

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM E ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO LEVE (LEV)

por

Rafael Mester Furtado

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2017

MODELAGEM E ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO LEVE (LEV)

por

Rafael Mester Furtado

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. **Thammy Cristina Hayashi**
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. **Flávio José Lorini**

Comissão de Avaliação:

Prof. **Darci Campani**

Prof. **Patric Neis**

Prof. **Tiago Becker**

Porto Alegre, 28 de Julho de 2017

MESTER FURTADO, R. **MODELAGEM E ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO LEVE (LEV)**. 2017. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

O presente trabalho aborda as etapas no projeto de um veículo elétrico leve (LEV) com motores *In-Wheel* (MiW) desenvolvido dentro da empresa ACTUA – *Actuation and Control Technologies Srl* localizada em Turim no norte da Itália. A aplicação dos motores elétricos e híbridos em carros vem crescendo constantemente por representar uma solução sustentável, além de apresentar vantagens como alta eficiência e torque de partida; já a tecnologia de motores *In-Wheel* tem aparecido cada vez mais como solução para sistemas que requerem baixa carga sustentada por amortecedores e/ou ausência de caixa de câmbio, sendo então associada a uma grande economia de espaço. O objetivo do trabalho consiste na obtenção das curvas preliminares de desempenho do veículo a partir de medições realizadas nos motores fabricados na empresa, de onde foram levantados os mapas e constantes físicas que representam o comportamento eletro-termo-mecânico. Após, diferentes lógicas de controle e de arquiteturas mecatrônicas foram propostas para programação e construção da ECU (*Electronic Control Unit*) do veículo, respectivamente. Dessa forma, todos os parâmetros necessários para a aplicação das equações da dinâmica longitudinal do veículo são obtidos e permitem simular via sistema Matlab/Simulink o comportamento do carro com os sistemas de controle utilizando o módulo *Stateflow*. Como resultados, foram obtidos, a partir de perfis de teste adequados e parâmetros de análise devidamente selecionados, diversas curvas de desempenho do veículo e especificações preliminares para a futura prototipagem do mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: Veículo elétrico leve, Testes de motores, Controle e simulação térmica, Desempenho de tração veicular.

MESTER FURTADO, R. **DEVELOPMENT AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A LIGHT ELECTRIC VEHICLE (LEV)**. 2017. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The following paper discusses the steps of a light-electric vehicle (LEV) with In-Wheel motors' (MiW) project developed inside a company named ACTUA - Actuation and Control Technologies Srl located in Turin in northern Italy. Applications of electric and hybrid motors in cars has been widely studied as a sustainable solution, besides offering advantages such as high efficiency and starting torque. On the other hand, In-Wheel engine technology has increasingly appeared as a solution for systems that still require low sustained load by shock absorbers and/or no gearbox; is therefore associated with a great saving of space. The objective of the work is to obtain the preliminary performance curves of the vehicle from measurements made on the engines manufactured in the company, from which the maps and physical constants representing the electro-thermo-mechanical behavior were collected. Different control logics and mechatronic architectures were proposed for programming and building the ECU (Electronic Control Unit) of the vehicle, respectively. In this way, all the necessary parameters for the application of the equations of the longitudinal dynamics of the vehicle were obtained and will allow to simulate using Matlab/Simulink platform the behavior of the car with the control systems using the Stateflow module. As results, several curves of performance and preliminary specifications of the vehicle will be obtained for the future prototyping of the same.

KEYWORDS: Light electric vehicle, Motors' tests, Control and thermal simulation, Vehicular's traction performance.

INDICE DE ABREVIACES

- AKU** – Actuation ‘**K**ontrol’ **U**nit
- BLDC** – **B**rushless **D**irect **C**urrent
- BMS** – **B**attery **M**anagement **S**ystem
- DC** – **D**irect **C**urrent
- EKU** – **E**lectronic ‘**K**ontrol’ **U**nit
- EMU** – **E**nergy **M**anagement **U**nit
- ESS** – **E**nergy **S**torage **S**ystem
- EV** – **E**lectric **V**ehicle
- ICE** – **I**nternal **C**ombustion **E**ngine
- IDEA** – **I**ntegrated **D**ifferential **E**lectrical **A**xle
- IPM** – **I**nterior **P**ermanent **M**agnet
- LDPE** – **L**ongitudinal **D**ynamic **P**erformance **E**valuator
- LEV** – **L**ight **E**lectric **V**ehicle
- MiW** – **M**otor **I**n-**W**heel
- MiW-BLDC** – **M**otor **I**n-**W**heel **B**rushless **D**irect **C**urrent
- MRU** – **M**otor **R**eduction **U**nit
- PEK** – **P**erformance **E**valuator **K**it
- SRM** – **S**witched **R**elutance **M**otor
- TMM** – **T**raction **M**otor **M**anagement
- UDC** – **U**rban **D**riving **C**ycle
- UDFVC** – **U**nified **D**irect **F**lux **V**ector **C**ontrol
- VDC** – **V**ehicle **D**ynamic **C**ontrol
- WLTC** – **W**orldwide harmonized **L**ight vehicles **T**est **C**ycle

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | iv |
| INDICE DE ABREVIACÕES | v |
| ÍNDICE | vi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA..... | 2 |
| 2.1. Sistema de Armazenamento de Energia (ESS) | 2 |
| 2.2. Unidade de Controle de Atuadores (AKU)..... | 2 |
| 2.3. Motor Elétrico..... | 3 |
| 2.3.1. Modelo Térmico Motor..... | 4 |
| 2.3.2. Limites do Acoplamento Motor-Inversor-Bateria | 5 |
| 2.4. Dinâmica Longitudinal..... | 5 |
| 3. TESTES E ANÁLISE DE DADOS..... | 6 |
| 3.1. Verificação de Correntes Parasitas | 6 |
| 3.2. Caracterização do Motor | 7 |
| 4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO VIRTUAL | 8 |
| 4.1. <i>Longitudinal Dynamic Performance Evaluator</i> (LDPE) | 8 |
| 4.2. Controle Lógico Direto de Temperatura | 8 |
| 5. RESULTADOS | 10 |
| 5.1. Mapeamento Motor..... | 10 |
| 5.2. Obtenção dos Parâmetros Térmicos..... | 11 |
| 5.3. Desempenho Preliminar nos Testes | 11 |
| 5.3.1. Teste WLTC para 2 Motores | 11 |
| 5.3.2. Teste em Declividade para 4 Motores | 12 |
| 6. CONCLUSÕES | 14 |
| REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA | 15 |
| ANEXO I | 16 |
| ANEXO II..... | 18 |
| APÊNDICE A | 19 |
| APÊNDICE B | 20 |

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial tem causado um aumento consequente na quantidade de veículos nas ruas; estes, na grande maioria equipados com motores de combustão interna, geram uma alta quantidade de substâncias poluentes no ambiente. Para controlar a poluição e o uso de fontes limitadas na natureza, normas como a EURO 1-6 foram criadas. Estas políticas forçaram a indústria automotiva a encontrar soluções que fossem capazes de seguir as normas sem perder eficiência e qualidade; as soluções elétrica e híbrida então aparecem como uma forte solução nessa tentativa de melhoramento da qualidade de vida do planeta [SANCHEZ et al., 2012].

No início dos anos 90, quando as normas citadas começaram a aparecer na Europa, diversas empresas de desenvolvimento tecnológico também surgiram como a Actua, na Itália. A Actua é uma empresa que se ocupa de projetos na área automotiva para veículos elétricos e híbridos, passando por todos os passos, desde a concepção até a construção dos protótipo, de acordo com o esquema representado na Figura 1.1. [ACTUAGROUP, 2017]



Figura 1.1 - Esquema de trabalho Actua. [ACTUAGROUP, 2017]

Este trabalho aborda parte do esquema acima representado no contexto do projeto *Risciò*, com o principal objetivo de implantar a tecnologia dos Motores *In-Wheel* (MiW), desenvolvidos pela empresa, em um outro veículo leve, também desenvolvido pela empresa, chamado *Spadino*.

Espera-se, como objetivo principal neste trabalho, a obtenção de parâmetros e curvas preliminares de desempenho que sejam característicos e capazes de descrever o comportamento do veículo em situações de teste reais a partir de simulações virtuais e em diferentes configurações. Ao longo do processo são realizados testes experimentais para a caracterização dos motores e da sua interação com os componentes que o alimentam: inversor e bateria. A seguir, no trabalho, são criadas lógicas de controle a serem incorporadas ao controle de tração, como um controle térmico necessário devido ao fato de o motor não ser dotado de um sistema de resfriamento a água¹ e sim a ar. Segue-se então a construção ou modificação de uma plataforma virtual que represente o protótipo virtual com suficiente acurácia depois de uma seleção igualmente adequada de parâmetros e constantes necessárias às simulações, obtidas, ou via medições ou via pesquisa bibliográfica. Finalmente passa-se à seleção de ciclo reais de testes a serem introduzidos virtualmente; obtêm-se enfim as curvas de desempenho preliminar do veículo para a introdução de 2 posteriores e de 4 motores. Estes dados, após análises, servirão de base para a prototipação real do veículo futuramente.

Parte das considerações feitas ao longo do trabalho têm base em aproximações coerentes mas que estão sujeitas a alterações quando meios mais adequados estiverem disponíveis para a devida identificação das mesmas; ocorre principalmente no caso das constantes da dinâmica longitudinal: considerando-se possíveis alterações no design do veículo, diferenças aparecem nos valores das constantes aerodinâmicas.

¹ Sistemas de resfriamento a água necessitam de tubulações que, por passarem internamente à estrutura, diminuem a resistência mecânica da estrutura do motor e limitam a capacidade de transmissão de potência.

2. SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA

Os veículos elétricos são caracterizados por apresentarem seu sistema de tração (*powertrain*) inteiramente elétrico, ou seja, o espaço destinado ao reservatório de combustível nos veículos movidos a combustão vem substituído por uma fonte de energia elétrica: a bateria (ESS), que é então ligada aos controladores de tração (*Traction AKU*²) e alimenta o motor. Na Figura 2.1, está representada a arquitetura mecatrônica para o veículo em estudo em configuração para 4 motores. Dentro do ESS, corrente continua sai do pacote de energia (*Energy Pack*) e é distribuída entre os dois AKU pelo controlador da bateria (EMU). O AKU então realiza o controle através de informações recebidas dos diversos sensores que estarão instalados ao longo do carro e envia sinais trifásicos aos motores com as devidas saturações. O motor por sua vez vem acoplado às rodas através de um diferencial adaptado (IDEA³).

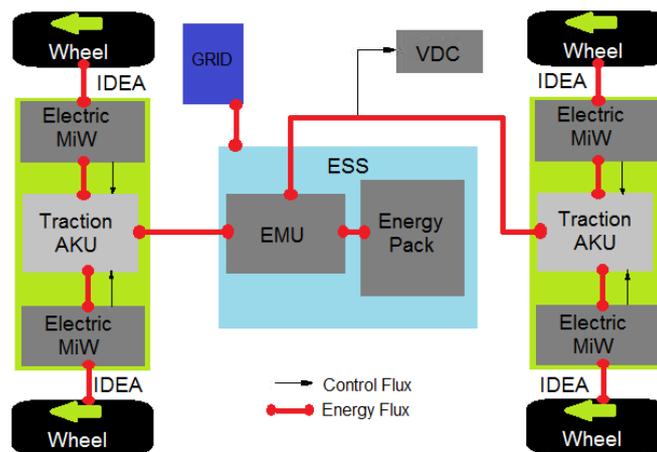


Figura 2.1 - Arquitetura mecatrônica de um veículo elétrico com 4 motores *In-Wheel*.

