

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

GUILHERMO GARCIA BURNETT

**Estudo comparativo para motor síncrono de ímãs permanentes em tração
elétrica ferroviária**

São Paulo
2023

GUILHERMO GARCIA BURNETT

**Estudo comparativo para motor síncrono de ímãs permanentes em tração
elétrica ferroviária**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências (Engenharia
Elétrica).

Área de concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Burnett, Guilherme

Estudo comparativo para motor síncrono de ímãs permanentes em tração elétrica ferroviária / G. Burnett – versão corr. -- São Paulo, 2023.
104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Máquinas 2.Tração Elétrica 3.Ferrovias I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Nome: BURNETT, Guilherme Garcia

Título: Estudo comparativo para motor síncrono de ímãs permanentes em tração elétrica ferroviária

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências (Engenharia Elétrica).

Aprovado em: 02 de agosto de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Silvio Ikuyo Nabeta
Instituição: Universidade de São Paulo
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Júlio Carlos Teixeira
Instituição: UFABC
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Pedro Pereira de Paula
Instituição: IPEN
Julgamento: Aprovado

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sandra Regina Garcia Burnett
e Fernando José Vieira Burnett

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que acreditaram, ajudaram e contribuíram desde o início para a realização deste trabalho: o professor Dr. Silvio Ikuyo Nabeta, o professor Dr. Ivan Eduardo Chabu e o Dr. Cassiano Lobo Pires, pela orientação e apoio, minha família pelo incentivo e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade.

RESUMO

Os desenvolvimentos científicos e tecnológicos ocorridos nos últimos anos impreterivelmente guardam um compromisso justificado com a elevação dos índices de eficiência energética, em favorecimento da preservação ambiental e de recursos naturais em escala global. Ainda que formas cada vez menos poluentes para o uso da energia cresçam exponencialmente em utilização, os desafios posteriores se situarão adicionalmente na pesquisa por otimização das tecnologias existentes. Neste contexto, este trabalho realiza no domínio da aplicação em transporte urbano ferroviário um estudo comparativo para a utilização do motor síncrono de ímãs permanentes como acionamento de tração elétrica, perante outros modelos já estabelecidos e consolidados no mercado, principalmente em termos de eficiência energética. Este estudo se fundamenta inicialmente na revisão teórica baseada na literatura para sistematização de características de engenharia intrínsecas do acionamento em questão, para que em sequência com a conceituação das propriedades de dinâmica do movimento se obtenha por meio de simulações os dados necessários para a elaboração da comparação por meio da investigação de aplicações e estudo de caso.

Palavras-chave: Máquinas. Tração Elétrica. Ferrovias.

ABSTRACT

The scientific and technological developments that have occurred in the last few years unavoidably keep a fundamental commitment to increase energy efficiency rates, in favor of environmental preservation and natural resources on a global scale. Although increasingly less polluting forms of energy use are growing exponentially in use, further challenges lie in the search for optimization of existing technologies. In this context, this paper conducts a comparative study for the use of permanent magnet synchronous motors as electric traction drives, in the field of urban rail transportation, in comparison with other models already established and consolidated in the market, especially in terms of energy efficiency. This study is based initially on a literature-based theoretical review to systematize the intrinsic engineering characteristics of the traction drive in question, so that in sequence with the conceptualization of the properties of motion dynamics the necessary data can be obtained through simulation for the preparation of the comparison through the investigation of applications and case study.

Keywords: Machines. Electric Traction. Railways.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|---------------|---|----|
| Figura 3.1 - | Características de segundo quadrante para ímãs..... | 29 |
| Figura 3.2 - | Estruturas para IPMSM e SPMSM..... | 30 |
| Figura 3.3 - | Topologias para IPMSM..... | 31 |
| Figura 3.4 - | Distribuições de densidade de fluxo magnético em vazio para IPMSM's de topologias "u" e "v"..... | 32 |
| Figura 3.5 - | Diagrama fasorial e circuito equivalente por fase simplificados de estator de motor síncrono de ímãs permanentes..... | 33 |
| Figura 3.6 - | Diagrama vetorial de PMSM..... | 34 |
| Figura 3.7 - | Controle FOC para PMSM..... | 35 |
| Figura 3.8 - | Diagrama de blocos para controle DTC de PMSM, e respectivo diagrama espacial vetorial para inversor de vetores de tensão... | 36 |
| Figura 3.9 - | Trajatórias do vetor corrente de estator sob condições de MTPA e MTPV, com círculo de limite de corrente e elipses de limite de tensão..... | 38 |
| Figura 3.10 - | Distribuição de temperatura em PMSM sob condição de refrigeração natural..... | 40 |
| Figura 3.11 - | Sensor de termoresistência acoplado a ímãs de rotor de PMSM para medição de temperatura..... | 41 |
| Figura 3.12 - | Esquema de sistema de acionamento para PMSM de configuração duplamente alimentada | 42 |
| Figura 3.13 - | Vista explodida e estrutura interna de motor CC elementar..... | 43 |
| Figura 3.14 - | Circuito equivalente simplificado de motor CC..... | 44 |
| Figura 3.15 - | Características de velocidade x conjugado de motores CC..... | 45 |
| Figura 3.16 - | Eixos dos enrolamentos de estator trifásico e rotor tipo gaiola de esquilo de motor de indução..... | 46 |
| Figura 3.17 - | Circuito equivalente monofásico de um motor de indução polifásico..... | 47 |
| Figura 3.18 - | Curva característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução, mostrando as faixas estendidas de operação (região de frenagem e região como gerador) | 48 |
| Figura 3.19 - | Interior de motor síncrono de ímãs permanentes ferroviário após 361.000 quilômetros em serviço no metrô de Tóquio..... | 51 |
| Figura 3.20 - | Curva de esforço motor para veículos ferroviários..... | 54 |
| Figura 3.21 - | Truque de um veículo ferroviário..... | 55 |
| Figura 3.22 - | Forças atuantes em roda de trem..... | 56 |
| Figura 3.23 - | Comportamento de variáveis durante ciclo de tração..... | 58 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Figura 3.24 - | Características de frenagem mecânica e dinâmica para trem- unidade elétrico..... | 59 |
| Figura 3.25 - | Visão geral da simulação de sistema de tração elétrica ferroviária..... | 60 |
| Figura 4.1 - | Composição Série 01 da Linha Ginza do Metrô de Tóquio e respectivo PMSM..... | 61 |
| Figura 4.2 - | Conceito de truque de bonde baseado em acionamentos diretos com PMSM | 63 |
| Figura 4.3 - | Comparação experimental entre consumo de energia de motores de indução e síncronos de ímãs permanentes aplicados em trem de alta velocidade..... | 64 |
| Figura 5.1 - | Abrangência geográfica dos serviços e estações de parada do Trem Intercidades..... | 65 |
| Figura 5.2 - | Locomotiva Bombardier ALP-46 e carros MultiLevel Coach do sistema ferroviário de Nova Jersey..... | 66 |
| Figura 5.3 - | Curva da fórmula de Davis para modelo de locomotiva do estudo de caso considerando uso de motores de indução | 70 |
| Figura 5.4 - | Curva da fórmula de Davis para modelo de carro de passageiros do estudo de caso | 71 |
| Figura 5.5 - | Curva da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução | 71 |
| Figura 5.6 - | Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução | 74 |
| Figura 5.7 - | Curva de esforço de freagem em função da velocidade para a composição do estudo de caso..... | 75 |
| Figura 5.8 - | Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's | 77 |
| Figura 5.9 - | Curvas de eficiência em função da velocidade para motor de indução e PMSM considerados no estudo de caso..... | 78 |
| Figura 5.10 - | Exemplo de mapa de eficiência para motor de tração..... | 78 |
| Figura 6.1 - | Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução..... | 79 |
| Figura 6.2 - | Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução..... | 80 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Figura 6.3 - | Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução..... | 80 |
| Figura 6.4 - | Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução..... | 81 |
| Figura 6.5 - | Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução..... | 81 |
| Figura 6.6 - | Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas Barra – Funda com motores de indução..... | 82 |
| Figura 6.7 - | Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução..... | 82 |
| Figura 6.8 - | Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução..... | 83 |
| Figura 6.9 - | Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's..... | 83 |
| Figura 6.10 - | Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's..... | 84 |
| Figura 6.11 - | Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com PMSM's..... | 84 |
| Figura 6.12 - | Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's..... | 85 |
| Figura 6.13 - | Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's..... | 85 |
| Figura 6.14 - | Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's..... | 86 |
| Figura 6.15 - | Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's..... | 86 |
| Figura 6.16 - | Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's..... | 87 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabela 3.1 - | Comparação entre estratégias DTC e FOC para controle de PMSM..... | 36 |
| Tabela 3.2 - | Temperaturas limítrofes estabelecidas para materiais magnéticos de PMSM..... | 41 |
| Tabela 3.3 - | Coeficientes A, B e C da fórmula de Davis..... | 57 |
| Tabela 4.1 - | Especificações de PMSM do Metrô de Tóquio..... | 62 |
| Tabela 5.1 - | Especificações da locomotiva Bombardier ALP-46..... | 67 |
| Tabela 5.2 - | Especificações do carro Bombardier MultiLevel Coach..... | 68 |
| Tabela 5.3 - | Critérios de projetos para via permanente do Trem Expresso Intercidades | 69 |
| Tabela 5.4 - | Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de locomotiva do estudo de caso considerando uso de motores de indução..... | 69 |
| Tabela 5.5 - | Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de carro de passageiros do estudo de caso | 70 |
| Tabela 5.6 - | Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução..... | 70 |
| Tabela 5.7 - | Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's..... | 76 |
| Tabela 6.1 - | Energia consumida para composição do estudo de caso com uso de motores de indução e PMSM's..... | 88 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| Alnico | Aluminum Nickel Cobalt |
| DTC | Direct Torque Control |
| DTP-PMSM | Dual Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor |
| EMU | Electric Multiple Unit |
| FEM | Finite Element Method |
| FOC | Field Oriented Control |
| IPMSM | Interior Permanent Magnet Synchronous Motor |
| MTPA | Maximum Torque per Ampere |
| MTPV | Maximum Torque per Voltage |
| NdFeB | Neodymium Iron Boron |
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Motor |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| SmCo | Samarium Cobalt |
| SPMSM | Surface Permanent Magnet Synchronous Motor |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Abreviação | Variável | Unidade |
|-------------|---|---|
| \dot{a} | Solavanco | [m/s ³] |
| a | Aceleração | [m/s ²] |
| A | Coefficiente de atrito: rolamento puro da composição | [N/kN] |
| B | Coefficiente de atrito viscoso | [N·h/kN·km] |
| BH | Produto energético | [kJ/m ³] |
| B_{liq} | Campo magnético líquido em motor de indução | [T] |
| B_r | Remanência magnética | [T] |
| B_{rot} | Campo produzido por corrente de rotor em motor de indução | [T] |
| C | Coefficiente de atrito aerodinâmico | [N·h ² /kN·km ²] |
| D | Diâmetro da roda | [m] |
| E_A | Tensão interna de armadura | [V] |
| \hat{E}_2 | Força contraeletromotriz gerada por fluxo de entreferro | [V] |
| f | Frequência | [Hz] |
| F_a | Força de aderência | [N] |
| f_e | Frequência de estator | [Hz] |
| F_f | Esforço de freagem | [kN] |
| F_m | Esforço motor | [kN] |
| $F_{m'}$ | Esforço motor na velocidade máxima da composição | [kN] |
| f_r | Frequência de rotor | [Hz] |
| g | Aceleração da gravidade | [m/s ²] |
| H_c | Coercitividade magnética | [A/m] |
| I | Corrente | [A] |
| I_A | Corrente de enrolamento de armadura | [A] |
| I_F | Corrente de enrolamento de campo | [A] |
| I_s | Corrente de estator | [A] |
| I_{sd} | Corrente de estator de eixo direto | [A] |
| I_{sq} | Corrente de estator de eixo em quadratura | [A] |
| \hat{I}_1 | Corrente de estator de motor de indução | [A] |
| j | Unidade imaginária | [1] |

| | | |
|------------------|---|----------------------|
| J | Momento de inércia | [kg·m ²] |
| K | Constante | [1] |
| L | Indutância | [H] |
| L _{Sd} | Indutância de estator em eixo direto | [H] |
| L _{Sq} | Indutância de estator em eixo em quadratura | [H] |
| M | Massa | [kg] |
| m' | Massa de inércia da composição | [t] |
| m _{ev} | Massa média por eixo do veículo | [t] |
| m _v | Massa média do veículo | [t] |
| n | Velocidade angular | [rpm] |
| N | Força de reação normal no ponto de contato | [N] |
| n _s | Velocidade síncrona | [rpm] |
| p | Número de polos | [1] |
| P | Potência total fornecida pelos motores do trem | [kW] |
| P _{ef} | Potência de entreferro em motor de indução | [W] |
| P _t | Potência mecânica desenvolvida pelo trem | [kW] |
| R | Resistência | [Ω] |
| R'' ₁ | Resistência devido à interface roda-superfície de contato | [kN] |
| R' ₁ | Resistência devido à interface mecânica eixo-rolamento | [kN] |
| R ₀ | Resistência normal ao movimento | [kN] |
| R ₁ | Resistência devido ao rolamento | [kN] |
| R ₁ | Resistência efetiva de estator de motor de indução | [Ω] |
| R ₂ | Resistência do ar | [kN] |
| R _A | Resistência de enrolamento de armadura | [Ω] |
| R _c | Resistência devido às curvas | [kN] |
| R _e | Resistência suplementar combinada | [kN] |
| R _F | Resistência de enrolamento de campo | [Ω] |
| R _i | Resistência devido às rampas | [kN] |
| R _m | Esforço resistente ao movimento | [N] |
| R _S | Resistência de enrolamento estator | [Ω] |
| s | Escorregamento | [1] |
| S _t | Espaço percorrido | [m] |
| s _v | Área da seção frontal do veículo | [m ²] |
| t | Tempo | [s] |

| | | |
|----------------|--|--------------|
| T_e | Torque eletromagnético | [N·m] |
| T_{ind} | Torque induzido em motor assíncrono | [N·m] |
| T_L | Torque de carga | [N·m] |
| T_m | Torque motor | [N·m] |
| T_R | Torque resistente | [N·m] |
| U | Tensão terminal | [V] |
| U_i | Tensão induzida | [V] |
| U_{Sd} | Tensão induzida de estator em eixo direto | [V] |
| U_{Sq} | Tensão induzida de estator em eixo em quadratura | [V] |
| V | Velocidade linear | [km/h] |
| v | Velocidade linear | [m/s] |
| V_A | Tensão terminal de enrolamento de armadura | [V] |
| V_F | Tensão terminal de enrolamento de campo | [V] |
| V_{max} | Velocidade linear máxima da composição | [km/h] |
| \hat{V}_1 | Tensão de fase terminal de estator | [V] |
| X_1 | Reatância de dispersão de estator de motor de indução | [Ω] |
| δ | Ângulo entre B_{liq} e B_{rot} em motor de indução | [rad] |
| θ | Ângulo | [rad] |
| μ | Coefficiente de aderência | [1] |
| μ | Permeabilidade magnética | [H/m] |
| ξ | Fator de inércia das massas girantes | [1] |
| φ | Fluxo magnético | [Wb] |
| φ_{PM} | Fluxo magnético de ímã permanente | [Wb] |
| φ_{Sd} | Fluxo magnético de estator em eixo em quadratura | [Wb] |
| φ_{Sq} | Fluxo magnético de estator em eixo direto | [Wb] |
| ω | Frequência angular | [rad/s] |
| ω_s | Frequência angular síncrona | [rad/s] |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Definição do Problema | 17 |
| 1.2 | Objetivo | 19 |
| 1.3 | Justificativa | 19 |
| 1.4 | Estrutura do Trabalho | 20 |
| 2. | REVISÃO DA LITERATURA | 22 |
| 2.1 | Estado da Arte | 26 |
| 3. | METODOLOGIA | 28 |
| 3.1 | Motor síncrono de Ímãs permanentes em tração elétrica | 28 |
| 3.1.1 | Análise construtiva, de materiais e topologias | 28 |
| 3.1.2 | Análise magnética e de circuito | 31 |
| 3.1.3 | Modelagem | 33 |
| 3.1.4 | Acionamento eletrônico e controle | 34 |
| 3.1.5 | Proteção | 39 |
| 3.2 | Comparativo entre acionamentos clássicos | 43 |
| 3.2.1 | Motor CC | 43 |
| 3.2.2 | Motor de indução | 46 |
| 3.2.3 | Custos e investimento | 48 |
| 3.2.4 | Manutenção e desempenho | 50 |
| 3.2.5 | Economia de energia e eficiência energética | 52 |
| 3.3 | Dinâmica do movimento e simulação de marcha | 53 |
| 3.3.1 | Características mecânicas e cinemáticas | 53 |
| 3.3.2 | Características elétricas e frenagem regenerativa | 58 |
| 4. | APLICAÇÕES | 61 |
| 5. | ESTUDO DE CASO | 65 |
| 6. | RESULTADOS | 79 |
| 7. | CONCLUSÕES | 89 |
| 8. | TRABALHOS FUTUROS | 90 |
| | REFERÊNCIAS | 91 |
| | APÊNDICE | 102 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

Para todas as aplicações tecnológicas de engenharia em desenvolvimento no mundo atualmente existe o consenso de que uma das premissas básicas se trata da busca por otimização da eficiência energética, não apenas pela importante redução de custos, mas principalmente como forma de minimização na demanda de recursos naturais e, portanto, de contribuição para a preservação ambiental. Segundo Coroiu (2019), as abordagens em eficiência têm papel fundamental na transição energética do cenário atual em seguimento ao acordo de Paris de 2015. Perante o enfoque na análise em relação aos meios de transporte, em todos os modais se fortaleceu nos últimos anos a introdução de novas tecnologias mais limpas e em grande parte eletrificadas, em detrimento do uso de combustíveis fósseis, sendo que no futuro a eficiência energética será, portanto, cada vez mais priorizada nos sistemas de mobilidade (SULAIMAN, 2019).

Considerando as ferrovias como importante meio de transporte urbano de massa, a eletrificação destas se consolidou muitas décadas atrás nas maiores cidades, com crescente evolução tecnológica nos períodos seguintes, sendo que aprimoramentos futuros se concentrarão também em estudos para a otimização das tecnologias existentes dentro do contexto de expansão das cidades e crescente escassez de recursos. O motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM) tem sido destacado, aplicado e estudado frequentemente na literatura dos anos recentes como alternativa de acionamento para tração elétrica ferroviária, especialmente por suas conhecidas vantagens, como superior eficiência, maior densidade de potência e volumes tipicamente reduzidos, conforme Cheng et al. (2020), sendo considerado como o único tipo de máquina capaz de concorrer diretamente com o motor de indução dentro da aplicação em tração elétrica ferroviária (BRENNAN et al., 2018).

Segundo Umans (2014), o PMSM será encontrado no futuro em um número elevado de aplicações de alta potência, considerando sua ênfase em eficiência energética, alcançada principalmente pela ausência de perdas no rotor, já que os ímãs produzem fluxo sem que haja dissipação. Nas aplicações em tração elétrica o motor síncrono de

ímãs permanentes se diferencia do amplamente utilizado motor assíncrono de indução, além da menor massa para dada potência, pela possibilidade de implementação direta sem a presença de caixas de velocidades, as quais implicam em maiores custos, peso e dimensões, impactando diretamente sobre a eficiência de transferência final do torque do motor para o conjunto de rodas, de acordo com Franko, Kuchta e Buday (2012). Este tipo de montagem, denominada propulsão direta, possibilita a construção de veículos de piso baixo, não sendo possível no caso do motor de indução, justamente por suas dimensões tipicamente maiores (SIMANEK et al., 2007).

A tendência mundial pelo uso eficiente de energia faz do PMSM uma escolha interessante para muitas aplicações, a exemplo da tração elétrica, tendo sido mais empregado nos últimos anos principalmente devido às melhorias na obtenção de ligas de materiais magnéticos utilizados na construção dos ímãs permanentes, segundo Bossio et al. (2020). As características do PMSM, como sua superior controlabilidade, o qualificam como potencial candidato para utilização em ferrovias de alta velocidade, conforme Yu et al. (2017). A confiabilidade também é descrita como superior para o PMSM na utilização em tração elétrica ferroviária, como explanado por Halder, Agarwal e Srivastava (2015), na qual pode operar tipicamente com melhor desempenho dinâmico (SHEN et al., 2010).

Dentre as principais desvantagens conhecidas para o PMSM, se destacam a maior complexidade para proteção contra faltas e desmagnetização, eventual presença de níveis de ruído, vibrações e pulsação de torque, segundo Parsa e Toliyat (2007). Embora os custos envolvidos na construção do PMSM possam ser maiores em comparação aos da máquina assíncrona, devido à necessidade de obtenção de ímãs de terras raras, este motor também apresenta vantagens operacionais comumente associadas a outros tipos de máquinas, tal qual a possibilidade da utilização associada a sistemas de recuperação de energia por frenagem regenerativa. Em comparação a outro acionamento elétrico clássico de tração anteriormente relevante, o motor de corrente contínua, este se compara perante o PMSM como uma escolha menos confiável, principalmente pela presença do mecanismo coletor-escova, destacando, portanto, o PMSM como uma alternativa interessante de escolha em sistemas de

propulsão elétrica em relação principalmente a requisitos como qualidade do controle e eficiência energética (SINCHUK; KOZAKEVICH, 2017).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um estudo comparativo para o PMSM, aplicado como acionamento de tração elétrica ferroviária, em relação aos principais tipos de máquinas mais frequentemente utilizadas nesta aplicação atualmente e no passado, notadamente o motor assíncrono de indução, em termos técnicos e operacionais. A análise de propriedades teóricas do PMSM, obtidas por meio da revisão bibliográfica sobre características dentre as construtivas, eletromagnéticas, de controle e proteção, precederá que por meio do uso de ferramentas computacionais, como a de simulação de marcha, seja efetuado estudo de caso que possibilite a comparação dos aspectos selecionados, em destaque para os níveis de eficiência energética, considerando a importância para estes atribuída em todas as tecnologias que se encontram em evolução atualmente.

1.3 Justificativa

As tecnologias em tração elétrica ferroviária se incrementaram continuamente nas últimas décadas, como um modal de transporte urbano ecologicamente mais limpo e sustentável, ainda que intensivo no consumo de energia. A expansão das malhas ferroviárias ocorre juntamente com o crescimento das cidades, de modo que os estudos em relação aos métodos de otimização da operação e elevação da eficiência energética constituem uma das vertentes em curso para a implementação de novos aperfeiçoamentos no tema.

Revisando os conceitos principais referenciados para a utilização do PMSM como acionamento de tração elétrica em ferrovias, o presente trabalho desempenha como uma investigação aplicada sobre a máquina em questão, tendo a possibilidade de servir como ponto inicial teórico para aprimoramentos futuros no assunto, além de reexaminar aspectos de engenharia importantes para a utilização de máquinas elétricas no transporte metroferroviário.

A simulação de marcha, como importante forma de análise na área ferroviária, possibilitará neste trabalho uma facilitada e robusta aquisição de informações sobre a dinâmica de operação da máquina síncrona de ímãs permanentes como elemento de tração elétrica em redes ferroviárias.

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação de mestrado se organiza conforme a estrutura abaixo apresentada:

Introdução: Inicia o trabalho, justificando e contextualizando sobre a importância da preservação de recursos ambientais e o objetivo pela elevação da eficiência energética no cenário atual, ressaltando neste sentido o PMSM como alternativa de acionamento aplicado em tração elétrica ferroviária.

