fonte: Autoria própria (2023)

Convertendo o valor de velocidade angular calculado pela simulação e velocidade linear em km/h se obtém o valor de 101,3km/h, com um erro de 10%. O perfil da velocidade possui um comportamento muito parecido entre simulação e o teste real. Ocorre uma pequena diferença no início da manobra que é causada pelo escorregamento das rodas logo no início do movimento do veículo (Figura 12).

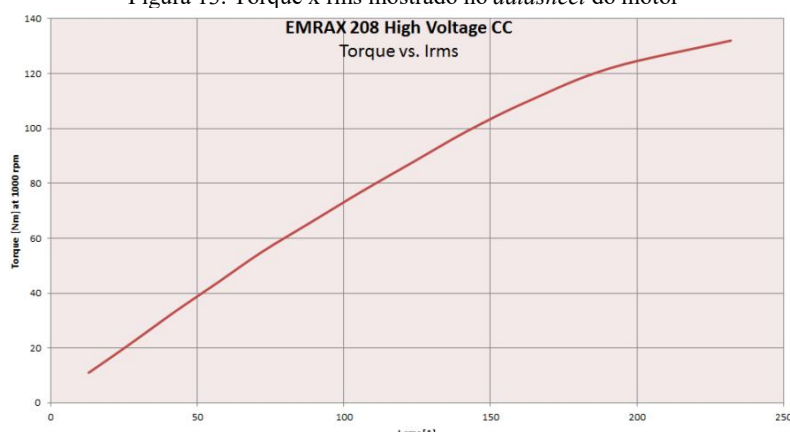
Figura 12. Resultado de torque e potência da simulação



Fonte: Autoria própria (2023)

Comparando, tem-se que o torque mecânico está dentro da faixa de operação do fabricante, como mostrado na Figura 13. E a potência também se apresenta no intervalo dado pelo *datasheet*.

Figura 13. Torque x rms mostrado no *datasheet* do motor



Fonte: EMRAX (2022)

No teste dinâmico o protótipo fórmula apresentou resultados satisfatórios, com velocidade máxima 104 km/h e desaceleração em 3 segundos, de acordo com a Figura 14. O *software* ainda realiza a plotagem de gráficos com inúmeros dados, como RPM, torque, momento, etc, como mostra o Apêndice A1.

Figura 14. Teste dinâmico no *CarSim*



Fonte: Autoria própria (2023)

É importante destacar que o uso destas ferramentas computacionais envolve bastante complexidade e exigem que vários parâmetros do veículo sejam acurados, como as principais dimensões do carro (entre eixos, bitola, altura), além do centro de massa de cada componente para finalmente estimar com precisão o centro de gravidade total do veículo. Para ter melhores resultados, é interessante não fazer grandes simplificações, como por exemplo, consideração do carro como um corpo rígido (nessa simulação o carro foi considerado um corpo rígido), pois o mesmo está submetido a solicitações mecânicas provenientes das acelerações laterais e longitudinais.

#### 4. CONCLUSÃO

Nesse artigo se apresentou o estudo e desenvolvimento do sistema de trem de força com controle simples de um motor de indução de ímã permanente do veículo leve de competição da equipe Fórmula FEI. Este sistema foi modelado e simulado com êxito no software Altair Activate, que apresenta ferramentas de fácil manipulação e interface intuitiva. De resposta do sistema foi possível obter velocidade, torque, potência consumida e estado da bateria. Com a integração com o software CarSim foi então possível analisar a dinâmica veicular de forma generalista, no qual constatou-se a acuracidade da modelagem do trem de força. O uso de simulação comprovou-se ser eficiente, com comportamento semelhante aos testes físicos e aos dados fornecidos pelo fabricante do motor. A modelagem em diagrama de blocos revelou-se ser simples e com tempo de simulação bastante reduzido. Dentre as vantagens da simulação 1D no software Activate, pode-se citar a facilidade de alteração dos dados. Assim, podemos concluir que o uso das ferramentas de simulação, além de reduzir os custos em relação a recursos utilizados, ainda direciona o projetista aos parâmetros que possuem maior influência em relação ao desempenho do veículo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