2.1. Sistema de Armazenamento de Energia (ESS)

A bateria é o componente capaz de armazenar energia na forma eletroquímica quando desconectado e liberar potência elétrica quando conectado a um circuito. É capaz de ser recarregada se submetida a uma diferença de potencial inversa. Uma bateria é formada por conjuntos de módulos em série e paralelo, que por sua vez são formados por conjuntos de células geridas por um BMS (Sistema de Gestão de Bateria). Cada elemento adiciona energia ao sistema, ou na forma de aumento da tensão nominal, quando posicionados em série, ou de aumento da corrente nominal, quando em paralelo em paralelo aumentam a corrente gerada [SONSIN, 2015].

2.2. Unidade de Controle de Atuadores (AKU)

O controle de atuadores é dividido fisicamente em duas partes: uma de potência, onde dados são coletados dos sensores, e uma parte de controle eletrônico (EKU⁴) onde é feito o controle de tração por roda através de diversos algoritmos que interpretam as informações que chegam dos sensores. Dividido em UDFVC e TMM, a primeira função do EKU controla os sinais de corrente (i_q e i_d); já o TMM faz a interação direta entre os comandos do motorista e a resposta da *powertrain* elétrica através de controles como o térmico, que define, baseado nas informações obtidas dos sensores de temperatura, o quanto de potência poderá ser efetivamente convertido pelo motor sem que ele seja danificado. O VDC, controle dinâmico do

² *Actuation "Kontrol" Unit* – Unidade de controle de tração. O termo *Kontrol* vem assim escrito por representar especificamente o controlador desenvolvido pela Actua e assim nomeado pela mesma.

³ *Integrated Differential Electrical Axle* – Eixo com diferencial elétrico integrado. Componente desenvolvido pela Actua para aplicar o controle de torque para cada roda independentemente e de forma otimizada.

⁴ *Electronic "Kontrol" Unit* – Unidade de controle eletrônico interno ao AKU. O termo *Kontrol* vem assim escrito pela mesma razão que o AKU.

veículo, interpreta as variáveis relacionadas à dinâmica longitudinal (torque, velocidade e escorregamento, etc...) determinando a quantidade de energia que cada motor deve receber do ESS [HERNANDEZ, 2014; MOSCA, 2014; BECCHIA, 2015].

2.3. Motor Elétrico

Motores elétricos são caracterizados principalmente por possuírem alta eficiência, alto torque de partida e capazes de alcançarem altas rotações, porém baixa potência quando comparados aos de combustão interna [MATOS DIAS et al., 2005]. Várias configurações e tipologias possíveis já foram desenvolvidas para uma vasta variedade de aplicações. Na área automotiva, os mais comuns são os motores *Brushless* DC e os motores com relutância elétrica variável (SRM), ambos síncronos. A tipologia em análise neste projeto é o MiW *Brushless* DC (MiW-BLDC) com estator interno. Este motor está associado a altos custos de montagem e a baixos custos de manutenção. O motor Actua pode ser visto no ANEXO I.

Devido à configuração com ímãs permanentes no rotor e ligação na fonte via frequência controlada pelo AKU, um perfil otimizado e controlado de comportamento torna-se possível para o motor em termos de torque, velocidade e potência [M. FURTADO, 2016]. Basicamente, o motor é capaz de gerar qualquer valor de torque dentro de uma curva característica com um determinado rendimento; o comportamento do motor é regido, então, por um mapa de funcionamento, cujos limites são dados pelas curvas características. No auxílio do controle térmico do motor, três curvas características são definidas baseadas no rendimento médio teórico em que trabalham ou, em outras palavras, no nível térmico alcançado em funcionamento contínuo: base (ponto de trabalho que eleva a temperatura das bobinas a valores inferiores ao limite do sistemas de isolamento), nominal (ponto de trabalho que eleva a temperatura das bobinas ao máximo), e máxima (ponto de trabalho que eleva a temperatura das bobinas ao limite do isolamento em 10 segundos a partir da curva base). Na prática, as curvas vêm definidas baseadas no mapa de rendimento motor e a curva máxima coincide com o máximo elaborado pelo motor [SONSIN, 2015].

Para melhor compreensão deste rendimento, a análise de um modelo físico é proposta. O modelo é de natureza híbrida (elétrica e mecânica) e é representativo de motores síncronos (Figura 2.2); a parte elétrica representa os circuitos do estator com os efeitos de resistência e indutância (à esquerda) e a parte mecânica, o eixo do rotor com os efeitos de inércia, amortecimento e um torque resistente (T_r).

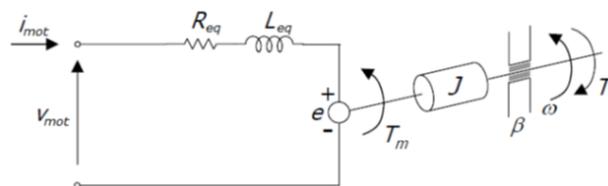


Figura 2.2 - Modelo monofásico característico de motores síncronos. [SONSIN, 2015]

As equações diferenciais do comportamento elétrico e do mecânico são apresentadas nas equações 2.1 e 2.2 e os parâmetros são relacionados através das equações 2.3 e 2.4.

$$V_{mot}(t) - e(t) - R_{eq}I_{mot}(t) - L_{eq} \frac{dI_{mot}(t)}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

$$T_m(t) - T_r(t) - J \frac{d\omega(t)}{dt} - \beta\omega(t) = 0 \quad (2.2)$$

$$e(t) = k_w\omega(t) \quad (2.3)$$

$$T_m(t) = k_t I_{mot}(t) \quad (2.4)$$

Onde k_w e k_t estabelecem as relações lineares fundamentais entre força eletromotriz auto-induzida $e(t)$ e velocidade $\omega(t)$, torque motor $T_m(t)$ e corrente $I_{mot}(t)$, e são chamados, respectivamente, de constante de velocidade e constante de torque. R_{eq} e L_{eq} representam a resistência e indutância do estator e J e β a inércia mássica de rotação e amortecimento no eixo rotor. As relações de eficiência úteis a esta análise estão apresentados nas equações 2.5 e 2.6.

$$P_m(t) = T_m(t)\omega(t) = \eta_m P_{el}(t) = \eta_m \eta_{inv} P_{bat}(t) \quad (2.5)$$

$$P_d(t) = P_{el}(t)(1 - \eta_m) \quad (2.6)$$

Onde: P_m , P_{el} e P_{bat} representam respectivamente a potência no rotor (mecânica), no estator (elétrica) e na bateria. P_d é a potência dissipada. η_m e η_{inv} representam a eficiência do motor e do AKU respectivamente. Estes valores são quantificados através de testes que são realizados e explicados mais adiante. Do sinal de torque proveniente do motor, segue o comportamento mecânico que representa a interação entre a estrutura e o ambiente ao redor, definindo como o sinal de torque é convertido em velocidade efetiva do veículo.

2.3.1. Modelo Térmico Motor

Como em qualquer sistema de transmissão ou conversão de energia, existem perdas no processo que são avaliadas pelo conceito de eficiência ou rendimento. As relações que governam o fluxo energético através da powertrain elétrica já foram explicadas e chegou-se em basicamente quatro parâmetros geradores de perdas no motor: efeito resistivo e indutivo nos enrolamentos do estator e efeitos de inércia e amortecimento no eixo do rotor. Não foi posto em análise, mas existem perdas similares nos circuitos do AKU e da bateria, porém em menores escalas. A presença de efeito resistivo em um condutor atravessado por corrente é traduzido em uma inevitável perda térmica. Indutores geram campos magnéticos e correntes auto-induzidas na armadura metálica do estator. Inércia mássica atrasa o movimento do rotor e o amortecimento, além da tendência a defasar o movimento rotativo do rotor em relação ao campo magnético gerador, é uma fonte secundária geradora de calor [FASIL et al., 2015].

Torna-se necessário, portanto, o controle das perdas do sistema. É proposto um modelo térmico que descreva de forma simplificada como se comporta o motor em relação à sua perda mais significativa. É garantido, porém, que, primeiramente, as outras perdas sejam efetivamente desprezíveis ou minimizadas. O circuito térmico é representado na Figura 2.3.

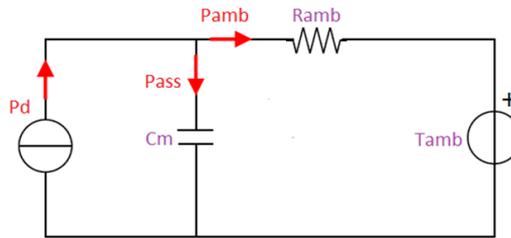


Figura 2.3 - Circuito térmico análogo representativo do comportamento motor.

Utilizando-se da mesma notação da equação 2.6, a potência perdida no motor ($P_d(t)$) pode ser dividida em duas parcelas: uma absorvida (P_{ass}), dependente da capacidade térmica equivalente do motor (C_m) e uma dissipada ao ambiente (P_{amb}), dependente da resistência térmica equivalente do motor (R_{amb}). Partindo-se das hipóteses de perdas uniformemente distribuídas em toda a área de troca térmica e de temperatura homogênea em todo o volume de metal, as potências absorvida e dissipada podem ser representadas pelas equações 2.7 e 2.8 [INCROPERA et al., 2007].

$$P_{ass}(t) = C_m \frac{d(T_m(t) - T_{amb})}{dt} = mc_p \frac{d(T_m(t) - T_{amb})}{dt} \quad (2.7)$$

$$P_{amb}(t) = \frac{(T_m(t) - T_{amb})}{R_{amb}} = h_{amb} A_{amb} (T_m(t) - T_{amb}) \quad (2.8)$$

A resistência térmica vêm modelada como uma resistência à convecção com o ambiente externo e são desprezados quaisquer efeitos de radiação ($R_{amb} = 1/h_{amb} A_{amb}$). A configuração com estator aberto permite que o motor, não dotado de sistema de resfriamento, troque calor mais eficientemente com o ambiente mesmo com a presença do rotor externo. Pode-se considerar que a resistência térmica engloba todos os efeitos de dissipação dentro do coeficiente de troca térmica (h_{amb}); o calor específico (c_p) pode ser modelado como uma média entre o valor para o cobre dos enrolamentos e para o ferro na armadura do estato; a massa (m) representa então uma massa térmica equivalente aproximada.

2.3.2. Limites do Acoplamento Motor-Inversor-Bateria

O funcionamento do motor passa seja por limitações inerentes ao funcionamento seja por saturações impostas com o objetivo de se evitar danos. Na transmissão de energia entre o ESS e a chegada no motor, a bateria e o AKU impõem certas alterações no comportamento motor que alteram as curvas características deste. Mais detalhes no APÊNDICE A.

2.4. Dinâmica Longitudinal

A dinâmica do veículo representa a interação deste com as diversas variáveis externas relacionadas com o mesmo. Imaginando-se um sistema de referência como aquele representado na Figura 2.4a, onde o sistema local do carro (xyz) permanece paralelo ao sistema global (XYZ) possibilitando somente um eixo de rotação (ausência de análise de dinâmica lateral), e as forças aplicadas como na Figura 2.4b, as equações de equilíbrio dinâmico na direção x (2.9), y (2.10) e de rotação ao redor do ponto A de contato (2.11) são apresentadas a seguir [FERRARESI e RAPARELLI, 2007].