Revisão da literatura: Realiza uma revisão bibliográfica acerca dos estudos e pesquisas relevantes produzidos nas últimas décadas sobre a utilização em tração elétrica para o PMSM, evidenciando também o estado da arte para o tema com os tópicos recentemente destacados.

Metodologia: Conceitua por meio do método científico as bases teóricas para o desenvolvimento do trabalho, examinando as características notáveis do PMSM e da dinâmica do movimento em ferrovias, fundamentando para posterior realização de simulações e obtenção de resultados.

Aplicações: Estudo de especificações e resultados reais obtidos para o uso do PMSM aplicado em ferrovias ao redor do mundo e citados na literatura.

Estudo de caso: Efetiva a análise do estudo de caso proposto no trabalho, realizado por meio de simulações.

Resultados: São expostos e detalhados os resultados apurados durante a realização das simulações.

Conclusões: As considerações finais e reflexões sobre o desenvolvimento teórico e o estudo de caso efetuados são colocadas, finalizando o trabalho.

Trabalhos futuros: Sugestões para pesquisas futuras em continuidade ao tema de estudo são enumeradas, tendo como ponto de partida os desenvolvimentos e a revisão bibliográfica neste trabalho realizados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Será realizada a seguir uma revisão bibliográfica contemplando algumas das linhas de pesquisa mais relevantes efetuadas nas últimas décadas para o PMSM e sua aplicação em tração elétrica, em especial a ferroviária. Após a verificação da evolução dos desenvolvimentos realizados, será exposto o estado da arte para o tema, referenciando os principais tópicos abordados na literatura recente.

Os estudos acerca de máquinas síncronas dotadas de excitação de campo sem escovas por ímãs permanentes, ainda que com potências e dimensões reduzidas, passaram a ganhar maior destaque na literatura durante o século XX a partir da década de 1950, principalmente devido ao desenvolvimento anterior de materiais magnéticos baseados em ligas de Alnico, conforme Brainard (1952) analisou para a aplicação em pequenos geradores embarcados de elevada eficiência. Em sequência, ressalta-se o trabalho de Merrill (1955), ao propor o desenvolvimento na ocasião de um inédito e promissor motor síncrono de ímãs permanentes, de baixa potência, à época nomeado como “permasyn”. Este motor, tendo a característica da ausência de perdas no cobre do rotor e fator de potência superior a um motor de indução equivalente, pela ausência de correntes de magnetização, também apresentava maior potencial perante o motor síncrono tradicional de excitação CC para aplicações específicas que requisitassem operação síncrona de maior eficiência. Limitações se impuseram para o desenvolvimento de exemplares de maiores potências em termos de viabilidade construtiva e econômica. Posteriormente, foi realizada uma análise de otimização do desempenho para um PMSM concebido para utilizações síncronas a partir da modificação de uma máquina de indução, pela colocação de ímãs permanentes no rotor de tipo gaiola de esquilo, tendo o desafio relacionado à desmagnetização dos ímãs em condições de altas correntes durante os processos de partida e sincronização (CAHILL; ADKINS, 1962).

Uma nova intensificação das pesquisas sobre a máquina síncrona de ímãs permanentes ocorreu na década de 1980, a exemplo da modelagem de parâmetros realizada por Honsinger (1982), em que as indutâncias dos eixos direto e em quadratura foram obtidas por intermédio dos campos magnéticos presentes no entreferro. Neste trabalho uma diferenciação construtiva também passou a ser

adotada para o PMSM, a denominação de motor síncrono de ímãs permanentes interiores ou IPMSM, em que os ímãs são especificamente introduzidos internamente em um rotor de gaiola de motor de indução, com a utilização da gaiola em favor da partida do motor e como proteção contra desmagnetização aos ímãs. Técnicas aplicadas também para o controle eletrônico do PMSM se desenvolveram neste período, como a utilização de inversores fontes de tensão e corrente para controle de velocidade variável do motor, em aplicações de potência reduzida e de alta eficiência, como explanado por Himeji et al. (1985). O IPMSM, em contraponto ao modelo de motor síncrono SPMSM de ímãs superficiais ao rotor, passou a ser considerado interessante para operação em velocidade variável, principalmente desempenhando como servo motor industrial, tendo como características uma maior robustez e elevada densidade de potência com o torque de relutância ocasionado pela saliência do rotor, adicionalmente ao torque de mútua. O design de ímãs internos ao rotor também representou diminuição em termos de custos, considerando a menor massa dos ímãs requisitada nesta estrutura (JAHNS; KLIMAN; NEUMANN, 1986).

Nos anos seguintes, as técnicas de controle vetorial foram introduzidas também para o PMSM, com sua força contra eletromotriz senoidal, em que a posição instantânea do rotor é utilizada para estimar as correntes necessárias no estator, as quais são orientadas em ângulos específicos com relação ao rotor, alcançando desempenho e confiabilidade semelhantes às das máquinas de corrente contínua, sem a presença de escovas. Aplicações em robótica e dispositivos aeroespaciais passaram a ser também consideradas para o PMSM, segundo Freere e Pillay (1990). A diminuição de custos dos dispositivos de eletrônica de potência permitiu que o PMSM alimentado por sistemas inversores, em controle de magnitude e fase das correntes de estator, também passasse a ser considerado para aplicações como tração elétrica veicular e ferroviária (MOGHBELLI; RASHID, 1990).

O interesse pelo PMSM foi incrementado na década de 1990 principalmente pelo descobrimento anterior de poderosas ligas magnéticas, com redução de custos, a exemplo das ligas de NdFeB, sendo este motor com sua eficiência e design compacto adequado para utilização como acionamento de tração, em que a demanda de torque é elevada e constante em baixas velocidades e menor em altas velocidades, na região

tipicamente conhecida como de enfraquecimento de campo ou de potência constante (ADNANES, 1991).

Kondou e Matsuoka (1997) expuseram o PMSM e seu respectivo sistema de controle como vantajosos para utilização em tração elétrica ferroviária, principalmente na forma de acionamento direto, sem a utilização de caixas de redução, em favor da eliminação de ruídos e minimização de problemas de manutenção, com desempenho incrementado pelo baixo centro de massa. O PMSM passou a receber, portanto, ainda maior atenção no final do século XX, principalmente por sua alta aplicabilidade em tração elétrica automotiva, devido às características como alta densidade de potência e maior eficiência, alto torque de partida e elevadas velocidades de trabalho, em conjunto com a evolução tecnológica observada à época em termos de qualidade dos dispositivos semicondutores e seus respectivos métodos de controle (EDWARD; WAHSH; BADR, 1998).

Frenzke e Piepenbreier (2004) classificaram o conjunto motor de indução alimentado por inversor, em combinação com caixas de redução, como o estado da arte à época em termos de equipamentos para tração elétrica ferroviária, apontando, no entanto, também o PMSM como uma promissora alternativa, por suas conhecidas vantagens e a possibilidade de utilização como acionamento direto sem engrenagens, graças a sua alta densidade de torque, o que contribuiria para uma eficiência ainda maior devido à redução de massa. Feng et al. (2007), no entanto, realizaram um estudo aplicado baseado em técnicas para redução de força contra eletromotriz no PMSM aplicado em tração ferroviária, como a adoção de conexões série e paralela para os enrolamentos, tendo em vista a possibilidade indesejada de geração desta força mesmo em situações de rotação na ausência de carga.

Zhao et al. (2008) apresentaram alternativamente em seu trabalho a estratégia de controle direto de torque (DTC) para o PMSM, com alto desempenho dinâmico para utilização em sistemas de tração de acionamento direto, alcançando transições suaves entre os diferentes estados de funcionamento. Em sequência, Oettmeier et al. (2010) analisaram um esquema de controle para o PMSM fundamentado nos fluxos do estator, afirmando também que, à época, o desempenho dos materiais magnéticos aplicados no PMSM se incrementava continuamente, de modo que os níveis de

intensidade de campo e sensibilidade à temperatura não mais representavam obstáculos insuperáveis, permitindo aplicação prática mais importante da máquina em tração elétrica ferroviária e veicular. Aguirre et al. (2011) efetivaram uma análise comparativa entre duas estratégias de controle para o PMSM em tração elétrica ferroviária, DTC e o mais comumente utilizado controle vetorial de campo orientado (FOC), por intermédio de simulações e testes experimentais. Enquanto o método linear de FOC fundamenta-se na transformação das variáveis trifásicas da máquina em eixos bifásicos de referência, a fim de se obter um desacoplamento entre fluxo e torque similar ao naturalmente existente nas máquinas CC, o DTC é baseado no controle direto de torque e fluxo do motor com base em controladores de histerese não lineares, sem que ocorram transformações de referência, e simplificado sem o uso de moduladores PWM, proporcionando respostas dinâmicas mais rápidas. Os autores também pontuaram que, ainda com suas conhecidas vantagens perante ao amplamente utilizado motor de indução, o PMSM em ferrovias apresenta adicionalmente desvantagens pelo fato de requisitar em seu controle o uso individual de um inversor para cada motor, além da necessidade da utilização de contadores para isolamento entre motor e inversor em caso de falhas.

Shikata et al. (2012) relataram em sua publicação que o PMSM fora introduzido com sucesso quatro anos antes em operação comercial no sistema metropolitano de Tóquio, proporcionando os resultados esperados de economia de energia, baixa emissão de ruídos e manutenção facilitada, comparativamente a um motor de indução convencional de similar potência. No mesmo ano, um IPMSM foi pesquisado, desenvolvido e testado especificamente para a aplicação como acionamento de tração em ferrovias de alta velocidades, de acordo com Huang et al. (2012). O motor foi constituído de uma inédita e exclusiva estrutura para o rotor, em que um eixo não magnético foi introduzido para redução da dispersão de fluxo. Um acionamento de tração elétrica de ímãs permanentes, associado a um módulo experimental tolerante a faltas, foi também proposto por Wang et al. (2014), voltado especificamente para aplicação em metrô, de modo que as composições pudessem manter um desempenho básico de operação mesmo em situações de falha. Os autores reforçaram que o PMSM, por requisitar um maior número de dispositivos eletrônicos em seu controle individualizado, em comparação ao motor assíncrono, possuiria um maior índice de falhas, exigindo um tratamento especial de proteção.

2.1 Estado da Arte

Considerando algumas das pesquisas mais relevantes efetuadas para o PMSM aplicado em tração elétrica na década recente, destaca-se inicialmente o trabalho de Douglas et al. (2016), que realizaram um estudo para avaliação do custo-benefício da introdução do motor síncrono de ímãs permanentes em diferentes subtipos de ferrovias, em busca da solução mais apropriada em termos de minimização de perdas e otimização da economia energética, também considerando a aplicação das técnicas de frenagem dinâmica e regenerativa. Em seguida, Chen et al. (2016) desenvolveram um modelamento para o PMSM baseado na teoria de acoplamento multi-campo e método dos elementos finitos (FEM), tendo características operacionais da máquina associadas a parâmetros eletromagnéticos, térmicos e mecânicos, especificamente planejados para utilização em ferrovias de alta velocidade. Os autores relataram a aplicação bem sucedida do PMSM em ferrovias de alta velocidade pela China no ano de 2014, sendo o quarto país a dominar a tecnologia em questão após Japão, Alemanha e França.

Zhang et al. (2019) em seu trabalho propuseram um método “sensorless”, sem sensores, para controle do PMSM em transporte ferroviário com a utilização de modulação síncrona segmentada, com base na injeção de sinais arbitrários para a estimação da posição rotórica. Takahashi et al. (2020), em seguida, conceberam um PMSM de alta eficiência para aplicação ferroviária com base em estrutura de polos magnéticos assimétricos, para redução de pulsação e ripple de torque, sem comprometimento da componente CC do torque de saída sob o controle baseado em máximo torque por ampere (MTPA), alcançando eficiência nominal de 98% para a máquina e redução de perdas de até 15% comparativamente ao motor assíncrono de tração convencional, perante testes de operação comercial.

Luo et al. (2020) propuseram um novo método de controle para o IPMSM, fundamentado na injeção de múltiplos sinais virtuais, associada à técnica de máximo torque por ampere, baseada na identificação do ângulo ótimo de corrente que combine as componentes dos eixos direto e em quadratura para a geração do máximo torque perante uma determinada corrente de estator, em benefício de uma eficiência ainda maior para a máquina, com redução de perdas no cobre.

Zheng et al. (2019) ressaltaram o surgimento e relevância do PMSM de tração trifásico duplamente alimentado (DTP-PMSM), contemplado pelas vantagens tanto do PMSM convencional quanto das máquinas polifásicas, principalmente por possuir uma curva de torque melhor suavizada, pela redução de pulsações. Em seguimento à esta linha de pesquisa, Lutonin, Shklyarskiy e Shklyarskiy (2020) desenvolveram uma estratégia de controle para o motor síncrono de ímãs permanentes duplamente alimentado de tração, nos modos de enfraquecimento de campo e frenagem, com base em uma topologia de enrolamentos estatóricos abertos em suas extremidades. O PMSM multifásico duplamente alimentado tem ganhado atenção como uma das principais topologias atuais para aplicação em tração ferroviária, com sua superioridade em termos de redução da distorção harmônica e perdas totais, possuindo maior densidade de potência e tolerância contra faltas (POLATER; KAMEL; TRICOLI, 2021).

Neste capítulo foram revisados alguns dos principais pontos de evolução acerca do PMSM na literatura ao longo das últimas décadas, também como elemento de tração elétrica ferroviária, de forma a fundamentar a metodologia que será apresentada a partir do próximo capítulo como base para a realização do trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1 Motor síncrono de ímãs permanentes em tração elétrica

3.1.1 Análise construtiva, de materiais e topologias

Componentes fundamentais do PMSM, os ímãs permanentes são frequentemente referenciados na literatura como ímãs de terras raras, principalmente na forma dos constituídos por NdFeB (Neodímio, Ferro e Boro), de alto custo, conforme Franko, Ondrejčka e Kuchta (2012). Segundo Funieru e Binder (2008), enquanto os ímãs de NdFeB tem como característica uma maior sensibilidade a temperaturas excessivas, as unidades de SmCo (Samário e Cobalto), disponíveis em séries como SmCo₅ e Sm₂Co₁₇, também de terras raras e de custo ainda maior, possuem como atributo um menor nível de magnetização remanescente.

Os ímãs de ligas de Alnico (Alumínio, Níquel, Cobalto e Ferro), por sua vez, possuem elevada magnetização residual e baixo coeficiente de temperatura, embora sejam mais suscetíveis à desmagnetização, conforme Gieras (2009). A ferrite, material cerâmico magnetizável e de menor custo, também é considerada para introdução no PMSM (CHENG et al., 2020).

De acordo com Brenna et al. (2018), as principais grandezas que definem um ímã permanente são: a coercitividade H_c , a remanência B_r e o produto energético BH, tipicamente avaliados em dependência dos níveis de temperatura. Na figura 3.1 são expostas as características de segundo quadrante para os principais tipos de ímãs.

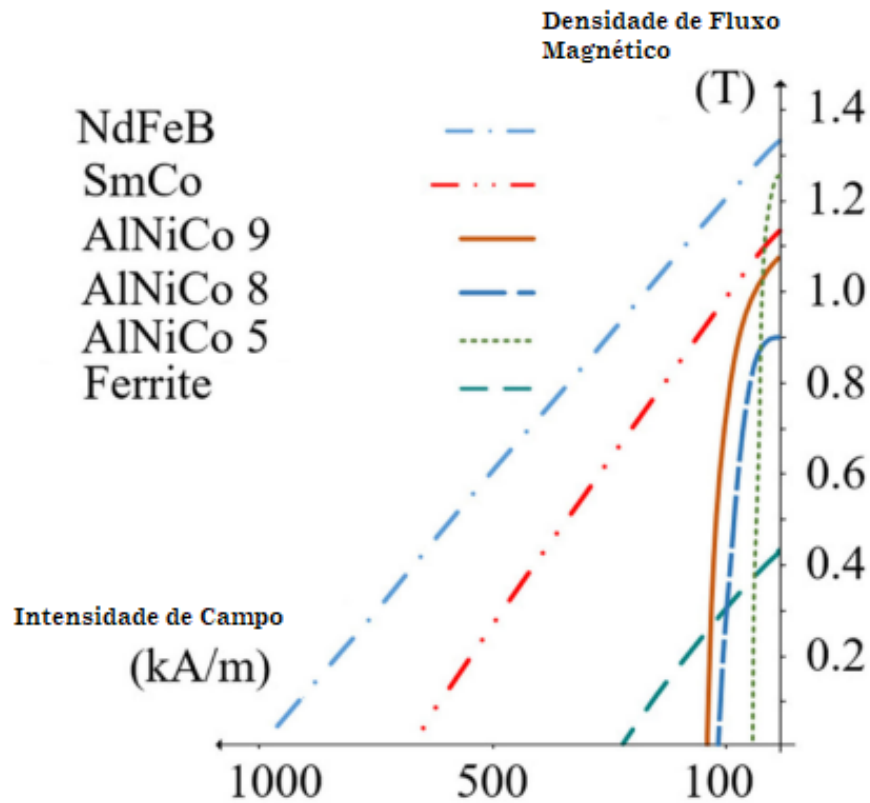


Figura 3.1 – Características de segundo quadrante para ímãs. Fonte: modificado de Maroufian e Pillay (2019).

O produto energético é uma importante propriedade dos ímãs permanentes, segundo Zadeh (2018), correspondendo a uma medida combinada da remanência e da coercitividade magnética, fornecendo a magnitude da densidade de fluxo e a resistência contra desmagnetização dos materiais, de forma que altos valores de produto energético contribuam para maior torque e características de potência do PMSM. O valor máximo do produto energético de um ímã permanente pode ser obtido pela equação (3.1), sendo a permeabilidade μ válida apenas para segundo quadrante na forma de reta, portanto não aplicável para Alnico:

$$BH_{max} = -\frac{\mu H_c^2}{4} \quad (3.1)$$

Dentre as formas construtivas para o PMSM, de acordo com a posição dos ímãs em relação ao rotor, dois tipos se destacam, como reforçado por Duan, Ou e Deng (2020): o motor de tipo IPMSM, com ímãs internos ao rotor, e SPMSM, no qual os ímãs são fixados na superfície do rotor, vide figura 3.2.

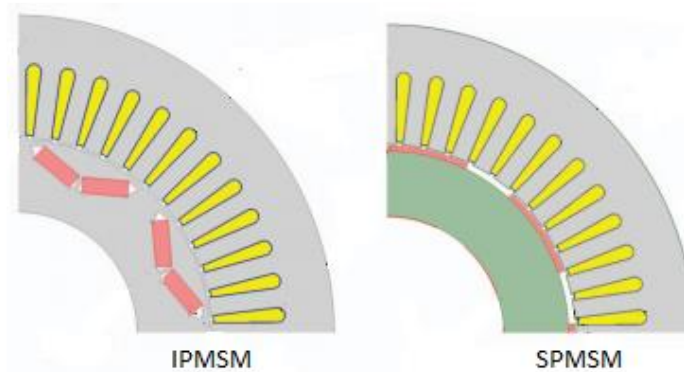


Figura 3.2 – Estruturas para IPMSM e SPMSM. Fonte: modificado de Duan, Ou e Deng (2020).

Uma propriedade e importante vantagem do PMSM com ímãs internos ao rotor, em comparação ao modelo de ímãs superficiais, ocorre pelo fato de que torque híbrido é estabelecido na máquina, pela presença dos componentes de torque de mútua e de relutância, este ocasionado especificamente pelas saliências características do IPMSM, segundo Parsa e Toliyat (2007), o que contribui para maior densidade de potência desta estrutura frente ao modelo SPMSM. Esforços elevados, no entanto, podem ocasionar a quebra dos ímãs internos. Liu et al. (2009) ressaltaram o PMSM de polos salientes como uma máquina de alta eficiência, rápida resposta e excelente operação sob enfraquecimento de campo. A produção adicional do torque de relutância torna o IPMSM mais aplicável para utilização em tração elétrica (HALDER; AGARWAL; SRIVASTAVA, 2015)

A ocorrência de maiores perdas por correntes parasitas é evidenciada no PMSM de ímãs superficiais, principalmente durante a rotação em altas velocidades, requisitando que cintas sejam introduzidas para retenção aos ímãs. Umans (2014) ressaltou a alteração do comprimento do entreferro proporcionada pela espessura das cintas de retenção para o SPMSM, comprometendo a produção de conjugado pela máquina.

Diversas topologias ocorrem para a inserção dos ímãs internamente ao rotor do PMSM, como os formatos em “u” e “v” destacados em Belahcen et al. (2016) e vistos na figura 3.3, além da topologia “w”. A introdução de barreiras de fluxo é também uma técnica comum para o IPMSM em favor de um direcionamento magnético otimizado, com o aumento da saliência e posteriormente do torque de relutância. Esta forma de projeto também proporciona a redução do fluxo de dispersão (HUANG et al., 2012).

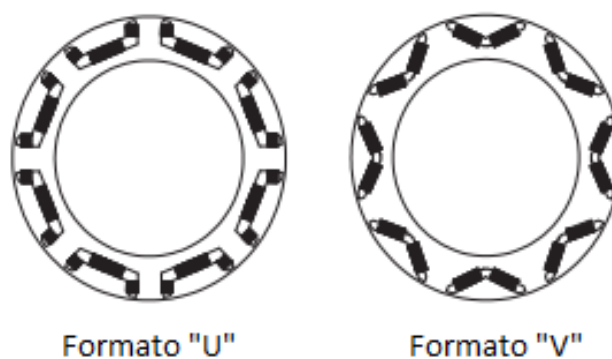


Figura 3.3 – Topologias para IPMSM. Fonte: modificado de Belahcen et al. (2016).

Em termos de estrutura para o estator, o PMSM de tração pode ser configurado por enrolamentos distribuídos ou concentrados, sendo os de tipo concentrado mais coerentes com os rotores de ímãs superficiais, os quais intrinsecamente possuem menor índice de saliência, comprometendo o torque de relutância no caso da utilização em máquinas de ímãs internos (VAGATI et al., 2012).

3.1.2 Análise magnética e de circuito

Em uma máquina trifásica, um campo magnético girante é estabelecido no entreferro a partir da presença de três enrolamentos no estator distanciados entre si por 120 graus elétricos, com a velocidade síncrona obtida pela equação (3.2), em função da frequência e do número de polos. O PMSM é um motor síncrono polifásico com rotor de ímãs permanentes, se assemelhando, portanto, às máquinas síncronas convencionais em seu estudo, com a exceção de que os enrolamentos de campo são substituídos pela excitação fixa dos ímãs permanentes, analogamente à uma corrente constante (UMANS, 2014).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (3.2)$$

Considerando que no PMSM, por ser uma máquina síncrona, o torque é desenvolvido apenas na velocidade síncrona, técnicas de partida e controle com frequência variável se fazem necessárias, podendo o acionamento fornecer ou absorver potência reativa do sistema a depender do nível de excitação. As perdas verificadas neste tipo de

motor são segmentadas em: perdas no cobre do estator, perdas no ferro, perdas mecânicas e perdas suplementares (CHAPMAN, 2013).

