

ANÁLISES ESTRUTURAL E TÉRMICA NO PROJETO DE ACIONAMENTOS ELÉTRICOS INTEGRADOS

Alexandre Verdi, Sergio Vidal Garcia Oliveira

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar as forças que atuam sobre um veículo elétrico de competição, tomando como base um protótipo de Fórmula SAE Elétrico da Equipe E-Force UDESC, com foco na determinação dos esforços necessários para vencer as resistências ao movimento, buscando avaliar o desempenho dinâmico do veículo, em especial no que se refere à sua capacidade de aceleração, ou seja, determinar em que medida o motor de tração elétrica poderia atender às condições de operação. A modelagem do problema começou analisando as massas em translação que estão envolvidas. Além da parcela de translação, todos os componentes que possuem movimento de rotação, como rodas, cubos, rolamentos, semieixos, diferencial, coroas, correntes e também o motor, contribuem significativamente para a resistência à aceleração do veículo. Para isso, são considerados parâmetros reais do Protótipo, permitindo uma modelagem consistente e adequada às características do protótipo.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento dessa pesquisa baseou-se em dados reais do protótipo de 2025 da Equipe E-Force UDESC de Fórmula SAE Elétrico onde foram utilizados parâmetros fornecidos pela própria equipe, como massa, dimensões, posicionamento e CADs de todos os equipamentos que compõem o veículo. Os dados utilizados para os cálculos referentes à potência do conjunto também foram fornecidos pela equipe, a qual utiliza motor WEG WTE300 e inversor CVW250 (informações disponíveis na seção de revisão bibliográfica). Utilizando os projetos de CAD, juntamente com as características de cada componente, foi possível, por meio de software, determinar os momentos de inércia de todos os componentes do veículo que são fundamentais para os cálculos.

A metodologia adotada dividiu o processo em duas etapas. Primeiramente, aplicou-se um modelo simplificado com o objetivo de estimar tanto as forças quanto o torque envolvido no processo de translação. Posteriormente, realizou-se a análise detalhada com base em Nicolazzi (2012), onde se subdividem as massas que estão em translação daquelas em rotação, fazendo, posteriormente, a sobreposição destes efeitos no resultado final.

A modelagem do problema começou analisando as massas em translação que estão envolvidas, neste caso o peso final do veículo e também do piloto, sendo considerados como um corpo rígido sujeito a uma aceleração linear, obtendo-se, assim, a força necessária para o movimento retilíneo através do produto da massa pela aceleração.

Além da parcela de translação, todos os componentes que possuem movimento de rotação, como rodas, cubos, rolamentos, semieixos, diferencial, coroas, correntes e também o motor, contribuem significativamente para a resistência à aceleração do veículo. Estes corpos são considerados as massas em rotação e, para cada um deles, foi necessário o cálculo do momento de inércia, realizado a partir dos modelos CAD.

Os dados referentes aos momentos de inércia foram então utilizados para o cálculo da inércia do conjunto de rodas e agregados, da inércia da transmissão e da inércia do motor, sendo esta última disponibilizada no *datasheet* pelo fabricante.

Para obter um modelo mais detalhado, é necessária a superposição dos efeitos das massas em translação e rotação, que corresponde à soma destas duas parcelas. Este resultado reflete o

torque necessário na roda do veículo para que ele possa vencer a inércia e iniciar a aceleração. Dessa forma, a parte dinâmica/cinemática foi modelada, permitindo a entrada de valores referentes ao conjunto de powertrain da equipe, aos dados do pacote de baterias e à faixa de torque do motor, de modo a obter as informações associadas a esse conjunto do protótipo.

RESULTADOS

Na primeira etapa, foram adotados parâmetros médios para o momento de inércia das rodas e o raio dinâmico dos pneus, com a massa total do veículo de 350 kg. A aceleração linear utilizada foi de $0,421 \text{ m/s}^2$, correspondente à aceleração máxima pela configuração atual do pacote de baterias.

Nessas condições, a inércia equivalente do sistema demandou uma força de 170 N para atingir a aceleração desejada. O torque calculado na roda foi de $40,7 \text{ N}\cdot\text{m}$, o que correspondeu a cerca de $4,52 \text{ N}\cdot\text{m}$ no eixo do motor, após aplicar a redução de 9:1.

Esta análise simplificada forneceu uma estimativa conservadora das forças e torques envolvidos no processo de aceleração, útil para estimar alguns dados de projeto.

Na sequência, foi realizada uma avaliação mais detalhada do sistema, baseada nos momentos de inércia obtidos via CAD e nos dados técnicos do sistema de tração. Foram utilizados os seguintes valores principais: massa total de 350 kg, raio dinâmico do pneu de 0,2397 m, aceleração linear de $0,421 \text{ m/s}^2$, aceleração angular da roda de $1,684 \text{ rad/s}^2$ e aceleração angular no eixo do motor de $15,156 \text{ rad/s}^2$. Os momentos de inércia resultaram em um valor total equivalente de aproximadamente $26,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