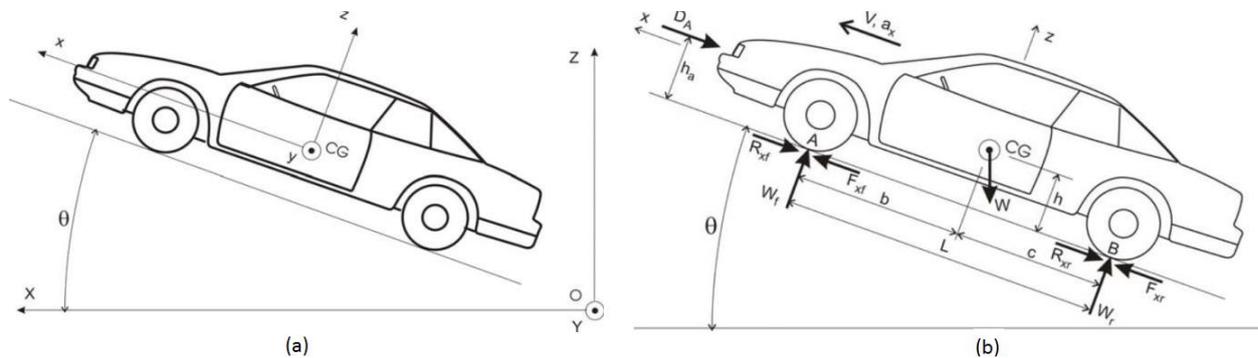


Figura 2.4 - Modelo de dinâmica longitudinal de um veículo. Sistema de referência em (a) e aplicação das forças em (b). [FERRARESI e RAPARELLI, 2007]

$$M_{ap}a_x = F_{xf} + F_{xr} - R_{xf} - R_{xr} - D_A - Mgsin(\theta) \quad (2.9)$$

$$Mgcos(\theta) = W_f + W_r \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} W_r L - D_A h_a - Mghsin(\theta) - Mgccos(\theta) - Mha_x = 0, \text{ em aceleração} \\ W_r L - D_A h_a - Mghsin(\theta) - Mgccos(\theta) + Mha_x = 0, \text{ em frenagem} \end{cases} \quad (2.11)$$

As hipóteses e relações auxiliares que envolvem o comportamento dinâmico são: perfeita aderência, ou ausência de escorregamento, que permite unificar, como na equação 2.12, os efeitos de inércia de rotação das rodas à massa do sistema e utilizar uma massa aparente (M_{ap}) [GUIGGIANI, 2007]; atrito de resistência ao rolamento com coeficiente de resistência quadrático com a velocidade relacionando as forças de contato frontal (W_f) e traseira (W_r) com as forças resistentes frontal (R_{xf}) e traseira (R_{xr}) respectivamente (equação 2.13); inexistência de arrasto nas direções y e z e invariabilidade do coeficiente de arrasto na direção x, em decorrência da densidade consideradas constantes para o ar no escoamento (equação 2.14).

$$M_{ap} = M + (J_{mot} + J_{tire})/r_{tire}^2 \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} R_{xf} = (f_0 + f_2 v_x^2) W_f \\ R_{xr} = (f_0 + f_2 v_x^2) W_r \end{cases} \quad (2.13)$$

$$D_A = 0.5 C_D \rho A_F v_x^2 \quad (2.14)$$

J_{mot} e J_{tire} são os momentos de inércia do motor e da roda respectivamente. r_{tire} é o raio da roda. f_0 e f_2 são os coeficientes que definem o atrito, representando o primeiro a fricção estática e o segunda a dinâmica. A_F é a área frontal do veículo e C_D o coeficiente de arrasto na direção x. A partir da equação 2.9, é possível traçar-se um gráfico de força resistente, analogamente ao modelo da Figura 2.2, que englobaria os termos de resistência ao rolamento (R_{xf} e R_{xr}), força aerodinâmica (D_A) e força devido à presença de inclinação no terreno ($Mgsin(\theta)$) e confrontá-lo com as curvas características do acoplamento motor-inversor-bateria em função da velocidade. Estes gráficos apresentariam um intersecção entre a curva resistente e a curva motriz que representaria o ponto de operação do veículo.

3. TESTES E ANÁLISE DE DADOS

Uma vez definidas todas as equações e relações fundamentais, é realizada uma sequência de testes que tem por finalidade básica a construção de mapas de funcionamento do motor. Primeiramente é realizada uma verificação para a ausência das correntes parasitas no motor e em seguida são realizados os testes de caracterização.

3.1. Verificação de Correntes Parasitas

Este efeito, consequência do efeito indutivo das bobinas no modelo da Figura 2.2, é verificado de acordo com o esquema da Figura 3.1. O parâmetro monitorado é a temperatura; é necessário que essa se mantenha inalterada ou com mínimas variações durante os testes para confirmar-se a ausência das correntes indesejadas.

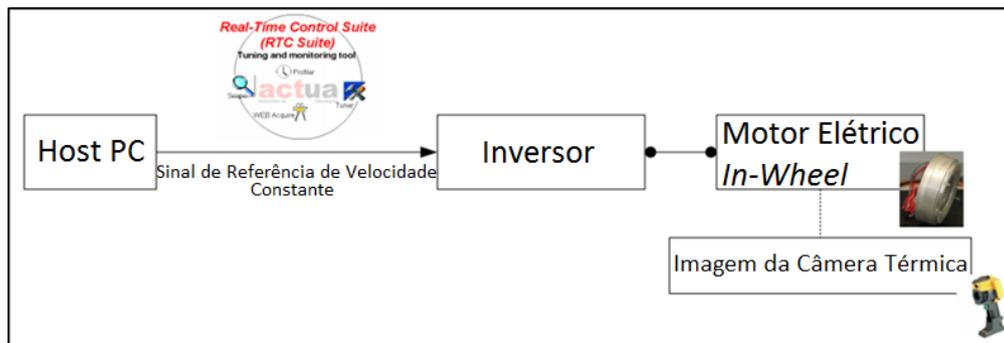
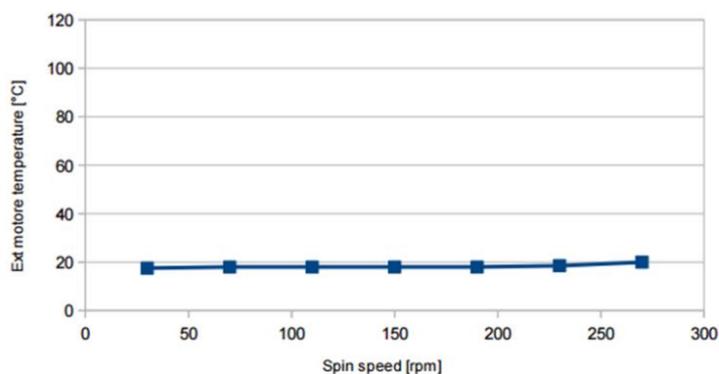


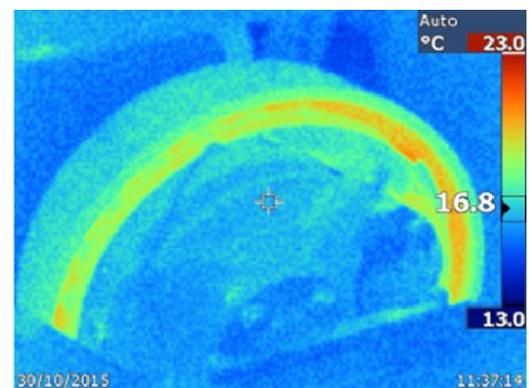
Figura 3.1 - Esquema de teste para verificação de correntes parasitas.

Um sinal de velocidade constante controlado por computador é enviado ao motor passando pelo inversor sem limites impostos por controle e o motor gira elaborando um torque nulo; em seguida, a leitura de temperatura nas bobinas retorna dos sensores presentes no motor e uma câmera térmica é aplicada para monitorar que não haja perdas localizadas ao redor da armadura do estator. Neste ponto nenhum sistema de ventilação é instalado para simular condições de convecção forçada reais. Na ausência de torque, não devem existir mudanças de temperatura, pois não circula corrente geradora de campos magnéticos no estator.

A bateria de testes foi realizada sequencialmente começando em 30 RPM e incrementando-se 40 RPM a cada ciclo, que era então mantido por 100 segundos; a velocidade é medida através de sensores de efeito Hall presentes no AKU; o computador então armazenava as informações adquiridas através do sistema de aquisição RTC Suite desenvolvido pela Actua [BECCHIA, 2015]. Na Figura 3.2 é mostrado o gráfico da temperatura média das bobinas durante os 100 segundos e uma imagem da câmera térmica. Nota-se pelo gráfico que se verificou uma variação térmica de menos de 1°C na média dos 100 segundos de simulação entre 30 RPM e 300 RPM, podendo-se desprezar o efeito das correntes parasitas.



(a)



(b)

Figura 3.2 - Medidas de temperatura para verificação de correntes parasitas. Gráfico das temperaturas médias das bobinas (a) e imagem da bobina observada pela câmera térmica em (b).

3.2. Caracterização do Motor

Os testes experimentais para levantamento das curvas de caracterização do motor (potência, torque, eficiência, etc...) foram realizados de acordo com o esquema da Figura 3.3.

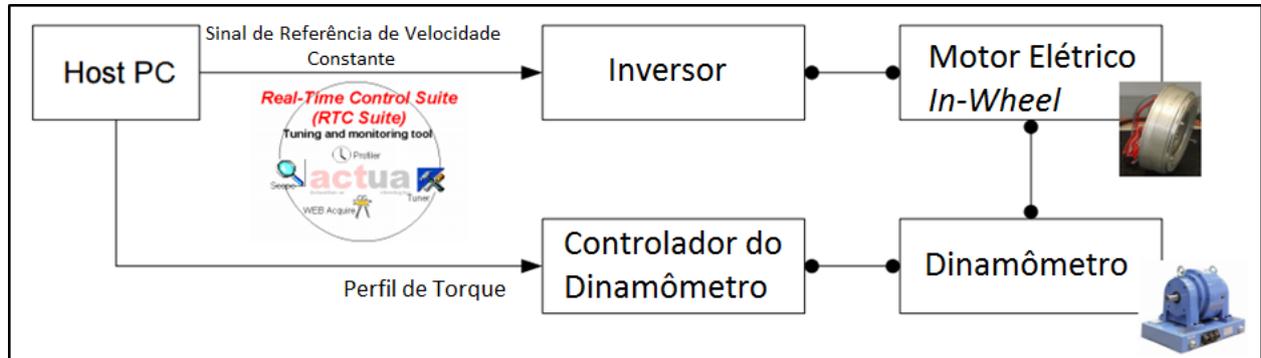


Figura 3.3 - Esquema de teste para caracterização do motor.

Novamente um sinal de velocidade controlada e constante é enviado ao motor, porém o motor é agora conectado ao dinamômetro, também controlável por computador. O torque é incrementado até o bloqueio do motor interrompendo a rotação (máximo elaborado) ou até saturar a corrente no alimentador. Além de velocidade e torque, no RTC Suite são armazenadas informações para todo o perfil de torque para uma série de informações diretamente recolhidas dos sensores: correntes de fase (I_q^{AKU} e I_d^{AKU}) medidas na saída do AKU, tensão e corrente contínua (I_{DC} e V_{DC}) na entrada do AKU e temperatura no motor e no AKU (ϑ_m e ϑ_{AKU}). Para ter-se um comportamento térmico mais realista, dois ventiladores foram colocados direcionando ar à temperatura ambiente no motor, simulando condições de convecção existentes no funcionamento real.