De acordo com Shen et al. (2010), a densidade de fluxo magnético no motor síncrono de ímãs permanentes não apresenta precisão suficiente ao ser analisada pelo circuito magnético equivalente, tendo em vista a complexidade da configuração do rotor, de modo que se torna indispensável o estudo por intermédio do método dos elementos finitos baseado em simulação computacional. Uma ilustração exemplificativa da distribuição de fluxo em seção de motores síncronos de ímãs permanentes internos em vazio, considerando os ímãs fixados em topologia “u” e “v”, é mostrada na figura 3.4. Ambas as distribuições contêm significativos harmônicos, que contribuem para a ocorrência de maior ripple de torque, vibrações e ruídos acústicos, além de maiores perdas no ferro e por correntes de Foucault (BELAHCEN et al., 2016).

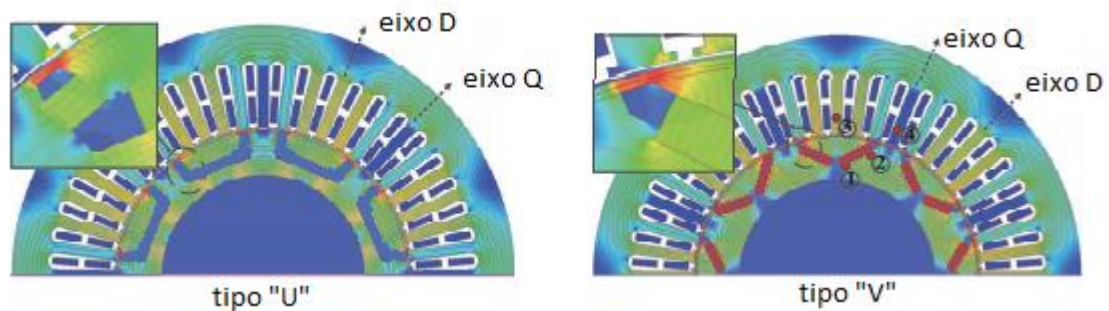


Figura 3.4 – Distribuições de densidade de fluxo magnético em vazio para IPMSM's de topologias “u” e “v”. Fonte: modificado de Belahcen et al. (2016).

De forma semelhante ao verificado no motor síncrono clássico, ocorre a equação (3.3) simplificada para o circuito monofásico equivalente do estator de um PMSM não saliente, segundo Simanek et al. (2007), o qual possui indutâncias similares para os eixos direto e em quadratura. Para esta condição, é exibido na figura 3.5 esquema de circuito estatórico monofásico equivalente e respectivo diagrama fasorial, sob operação de fluxo constante.

$$U = RI + j\omega LI + U_i \quad (3.3)$$

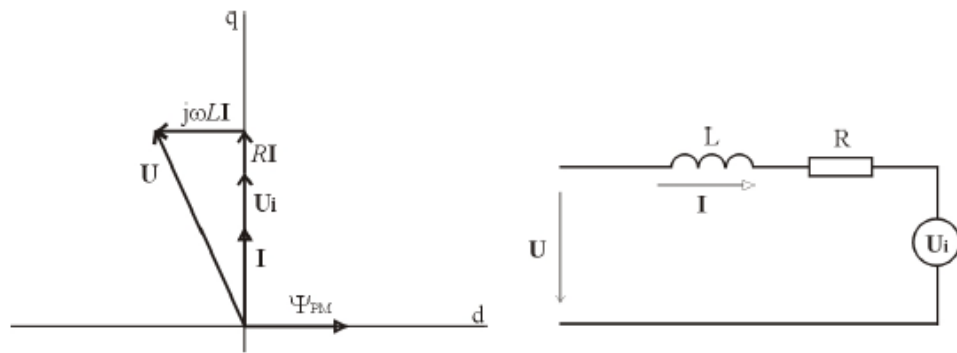


Figura 3.5 – Diagrama fasorial e circuito equivalente por fase simplificados de estator de motor síncrono de ímãs permanentes. Fonte: modificado de Simanek et al. (2007).

3.1.3 Modelagem

O motor síncrono de ímãs permanentes pode ser modelado matematicamente em sua dinâmica de operação tanto com base no referencial bifásico estacionário “ $\alpha\beta$ ” quanto por meio do sistema “dq” coordenado de eixos girantes, de acordo com Aguirre et al. (2011), conforme avaliado pelas equações (3.4) e (3.5) e exibido no diagrama vetorial da figura 3.6, considerado rotor hipotético com ímã permanente orientado no eixo direto:

$$U_{sd} = R_S I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega \varphi_{sq} = R_S I_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega L_{sq} I_{sq} \quad (3.4)$$

$$U_{sq} = R_S I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega \varphi_{sd} = R_S I_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega (\varphi_{PM} + L_{sd} I_{sd}) \quad (3.5)$$

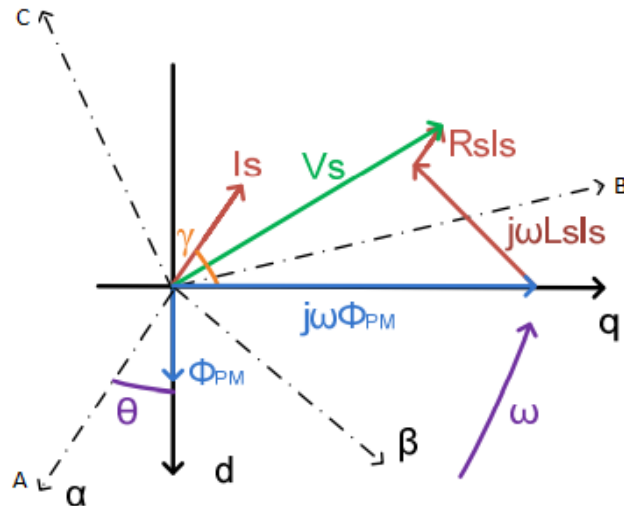


Figura 3.6 – Diagrama vetorial de PMSM. Fonte: modificado de Aguirre et al. (2011).

Ainda segundo Aguirre et al. (2011), a expressão de torque para o PMSM é constituída por uma componente de mútua e outra de relutância, dependentes da topologia do motor em termos do nível de saliência, sendo que no SPMSM, não saliente, as indutâncias dos eixos direto e em quadratura, de valor equivalente, implicam apenas na presença da componente de mútua. A equação (3.6) modela o torque eletromagnético para o PMSM em função do fluxo magnético estabelecido pelos ímãs permanentes, do número de polos da máquina, corrente e indutâncias de estator em termos dos eixos direto e em quadratura, enquanto a equação (3.7) expressa relação entre os torques eletromagnético e de carga, em termos do momento de inércia e da variação temporal da frequência angular (ACAMPA; PIZZO; RIZZO, 2007):

$$T_e = \frac{3p}{2} (\varphi_{PM} I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}) \quad (3.6)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.7)$$

3.1.4 Acionamento eletrônico e controle

Dois métodos são predominantemente utilizados para o controle do PMSM, segundo Brenna et al. (2018): o controle vetorial de campo orientado (FOC), aliado à modulação individual por largura de pulso (PWM), e a técnica de controle direto de torque (DTC). A estratégia de controle vetorial, analogamente ao verificado no controle das

máquinas de corrente contínua, baseia-se em um desacoplamento da corrente de estator em componentes associadas a fluxo e torque, em termos dos eixos direto e em quadratura, respectivamente, por meio da transformada referencial “dq” de Park e utilização de controladores proporcionais integrais (PI), de acordo com Garcia et al. (2006). Na figura 3.7 é exposto exemplo de diagrama de controle por campo orientado para PMSM. Os controladores PI adicionalmente compensam as resistências implícitas do circuito da malha de controle.

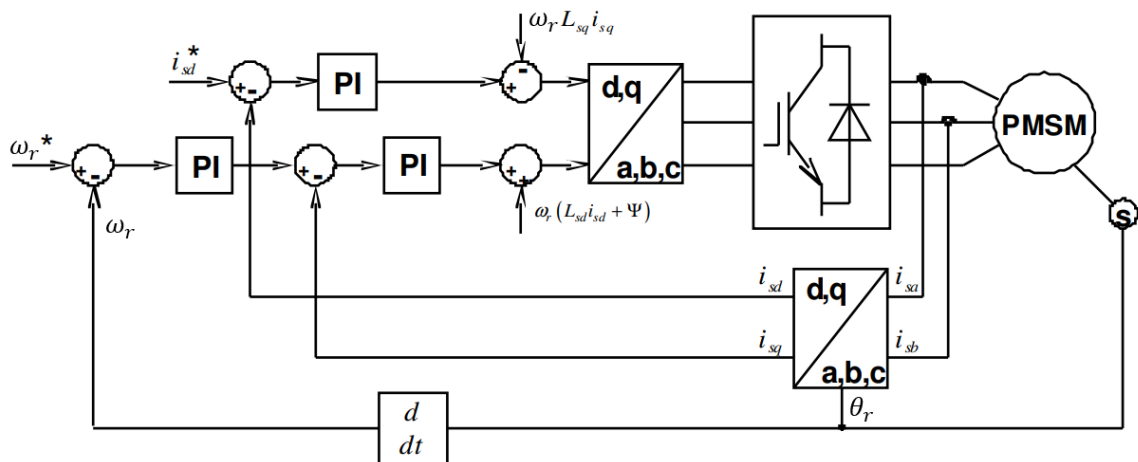


Figura 3.7 – Controle FOC para PMSM. Fonte: modificado de Garcia (2006).

Alternativamente, a estratégia DTC fundamenta-se no controle direto de torque e fluxo para o PMSM, por meio da utilização de controladores não lineares de histerese. O método de controle direto de torque possibilita a geração de um fluxo de estator senoidal sem a necessidade de transformações de referência para a obtenção do controle desacoplado entre fluxo e torque. Além disso, o método DTC não requisita o uso de moduladores baseados em PWM, sendo seu controle composto por tabelas de chaveamento dependentes das saídas dos controladores de histerese, com base na modulação vetorial espacial (SVM) no referencial bifásico estacionário “ $\alpha\beta$ ”. A seleção de vetores apropriados de tensão possibilita o controle da velocidade e trajetória do fluxo da máquina, segundo Aguirre et al. (2011). A figura 3.8 exhibe diagrama de blocos para controle de PMSM com base na estratégia DTC, juntamente com exemplo de diagrama espacial para vetores de tensão em respectivo inversor.

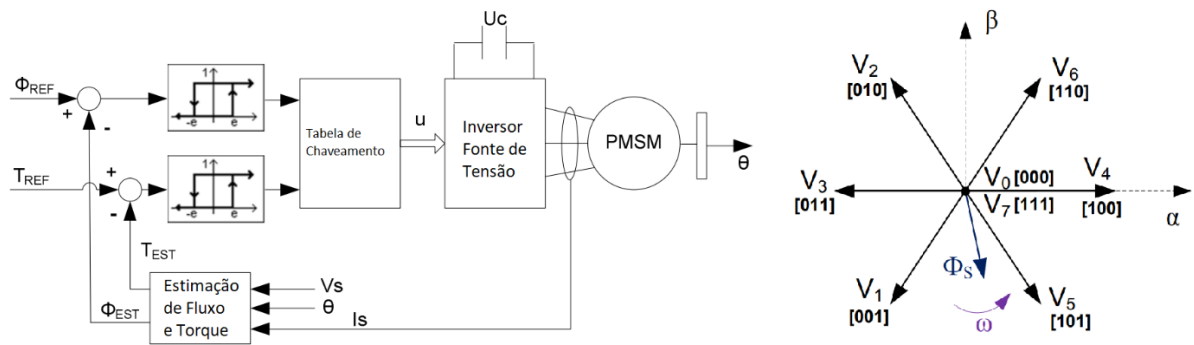


Figura 3.8 – Diagrama de blocos para controle DTC de PMSM, e respectivo diagrama espacial vetorial para inversor de vetores de tensão. Fonte: modificado de Aguirre et al. (2011).

A tabela 3.1 abaixo detalha a comparação entre as principais características das estratégias de controle, controle direto de torque e campo orientado, para o motor síncrono de ímãs permanentes.

Tabela 3.1 – Comparação entre estratégias DTC e FOC para controle de PMSM.

| | DTC | FOC |
|---|--|-----------------------------|
| Resposta dinâmica para o torque | Rápida | Lenta |
| Comportamento de estado estacionário para o torque, fluxo de estator e correntes. | Alto ripple e distorção. | Menores ripple e distorção. |
| Necessidade de sensores para posição de rotor | Não | Sim |
| Controle de corrente | Não | Sim |
| Necessidade de modulador PWM | Não | Sim |
| Necessidade de transformações de coordenadas | Não | Sim |
| Frequência de chaveamento | Variável, a depender dos pontos de operação e transientes. | Constante |
| Ruído audível | Alto em baixas velocidades | Baixo em frequências fixas |
| Sintonia do controle | Bandas de histerese | Ganhos PI |
| Complexidade de processamento do controle | Baixa | Alta |

Fonte: modificado de Aguirre et al. (2011).

De acordo com Aguirre et al. (2011), em ferrovias a estratégia DTC pode ser escolhida se os requisitos dinâmicos forem muito restritivos ou uma solução mais simples em termos da técnica de modulação precise ser implementada, enquanto o esquema FOC pode ser uma opção melhor quando a alta qualidade da forma de onda é exigida ou uma configuração de controle mais fácil é preferida.

Para magnitudes constantes da corrente I_s de estator do PMSM, o torque eletromagnético torna-se função do ângulo θ entre a corrente e o eixo direto “d”, de acordo com Luo et al. (2020), sendo que nesta condição o torque eletromagnético da máquina é obtido pela equação (3.8) no sistema polar de coordenadas. As técnicas de controle baseadas em máximo torque por ampere (MTPA) estimam o ângulo θ ótimo que efetive o maior torque possível para determinado valor de corrente.

$$T_e(\theta) = \frac{3p}{2} (\varphi_{PM} I_s \sin\theta + \frac{1}{2} (L_{sd} - L_{sq}) I_s^2 \sin 2\theta) \quad (3.8)$$

Ainda segundo Luo et al. (2020), o ângulo ótimo supracitado pode ser obtido em função dos parâmetros da máquina ao se igualar a zero a derivada do torque com relação a θ , como mostrado nas equações (3.9) e (3.10).

$$\frac{\partial T_e}{\partial \theta} = \frac{3p}{2} (\varphi_{PM} \cos\theta + (L_{sd} - L_{sq}) I_s \cos 2\theta) = 0 \quad (3.9)$$

$$\theta_{MTPA} = \arccos \left(\frac{-\varphi_{PM} + \sqrt{\varphi_{PM}^2 + 8(L_{sd} - L_{sq})^2 I_s^2}}{4(L_{sd} - L_{sq}) I_s} \right) \quad (3.10)$$

Na figura 3.9 são exibidos os limites das trajetórias de operação características para o PMSM no plano referencial (i_q , i_d), com região operável destacada em azul, considerando vetor de corrente estatórica em situações de controle baseadas em máximo torque por ampere (MTPA) e máximo torque por tensão (MTPV) (WANG; HSIEH; LIN, 2018).

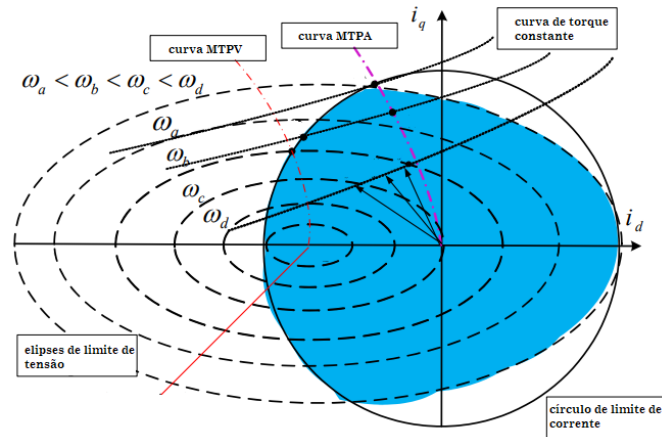


Figura 3.9 – Trajetórias do vetor corrente de estator sob condições de MTPA e MTPV, com círculo de limite de corrente e elipses de limite de tensão. Fonte: modificado de Wang, Hsieh e Lin (2018).

A região de máximo torque por tensão (MTPV), segundo Wang, Hsieh e Lin (2018), permite a geração do máximo torque possível para determinada limitação de tensão do inversor, em velocidades acima da nominal na operação sob potência constante. Adicionalmente à estratégia DTC de controle direto de torque, outros métodos também “sensorless” (sem sensores) são estudados e aplicados para o controle do PMSM. Tais métodos, diferentemente da técnica de controle vetorial de campo orientado, dispensam a necessidade do uso de transdutores de posição, alternativamente baseando-se em técnicas de estimação analítica de estados, como os de velocidade posição, e fluxo, implicando diretamente em menores dimensões e custos, além de maior confiabilidade ao acionamento (POZA et al., 2013).

A pulsação de torque, embora na prática de baixa intensidade, é uma característica intrínseca da operação do motor síncrono de ímãs permanentes acionado eletronicamente, implicando como consequência em maiores vibrações e ruído sonoro. A ocorrência de distorções de tensão durante o tempo morto do inversor e distorção de indutância e fluxo dos ímãs permanentes devido às estruturas de estator e rotor são exemplos de causas possíveis para a ocorrência deste fenômeno no acionamento eletrônico do PMSM, segundo Yi, Wang e Sun (2020). Parsa e Toliyat (2007) propuseram soluções para o alcance de maior suavização ao torque da máquina, com base em modificações construtivas, a exemplo de inclinação de estator ou rotor, alteração da direção e arcos de magnetização dos ímãs, mudanças no número e distribuição de ranhuras e enrolamentos do estator e até mesmo o incremento do número de fases da alimentação.

3.1.5 Proteção

Durante o acionamento de um motor síncrono de ímãs permanentes, os defeitos possíveis de ocorrer são majoritariamente associados a faltas no estator, falhas no rotor, problemas nos rolamentos e defeitos no inversor. Dentre as principais causas identificadas para a ocorrência das falhas no estator, destacam-se os curtos circuitos entre as espiras dos enrolamentos, assim como no núcleo estatórico. Em termos do rotor, a excentricidade, desuniformidade do entreferro causada por desalinhamento, e principalmente a desmagnetização dos ímãs permanentes, seja por estresse térmico, elétrico, mecânico, ou por condições ambientais, representam os principais motivos de faltas. Custos são gerados como consequência das falhas, com a necessidade de paradas para manutenção e o tempo em que a máquina de tração permanece inoperante, segundo Bossio et al. (2020). Os autores ainda ressaltaram que o processo de desmagnetização do rotor no PMSM implica em uma redução da força eletromotriz induzida, requisitando a elevação das correntes do estator para a produção da mesma potência de saída obtida em condições normais. O aumento da magnitude das correntes estatóricas resulta em um ciclo de incrementações de temperatura e correntes, potencializando os danos da falta.

Considerando que o PMSM de tração é susceptível à desmagnetização e falhas de isolamento sob altas temperaturas, a análise térmica é de grande importância no projeto da máquina, em favor de um correto dimensionamento das classes de isolamento e do sistema de refrigeração, segundo Cheng et al (2020). As simulações baseadas no método dos elementos finitos (FEM), a exemplo da distribuição de calor exibida na figura 3.10, podem ser utilizadas para a modelagem térmica do motor síncrono de ímãs permanentes, de acordo com Funieru e Binder (2008), que ressaltaram a maior sensibilidade às altas temperaturas dos ímãs de NdFeB perante os de Samário-Cobalto.

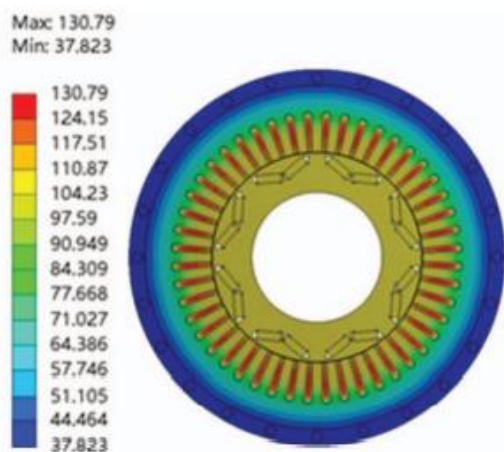


Figura 3.10 – Distribuição de temperatura em PMSM sob condição de refrigeração natural. Fonte: modificado de Cheng et al. (2020).

Os efeitos associados à elevação de temperatura no PMSM são divididos nos seguintes critérios, segundo Brenna et al. (2018): perdas reversíveis, que são revertidas após a normalização da temperatura do motor; perdas irreversíveis recuperáveis, relacionadas a desmagnetização parcial e possíveis de solução por meio de processo de remagnetização; e perdas irreversíveis irrecuperáveis, ocasionadas por temperaturas altíssimas a ponto de que a estrutura química dos ímãs seja modificada. Os autores também destacaram o importante fato de que a excitação de um PMSM, providenciada pelos ímãs do rotor, não pode ser removida enquanto a máquina esteja em rotação, mesmo em situações de curto circuito. A dificuldade em se reduzir a magnetização dos ímãs em caso de curtos circuitos, a exemplo dos curtos entre fases, pode implicar em situações perigosas de operação durante a ocorrência de faltas, não sendo o simples seccionamento uma solução para este cenário. A tabela 3.2 exhibe as temperaturas Curie acima das quais se torna possível a desmagnetização de diferentes materiais de ímãs permanentes, adicionalmente com valores limítrofes de temperaturas seguras de operação.

Tabela 3.2 – Temperaturas limítrofes estabelecidas para materiais magnéticos de PMSM.

| Material | Temperatura Curie (°C) | Temperatura máxima de segurança(°C) |
|----------|------------------------|-------------------------------------|
| NdFeB | 310 | 150 |
| SmCo | 750 | 300 |
| Alnico | 860 | 540 |
| Ferrite | 460 | 300 |

Fonte: modificado de Brenna et al. (2018).

Os métodos do estado da arte para a proteção do motor síncrono de ímãs permanentes, em favor da identificação de defeitos, fundamentam-se principalmente em ferramentas matemáticas, as quais conjuntamente com técnicas de processamento de dados coletados por sensores de tensão, corrente, e torque permitem a detecção de condições anormais de funcionamento. As técnicas de inteligência artificial também se mostram como potenciais ferramentas para a extração de informações que providenciem uma diferenciação assertiva entre condições normais e atípicas de operação, conforme Choi et al. (2018). A figura 3.11 representa um exemplo prático de sensor de temperatura utilizado na proteção térmica de PMSM.



Figura 3.11 – Sensor de termoresistência acoplado a ímãs de rotor de PMSM para medição de temperatura. Fonte: modificado de Choi et al. (2018).

A detecção de temperatura dos ímãs acoplados ao PMSM, no entanto, pode ser dificultada pelo fato de o rotor ser uma parte girante. Os métodos para detecção direta da temperatura dos ímãs podem ser baseados tanto em sensores de contato, a

exemplo dos termorresistores e termopares, como em sensores por infravermelho, sem contato. Os métodos de detecção que envolvem contato, embora mais precisos e de fácil obtenção, requerem sensores e dispositivos de transmissão de dados, e, portanto, implicam em maiores custos e redução da robustez do controle. Alternativamente, métodos sem a utilização de sensores foram desenvolvidos para estimação da temperatura dos ímãs a partir de parâmetros associados à temperatura, como os modelos térmicos baseados em método dos elementos finitos, injeção de sinais de alta frequência para medição de alterações de resistência e estimação com base em medição de variação da força contraeletromotriz (DING; GONG; GONG, 2020).