A partir desses dados, a força necessária para vencer a resistência à translação foi de 147,35 N, enquanto para a resistência rotacional, foi calculado um torque de $45,84 \text{ N}\cdot\text{m}$, que corresponde a uma força equivalente de 191,27 N aplicado ao raio estático da roda, totalizando uma força de resistência à inércia de 338,62 N. O torque correspondente na roda foi de $81,18 \text{ N}\cdot\text{m}$, o que refletido ao eixo do motor, com redução de 9:1, resultou em um torque necessário de $9,49 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Comparando os dois métodos, a análise simplificada subestimou significativamente a resistência à aceleração, principalmente por não considerar adequadamente as inércias rotativas individuais. O modelo detalhado, que leva em conta os momentos de inércia de cada componente, mostra que 56,5% da resistência total (191,27 N) origina-se de componentes rotativos, demandando torque de $9,49 \text{ N}\cdot\text{m}$ no eixo do motor, valor 7,5% superior ao torque disponível ($8,83 \text{ N}\cdot\text{m}$) do pacote de baterias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

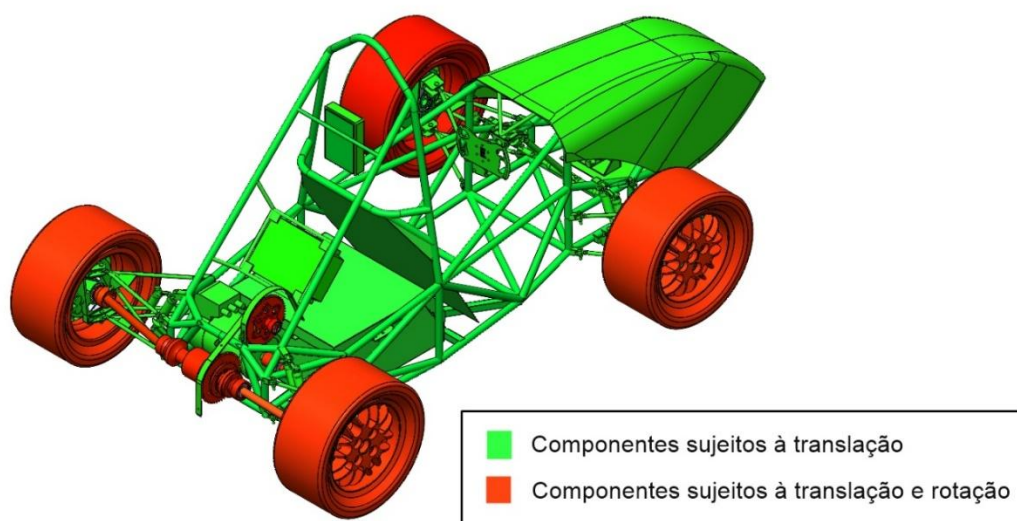
Os cálculos demonstram que, para esta configuração de powertrain do protótipo de Fórmula SAE, a parcela referente às inércias rotativas tem participação significativa na resistência à aceleração, levando o sistema a operar próximo ao limite de capacidade do pacote de baterias.

Ainda que a potência teórica do pacote supere a potência mecânica demandada durante a aceleração, a limitação prática reside na corrente máxima fornecida pelo pacote, que se encontra abaixo da corrente nominal requerida pelo motor.

Logo, essa condição demanda estratégias de controle para suavizar a aceleração e evitar sobrecarga, uma vez que a restrição principal está na capacidade de corrente do pacote e não na potência total disponível.

Palavras-chave: Análise de desempenho; Carros elétricos; Controle de torque; Fórmula SAE; Pacote de baterias; Projeto de automóveis; Resistência à aceleração; Tração elétrica.

ILUSTRAÇÕES



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, Anderson Werner Vieira. **Especificação de um motor de indução para aplicação no sistema de giro de uma subestação móvel de energia elétrica**. 2017. 139 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2017.

LEAL, Longuinho da Costa Machado; ROSA, Edison da; NICOLAZZI, Lauro Cesar. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis**. Florianópolis, 2012. Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

JAHNS, T. M.; DAI, H. The past, present, and future of power electronics integration technology in motor drives. **CPSS Transactions on Power Electronics and Applications**, v. 2, n. 3, p. 197-216, set. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8118375&isnumber=8118368>>. Acesso em: 28 ago. 2025.

ROSU, M. et al. **Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics and drives**. IEEE, 2018. DOI: 10.1002/9781119103462.

EFORCE UDESC. **Página institucional da E-Force UDESC**. LinkedIn. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/company/eforceudesc/people/>>. Acesso em: 28 ago. 2025.

WEG. **Three-phase low voltage electric traction motor light vehicles**. In: Catálogo de motores elétricos. Brasil: WEG. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/en/Electric-Motors/Three-Phase-Low-Voltage/Definite-Purpose/Electric-Traction/Light-vehicles/Electric-Traction/p/MKT_WMO_BR_MT_3PHASE_LV_ELECTRICTRACTIONMOTOR_LIGHT>. Acesso em: 28 ago. 2025.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Alexandre Verdi

MODALIDADE DE BOLSA: PIBITI/CNPq

VIGÊNCIA: 09/24 a 08/25 – Total: 12 meses

ORIENTADOR(A): Sergio Vidal Garcia Oliveira

CENTRO DE ENSINO: CCT

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia Elétrica

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia Elétrica

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Acionamentos elétricos integrados - Parte 2

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP3155-2021