A partir das informações diretamente recolhidas, obtêm-se diversos pontos que são, então, filtrados e os mais significativos são selecionados. A partir dos parâmetros diretamente medidos pelos sensores se calculam as variáveis de mapeamento motor de acordo com as equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Os resultados das variáveis são então interpolados para que se obtenha a curva de torque máximo e os mapas de funcionamento para todo o domínio. As relações usadas estão listadas abaixo, onde P_m é a potência mecânica na saída do motor, P_{bat} é a potência na saída da bateria, η_s é a eficiência global do acoplamento motor/inversor/bateria ($\eta_s = \eta_m \eta_{inv}$) e k_t é a constante de torque.

$$P_m = T_m \omega \quad (3.1)$$

$$P_{bat} = V_{DC} I_{DC} \quad (3.2)$$

$$\eta_s = P_m / P_{bat} \quad (3.3)$$

$$k_t = T_m / I_q^{AKU} \quad (3.4)$$

A partir do mapa de eficiência e da definição das curvas características dada na metade da seção 2.3, torna-se possível a obtenção dos pontos que determinam as curvas⁵ nominal e base. Já para a obtenção dos parâmetros térmicos criou-se um modelo em Simulink que recebe rotação e torque como *Input* e temperatura como *Output*. Para cada teste à velocidade constante citado, foi obtida uma curva experimental para a temperatura; essa vem então confrontada com aquela calculada pelo modelo Simulink quando o perfil de torque recolhido pelo dinamômetro e o mesmo perfil constante de velocidade utilizado no teste são introduzidos como sinais de entrada. Da comparação, se gerou uma função erro que, representando a diferença entre as duas curvas, foi minimizado através da utilização do comando *fminsearch* presente no Matlab [MATHEWORKS, 2017]. Dessa forma, obtêm-se os valores otimizados para as constantes térmicas que melhor representam a realidade dos testes.

⁵ Optou-se por não utilizar a curva intermitente nessa altura do trabalho e manteve-se a análise com as outras três: Máxima, Nominal e Base.

4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO VIRTUAL

Após todos os testes e tratamentos dos dados obtidos, faz-se necessária a construção do protótipo virtual do veículo, uma plataforma onde se possam fazer as simulações. Para tal partiu-se de um modelo previamente desenvolvido dentro da Actua chamado *Performance Evaluator Kit* (PEK), realizado em Matlab/Simulink e as alterações necessárias foram feitas.

4.1. Longitudinal Dynamic Performance Evaluator (LDPE)

A construção do simulador consta de um modelo Simulink que representa a arquitetura mecatrônica da Figura 2.1. Vem modelado de acordo com a interface representada na Figura 4.1. O modelo recebe dados a respeito da bateria, do motor, do AKU, além de todos os dados da dinâmica longitudinal e construtivos do veículo. As simulações seguem a seguinte lógica:

1º: Um sinal de velocidade de referência é comparado ao sinal de velocidade de retroação e o erro é calculado dentro do *Driver*, de forma a simular o comportamento do motorista ao desejar atingir uma velocidade e conhecer aquela dada pelo velocímetro;

2º: O erro sai do *Driver* e é convertido em um comando de aceleração e logo em seguida em um torque de referência dentro do bloco *Pedals*;

3º Torque de referência é saturado e convertido em um torque disponível efetivo dentro do AKU, caracterizando a interface Ser Humano-Máquina.

4º Torque é aplicado nas equações da dinâmica e gera uma resposta em velocidade na *Plant* que volta ao *Driver* e um novo comando de erro é gerado.

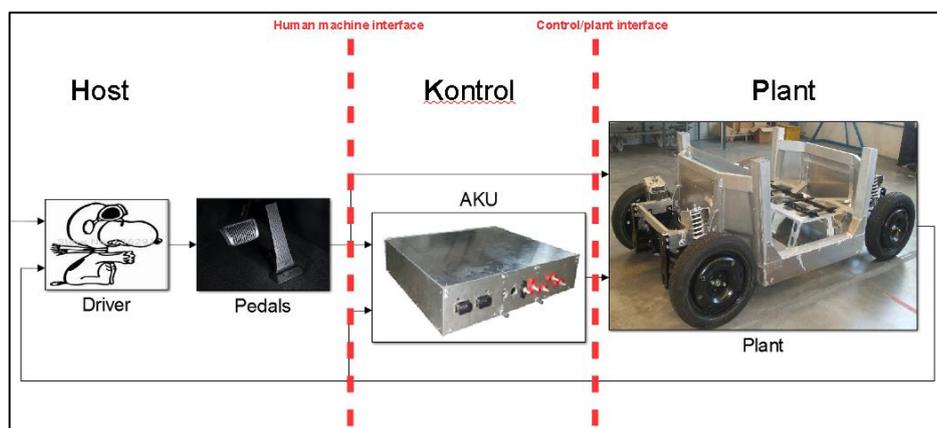


Figura 4.1 – Longitudinal Dynamic Performance Evaluator.

Mais detalhes sobre o funcionamento do simulador em M. Furtado, 2016. Detalhes sobre a modelagem do sistema de frenagem regenerativa, realizado internamente na empresa, podem ser visto em Mosca, 2014. As constantes para os pneus foram baseados em Clark & Dodge, 1979. Para a aerodinâmica, foram reaproveitadas as constantes encontradas via CFD para o veículo *Spadino*, veículo base cujo modelo CAD se encontra no ANEXO I junto a imagens caracterizando a nova configuração da *powertrain* a ser implantada.

4.2. Controle Lógico Direto de Temperatura

O próximo passo na construção do protótipo virtual é a criação da lógica de controle térmica e do modelo térmico compatível com o PEK. Para isso, utilizou-se novamente o Simulink através do módulo Stateflow [MATHWORKS, 2017] de controle por estados.

O subsistema referente ao modelo térmico fica localizado junto ao subsistema do motor, retornando o valor da temperatura. Conforme explicado em 2.2, dentro do AKU encontra-se o TMM, local onde ocorrem as saturações necessárias ao funcionamento do motor sem danos; é neste ponto que é colocado o bloco de controle lógico como mostrado na Figura 4.2. Pode-se ver pela figura que existem três entradas e uma saída no bloco; as três entradas são a temperatura, o torque requerido ou de referência e a velocidade; a saída será o comando de torque disponível. O controle ocorre por eixo, conforme a Figura 2.1.

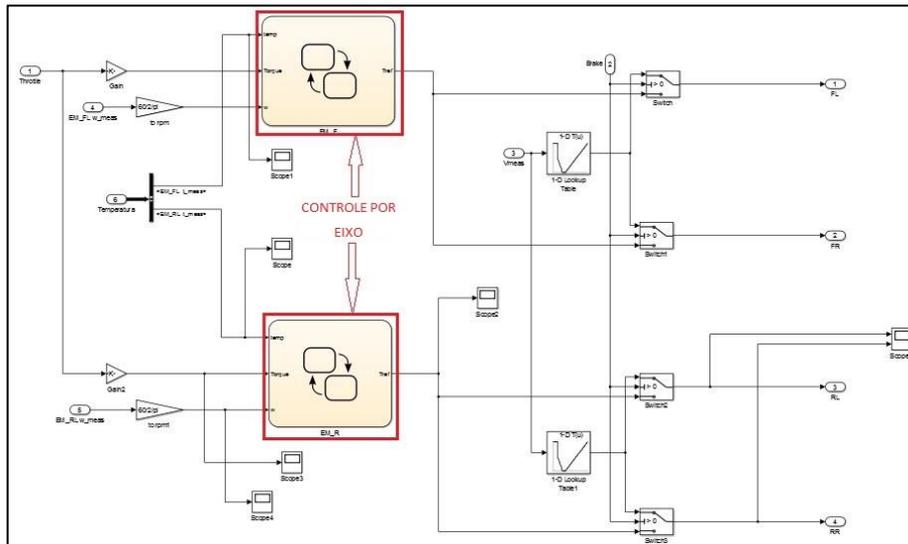


Figura 4.2 – Subsistema referente ao TMM

O módulo Stateflow de controle funciona com base na definição do estado de um sistema e de uma ou mais variáveis de controle capazes de alterar este estado; neste caso o sistema é o motor e o seu estado de operação é controlado pela variável temperatura. Como já explicado, 3 estados são definidos para o motor: Máximo, Nominal e Base, portanto 3 blocos de estado são criados representando-os. Dentro de cada bloco encontra-se um subsistema Simulink responsável por calcular, a partir da velocidade, o valor do torque disponível; dentro de cada subsistema Simulink é, portanto, introduzida a curva característica associada além do mapa de eficiência. Os blocos são colocados em *Exclusive Mode*⁶ de forma que somente um estado possa trabalhar por vez. A montagem do controle está representada na Figura 4.3. O motor passa, por exemplo, de um estado de máximo a um estado base quando o valor do torque requerido diminui a este nível ou quando a temperatura se aproxima do máximo, sendo então saturado. Analogamente, para se passar de um estado base ao estado nominal, o torque requerido precisa aumentar e a temperatura não se encontrar no seu valor máximo.

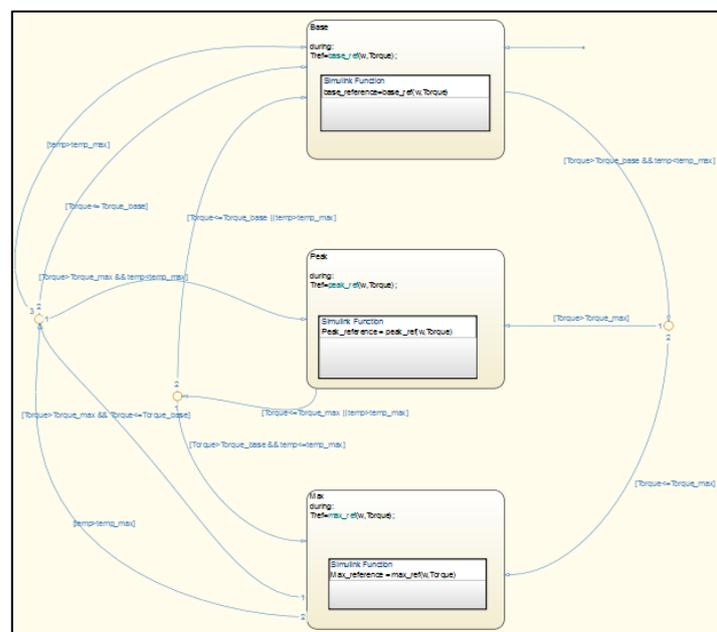


Figura 4.3 - Módulo Stateflow de controle do motor.

⁶Stateflow permite trabalhar com mais variáveis de controle e mais de uma característica definindo o estado, portanto faz-se necessário a existência de blocos trabalhando em paralelo (*Parallel Mode*) ou em modo exclusivo (*Exclusive Mode*).

5. RESULTADOS

5.1. Mapeamento Motor

A partir dos testes, obteve-se a sequência dos pontos representados na Figura 5.1 a no plano torque x rotação. Nos testes, em 250 RPM e 300 RPM ocorreu interrupção dos mesmos por saturação no alimentador em 50 A; porém, tais limitações são contornadas através de interpolação e introdução manual de pontos representativos como (0,0), (0,220) e (660,0) com eficiência nula. O mapa de eficiência pode ser visto à direita, na Figura 5.2.