O desenvolvimento de máquinas dotadas de maior capacidade de tolerância a faltas (fault-tolerant machines) se intensificou nos anos recentes, também com relação ao PMSM, em que a introdução de sistemas redundantes possibilita a minimização das probabilidades de falha. Com base neste conceito, destaca-se a concepção dos motores síncronos de ímãs permanentes multifásicos, com número de fases isoladas e independentes superior a três, de acordo com Xu et al. (2020), a exemplo da configuração trifásica duplamente alimentada (DTP-PMSM) de acionamento mostrada na figura 3.12. A máquina é composta por dois conjuntos de enrolamentos trifásicos no estator, deslocados entre si por 30 graus elétricos, com dois pontos neutros isolados. A alimentação é fornecida por um inversor fonte de tensão de dois níveis e seis fases.

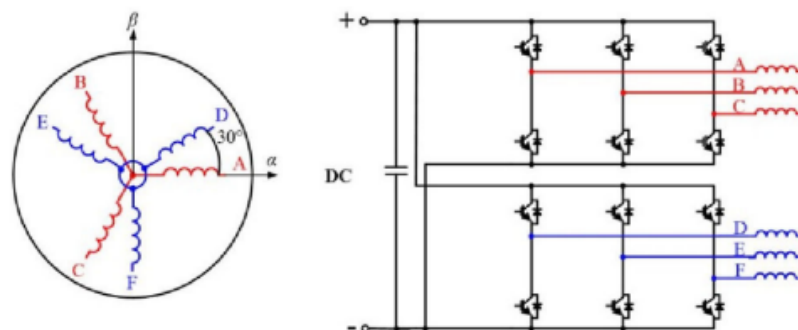


Figura 3.12 – Esquema de sistema de acionamento para PMSM de configuração duplamente alimentada. Fonte: modificado de Xu et al. (2020).

3.2 Comparativo entre acionamentos clássicos

3.2.1 Motor CC

De forma comparativa ao motor síncrono de ímãs permanentes de tração, objeto de estudo deste trabalho, detalham-se a seguir as principais características técnicas e operacionais do motor de corrente contínua, um dos principais equipamentos legados de tração elétrica e velocidade variável, popularizado por seus atributos de baixo custo e facilidade de controle, principalmente por meio dos conversores chaveados de potência. A estrutura construtiva básica do motor CC é constituída por um estator, formado por ímãs permanentes ou enrolamentos de campo, responsáveis por estabelecer no entreferro um fluxo magnético uniforme ou variável, respectivamente; e por um rotor, no qual ranhuras contêm o denominado enrolamento de armadura, em que ocorre a conversão eletromecânica de energia e a produção de torque. Destaca-se também a presença do mecanismo composto por comutador segmentado e escovas deslizantes de carvão, responsáveis pela energização contínua do enrolamento rotativo de armadura, sendo marcado, porém, pela desvantagem da ocorrência de indesejáveis desgastes causados por atrito mecânico. A figura 3.13 exhibe vista explodida e estrutura interna de um motor de corrente contínua elementar.

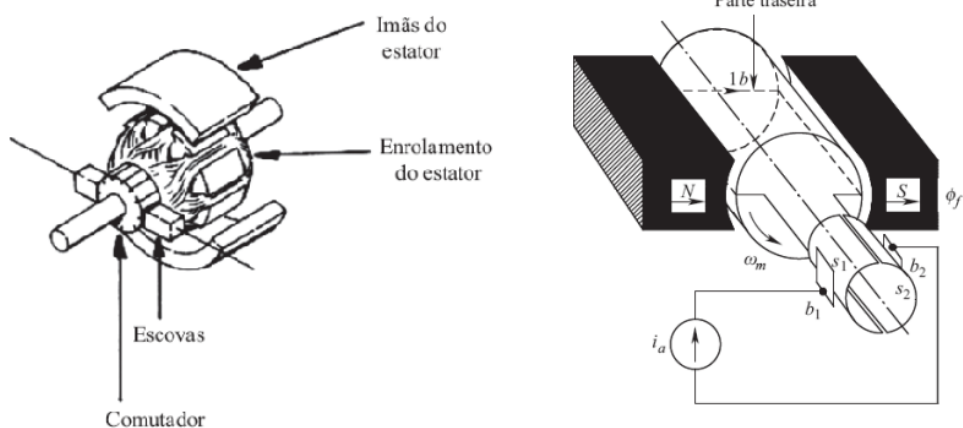


Figura 3.13 – Vista explodida e estrutura interna de motor CC elementar. Fonte: modificado de Mohan (2017).

A figura 3.14 ilustra um exemplo de circuito equivalente simplificado para motor de corrente contínua, em que o circuito de armadura é constituído por uma fonte ideal de tensão e uma resistência de armadura. O enrolamento de campo, responsável pela geração do fluxo magnético da máquina, por sua vez é composto por sua indutância e por uma resistência. As equações (3.11), (3.12), (3.13) e (3.14) avaliam respectivamente a tensão interna da máquina CC, o conjugado induzido desenvolvido, e as expressões circuitais simplificadas dos enrolamentos de armadura e campo.

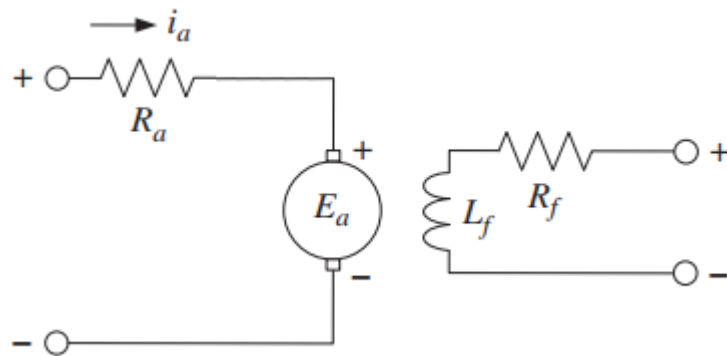


Figura 3.14 – Circuito equivalente simplificado de motor CC. Fonte: modificado de Hayes e Goodarzi (2017).

$$E_A = K\phi\omega \quad (3.11)$$

$$T_e = K\phi I_A \quad (3.12)$$

$$V_A = E_A + R_A I_A \quad (3.13)$$

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (3.14)$$

As vantagens da máquina de corrente contínua também advêm de sua flexibilidade operacional em termos das possibilidades topológicas de ligação para os circuitos de excitação, os quais podem ser configurados na forma de excitação independente, série, em derivação ou composta, entre enrolamentos de campo e de armadura. Na figura 3.15 é exibido gráfico comparativo para curvas características de velocidade em função de conjugado para os principais tipos de ligação do motor de corrente contínua. No motor CC série, de velocidade variável, o aumento de carga é acompanhado por

aumentos de corrente e fluxo de estator, tendo em consequência a queda de velocidade para que seja mantido o equilíbrio entre tensão aplicada e força contraeletromotriz, sendo um motor vantajoso para aplicações de elevada sobrecarga de conjugado e partida.

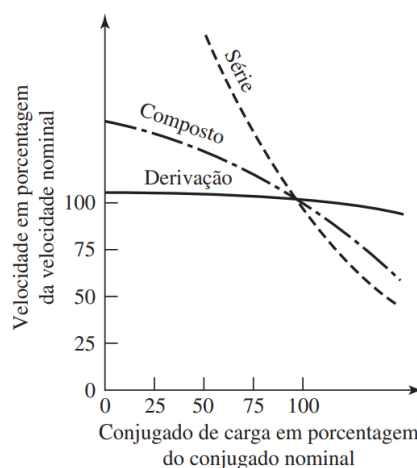


Figura 3.15 – Características de velocidade x conjugado de motores CC. Fonte: modificado de Umans (2014).

As características de desempenho especificamente associadas ao motor CC de excitação série, portanto, o destacam perante as topologias composta e em derivação para a utilização em acionamentos de tração, principalmente pelo fato de disponibilizar maior torque de partida, além de possibilitar menor incremento de corrente de armadura durante variações do esforço resistente (PIRES, 2013).

Os motores de corrente contínua de tração são usualmente planejados para operação também no modo gerador de frenagem regenerativa, com a conversão da energia cinética em elétrica durante os períodos de diminuição de velocidade, com base na inversão de sentido da corrente de armadura e em consequência do torque, permitindo uma operação flexível nos quatro quadrantes de torque-velocidade. A operação sob enfraquecimento de campo, por sua vez, possibilita o funcionamento em velocidades acima da nominal, por meio da redução proposital do fluxo de campo e em consequência da força contraeletromotriz induzida no rotor, limitando, no entanto, o torque fornecido devido à magnitude máxima da corrente de armadura (MOHAN, 2017).

3.2.2 Motor de indução

O motor assíncrono de indução destaca-se como o padrão predominante de mercado em termos de acionamentos de tração elétrica, incluído o modal ferroviário, nas décadas recentes. A título de comparação perante o PMSM de tração detalhado neste trabalho, são apresentadas a seguir as principais especificidades técnicas da máquina de indução. Reconhecido por seu baixo custo, resistência construtiva e aplicabilidade para operação em velocidade variável, o clássico motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo possui em seu estator enrolamentos trifásicos distribuídos e deslocados 120° entre si. A estrutura rotórica, por sua vez, é constituída por barras condutoras metálicas curto-circuitadas por meio de anéis, conforme exposto por Mohan (2017). Na figura 3.16 pode ser visualizada representação dos eixos dos enrolamentos estatóricos de motor assíncrono, juntamente com ilustração de respectivo rotor do tipo gaiola de esquilo.

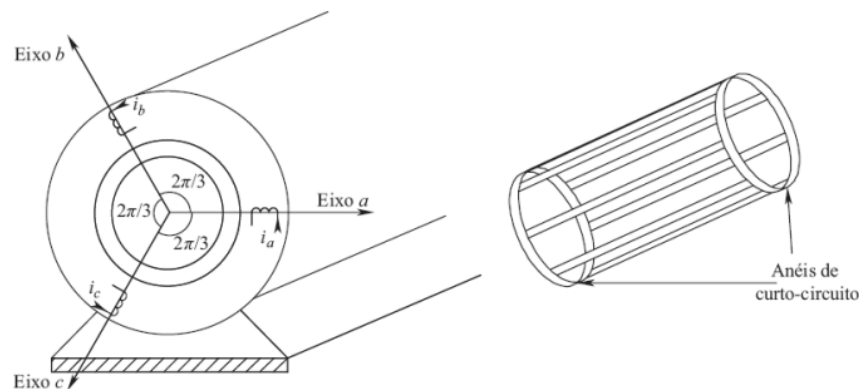


Figura 3.16 – Eixos dos enrolamentos de estator trifásico e rotor tipo gaiola de esquilo de motor de indução. Fonte: modificado de Mohan (2017).

No motor de indução, assim como ocorre para a máquina síncrona e o PMSM, um fluxo magnético girante é estabelecido no entreferro a partir da alimentação do estator, com velocidade síncrona também avaliada pela equação (3.2) anteriormente apresentada, em função do número de polos do estator e a frequência da tensão neste aplicada. No rotor, diferentemente, as correntes são induzidas por ação de transformador, por intermédio dos enrolamentos estatóricos, quando o rotor atravessa a onda de fluxo síncrono. O motor de indução apenas produz conjugado quando a velocidade de rotor é diferente da velocidade síncrona, sendo estabelecido um

importante parâmetro para o estudo da operação do motor assíncrono, o escorregamento, mostrado na equação (3.15), que expressa uma relação percentual de diferença entre a velocidade síncrona do campo e a velocidade do rotor. A frequência de escorregamento é apresentada na equação (3.16), em função da frequência da alimentação do estator.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.15)$$

$$f_r = sf_e \quad (3.16)$$

Um circuito equivalente monofásico simplificado, exibido na figura 3.17, pode ser estabelecido para o motor polifásico de indução equilibrado em regime permanente, em termos da tensão de fase de terminal do estator, a força contraeletromotriz gerada pelo fluxo de entreferro resultante, a corrente do estator e a resistência efetiva e reatância de dispersão do estator. A equação (3.17) expressa matematicamente o circuito apresentado (UMANS, 2014).

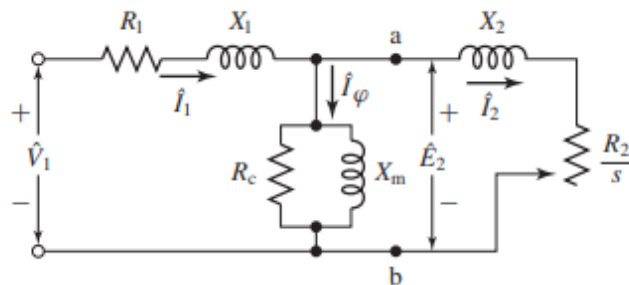


Figura 3.17 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução polifásico. Fonte: modificado de Umans (2014).

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (3.17)$$

Importantes características adicionais de operação da máquina de indução podem ser observadas a partir da curva de conjugado versus velocidade, mostrada na figura 3.18. Conforme anteriormente apontado, o conjugado induzido do motor é nulo na velocidade síncrona, além do fato de que existe um conjugado máximo a não ser excedido, de tipicamente duas a três vezes o conjugado nominal de plena carga. Na hipótese de o rotor da máquina assíncrona ser acionado em velocidade superior à

velocidade síncrona, ocorre uma inversão de sentido do conjugado induzido, de forma que a máquina atue como um gerador. As equações (3.18) e (3.19) expõem relações equivalentes ao conjugado induzido do motor de indução, em função das magnitudes de campo magnético, velocidade síncrona e potência de entreferro, que atravessa a lacuna de ar existente entre estator e rotor.

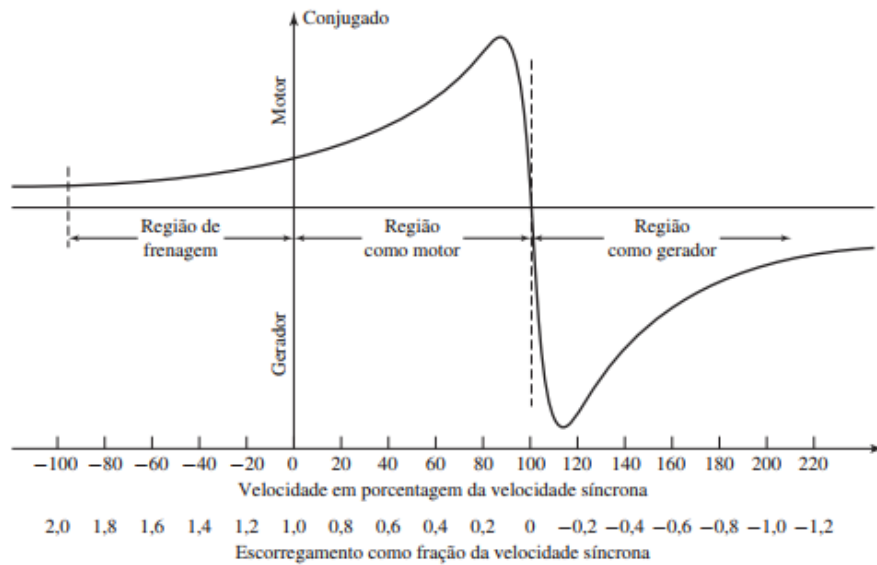


Figura 3.18 – Curva característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução, mostrando as faixas estendidas de operação (região de frenagem e região como gerador). Fonte: modificado de Umans (2014).

$$T_{ind} = k B_{rot} B_{liq} s e n \delta \quad (3.18)$$

$$T_{ind} = \frac{P_{ef}}{\omega_s} \quad (3.19)$$

3.2.3 Custos e investimento

O custo de produção de uma máquina elétrica, a exemplo do motor síncrono de ímãs permanentes, é função de diversas variáveis mercadológicas e construtivas, segundo Gieras (2009), dentre elas: o número de máquinas do mesmo tipo fabricadas anualmente, os equipamentos e automações utilizados na manufatura, a organização do processo produtivo e a qualidade dos materiais empregados, o que dificulta a concepção de um modelo matemático genérico de custos. De modo geral, consideram-se os custos dos enrolamentos, núcleo ferromagnético, ímãs

permanentes, eixo e demais subcomponentes independentes. Liu et al. (2009) reforçaram que o custo do PMSM de tração é dependente principalmente da quantidade de materiais magnéticos permanentes utilizados, o que por sua vez guarda relação com a configuração geométrica construtiva adotada. Em termos não apenas construtivos, mas também sistêmicos, destaca-se que o motor assíncrono de indução, como principal concorrente do PMSM de tração, permite diferentemente nesta aplicação a utilização de um único inversor para o controle de múltiplos motores, o que também resulta diretamente em menores custos comparativamente para este acionamento, de acordo com Takahashi et al. (2020). Os inversores disponibilizados no mercado para o acionamento do motor síncrono de ímãs permanentes também tendem a apresentar maior custo perante os concebidos para o controle de motores de indução, principalmente em termos da operação no modo enfraquecimento de campo.

Diferentes métodos são propostos na literatura para o alcance da diminuição do custo construtivo do motor síncrono de ímãs permanentes, principalmente no que diz respeito à utilização dos ímãs de terras raras. Petrov e Pyrhonen (2013), por exemplo, realizaram estudo acerca do desempenho de materiais magnéticos de menor custo, como a ferrite, em substituição às unidades de terras raras, apresentando desempenho satisfatório, no entanto, apenas para aplicações industriais de baixa potência. Em termos geométricos, Belahcen et al. (2016) ressaltaram em seu trabalho os resultados indicativos de que a topologia de formato quadrado para os ímãs interiores de IPMSM de tração implica em rotores de menor custo comparativamente aos de formato arqueado. Em torno de aspectos relacionados ao acionamento do PMSM, e também conforme anteriormente mencionado e destacado por Poza et al. (2013), evidencia-se a redução de custos providenciada pela introdução das técnicas “sensorless” de controle. A escolha do sistema apropriado de refrigeração para o PMSM ferroviário de tração também representa uma importante variável em termos de custos (CHENG et al., 2020).

O estudo econômico efetuado por Douglas et al. (2016) apresentou o fato de que a substituição das máquinas de indução por equivalentes motores síncronos de ímãs permanentes, em termos da aplicação em tração para diferentes categorias de ferrovias, requisita um considerável investimento devido às adaptações necessárias

em termos de diferenças no acionamento eletrônico e redes de proteção, mesmo considerando a melhoria da eficiência energética e a utilização das técnicas de frenagem regenerativa. Os autores consideraram a premissa de que para a substituição pudesse ser classificada como comercialmente viável, o valor dispendido devesse poder ser recuperado em um período razoável de tempo. Portanto, com base nos custos construtivos e na economia de energia idealizada, os cálculos dos prazos de retorno dos investimentos indicaram uma alta viabilidade e benefício da introdução do PMSM em ferrovias urbanas e de alta velocidade, com períodos avaliados entre dez e vinte anos para a recuperação dos investimentos.

3.2.4 Manutenção e desempenho

A escolha de motores de tração apropriados para a aplicação em veículos ferroviários envolve tipicamente o atendimento a requisitos de durabilidade e robustez, segundo Soualmi et al. (2011), além do alinhamento a características de peso, vibrações e ruído reduzidos, alta eficiência e manutenção facilitada. As máquinas de corrente alternada, como o motor de indução e o PMSM, se tornaram predominantes no uso em tração elétrica ferroviária, em substituição aos motores de corrente contínua, principalmente devido ao regime menos intensivo de manutenção aliado à maior confiabilidade e densidade de potência incrementada, conforme Douglas et al. (2016). O perfil de baixa manutenção associado ao motor síncrono de ímãs permanentes, combinado a seu design compacto, resultou em torna-lo altamente aplicável em sistemas de tração ferroviária (ACAMPA; PIZZO; RIZZO, 2007).

Um fator que contribui para a minimização dos índices de manutenção do PMSM de tração é a adoção de uma configuração construtiva totalmente fechada sem ventilação forçada, em contraste, por exemplo, ao motor de indução autoventilado, o que atua por reduzir a ocorrência de contaminações por poeira e em consequência a necessidade de limpezas periódicas, de acordo com Shikata et al. (2012). A figura 3.19 exhibe o interior de um PMSM utilizado por quatro anos de serviço em operação do metrô de Tóquio, sem sinais aparentes do ingresso de poeira.



Figura 3.19 – Interior de motor síncrono de ímãs permanentes ferroviário após 361.000 quilômetros em serviço no metrô de Tóquio. Fonte: modificado de Shikata et al. (2012).

Em termos gerais acerca do acionamento do PMSM, a possibilidade da utilização de estratégias “sensorless” de controle, anteriormente apresentadas, também permite a redução das paradas para manutenção, juntamente com a incrementação da confiabilidade, segundo Poza et al. (2013). A obsolescência de inversores, no entanto, é um fator que pode representar a geração de custos operacionais adicionais a longo prazo, considerando que, no caso de defeito de um inversor de geração anterior, a substituição por uma nova unidade seja possivelmente a única solução disponível no mercado. No caso da escolha pelo acionamento direto do PMSM, sem caixas de redução, também é verificada uma facilitação do processo de manutenção e redução de respectivos custos e perdas, providenciada pela não necessidade da manutenção de engrenagens e reposição de óleo, ausentes neste tipo de acionamento (FUNIERU; BINDER, 2008).

Como destacado por Lutonin, Shklyarskiy e Shklyarskiy (2020), o motor síncrono de ímãs permanentes de tração se mostra como uma escolha potencial para aplicações em que uma relação de peso por potência reduzida é essencial, apresentando superior desempenho neste contexto perante outros tipos de acionamento. O IPMSM de tração é idealizado para fornecer boa característica de torque em baixas velocidades, além de capacidade de enfraquecimento de campo em operação sob altas velocidades, o que depende diretamente de parâmetros geométricos do motor, como as características e disposição dos ímãs permanentes no rotor (BELAHCEN et al., 2016).

Cheng et al. (2020) apontam que, com base no desenvolvimento tecnológico, os requisitos em termos do desempenho de uma máquina elétrica se tornam cada vez mais rigorosos, principalmente em termos de níveis de confiabilidade, sendo a temperatura um importante fator com potencial de influência sobre o PMSM e seus componentes, o que requisita a efetivação de análises térmicas e introdução de técnicas apropriadas de resfriamento. Os ímãs permanentes tendem a desempenhar melhor em baixas temperaturas, o que exige o fornecimento de menores correntes de estator para a geração de determinado torque, impactando diretamente, portanto, nos níveis de consumo energético (KREUAWAN et al., 2007).

3.2.5 Economia de energia e eficiência energética

O motor síncrono de ímãs permanentes, conforme anteriormente apresentado, destaca-se como uma alternativa ao motor assíncrono de indução em aplicações a exemplo da tração elétrica ferroviária, devido sua eficiência energética incrementada. Koerner, Cai e Adam (2017) reforçam que a eficiência superior do PMSM se deve principalmente às perdas extremamente baixas no rotor, com valores típicos de eficiência para o PMSM avaliados entre 95% e 97%, em contraste a valores entre 93% a 95% para o motor de indução, seu principal concorrente. A otimização do design rotórico do motor síncrono de ímãs permanentes é um dos principais métodos para o alcance do pico de eficiência de 97%, por intermédio do aprimoramento da forma de onda da densidade magnética do entreferro (WEI et al., 2018).

Conforme Acampa, Pizzo e Rizzo (2007), as altas densidades de potência e torque do PMSM, aliadas à capacidade de fornecimento de torque constante mesmo em baixas velocidades, atuam por reduzir a massa do equipamento de tração, possibilitando também a implementação de acionamentos compactos e diretos (sem engrenagens), ou ao menos na forma de caixas com relação de velocidades reduzida, características que contribuem diretamente para a elevação dos índices de eficiência da máquina.