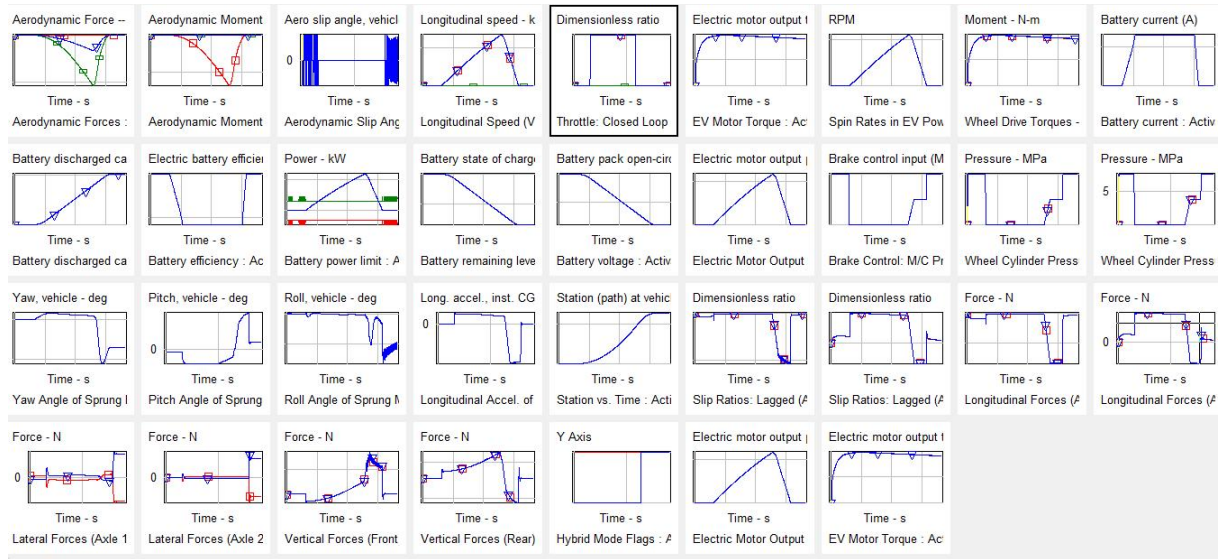
Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela empresa Virtual CAE. Agradecimentos: Agradeço ao orientador Alex Sandro pelo suporte, ao senhor Valmir Fleischmann por disponibilizar os recursos da VirtualCAE para desenvolvimento deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] SAEBRASIL. Disponível online: <https://saebrasil.org.br/>. Acesso em 03/04/2023.
- [2] ALTAIR. Disponível online: <https://altair.com/twin-activate>. Acesso em 02/05/2023.
- [3] Mechanical Simulation. Disponível online: <https://www.carsim.com/>. Acesso em 13/08/2023.
- [4] Teixeira, F. H. P. Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de ímã permanente - MSIP. TCC (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.
- [5] Weingartner C.B. Implementação de um controle vetorial aplicado em um gerador de indução duplamente alimentado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2007.
- [6] Freitas, A. O. Modelagem matemática da curva de descarga da bateria de um quadrirotor Rolling Spider utilizando a teoria de identificação de sistemas. TCC (Graduação). Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, 2019.
- [7] Behaker, H. C. M. N. H.G. Unidade de controle de tração para veículo híbrido. TCC de graduação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2021.
- [8] Kalatec. Disponível online: <https://blog.kalatec.com.br/inversor-de-frequencia/>. Acesso em 07/06/2023.
- [9] VirtualCAE. Disponível online: <https://virtualcae.com.br/2023/08/08/powertrain-de-um-veiculo-formula-eletrico-atraves-da-simulacao-pelo-software-altair-activate/>. Acesso em 10/08/2023.
- [10] Juliani, A. D. P. Análise do campo magnético de um motor de ímã permanente no rotor utilizando o método de elementos finitos. TCC (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- [11] Emrax. Disponível online: [https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/01/emrax\\_208\\_technical\\_data\\_4.5.pdf](https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/01/emrax_208_technical_data_4.5.pdf). Acesso em 05/07/2023.

## 7. Apêndice A1

Figura A1. Dados plotados no CarSim



Fonte: Autoria própria (2023)

Na imagem tem-se alguns dados da dinâmica do veículo, como por exemplo uma representação mais realista do estado de carga da bateria (SOC), o comportamento do RPM do motor em relação a aceleração e frenagem e a torque empregado.