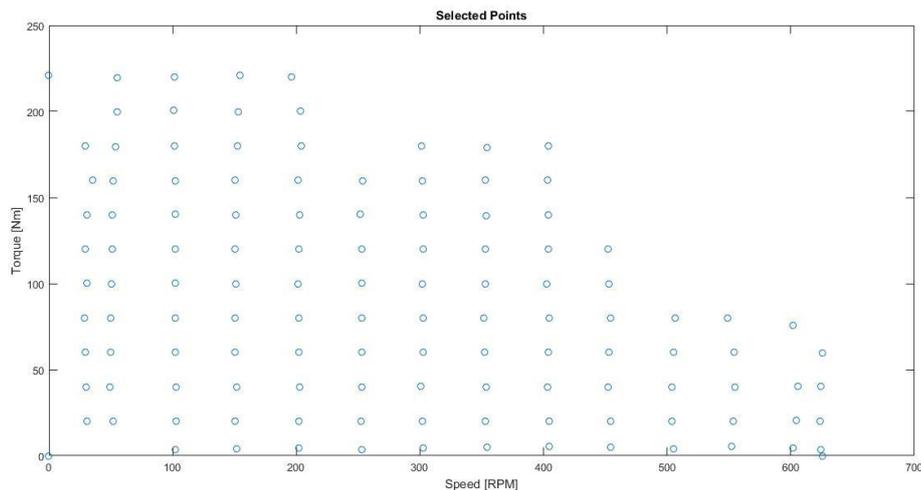


Figura 5.1 - Pontos obtidos nos testes.

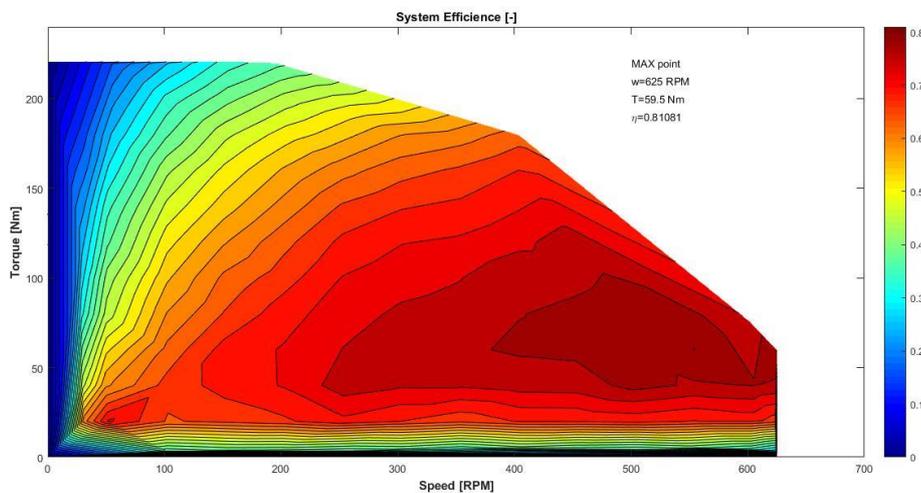


Figura 5.2 - Mapa de eficiência.

Por inspeção ao mapa de eficiência e consideradas as interrupções antes do limite do motor no intervalo citado, foram estimados os valores para as curvas características. Resultados por motor na Tabela 5.1 e curva de torque sem saturação na Figura 5.3.

Tabela 5.1 - Parâmetros Característicos resultantes dos testes no motor.

| | | Base | Nominal | Intermitente | Máxima |
|---|--------|-------|---------|--------------|--------|
| Velocidade | [RPM] | 610 | 520 | 390 | 320 |
| Torque | [Nm] | 50 | 100 | 180 | 220 |
| Potência Mecânica | [kW] | 3,15 | 5,25 | 7,35 | 7,5 |
| Corrente ($i_q/\sqrt{2}$) | [Arms] | 21 | 39 | 74 | 96 |
| Constante de Torque | [Nm/A] | 1,688 | 1,836 | 1,733 | 1,627 |

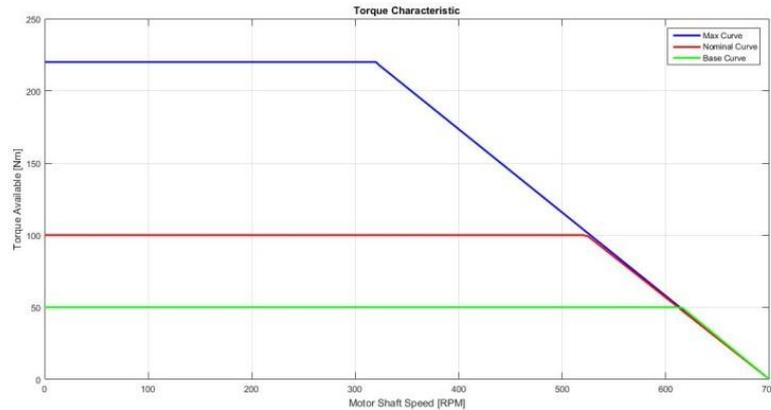


Figura 5.3 - Curvas de torque do motor.

5.2. Obtenção dos Parâmetros Térmicos

Os resultados diretos dos testes térmicos são ilustrados na primeira coluna da Tabela 5.2. Já as variáveis termodinâmicas específicas são mostradas junto a valores típicos para as mesmas na 3ª e 4ª coluna da tabela respectivamente. Para o calor específico foi encontrado um valor intermediário entre os valores para o cobre (385 J/kg.K) e o ferro (450 J/kg.K). A área de troca térmica foi considerada a lateral dos dois lados do motor e a massa foi estimada conhecendo-se os volumes de material nas bobinas e armadura do estator. Alguns gráficos gerados podem ser vistos no ANEXO II.

Tabela 5.2 - Parâmetros térmicos equivalentes do motor.

| | Variável | | Valores Encontrados | Valores Típicos |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|---------------------|-----------------|
| $C_m = 4230 \text{ J/K}$ | m | [kg] | 10,5 | - |
| | c_p | [J/kg.K] | 390 | 385 - 450 |
| $R_{amb} = 0,055 \text{ W/K}$ | h_{amb} | [W/(m ² .K)] | 150 | 40 - 250 |
| | A_{amb} | [m ²] | 0,1214 | - |

5.3. Desempenho Preliminar nos Testes

O simulador recebe como entrada todos os dados referentes ao motor, bateria, AKU, constantes do veículo e da dinâmica longitudinal. Tais dados estão disponíveis nas tabelas do ANEXO I e os perfis de entrada para velocidade referência no APÊNDICE A. Foram simulados os 4 ciclos para configuração de 4 motores ou de 2 motores posteriores. A seguir, dois dos resultados são apresentados.

5.3.1. Teste WLTC para 2 Motores

Neste teste foi usado o Ciclo WLTC – 3, para alto desempenho em tração. Nota-se pela Figura 5.4 que o veículo não é capaz de seguir o ciclo nas regiões de maior velocidade (1200 s - 1800 s). Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 5.3. Na Figura 5.5 são encontrados os gráficos de energia consumida e na Figura 5.6 as temperaturas os motores posteriores.

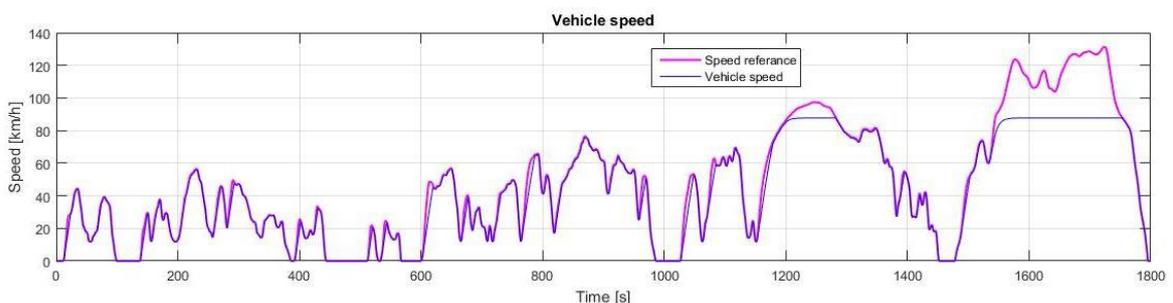


Figura 5.4 - Teste WLTC para 2MiW. Curva de confronto entre o sinal de velocidade e a resposta do veículo.

Tabela 5.3 - Parâmetros Característicos do Teste WLTC para 2MiW.

| Energia Sem Freio Regenerativo [Wh] | Energia com Freio Regenerativo [Wh] | Distância Percorrida [km] | Máxima Temperatura [°C] |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 2688 | 2512 | 20,97 | 115,1 |

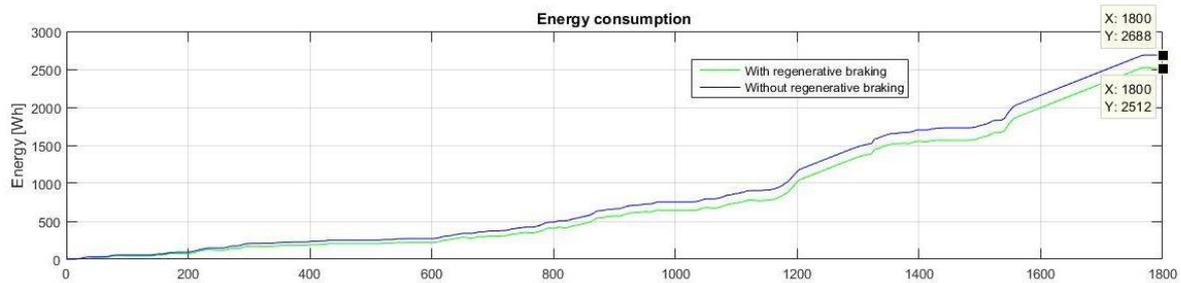


Figura 5.5 - Teste WLTC para 2MiW. Gráfico de energia consumida com e sem o uso de freio regenerativo.

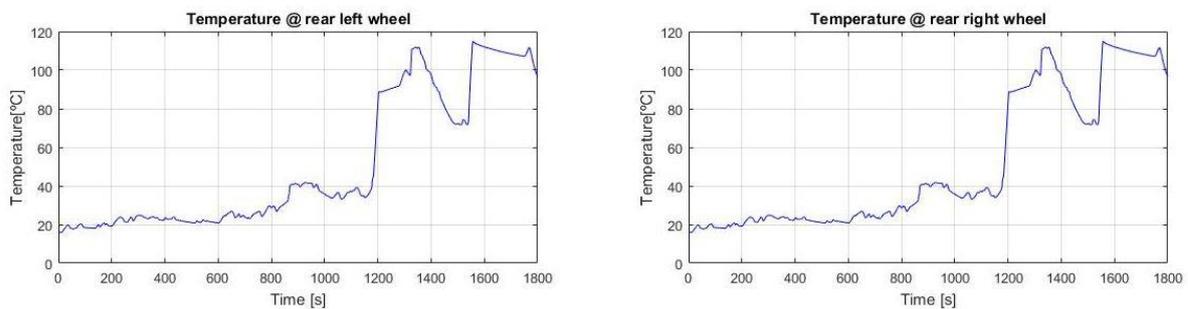


Figura 5.6 - Teste WLTC para 2MiW. Gráfico da temperatura para os 2 motores posteriores.