De acordo com Liu e Sheng (2011), o elevado consumo de eletricidade dispendido em operações de tráfego ferroviário urbano é composto por significativa parcela de perdas nos motores de tração e sistemas de controle. Neste contexto, portanto, os motores

síncronos de ímãs permanentes de alta eficiência atuam por desempenhar um importante papel em favor do aumento da eficiência energética. Douglas et al. (2016) pontuaram que entre 10% e 15% da energia elétrica consumida em sistemas de tração ferroviária é associada a perdas em elementos mecânicos de transmissão, sendo o PMSM não apenas capaz de minimizar estas perdas, mas também de elevar sua eficiência energética por meio de métodos de frenagem regenerativa. A introdução de técnicas de controle baseadas em máximo torque por ampere também é potencialmente considerada como uma forma para a otimização energética do motor síncrono de ímãs permanentes (LUO et al., 2020).

3.3 Dinâmica do movimento e simulação de marcha

3.3.1 Características mecânicas e cinemáticas

O estudo da dinâmica do movimento em sistemas ferroviários é caracterizado pela análise da locomoção espacial e temporal dos veículos em questão, em termos tridimensionais da direção longitudinal, transversal e vertical, considerando variáveis cinemáticas tais como: deslocamento, velocidade, aceleração e solavanco, a variação temporal da aceleração. O movimento pode ser diversificado dentre translação, rotação e oscilação, a depender de características das vias em relação às rampas e curvas (PIRES, 2013).

Os sistemas de tração elétrica baseiam-se na combinação entre acionamentos elétricos e a mecânica complexa de cargas de tração. Por meio do atrito entre rodas e trilho, o torque produzido pelos motores é transferido para as rodas em forma de força, impulsionando o trem por meio de um mecanismo conhecido como aderência, cuja força é expressa pela equação (3.20), sendo habilidade na qual a roda exerce um máximo esforço motor de tração sobre os trilhos, mantendo contato sem que haja deslizamento. Nas condições de aceleração e frenagem ocorre um desbalanço dinâmico entre a força de aderência e a força exercida pelo motor, limitada pela aderência, o que pode implicar em deslizamento e escorregamento. O atrito estático é responsável por prevenir a ocorrência destes fenômenos, sendo o atrito dinâmico atuante em condições de rodagem sob velocidade constante (HALDER; AGARWAL; SRIVASTAVA, 2015).

$$F_a = \mu N \quad (3.20)$$

Ainda de acordo com Halder, Agarwal e Srivastava (2015), o modelo dinâmico simplificado de um trem em um sistema de tração pode ser representado por uma equação diferencial de primeira ordem apresentada pela equação (3.21), em termos da massa e esforço resistente ao movimento do trem, velocidade e esforço motor.

$$M \frac{dv}{dt} = F_M - R_M - Mgsen\theta \quad (3.21)$$

A curva de esforço motor exibida na figura 3.20 descreve o torque tipicamente fornecido por um acionamento de tração elétrica ferroviária. Os motores de tração providenciam usualmente torque constante em baixas velocidades, de forma que a potência entregue se eleve gradualmente até o máximo valor. Em sequência ao atingimento da magnitude limítrofe de potência, o acionamento opera na região denominada de potência constante (enfraquecimento de campo), com o decréscimo do torque perante a incrementação da velocidade (DOUGLAS et al., 2016).

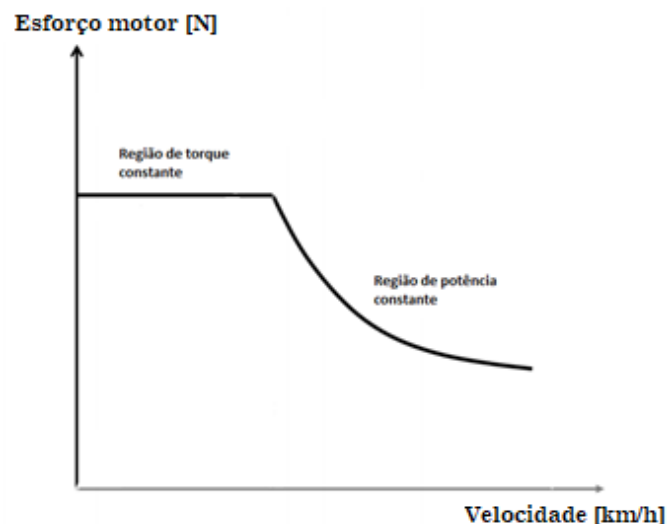


Figura 3.20 – Curva de esforço motor para veículos ferroviários. Fonte: modificado de Douglas et al. (2016).

Zhao et al. (2008) destacam que enquanto a operação do PMSM de tração na região de torque constante permite o estabelecimento de um torque de saída de elevado valor, com base em estratégia de controle por fluxo uniforme para situações de partida

e aceleração, a operação na região de potência constante por sua vez é utilizada na regulação de tensão e frequência da alimentação após o atingimento da tensão máxima de tração, de modo a permitir a entrega de potência de magnitude constante.

Conforme ressaltado por Brenna et al. (2018), no movimento ferroviário o esforço motor de tração pode ser incrementado até o alcance do limite da aderência, a partir do qual a roda passa a escorregar. A aderência natural fundamenta-se no efeito combinado e reversível de deformações elásticas e micro deslizamentos, sendo uma condição que se impõe mesmo em situações de frenagem. O coeficiente de aderência é dependente de parâmetros associados desde a velocidade até características de interface entre as rodas e respectivas superfícies de contato, variando tipicamente entre valores experimentais de 0,15 até 0,85, em relação aos materiais envolvidos e trilhos sob condições secas ou úmidas. De modo geral, em locomotivas ferroviárias o esforço motor é transmitido por diversas interfaces mecânicas até que seja aplicado nas rodas, de modo que cada veículo seja composto por conjuntos de rodeiros (pares de rodas interligado por eixo) e truques. Na figura 3.21 é mostrado exemplo de truque de um veículo ferroviário, enquanto na figura 3.22 são representadas principais forças atuantes em roda de trem.



Figura 3.21 – Truque de um veículo ferroviário. Fonte: modificado de Brenna et al. (2018).

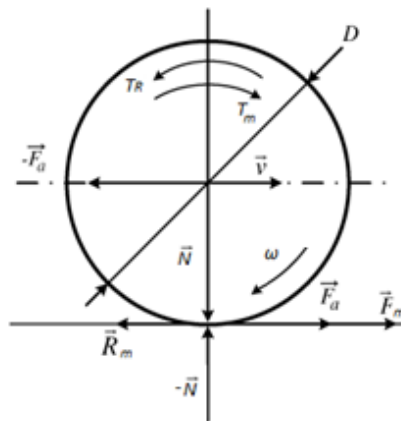


Figura 3.22 – Forças atuantes em roda de trem. Fonte: modificado de Brenna et al. (2018).

O esforço total resistente ao movimento R_m pode ser considerado como uma composição de forças resistentes que atuam em oposição ao deslocamento do trem, especificamente: em termos da resistência normal ao movimento R_0 , composta pela resistência devido ao rolamento R_1 , sendo esta a soma da resistência R'_1 devido à interface mecânica eixo-rolamento com a resistência R''_1 relacionada à interface roda-superfície de contato, e da resistência do ar R_2 ; e pela resistência suplementar combinada R_e , formada pela soma da resistência R_c devido às curvas e R_i devido às rampas. São válidas, portanto, as seguintes relações apresentadas nas equações (3.22), (3.23) e (3.24), conforme Brenna et al. (2018):

$$R_m = R_0 + R_e \quad (3.22)$$

$$R_0 = R_1 + R_2 = R'_1 + R''_1 + R_2 \quad (3.23)$$

$$R_e = R_i + R_c \quad (3.24)$$

De acordo com Pires (2013), a resistência aerodinâmica do ar depende diretamente da área e do formato da parte frontal do trem, agindo por atrito sobre as faces laterais e por aspiração na cauda da composição, crescendo rapidamente com a velocidade. A resistência devido às rampas, por sua vez é função do ângulo da inclinação a ser eventualmente superada por determinada composição, enquanto a resistência às curvas é caracterizada pela solidariedade de rodas e eixos, paralelismo dos eixos e por ação da força centrífuga. Uma forma adicional de representação da resistência

normal ao movimento ocorre pela equação (3.25), denominada fórmula de Davis, dependente da velocidade, e de parâmetros associados às resistências mecânicas de rolamento e atrito (coeficientes A e B) e do ar (coeficiente C). Valores típicos para os coeficientes são visualizados na tabela 3.3, em termos da massa média e área de seção frontal de cada tipo de veículo ferroviário. Os parâmetros para veículos do tipo Locomotiva e Carro serão utilizados posteriormente para a realização do estudo de caso do trabalho.

$$R_0 = A + BV + CV^2 \quad (3.25)$$

Tabela 3.3 – Coeficientes A, B e C da fórmula de Davis.

| Veículo | A [N/kN] | B [N·h/kN·km] | C [N·h ² /kN·km ²] |
|-----------------|----------------------------|---------------|---|
| Locomotiva | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,00932 | 0,00456·s _v /m _v |
| Carro | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,00932 | 0,000645·s _v /m _v |
| Vagão | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,01405 | 0,000945·s _v /m _v |
| Carro líder | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,01405 | 0,00456·s _v /m _v |
| Carro comandado | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,01405 | 0,000645·s _v /m _v |
| Carro motor | 0,65+13,15/m _{ev} | 0,028 | 0,00456·s _v /m _v |

Fonte: modificado de Pires (2013).

A simulação de marcha, também conforme Pires (2013), é uma ferramenta computacional de modelagem matemática para estudo ponto a ponto de características elétricas e cinemáticas dos sistemas de tração ferroviária, com base em dados geométricos das linhas e vias, como extensão, curvas, rampas e estações, além de parâmetros das composições, a exemplo de massa, propriedades do acionamento e esforço motor. A simulação de marcha possibilita o cálculo do desempenho de composições em determinado percurso ferroviário, de modo a permitir o dimensionamento do sistema de tração elétrica por meio do fornecimento de resultados do trem, como posição, velocidade, aceleração, tempo de percurso, esforço motor, potência desenvolvida e corrente demandada. O ciclo de tração de um trem, representado tipicamente pela figura 3.23, caracteriza a curva de velocidade da composição em função da velocidade ou espaço, contemplando as fases de partida, intermédio, regime, deslizamento, freagem e parada.

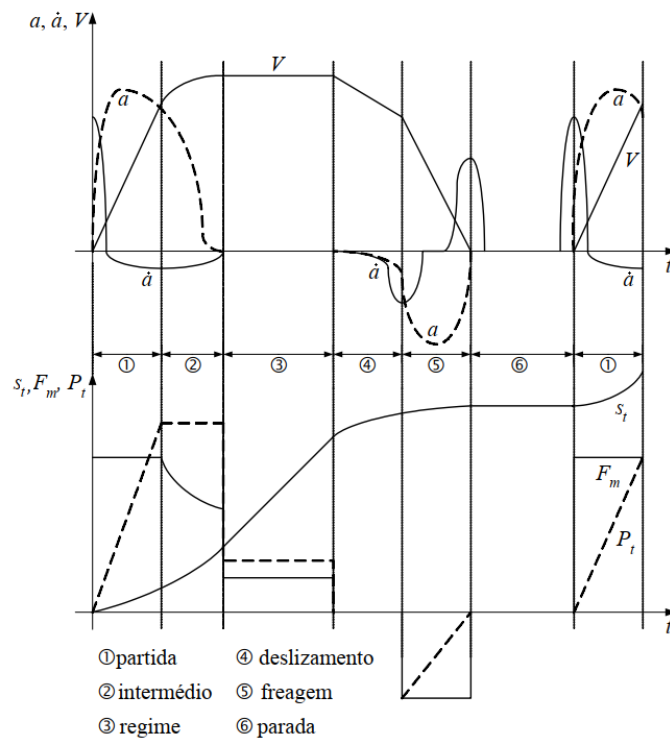


Figura 3.23 – Comportamento de variáveis durante ciclo de tração. Fonte: modificado de Pires (2013).

3.3.2 Características elétricas e frenagem regenerativa

De acordo com Koerner, Cai e Adam (2017), o desenvolvimento do motor síncrono de ímãs permanentes de tração nas últimas décadas abrangeu a concepção de unidades de potência nominal variando predominantemente entre 150kW e 2500kW, com intervalos de torque máximo fornecido entre 1500Nm e 13500Nm. O PMSM, além da sua reconhecida eficiência incrementada, também pode ser projetado e operado para que a energia cinética proveniente dos momentos de frenagem possa ser convertida em energia elétrica reutilizável, minimizando as perdas que ocorreriam em forma de calor, de acordo com Abraham e Ashok (2016). Embora tradicionalmente o esforço máximo de frenagem para um trem fosse providenciado predominantemente por um sistema mecânico de frenagem, a frenagem dinâmica se tornou recorrente nos acionamentos elétricos de tração ferroviária, com posterior recuperação de energia para linhas receptivas, sendo o motor síncrono de ímãs permanentes capaz de aplicar a frenagem elétrica inclusive em velocidades menores do que as possíveis para o motor de indução, segundo Douglas et al. (2016).

Kondou e Matsuoka (1997) ressaltam que, do ponto de vista de preservação dos dispositivos de frenagem mecânica e maximização da eficiência energética, a frenagem regenerativa deve ser providenciada pelo PMSM de tração ferroviária desde o intervalo relativo às mais baixas velocidades. A figura 3.24 exhibe curvas características típicas de frenagem mecânica e dinâmica para trem-unidade elétrica (EMU).

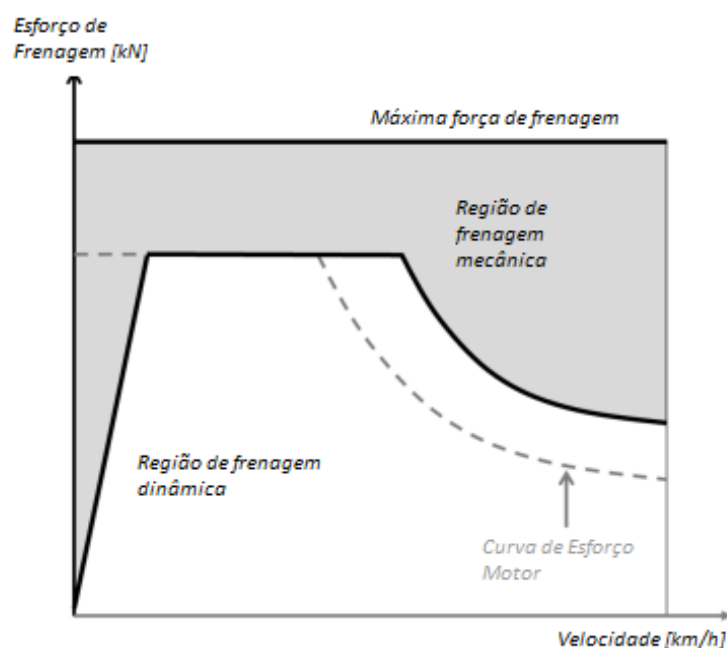


Figura 3.24 – Características de frenagem mecânica e dinâmica para trem-unidade elétrica. Fonte: modificado de Douglas et al. (2016).

A frenagem dinâmica, complementar à frenagem mecânica por atrito, se fundamenta na transformação da energia cinética oriunda da frenagem da composição em energia elétrica internamente aos motores de tração, sendo posteriormente dissipada em resistores. A frenagem regenerativa, por sua vez, possibilita a transferência da energia recuperada para as linhas de contato, de modo que possa ser consumida por outros trens ou armazenada em acumuladores para uso posterior. Destaca-se que o estudo das técnicas de otimização da eficiência energética em ferrovias requisita um criterioso dimensionamento das redes elétricas de alimentação, contemplando a aplicação de métodos específicos de análise de variáveis, sendo a simulação elétrica, de forma adicional à simulação de marcha, a solução do circuito de tração ferroviária com base em parâmetros de posição, tempo, e dados fornecidos pela simulação de

tráfego (PIRES, 2013). Na figura 3.25 são apresentadas na forma de diagrama de blocos as principais etapas, entradas e saídas de dados para as fases de simulação de um sistema de tração elétrica ferroviária, em que se destaca a simulação de marcha, base da ferramenta utilizada para a realização do estudo de caso do trabalho.

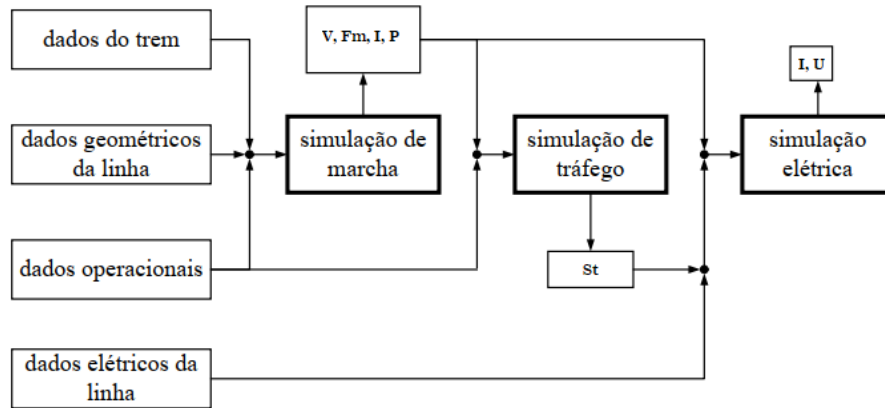


Figura 3.25 – Visão geral da simulação de sistema de tração elétrica ferroviária. Fonte: modificado de Pires (2006).

Neste capítulo foram desenvolvidas as bases metodológicas necessárias para a realização do estudo de caso do trabalho e entendimento das aplicações práticas relacionadas ao tema, apresentados a partir do próximo capítulo.

4. APLICAÇÕES

Dentre os casos de aplicação do motor síncrono de ímãs permanentes em ferrovias ao redor do mundo citados na literatura, destaca-se inicialmente o desenvolvimento e introdução do PMSM de tração no Metrô de Tóquio, conforme publicado por Shikata et al. (2012), tendo sido demonstrados resultados expressivos em termos da incrementação da eficiência energética, redução de ruídos em até 5dB e facilitação da manutenção, principalmente perante os motores assíncronos anteriormente empregados. Com início dos testes no ano de 2007, com base no trem Série 01 da Linha Ginza, o acionamento em questão iniciou sua operação comercial a partir de 2010, com a introdução do PMSM nos trens Série 16000 da Linha Chiyoda, em sequência com a implantação também nas composições Série 1000 da Linha Ginza em 2012. Na figura 4.1 está representado o trem Série 01 acima citado e a aparência externa do PMSM introduzido.



Figura 4.1 – Composição Série 01 da Linha Ginza do Metrô de Tóquio e respectivo PMSM. Fonte: modificado de Shikata et al. (2012).

Ressaltam-se os índices de redução do consumo de energia identificados após a introdução do motor síncrono de ímãs permanentes nas linhas do Metrô de Tóquio, variando entre 10% a 41%, a depender da configuração do acionamento e metodologia de controle empregada. Na tabela 4.1 são apontadas as especificações do PMSM adotado na composição Série 01 da Linha Ginza.

Tabela 4.1 – Especificações de PMSM do Metrô de Tóquio

| Item | Especificações |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Número de fases | 3 |
| Número de polos | 4 |
| Sistema de refrigeração | Totalmente fechado sem ventilador |
| Potência nominal | 120 kW |
| Tensão nominal | 400 V |
| Corrente nominal | 198 A |
| Eficiência | 96% |
| Fator de potência | 0,915 |
| Rotação nominal | 1890 rpm |
| Frequência nominal | 63 Hz |
| Rotação máxima | 3664 rpm |
| Massa | 610 kg |

Fonte: modificado de Shikata et al. (2012).

Um exemplo de utilização do motor síncrono de ímãs permanentes em veículos ferroviários de piso totalmente baixo, como bondes, com base na propulsão direta sem o uso de caixas de velocidades, é ressaltado em Peroutka et al. (2009), em que foi analisada a introdução do acionamento em questão em bondes na República Checa. A alta densidade de torque do modelo de PMSM de ímãs superficiais concebido, de dimensões reduzidas, permitiu que a máquina fosse individualmente implementada em cada roda, totalizando dezesseis motores de 46,6kW por cada composição. O sistema de propulsão individual para cada roda possibilitou o alcance de aderência total do bonde, com o projeto resultando em ganhos de eficiência e otimização do consumo de energia, também com a maximização do número de passageiros transportados. Na figura 4.2 é representado conceito de truque do bonde anteriormente mencionado, fundamentado em acionamento direto com base em PMSM.

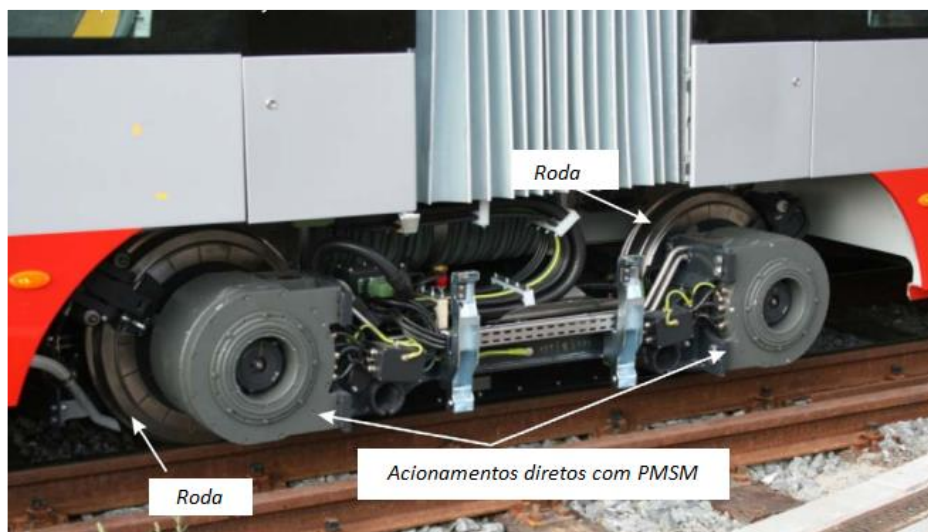


Figura 4.2 – Conceito de truque de bonde baseado em acionamentos diretos com PMSM. Fonte: modificado de Peroutka et al. (2009).

Diversas referências à introdução do PMSM em ferrovias de alta velocidade também são mencionados na literatura, com destaque para estudos experimentais e casos reais de aplicação em operação. Na Alemanha, Koerner, Cai e Adam (2017) detalharam o desenvolvimento de motores síncronos de ímãs permanentes de 680kW, com estrutura totalmente fechada e autoventilada, para aplicação em trens de alta velocidade, em substituição às máquinas de indução anteriormente utilizadas, de 510kW cada e estrutura aberta com ventilação forçada. O torque de partida dos PMSM's desenvolvidos, com eficiência de 97%, superou em 50% o verificado nos motores de indução antes utilizados, especificados respectivamente com eficiência de 96%. Notou-se, no entanto, o requisito de cada PMSM ser controlado individualmente por um único inversor dedicado, enquanto os motores de indução anteriores podiam operar alimentados em grupo de até quatro máquinas por inversor.