O consumo é a variável de maior importância nesta análise, representando os parâmetros de autonomia. Pode-se observar pelo gráfico uma diferença de mais de 150 Wh de energia consumida para o ciclo com e sem a presença de frenagem regenerativa; esta diferença de energia resulta em uma diferença de 10 minutos de autonomia em funcionamento contínuo, passando de 2:21 h para 2:12 h na ausência do sistema regenerativo. Devido às limitações de velocidade do motor, chegando a um máximo de 88 km/h no ciclo, haverá um aumento de temperatura associado, porém não chegando ao máximo. Outro fator decorrente da limitação na máxima velocidade é a diferença entre as distâncias percorridas; à medida que para o Ciclo WLTC – 3 a distância equivalente total a percorrer seria de 23,26 km, o veículo, de acordo com o gráfico, percorre somente 20,97 km.

5.3.2. Teste em Declividade para 4 Motores

O teste com inclinação inicia-se com um confronto entre a curva de torque do motor e a curva de torque resistente, cujo máximo foi achado em 36% e está representado na Figura 5.7.

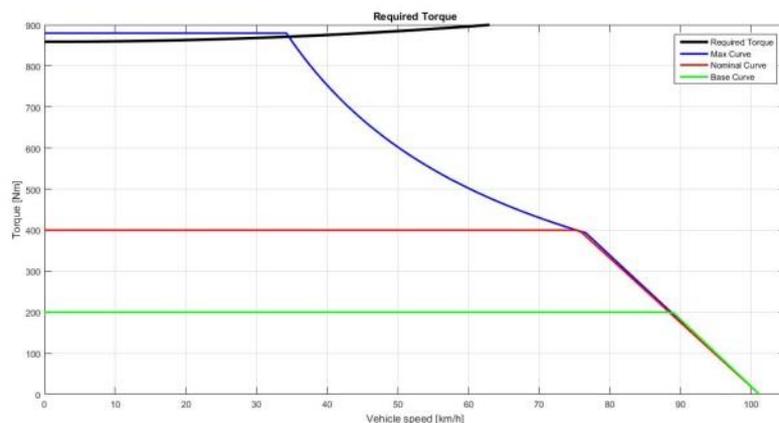


Figura 5.7 - Confronto do torque resistente para 36% de inclinação com a curva dos 4 MiW somados.

Poder-se-ia esperar um ponto de trabalho que valesse aproximadamente 35 km/h, porém não é garantida a estabilidade do ponto de trabalho após o controle térmico. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 5.4. Na Figura 5.8 são mostrados os gráficos de velocidade e distância percorrida e na Figura 5.9 a temperatura de um motor, igual para todos.

Tabela 5.4 - Parâmetros Característicos do Teste de Declividade em 36% para 4MiW.

| Declividade [%] | Velocidade de Operação [km/h] | Tempo para 400 m [s] | Tempo para Temperatura Máxima [s] |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 36 | 5,71 | 98,71 | 100 |

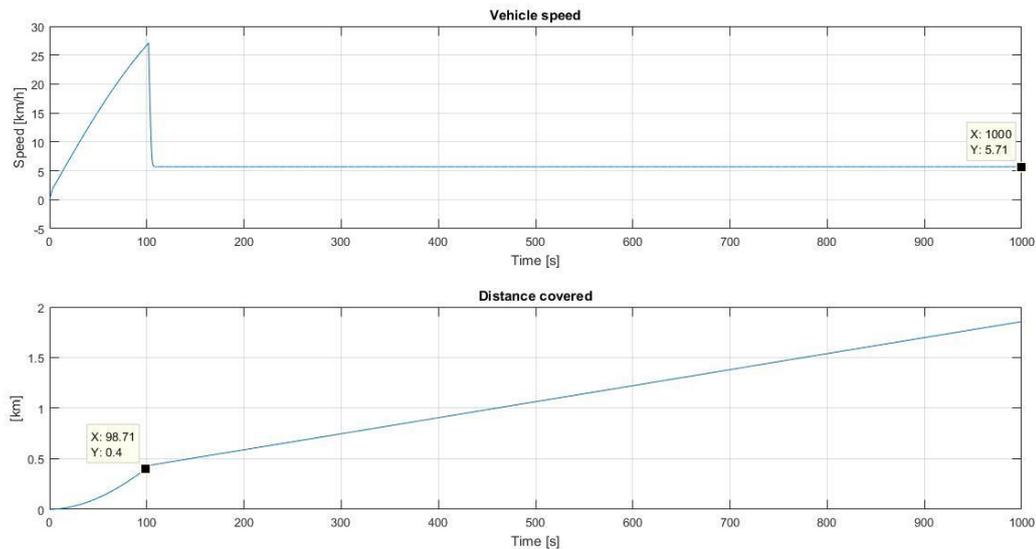


Figura 5.8 - Teste de Declividade a 36% para 4MiW. Velocidade e distância percorrida.

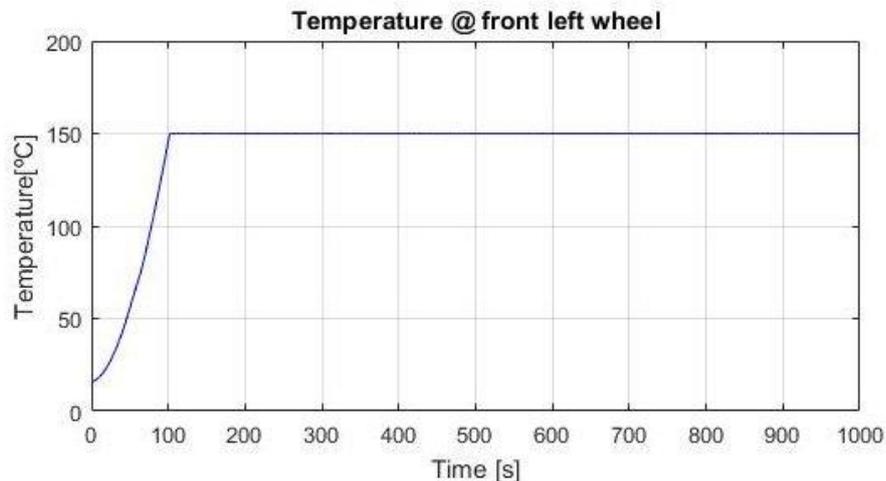


Figura 5.9 - Teste de Declividade a 36% para 4MiW. Temperatura do motor anterior esquerdo.

Observa-se o efeito do controle térmico na Figura 5.9. Em 100 segundos, ponto em que o motor alcança a temperatura limite de 150 °C, a velocidade ainda não se encontrava no máximo da intersecção com a curva máxima (Figura 5.7), ou seja, o motor superaquece antes. O carro alcança a máxima velocidade do ciclo em 100 segundos, aproximadamente 27 km/h (Figura 5.8), e passa a decrescer, estabilizando-se em um ponto de operação de 5,71 km/h, no qual consegue vencer a inclinação sem superar a máxima temperatura do motor.

6. CONCLUSÕES

Da análise de todas as simulações realizadas, conclui-se que parte das decisões sobre a configuração do veículo dependerão, naturalmente, do meio e aplicação na qual poderá inserir-se o mesmo. Devido à ausência de caixa de câmbio, sabe-se que não existe possibilidade de balanceamento da potência disponível entre torque e velocidade; portanto, seja a velocidade máxima seja o torque limite, são equivalentes àqueles que o motor é capaz de gerar. Conseqüentemente, a velocidade máxima alcançada para o veículo com 2MiW praticamente não se altera ao passar para a configuração 4MiW; o que varia de fato em decorrência do fato de o torque disponível, por outro lado, ser a soma dos torques dos motores individuais, é o tempo que leva o veículo para alcançar essa zona de operação. Esses efeitos podem, entretanto, ser também positivos em termos de energia e consumo: considerando-se, por exemplo, um caso onde o veículo estaria circulando em alta velocidade dentro da cidade, pode-se esperar baixos níveis de potência em funcionamento contínuo.

Em termos gerais, o veículo Actua não é capaz de superar os 93 km/h e, portanto, não poderá inserir-se em situação que exijam tal capacidade. Em termos de torque, por outro lado, pode-se esperar um desempenho bastante aceitável, sendo capaz de vencer até 20° de inclinação quando em configuração 4MiW; para um veículo popular e leve, como seria o propósito do mesmo, esses valores se mostram suficientes. Quanto ao consumo, pode-se assumir um comportamento igualmente suficiente e aceitável para uma aplicação em veículos leves para uso popular. Garante-se períodos de 6 a 9 horas em ciclos urbanos. A diferença fundamental encontra-se, em realidade, na autonomia energética em ambas as configurações: para percorrer o mesmo percurso a configuração 4MiW consome 44% mais energia que aquele com 2MiW em Ciclo WLTC, porém somente 15% a mais para Ciclo UDC.

Obviamente a bateria é projetada em base a aplicação, assim como os motores, e é possível realizar-se alterações de forma a balancear a capacidade energética total desta entre corrente e tensão. No caso de se querer operar em maiores velocidades, seria necessário um aumento da tensão nominal dessa; já para um aumento de torque seria necessário diminuir a tensão para um conseqüente aumento na corrente nominal. É interessante notar que a tensão nominal do motor (250 V) é inferior àquela da bateria (296 V) sendo, conseqüentemente, aumentado o limite de velocidade para o primeiro.

A tecnologia de MiW, porém, mostrou-se potencialmente vantajosa para diversas outras situações nas quais trabalhasse paralelamente a outros mecanismos de transmissão ou em situações em que trabalhasse em paralelo a outros motores, como em arquitetura híbrida. Exemplo de aplicação bastante recente seria a aplicação ao histórico modelo de automóvel Lancia 037, campeão de rally por diversos anos. Projeto esse realizado pela Politecnico di Torino, visa a implantação da tecnologia dos motores *In-Wheel* em paralelo a um motor de combustão interna, garantindo assim o uso em altas velocidade, além de alto torque em partida e em funcionamento contínuo.

O objetivo principal deste estudo, definir curvas e parâmetros representativos do desempenho para as duas configurações, foi obtido com sucesso e será utilizado como banco de dados pela Actua na futura construção do *Risciò*. Interessante ainda seria a introdução de outros mecanismos de controle como aquele capaz de reduzir os danos causados pela oscilação de corrente gerada nos controles tradicionais, introdução de tecnologia mais precisa na coleta de informações em testes reais além de outras lógicas de controle como aquela que leve em considerações efeitos de derrapagem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

- Actuagroup. <http://www.actuagroup.eu/modules/>, acessado em 05/04/2017.
- Becchia, S. *Monitoring, data logging and telemetry tools for automotive tuning and testing*. Torino: Master Degree's Thesis, 2015.
- Clark, S., & Dodge, R. *A handbook for the rolling resistance of pneumatic tires*, 1979.
- Fasil, M., Plesner, D., Walther, J., & Mijatovic, N. Numerical and Experimental Investigation of Heat Flow in Permanent Magnet Brushless DC Hub Motor. *SAE Int. J. Alt. Power*, 2015.
- Ferraresi, C., Raparelli, T. *Meccanica Applicata alle Macchine*. Torino: CLUT, 2007.
- Guiggiani, M. *Dinamica del Veicolo*. Torino: Città Studi Edizioni, 2007.
- Hernandez, A. *Model Based Design of "One Pedal Drive" Control strategy for EVs*. Torino: Tesi di Laurea Magistrale, 2014.
- Incropera, F., Bergman, T., Bergman, T., & Lavine, A. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa* (6ª Edição ed.). LTC Editora, 2007.
- Mathworks. <https://www.mathworks.com/help/matlab/>, acessado em 15/05/2017 e 02/06/2017.
- Matos Dias, M., Schaeffer, L., Matos Dias, A., L. César, J., & K. Verney, J. C. *Motores Síncronos Trifásicos com Imãs Permanentes*, 2005.
- Mester Furtado, R. *Studio delle Prestazioni di um Veicolo Elettrico Leggero*. Torino: Tesi di Laurea Magistrale, 2016
- Mosca, P. *Implementation of the Driving Mode for an Electric Vehicle in Presence of Regenerative Braking*. Torino: Master Degree's Thesis, 2014.
- Sanchez, F., Bandivadekar, A., & German, J. *Estimated cost of emission reduction technologies for LDVs*. Wasington DC: International Council on Clean Transportation (ICCT), 2012.
- Sonsin, A. *Performance Evaluator KIT - Sviluppo e Validazione Modello di Dinamica Longitudinale per Veicoli Elettrici*. Torino: Tesi di Laurea Magistrale, 2015.