A conhecida maior densidade de potência do PMSM permitiu que 12 máquinas do tipo substituíssem respectivamente até 16 motores assíncronos, otimizando indicadores de custos, eficiência energética e manutenção. Testes práticos realizados em trem de alta velocidade na Rússia, equipado com PMSM's baseados no estudo que fora realizado na Alemanha, provaram a economia de até 5% em termos de energia consumida, comparativamente a trem similar previamente equipado com motores de indução. Na figura 4.3 pode ser visualizada via gráfico comparação experimental de

consumo energético em função do tempo para o trem mencionado, considerando os testes com motores síncronos de ímãs permanentes e máquinas de indução.

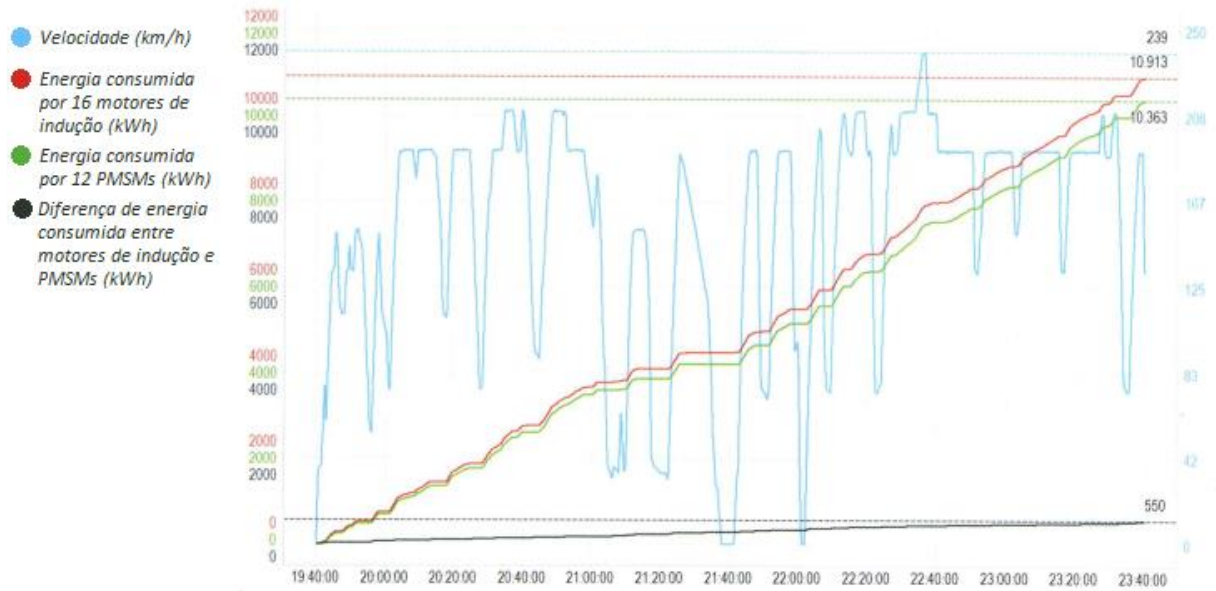


Figura 4.3 – Comparação experimental entre consumo de energia de motores de indução e síncronos de ímãs permanentes aplicados em trem de alta velocidade. Fonte: modificado de Koerner, Cai e Adam (2017).

5. ESTUDO DE CASO

A seguir é proposto o estudo de caso deste trabalho, em que uma análise comparativa é efetuada entre a aplicação do motor síncrono de ímãs permanentes em alternativa à máquina de indução em futura linha ferroviária urbana brasileira, o Trem Intercidades (TIC) eixo-norte, regional do estado de São Paulo. Não foi considerado o motor de corrente contínua no estudo de caso, devido suas desvantagens anteriormente apresentadas, como a presença de escovas, e relativa obsolescência na aplicação em questão.

A operação do Trem Intercidades, de acordo com a Secretaria dos Transportes Metropolitanos (2021a), atenderá as demandas de serviços expresso e parador, interligando uma extensão de 101km entre as cidades de São Paulo, Jundiaí e Campinas, conforme figura 5.1, com tempo de viagem de aproximadamente 1 hora em períodos de pico. As composições elétricas da referida linha são planejadas para alcançar a velocidade máxima de 140km/h com altos níveis de aceleração, comportando um número de passageiros sentados superior a 800.

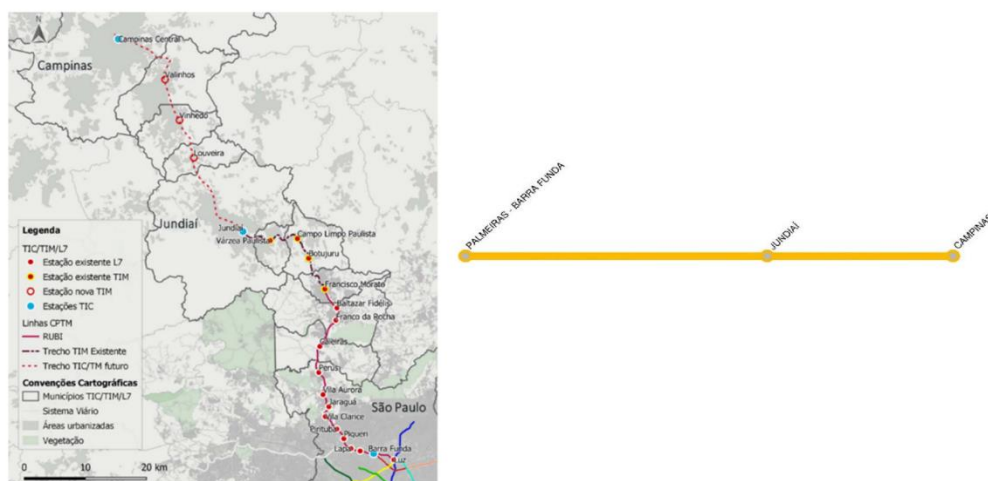


Figura 5.1 Abrangência geográfica dos serviços e estações de parada do Trem Intercidades. Fonte: modificado de Secretaria dos Transportes Metropolitanos (2021a).

A realização das simulações de marcha e elétrica serão possibilitadas neste trabalho pela aplicação da ferramenta computacional desenvolvida por Pires (2006), denominada EBahn e baseada em linguagem C++ e bibliotecas MATLAB. Os resultados a serem obtidos por meio do estudo de caso fornecerão dados para

processamento e análise de informações associadas principalmente a índices de eficiência, potência, esforços envolvidos, consumo e economia de energia, em função de parâmetros como os de velocidade e deslocamento dos trens na referida linha.

Os dados de entrada a serem fornecidos ao software de simulação de marcha serão relacionados aos aspectos técnicos das vias, bem como às propriedades do trem, em termos de características das composições e acionamentos, por intermédio também da respectiva fórmula de Davis. A partir disto, conclusões poderão ser avaliadas principalmente acerca dos níveis de eficiência energética do PMSM perante o motor de indução, com base nas especificidades do tipo de composição e rede ferroviária em estudo.

O modelo de composição considerado para o estudo de caso será formado por uma locomotiva elétrica exclusiva de tração, sem salão de passageiros, acoplada a seis carros de passageiros de dois andares sem tração própria. A locomotiva de tração será baseada no modelo Bombardier ALP-46, enquanto os carros de passageiros serão inspirados no Bombardier MultiLevel Coach, ambos utilizados no sistema ferroviário de Nova Jersey e apresentados na figura 5.2.



Figura 5.2 – Locomotiva Bombardier ALP-46 e carros MultiLevel Coach do sistema ferroviário de Nova Jersey. Fonte: modificado de Wikipedia (2022a).

Nas tabelas 5.1 e 5.2 a seguir são apresentadas respectivamente especificações técnicas principais da locomotiva ALP-46 e do carro ferroviário MultiLevel Coach:

Tabela 5.1 – Especificações da locomotiva Bombardier ALP-46.

| Item | Especificações |
|---|---|
| Tipo de Tração | Elétrica |
| Bitola | 1.435mm |
| Comprimento | 19,56m |
| Largura | 2,95m |
| Altura | 4,47m |
| Carga por eixo | 22.500kg |
| Massa da locomotiva | 90.000kg |
| Sistema de alimentação AC trifásico (Catenária) | 12,5kV 25Hz / 12,5kV 60Hz / 25kV 60Hz |
| Coletor de corrente | Pantógrafo |
| Velocidade máxima | 161km/h |
| Potência | 5.300kW |
| Esforço motor de partida | 316kN |
| Esforço motor contínuo (a 80km/h) | 245kN |
| Esforço dinâmico de frenagem | 150kN |

Fonte: modificado de Wikipedia (2022a).

Tabela 5.2 – Especificações do carro Bombardier MultiLevel Coach.

| Item | Especificações |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Capacidade de passageiros | 127 a 142 |
| Comprimento | 25,91m |
| Largura | 3,05m |
| Altura | 4,42m |
| Altura do piso | 1,295m |
| Velocidade máxima | 177km/h |
| Massa | 60.323kg |
| Sistema de frenagem | Disco pneumático e sapata de freio |
| Bitola | 1.435mm |
| Frequência nominal | 63Hz |
| Sistema de alimentação AC trifásico | 480V 60Hz / 12,5kV-25kV |

Fonte: modificado de Wikipedia (2022b).

Conforme a Secretaria dos Transportes Metropolitanos (2021b), as premissas técnicas específicas definidas para as composições do Serviço Expresso do Trem Intercidades indicam que as locomotivas e carros deverão operar em vias de bitola de 1,60m, com alimentação via catenária de 3,0kV CC. Os trens unidades poderão ser do tipo Single Decker de 12 carros com 300m, ou Double Decker de 150m de extensão, atingindo velocidade de 120km/h ou superior. No estudo de caso será adotado o modelo de dois andares, por oferecer maior capacidade de passageiros sem necessitar o uso de grandes plataformas nas estações (METROCPTM, 2022).

Ainda segundo a Secretaria dos Transportes Metropolitanos, os trens deverão dispor de uma aceleração não inferior a $0,7\text{m/s}^2$, em situação de carga nominal com via reta e em nível, tendo aceleração final sob velocidade máxima operacional de ao menos $0,25\text{m/s}^2$, e devendo o solavanco não ultrapassar $0,6\text{m/s}^3$ a qualquer velocidade. Na tabela 5.3 são apresentados parâmetros obrigatórios para a via permanente do Trem Expresso Intercidades.

Tabela 5.3 – Critérios de projetos para via permanente do Trem Expresso Intercidades.

| Item | Parâmetro |
|---|-----------|
| Raio mínimo desejável de curva circular | 650m |
| Tangente mínima entre curvas | 20m |
| Rampa máxima | 4% |
| Bitola | 1.600mm |

Fonte: modificado de Secretaria dos Transportes Metropolitanos (2021b).

A aplicação das expressões apontadas na tabela 3.3 permitem a obtenção numérica dos coeficientes da fórmula de Davis para os modelos de locomotiva e carro de passageiros adotados para o estudo de caso, inicialmente considerando o uso de motores de indução, mostrados respectivamente nas tabelas 5.4 e 5.5. Os coeficientes foram transformados dos valores específicos, em N/kN, para valores absolutos, em N, por meio da multiplicação pelo peso em kN de cada veículo. A tabela 5.6 contém os coeficientes da fórmula de Davis para o modelo de composição, sendo cada parâmetro da composição composto pela soma do respectivo parâmetro associado à locomotiva com seis parâmetros do modelo de carro. As curvas de resistência normal ao movimento em função da velocidade de deslocamento da locomotiva, do carro e por final da composição, baseadas na equação (3.25) da fórmula de Davis, são exibidas nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5 respectivamente.

Tabela 5.4 – Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de locomotiva do estudo de caso considerando uso de motores de indução.

| Coeficiente | Valor |
|--|-------------|
| A [N] | 1088,78 |
| B [N·h/km] | 8,22024 |
| C [N·h ² /km ²] | 0,589278312 |

Fonte: Autor.

Tabela 5.5 – Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de carro de passageiros do estudo de caso.

| Coeficiente | Valor |
|--|-------------|
| A [N] | 899,73751 |
| B [N·h/km] | 5,509661528 |
| C [N·h ² /km ²] | 0,085213401 |

Fonte: Autor.

Tabela 5.6 – Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução.

| Coeficiente | Valor |
|--|-------------|
| A [N] | 6487,20506 |
| B [N·h/km] | 41,27820917 |
| C [N·h ² /km ²] | 1,100558718 |

Fonte: Autor.

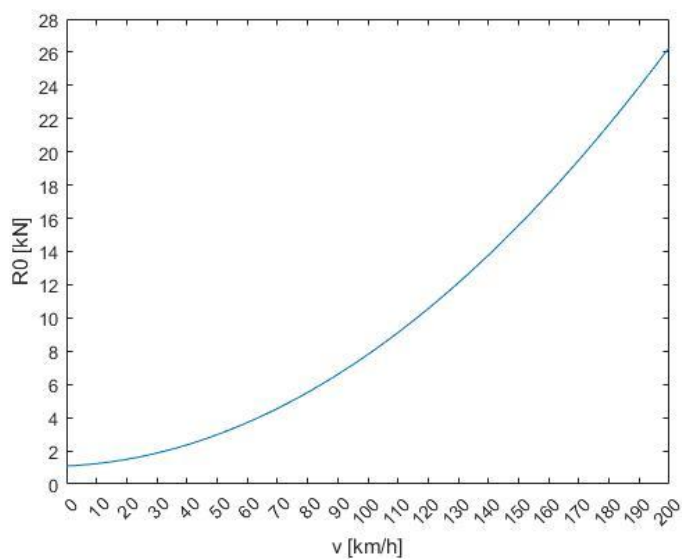


Figura 5.3 – Curva da fórmula de Davis para modelo de locomotiva do estudo de caso considerando uso de motores de indução. Fonte: Autor.

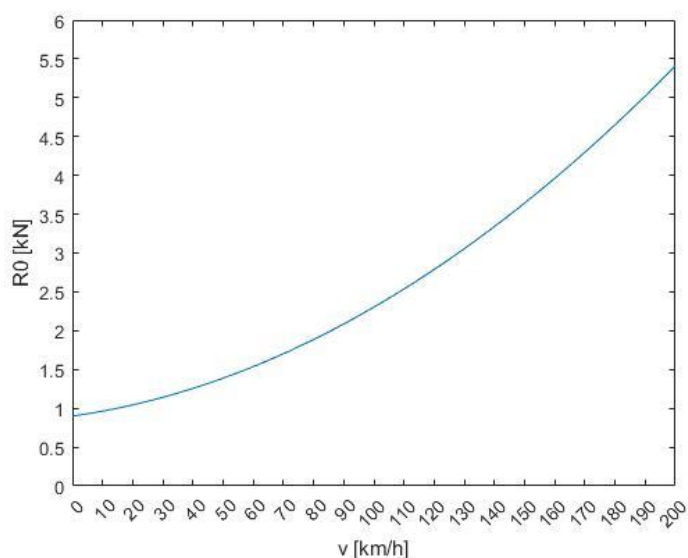


Figura 5.4 – Curva da fórmula de Davis para modelo de carro de passageiros do estudo de caso.

Fonte: Autor.

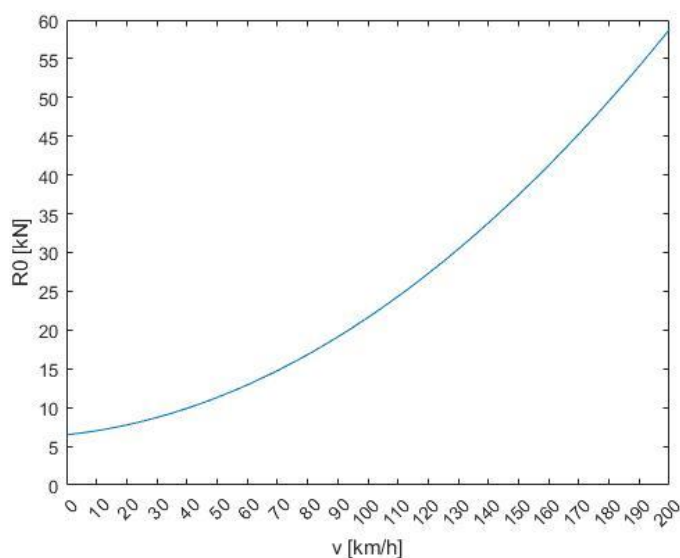


Figura 5.5 – Curva da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução. Fonte: Autor.

A curva de esforço motor em função da velocidade da composição, composta por uma locomotiva acoplada a seis carros, totalizando 451,938 toneladas de massa, válida para ambos os regimes de aceleração e frenagem, será obtida abaixo a partir da aceleração nominal de $0,7\text{m/s}^2$, por meio da equação resultante (5.1).

$$F_m - (R_0 + R_i + R_c) = m' \cdot a \quad (5.1)$$

A curva é composta por duas regiões, esforço motor constante e potência constante, que juntas compõem uma envoltória. Para o cálculo do esforço motor constante, será considerada velocidade nula e a aceleração nominal, enquanto a potência constante será proveniente da potência mecânica dos motores. Considerando que rampas e curvas são variáveis ao longo da via, serão consideradas nulas as respectivas resistências associadas. O termo R_0 , por sua vez, será equivalente ao coeficiente A da fórmula de Davis da composição, já que foi adotada velocidade zero. Portanto tem-se a equação (5.2), sendo a massa de inércia m' da composição equivalente ao produto da massa da composição pelo fator ξ de inércia das massas girantes (valor médio de 1,1 para o trem completo):

$$F_m = A + m' \cdot a \quad (5.2)$$

A seguir tem-se o desenvolvimento numérico da equação (5.2), por meio das expressões (5.3), (5.4) e (5.5), para a obtenção do valor de esforço motor da região constante.

$$F_m = 6,48720506 + 451,938 \cdot 1,1 \cdot 0,7 \quad (5.3)$$

$$F_m = 6,48720506 + 347,99226 \quad (5.4)$$

$$F_m = 354,4794651 \text{ [kN]} \quad (5.5)$$

Caso fossem utilizados os valores nominais de esforço motor contínuo e de partida apresentados na tabela 5.1, especificamente de 316 kN para o esforço de partida, a aceleração nominal teria a amplitude obtida pela expressão (5.7), desenvolvida a partir da equação (5.6), não atendendo a aceleração nominal estabelecida de $0,7\text{m/s}^2$.

$$F_m = 316 \text{ [kN]} = 6,48720506 + 451,938 \cdot 1,1 \cdot a \quad (5.6)$$

$$a = 0,622 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (5.7)$$

Portanto, será considerado o esforço motor contínuo obtido pela equação (5.5), calculado para atender a aceleração nominal.

O esforço motor da região de potência constante, por sua vez, é obtido pela equação (5.8), desenvolvida numericamente nas expressões (5.9) e (5.10), em função da velocidade da composição e da potência total entregue pelos motores da locomotiva, resultando na curva de forma conhecida como hipérbole de equipotência.

$$F_m = \frac{P \cdot 3,6}{V} \quad (5.8)$$

$$F_m = \frac{5300 \cdot 3,6}{V} \quad (5.9)$$

$$F_m = \frac{19080}{V} [kN] \quad (5.10)$$

Tendo em vista que aceleração na velocidade máxima deverá ser de ao menos 0,25m/s², uma terceira curva será introduzida na envoltória, a curva de potência reduzida, que será obtida pelo cálculo do esforço motor avaliado agora para a velocidade máxima de 140km/h e para a aceleração mínima apontada. Neste ponto, no entanto, o esforço obedecerá a uma proporção do tipo 1/V², ao invés de 1/V (potência constante). Analogamente ao visto para a equação (5.2), tem-se para esta condição o desenvolvimento das equações (5.11), (5.12), (5.13) e (5.14).

$$F_{m'} = A + BV + CV^2 + m' \cdot a \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} F_{m'} &= 6,48720506 + 0,04127820917V + \dots \\ &\dots 0,00110055871V^2 + 451,938 \cdot 1,1 \cdot 0,25 \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} F_{m'} &= 6,48720506 + 0,04127820917(140) + \dots \\ &\dots 0,00110055871(140^2) + 124,28295 \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$F_{m'} = 158,1200551 [kN] \quad (5.14)$$

A curva do esforço motor na região de potência reduzida é fornecida pela equação (5.15), desenvolvida numericamente nas expressões (5.16) e (5.17).

$$F_m = \frac{F_{m,r} \cdot V_{max}^2}{V^2} \quad (5.15)$$

$$F_m = \frac{158,1200551 \cdot (140)^2}{V^2} \quad (5.16)$$

$$F_m = \frac{3099153,079}{V^2} [kN] \quad (5.17)$$

A figura 5.6 exibe o gráfico de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso, considerando uso de motores de indução, contendo as regiões de esforço constante, potência constante e potência reduzida, tendo ao fundo a comparação com a curva da fórmula de Davis da composição.

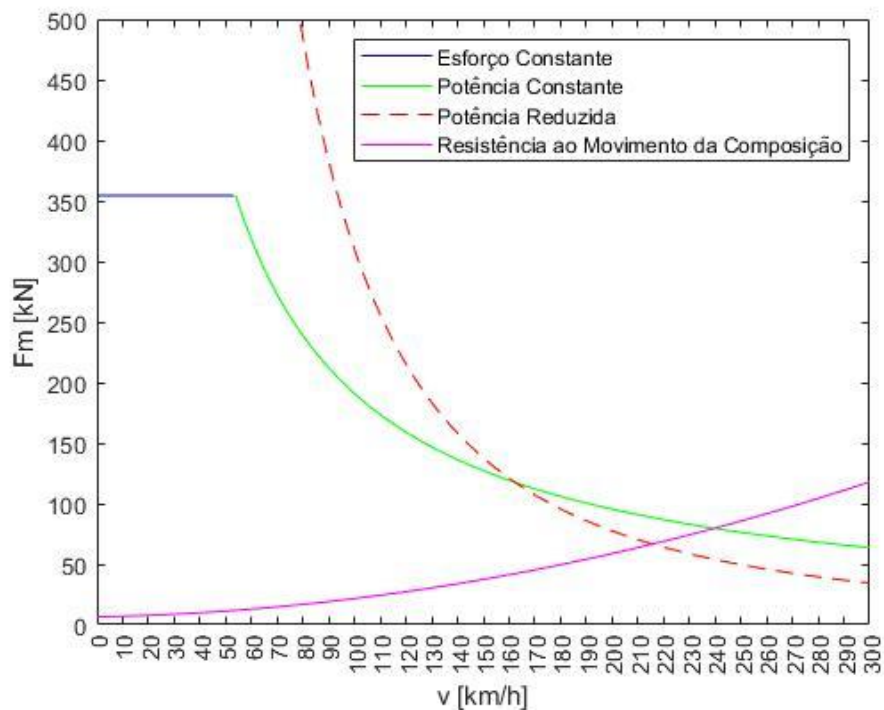


Figura 5.6 – Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução. Fonte: Autor.

A partir do esforço máximo de freagem da locomotiva obtido na tabela 5.1, é obtida a curva de esforço de freagem em função da velocidade da composição, mostrada na figura 5.7, composta pela região de esforço constante de freagem e pela região de potência constante de freagem, analogamente ao verificado para a curva de esforço motor, em função da potência dos quatro motores da locomotiva, que totalizam 5.300kW, tanto considerando a adoção de motores de indução quanto para o uso de PMSM's.