ANEXO I

Dados e ilustrações dos componentes do veículo:

Tabela I.1 - Dados construtivos do Motor.

| | | |
|------------------|------|------|
| Active Length | [mm] | 42 |
| Rotor Diameter | [mm] | 368 |
| Stator Diameter | [mm] | 278 |
| Case Length | [mm] | 112 |
| Case Diameter | [mm] | 394 |
| IP - Protection | [-] | IP68 |
| Number of Poles | [-] | 14 |
| Insulation Class | [-] | F |
| Max Temperature | [°C] | 150 |

Tabela I.4 - Dados do ESS.

| Energy Storage System | | |
|-----------------------------------|-------|--------------------------|
| Nominal Voltage | [V] | 296 |
| Nominal Energy | [kWh] | 11,84 |
| Nominal Capacity | [Ah] | 40 |
| Max Charge Current | [A] | 40 |
| Continuous Charge Current | [A] | 20 |
| Max Discharge Current | [A] | 120 |
| Continuous Discharge Current | [A] | 80 |
| Total Weight (structure+ modules) | [kg] | 113 (30,60+4x20x1,03) |

Tabela I.2 - Dados do AKU.

| Actuation Kontrol Unit LEVa | | |
|-----------------------------|--------|----------|
| Nominal Voltage | [V] | 350 |
| Nominal Current | [Arms] | 77,7817 |
| Max Current | [Arms] | 106,0660 |
| Weigth | [kg] | 12 |

Tabela I.3 - Dados úteis à dinâmica longitudinal.

| Tyre Size | Type | - | 135/80R17 |
|--------------------|-------|-----------------------|-----------|
| | J | [kg. m ²] | 0,25 |
| | r | [m ²] | 0,3239 |
| Frontal Area | A_F | [m ²] | 1,7 |
| Drag Coefficient | C_x | - | 0,4 |
| Rolling Resistance | f_0 | - | 0,0112 |
| Static Friction | f_2 | 1/m ² | 0,000001 |

Tabela I.5 - Composição da massa do veículo.

| Parte | 2MiW | 4MiW |
|--------------|-------------|-------------|
| ESS | 113+2 (box) | 113+2 (box) |
| AKU | 10 | 2x10 |
| MiW | 2x22 | 4x22 |
| Curb Weight | 472 | 472 |
| Passenger | 75 | 75 |
| Total Weight | 718 | 774 |

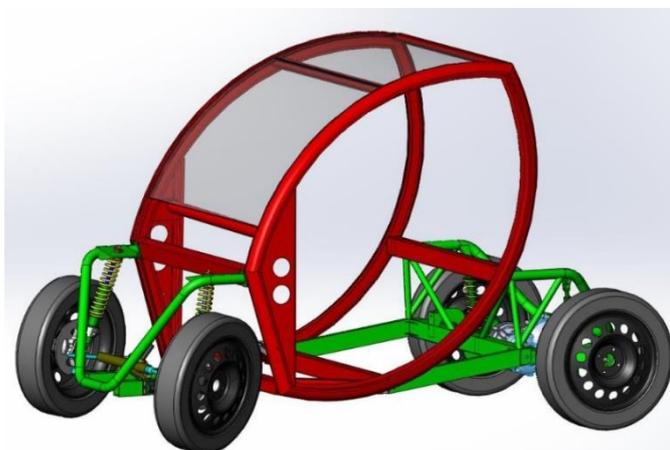


Figura I.1 - Modelo CAD do Spadino, (veículo em que o projeto Risciò foi baseado).

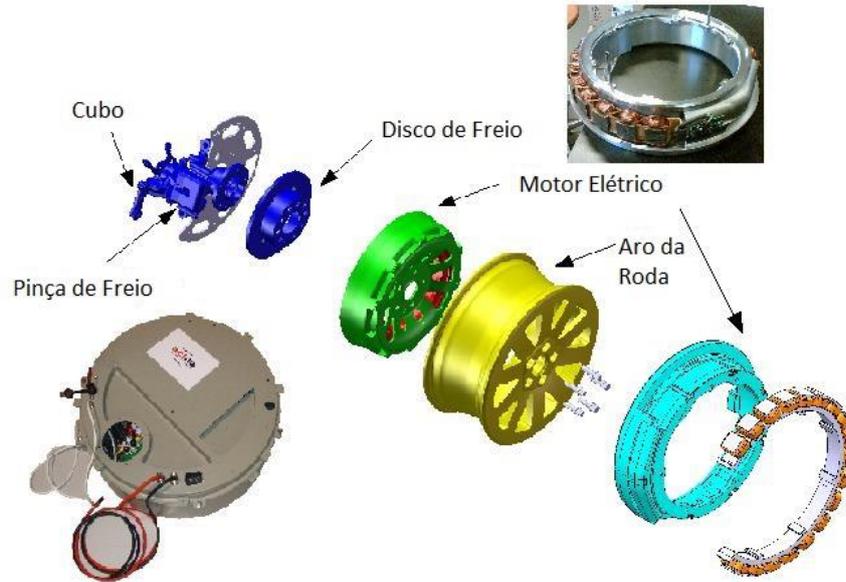


Figura I.2 - Motor *In-Wheel* Actua.

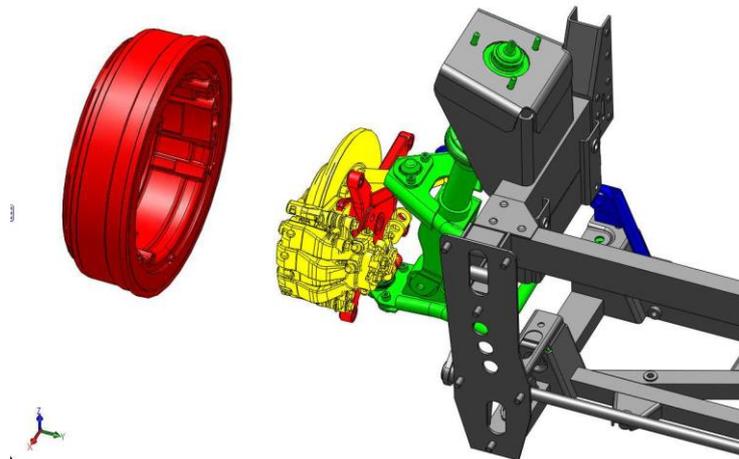


Figura I.3 - Acoplamento do motor *In-Wheel* no eixo do veículo.

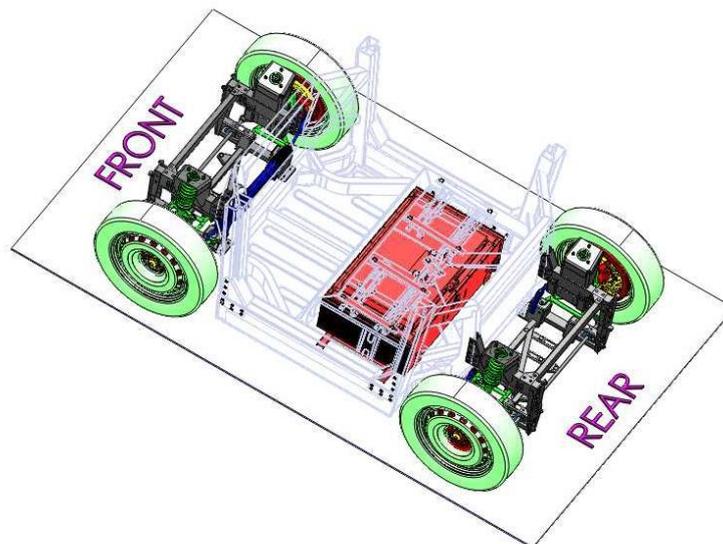


Figura I.4 - Configuração em vista superior da *powertrain* para 4 motores..

ANEXO II

Respostas dos testes térmicos para alguns valores de rotação:

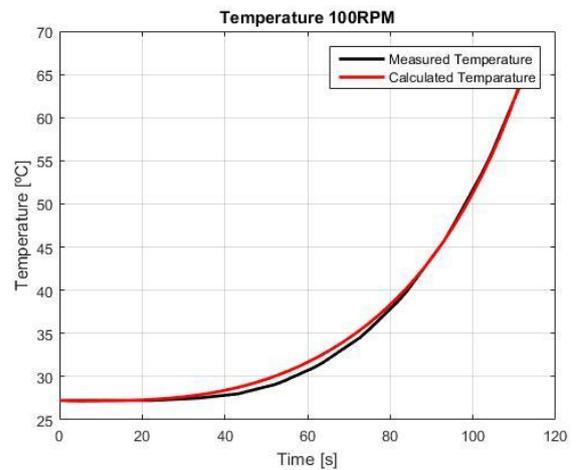
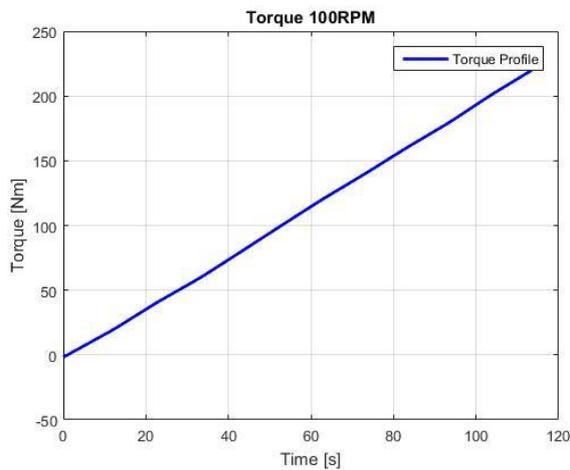


Tabela II.1 - Teste a rotação de 100 RPM. Perfil de torque imposto à esquerda e confronto entre as temperaturas experimental (preto) e simulada (vermelho) à direita.

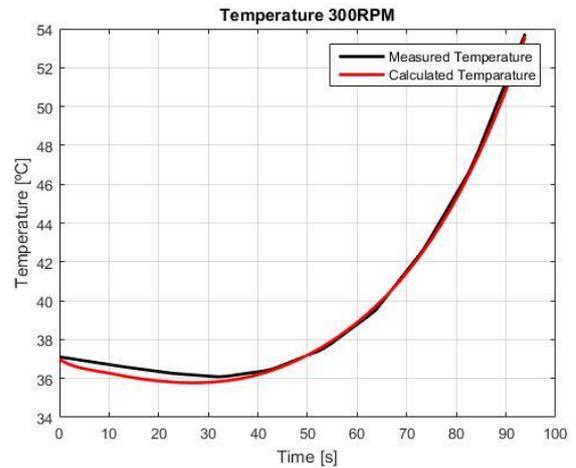
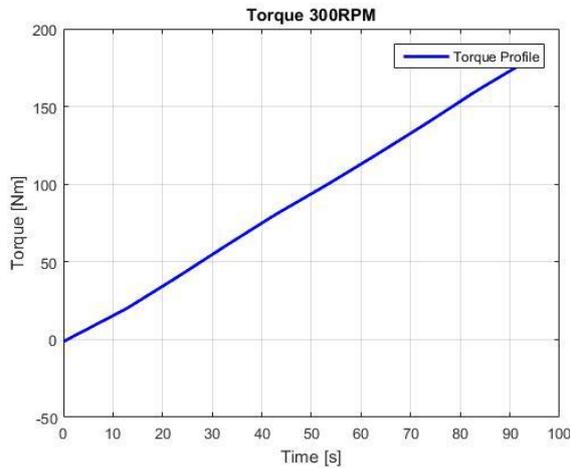


Tabela II.2 - Teste a rotação de 300 RPM. Perfil de torque imposto à esquerda e confronto entre as temperaturas experimental (preto) e simulada (vermelho) à direita.