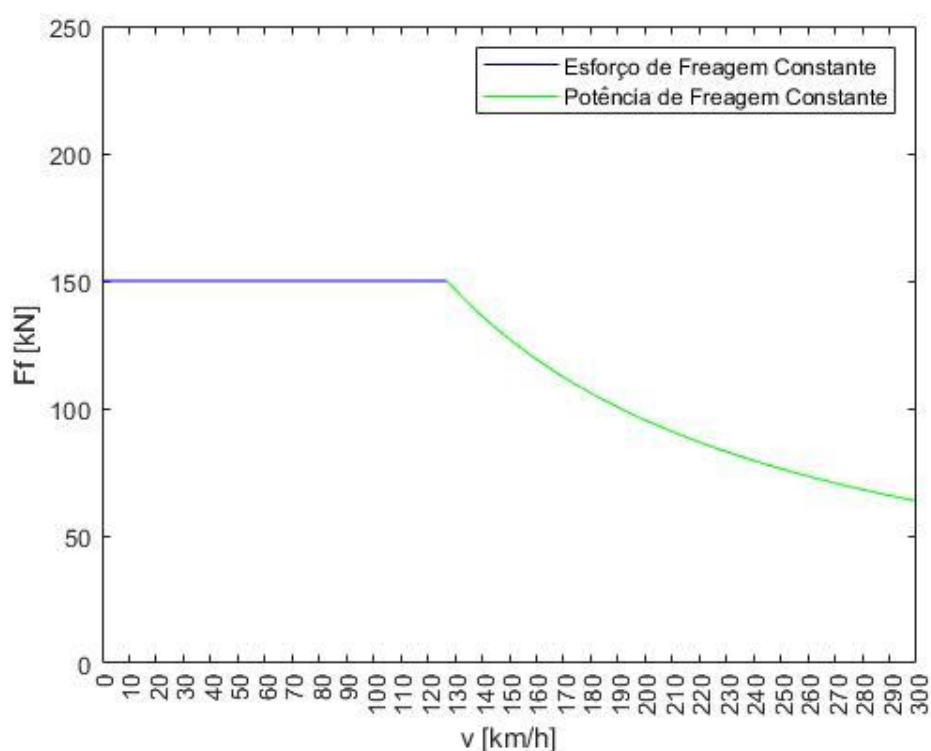


Figura 5.7 – Curva de esforço de freagem em função da velocidade para a composição do estudo de caso. Fonte: Autor.

A seguir serão obtidas as curvas de esforço motor e resistência ao movimento em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando agora uso de motores síncronos de ímãs permanentes, conforme figura 5.8. As curvas refletirão na prática a vantagem da menor massa do PMSM para a mesma potência total de 5.300kW da locomotiva, segmentada entre quatro máquinas de 1.325kW, em relação ao motor de indução.

Serão aplicados os valores de massa de 1.152kg, para cada um dos quatro PMSM's da locomotiva do estudo de caso, introduzidos após a subtração da massa de 1.472

kg de cada motor de indução da massa total da locomotiva. As massas dos motores foram obtidas por meio dos índices de densidade de potência, respectivamente de 0,9kW/kg para o motor de indução e de 1,15kW/kg para o PMSM, referenciados de Alstom (2015). Com a aplicação dos PMSM's, a massa da locomotiva é reduzida para 88,720 toneladas, que somadas às massas de seis carros de 60,323 toneladas cada, totalizam a composição de 450,658 toneladas. Portanto, uma redução total de 1280kg em comparação à composição anteriormente com motores de indução. A tabela 5.7 exibe os coeficientes da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's.

Tabela 5.7 – Coeficientes da fórmula de Davis para modelo de composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's.

| Coeficiente | Valor |
|--|-------------|
| A [N] | 6479,05146 |
| B [N·h/km] | 41,16129909 |
| C [N·h ² /km ²] | 1,100558718 |

Diferentemente do motor de indução, o PMSM não contempla em suas curvas características de esforço motor a ocorrência da terceira região, de potência reduzida, de acordo com Madichetty, Mishra e Basu (2021).

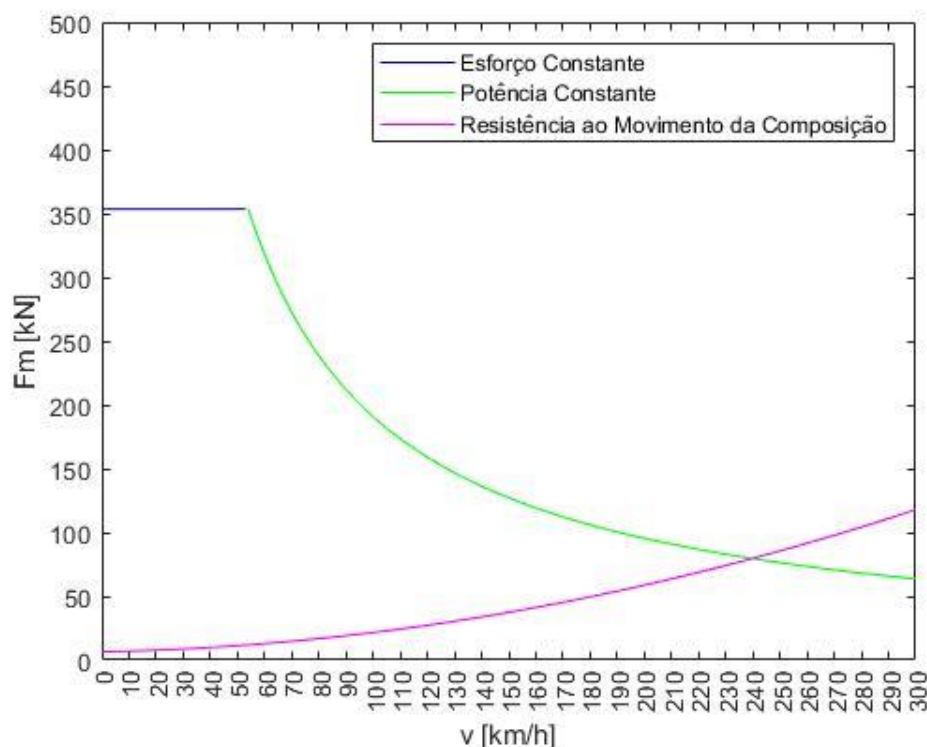


Figura 5.8 – Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's. Fonte: Autor.

Curvas de eficiência percentual em função da velocidade (km/h) da composição para os modelos de motor de indução e PMSM de ímãs internos (IPMSM) adotados nas simulações do estudo de caso, representadas na figura 5.9, foram obtidas a partir de Sandberg (2010), como uma simplificação para a realização o estudo de caso do trabalho, sem, portanto, considerar a influência dos valores de torque nos índices de eficiência. Para a avaliação da eficiência global da composição, foi considerada a eficiência de 0,98 para os mecanismos de transmissão (redutores), de acordo com Pires (2013), assim como 0,98 de eficiência também para o acionamento eletrônico, conforme Douglas et al. (2016), ambas as eficiências fixas em função da velocidade. A transformação de valores em rpm para km/h foi realizada considerando diâmetro da roda da locomotiva ALP-46 de 1.118mm, como indicado em Bombardier (2008), além da relação de transmissão de valor 1:3,714 apontada em Allenbach (2016) para a locomotiva ALP-45, similar à locomotiva do estudo de caso. Adicionalmente, apresenta-se a figura 5.10 como um exemplo de modelo de mapa tipicamente utilizado para a avaliação da eficiência de motores de tração e acionamentos eletrônicos de

controle, em que há a influência das magnitudes de toque adicionalmente às velocidades em relação aos níveis de eficiência.

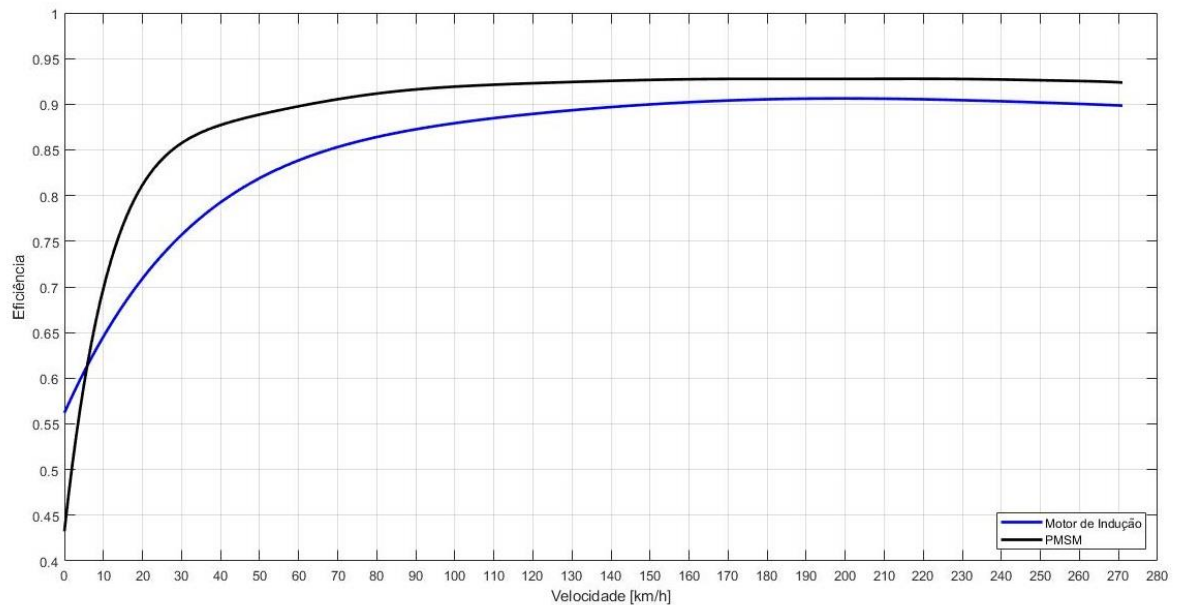


Figura 5.9 – Curvas de eficiência em função da velocidade para motor de indução e PMSM considerados no estudo de caso. Fonte: Autor.

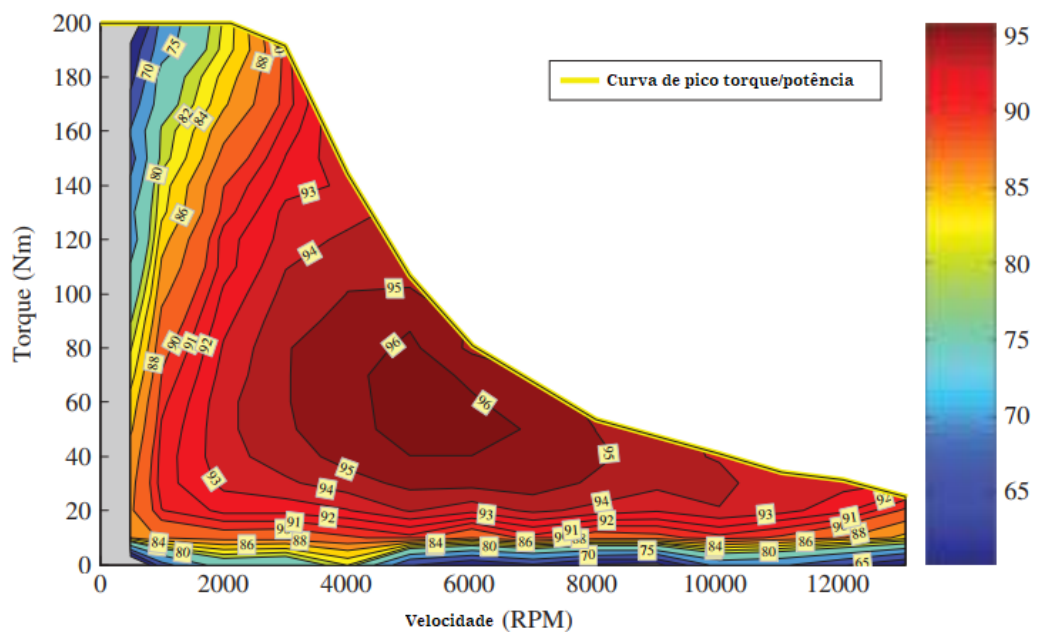


Figura 5.10 – Exemplo de mapa de eficiência para motor de tração. Fonte: modificado de Hayes e Goodarzi (2017).

6. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados do trabalho, com as curvas obtidas por meio da simulação de marcha para a ferrovia do estudo de caso, considerando as respectivas composições com aplicação de motores de indução e PMSM's. Os gráficos exibem as variações temporais de velocidade, figuras 6.1, 6.5, 6.9 e 6.13; esforço motor, figuras 6.2, 6.6, 6.10 e 6.14; corrente elétrica coletada, figuras 6.3, 6.7, 6.11 e 6.15; e potência elétrica demandada para cada composição, figuras 6.4, 6.8, 6.12 e 6.16; com estações de parada respectivamente em Barra Funda, Jundiaí e Campinas, contemplando o tráfego nos dois sentidos.

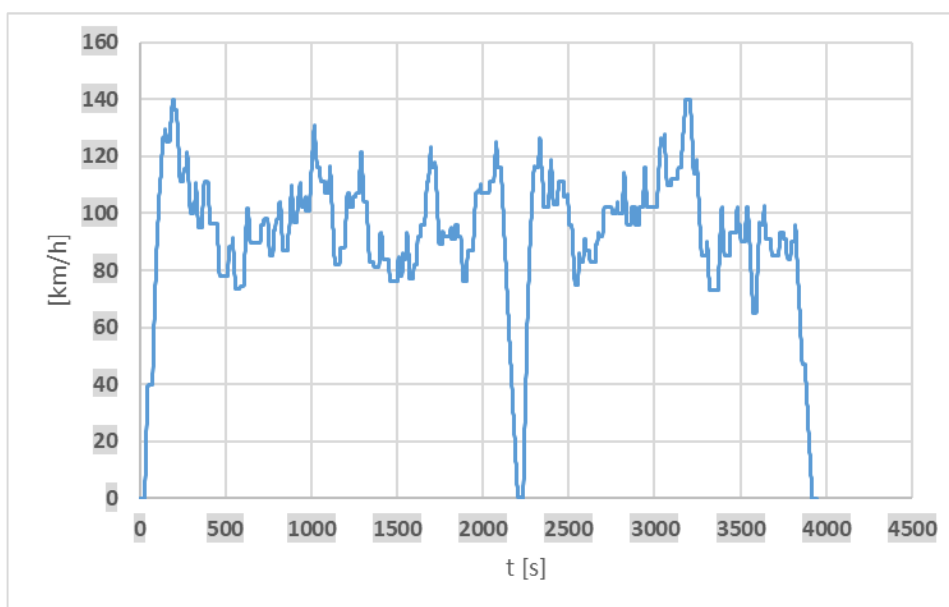


Figura 6.1 – Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução. Fonte: Autor.

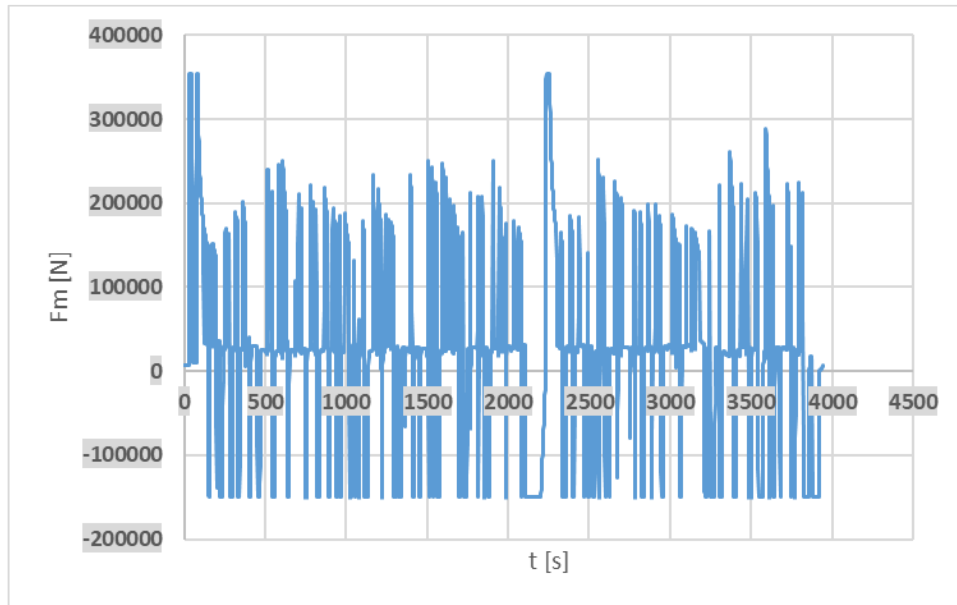


Figura 6.2 – Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução. Fonte: Autor.

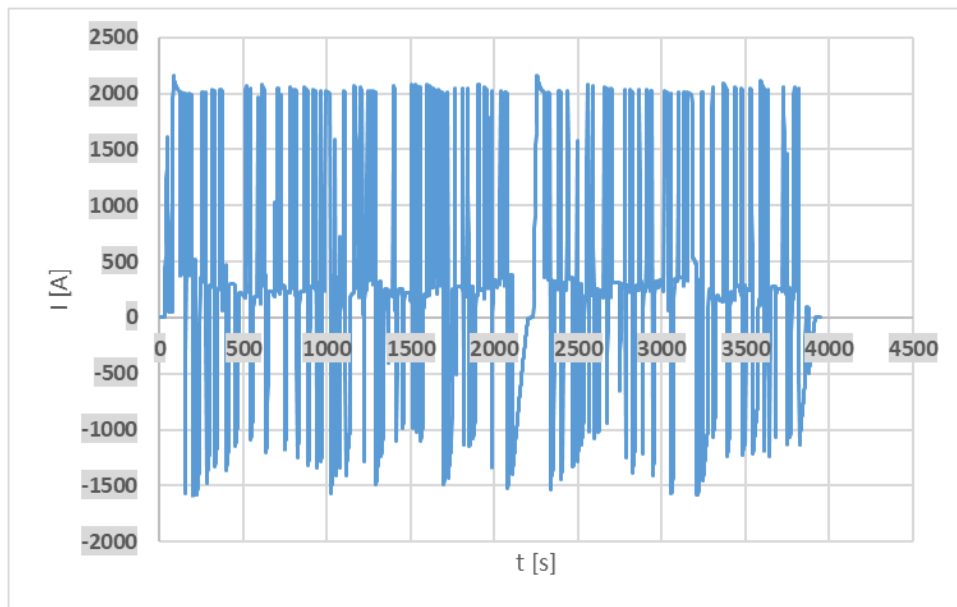


Figura 6.3 – Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução. Fonte: Autor.

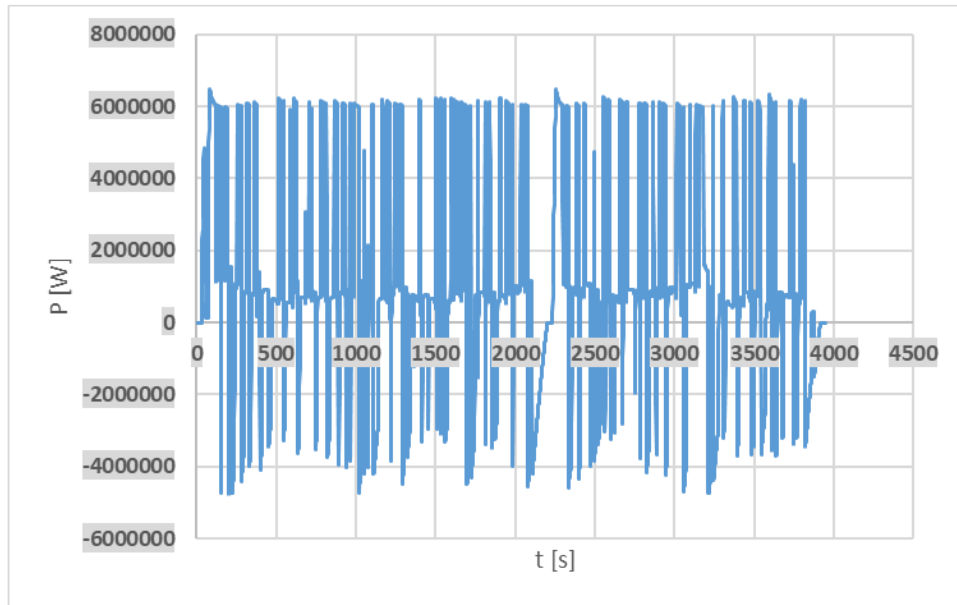


Figura 6.4 – Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com motores de indução. Fonte: Autor.

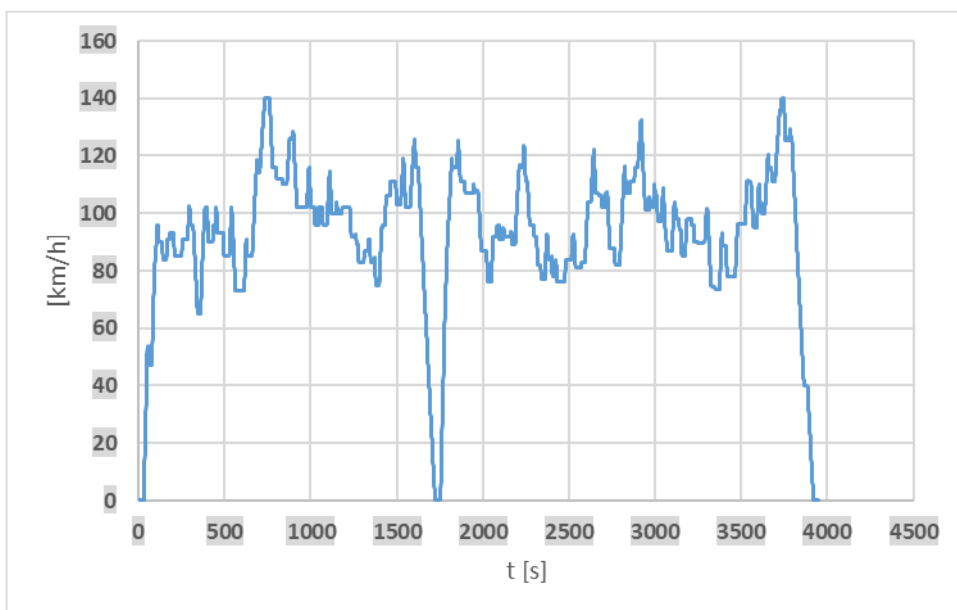


Figura 6.5 – Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução. Fonte: Autor.

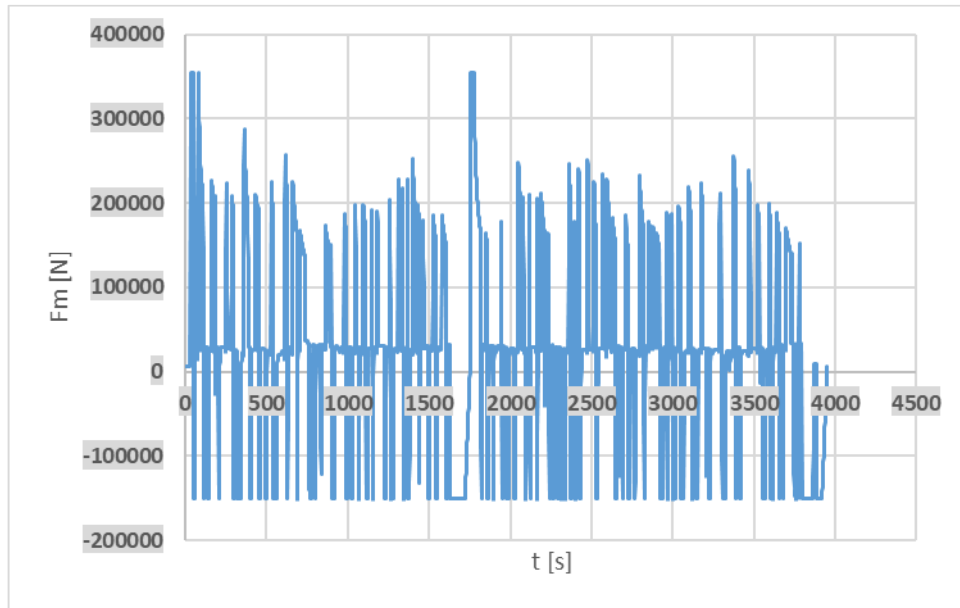


Figura 6.6 – Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas Barra – Funda com motores de indução. Fonte: Autor.