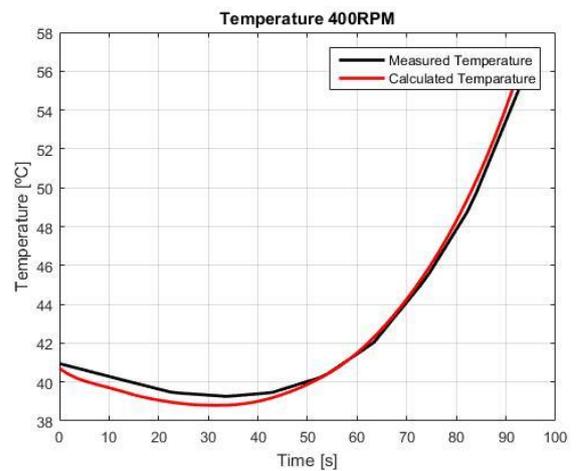
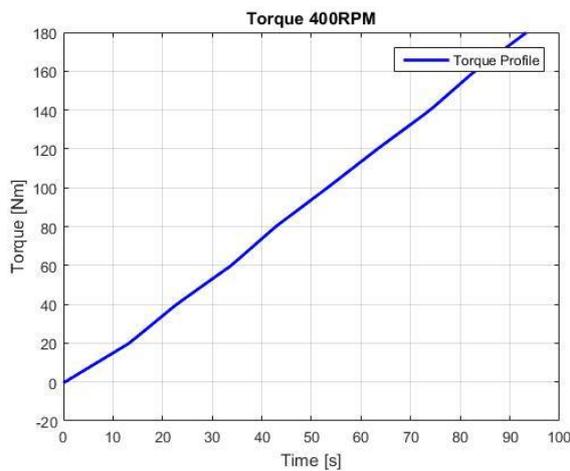


Tabela II.3 - Teste a rotação de 400 RPM. Perfil de torque imposto à esquerda e confronto entre as temperaturas experimental (preto) e simulada (vermelho) à direita.

APÊNDICE A

Ao ser testado, o motor apresenta um comportamento compatível com a tensão na entrada da fonte utilizada nos testes e que definem a tensão nominal de comportamento do mesmo. Não é dito porém que a bateria projetada funcione naquela tensão; de fato uma alteração na tensão da bateria altera a curva de torque de maneira proporcional no eixo da velocidade. Tal efeito pode ser controlado em projeto (equação A.1) e pode ser aproveitado de maneira positiva pelo projetista.

$$\omega_{sat} = \omega \frac{V_{bat}}{V_{mot}} \quad (A.1)$$

Efeito parecido encontra-se na passagem da corrente pelo inversor. Se a corrente gerada pela bateria é superior àquela máxima suportada pelo AKU, este satura invariavelmente ao seu valor limite de trabalho para conversão. Da relação de proporcionalidade entre torque motor e corrente, a saturação acontece no eixo das ordenadas de acordo com a equação A.2. Tal efeito depende dos limites de frequência do inversor.

$$T_{sat-inv} = \begin{cases} T_{mot} \frac{I_{inv}}{I_{mot}}, & \text{se } I_{inv} < I_{mot} \\ T_{mot}, & \text{se } I_{inv} \geq I_{mot} \end{cases} \quad (A.2)$$

Assim, através das relações de potência na transmissão da *powertrain* pode-se afirmar que a potência mecânica gerada pelo motor não pode ser superior à potência elétrica na saída da bateria, pelo princípio básico de conservação de energia. Existe, portanto, uma parcela de saturação da potência do motor causada pela potência máxima da bateria caso essa seja diferente da potência do alimentador utilizado na caracterização do motor. Tal efeito gera alterações no torque disponível pelo motor de acordo com a equação A.3 afetando os dois eixos da curva de torque.

$$T_{disp} = \begin{cases} \frac{I_{bat} V_{bat} \eta_{inv} \eta_m}{\omega_{sat}}, & T_{sat-inv} > \frac{I_{bat} V_{bat} \eta_{inv} \eta_m}{\omega_{sat}} \\ T_{sat-inv}, & T_{sat-inv} \leq \frac{I_{bat} V_{bat} \eta_{inv} \eta_m}{\omega_{sat}} \end{cases} \quad (A.3)$$

O resultado das saturações aplicadas na ordem em que são apresentados pode ser visto nos eixos de torque x velocidade e potência x velocidade na Figura A.1a e b, respectivamente.

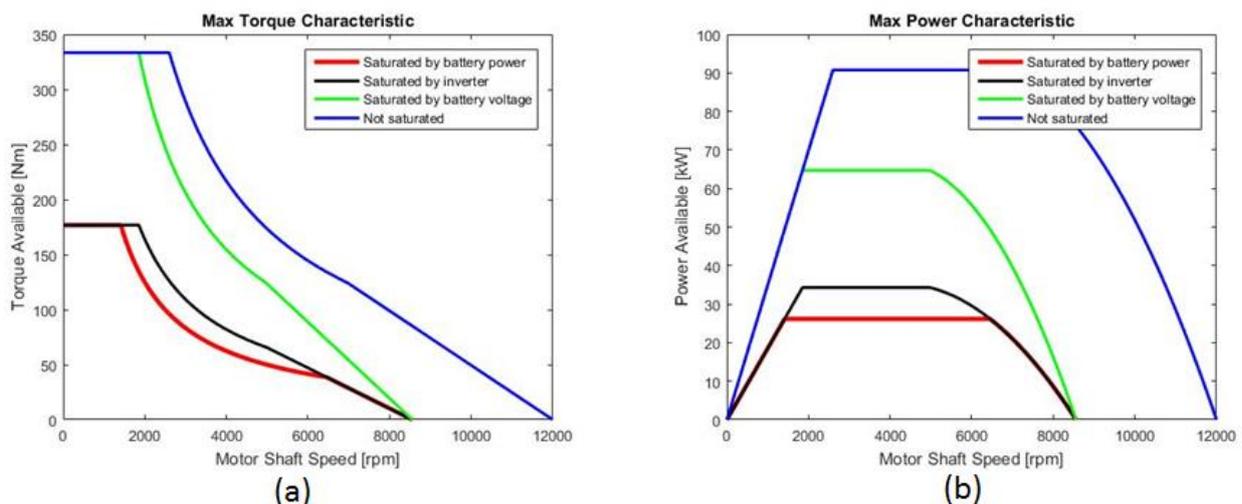


Figura A.1 - Efeito das saturações no acoplamento de um motor IPM - M5 a uma bateria a inversor de menores capacidades. Curva de torque em (a) e curva de potência em (b).

A equação A.1 descreve a passagem da curva não saturada (azul) àquela saturada pela bateria (verde); a equação A.2 representa a passagem da curva saturada pela bateria àquela saturada pela bateria e pelo inversor (preto); finalmente, a curva é saturada pela potência máxima da bateria, resultando na curva efetiva do motor (vermelho).

APÊNDICE B

Detalhamento dos perfis de entrada nas simulações e os respectivos parâmetros de interesse em cada ciclo:

- **Velocidade Máxima:** Ciclo realizado com o objetivo de verificar tempos de resposta e máximo desempenho do motor. Os parâmetros de interesse são: a máxima velocidade alcançada, o tempo para se alcançar os 30 km/h, o tempo para percorrer os primeiros 400 m e, enfim, a temperatura do motor após 200 segundos da partida. Para a simulação deste comportamento de máxima velocidade o sinal de entrada utilizado (*Input*) é um sinal de referência constante de 200 km/h .
- **Máxima Pendência:** Ciclo realizado com o mesmo sinal na entrada que o ciclo de máxima velocidade mas com uma quantidade percentual de elevação no terreno. Os parâmetros analisados são a máxima elevação vencida, a velocidade alcançada e o tempo para atingir a máxima temperatura suportada pelo motor (150 °C) alcançada nos 1000 segundos de simulação.
- **Ciclo UDC:** Também chamado de Ciclo Urbano ou Ciclo ECE-15, foi criado nos anos 70 para medir o consumo de combustível nos motores a combustão interna. É usado nesta aplicação com o mesmo objetivo, porém, medindo o consumo elétrico. Os parâmetros analisados são: a distância percorrida em 200 segundos de simulação, o consumo de energia com e sem a presença de frenagem regenerativa e, finalmente, a máxima temperatura alcançada pelo motor. O perfil do Ciclo UDC é apresentado abaixo.

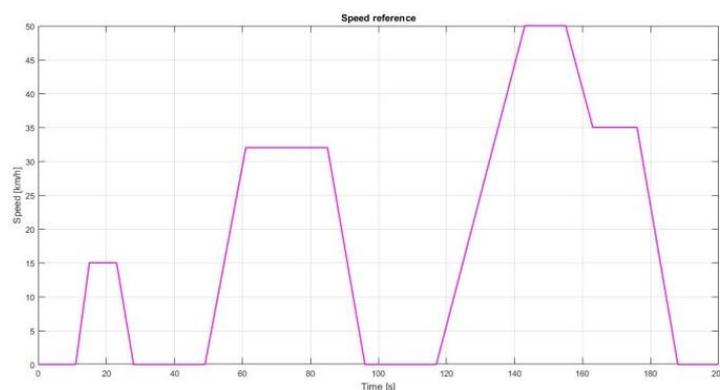


Figura B.1 - Ciclo ECE.

- **Ciclo WLTC:** Foi criado mais recentemente que o Ciclo UDC para medida de consumo, contudo, direcionado à veículos leves. Os parâmetros analisados são os mesmos do ciclo UDC com a diferença que a duração total do ciclo é de 1800 segundos. O sinal do Ciclo WLTC é apresentado abaixo.

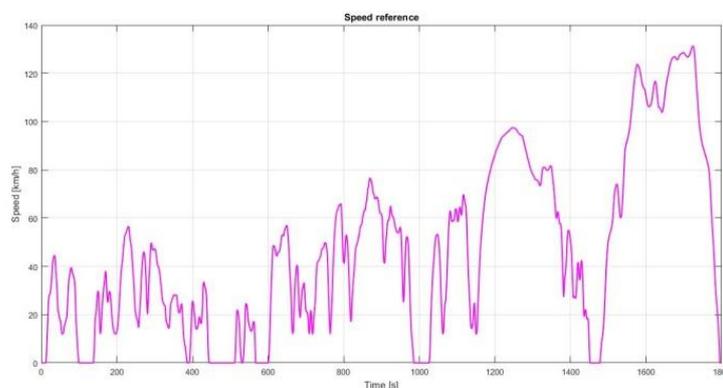


Figura B.2 - Ciclo WLTC.