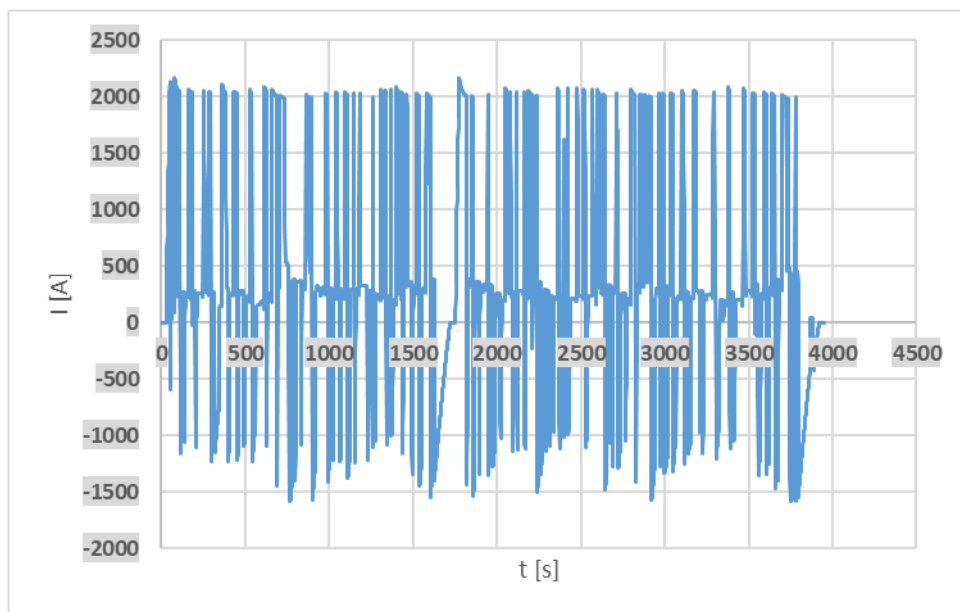


Figura 6.7 – Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução. Fonte: Autor.

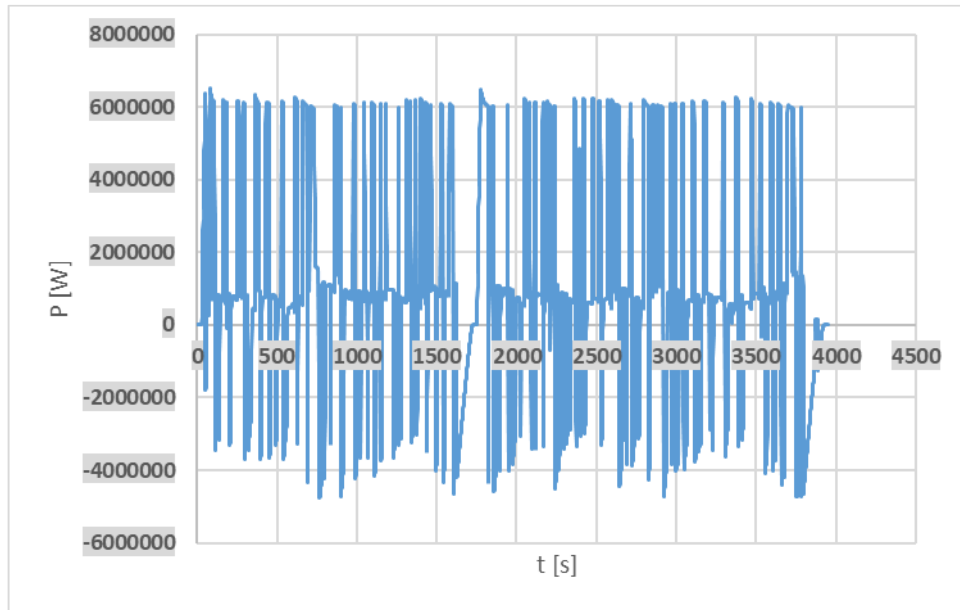


Figura 6.8 – Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com motores de indução. Fonte: Autor.

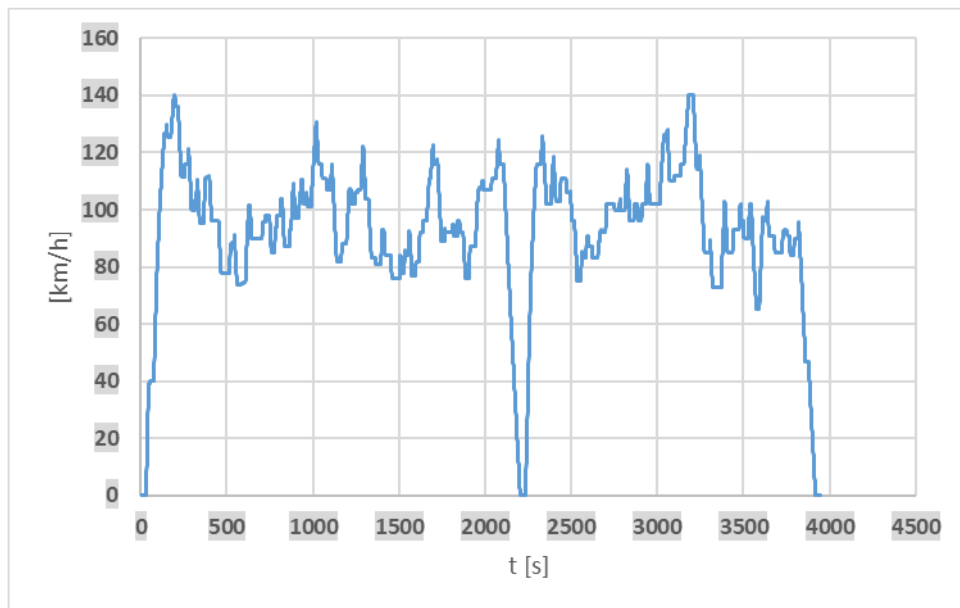


Figura 6.9 – Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's. Fonte: Autor.

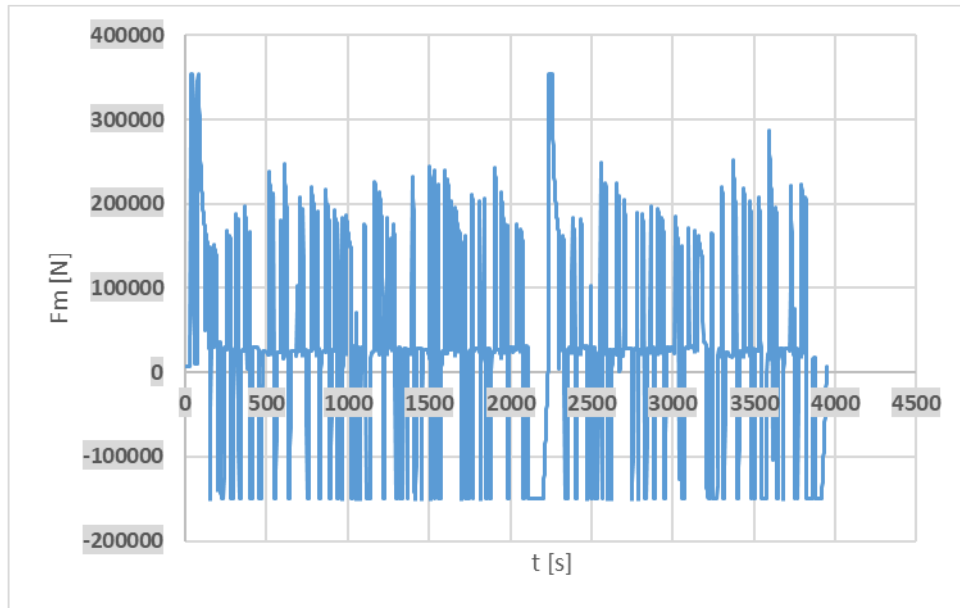


Figura 6.10 – Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's. Fonte: Autor.

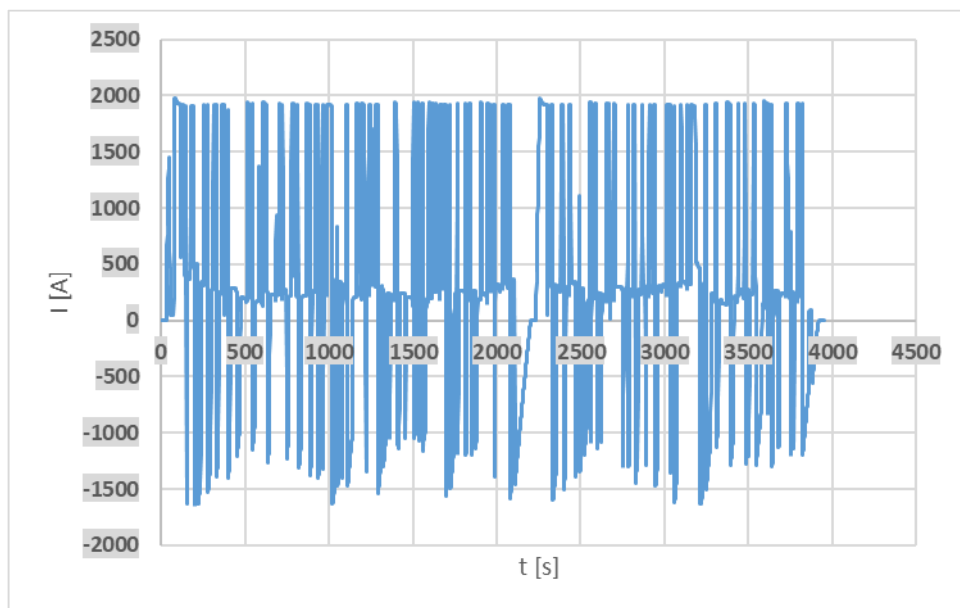


Figura 6.11 – Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda – Campinas com PMSM's. Fonte: Autor.

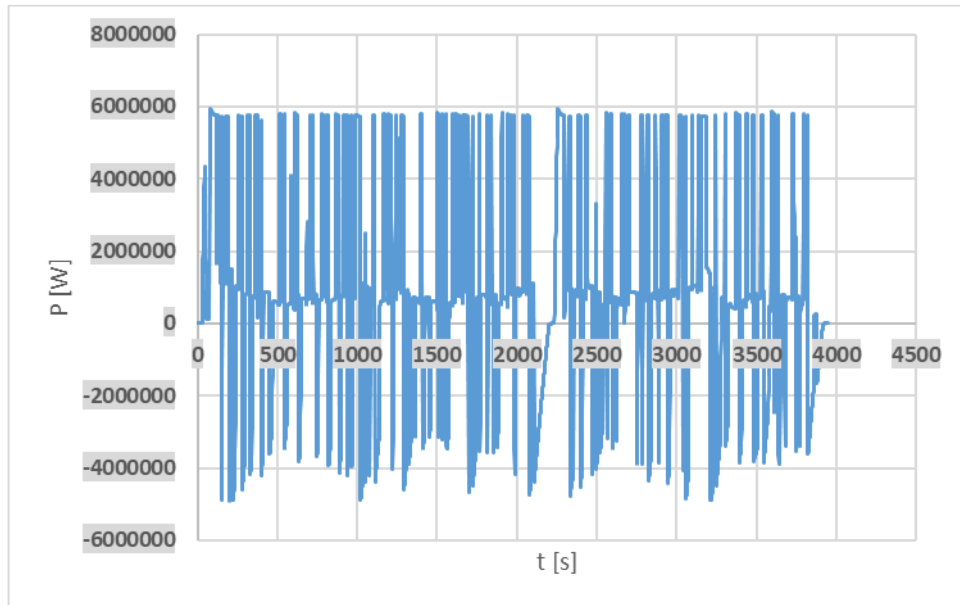


Figura 6.12 – Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Barra Funda - Campinas com PMSM's. Fonte: Autor.

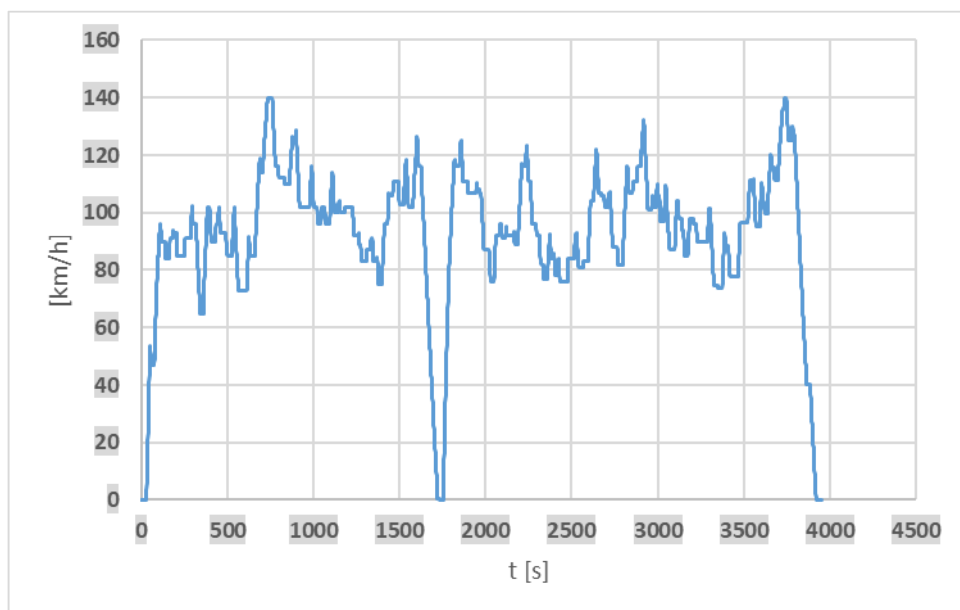


Figura 6.13 – Velocidade em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's. Fonte: Autor.

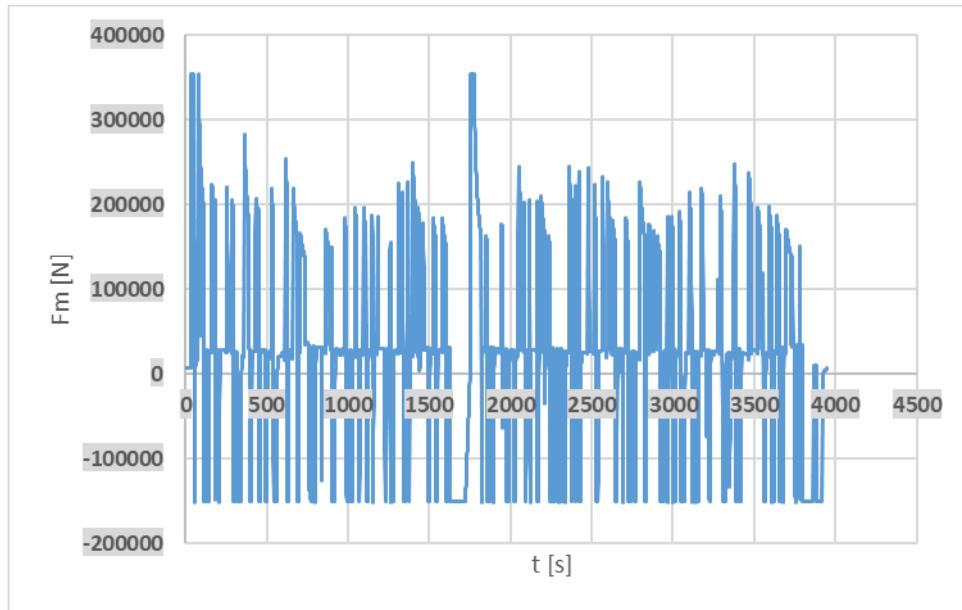


Figura 6.14 – Esforço motor em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's. Fonte: Autor.

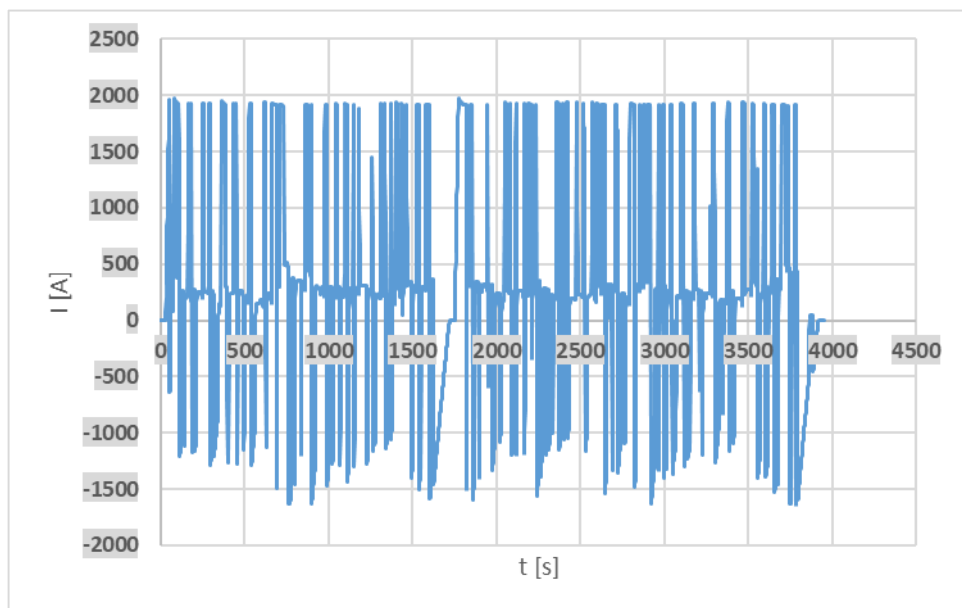


Figura 6.15 – Corrente coletada em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's. Fonte: Autor.

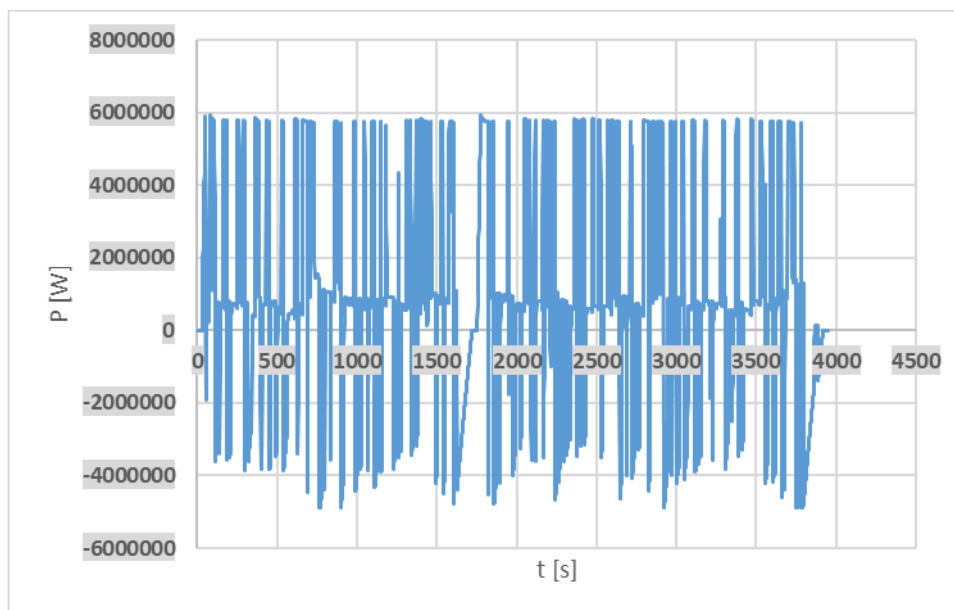


Figura 6.16 – Potência elétrica em função do tempo para composição do estudo de caso, trecho Campinas – Barra Funda com PMSM's. Fonte: Autor.

Observa-se nos gráficos acima apresentados que em ambos os trechos ferroviários adotados para a simulação de marcha, a introdução teórica dos motores síncronos de ímãs permanentes em troca às máquinas de indução das composições, considerando todos os aspectos dinâmicos da respectiva ferrovia, ocasionou visível redução das magnitudes de corrente coletada e potência elétrica demandada pelos trens, em ambos os sentidos de tráfego.

A integração numérica por regra trapezoidal das curvas de potência em função do tempo permite a obtenção dos valores de energia consumida para a composição do estudo de caso nos trechos de ferrovia considerados, apontados na tabela 6.1, para o uso de motores de indução e PMSM, apresentando o índice de economia alcançado com a aplicação destes.

Tabela 6.1 – Energia consumida para composição do estudo de caso com uso de motores de indução e PMSM's.

| Tipo de Motores | Energia Consumida Trecho Barra Funda – Campinas [kWh] | Energia Consumida Trecho Campinas – Barra Funda [kWh] | Energia Consumida Total na Ferrovia – Trechos de Ida e Volta [kWh] |
|--------------------|---|---|--|
| Motores de Indução | 1190,89 | 1103,71 | 2294,61 |
| PMSM's | 1027,17 | 1006,77 | 2033,95 |

A partir dos valores apresentados na tabela 6.1, resulta a economia de energia de aproximadamente 11,35% por viagem (trechos de ida e volta) providenciada pelo uso de PMSM's em substituição aos motores de indução, no modelo de ferrovia regional abordada no estudo de caso.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi efetuado, fundamentado em revisão bibliográfica teórica e conceituação acerca de dispositivos elétricos de tração ferroviária, um estudo comparativo entre acionamentos clássicos, como motores de indução, e máquinas síncronas de ímãs permanentes, contribuindo para a análise destes como elementos de tração em ferrovias, especificamente do tipo regional, principalmente em termos de eficiência energética. Na metodologia foram revisados e consolidados aspectos de engenharia associados aos tipos de máquinas em estudo, tendo como objetivo a aplicação em ferrovias, apresentando a evolução do tema na literatura ao longo das décadas, referenciando desde os estudos pioneiros até o estado da arte. Especial ênfase foi atribuída ao estudo de características de operação do motor síncrono de ímãs permanentes quando utilizado em locomotivas de tração, como os relacionados às especificidades construtivas, desafios e técnicas para o controle e proteção.

Foram considerados para este estudo parâmetros reais de projeto planejados para futura ferrovia regional brasileira, assim como características de modelo real de composição. A aplicação das grandezas dinâmicas dos modelos de ferrovia e composição adotados no estudo de caso do trabalho, em simulações computacionais de marcha, forneceu como resultados gráficos e dados que apresentaram, para o trecho ferroviário em estudo, uma economia energética de até 11,35% por viagem de cada composição, conforme tabela 6.1, por meio da introdução dos PMSM's em substituição aos motores de indução. Esta é uma melhoria significativa na eficiência energética, que pode se traduzir em redução de custos e emissões de carbono a longo prazo. Os resultados obtidos neste estudo são específicos para o caso analisado e para as variáveis dinâmicas e modelos utilizados nas simulações computacionais. No entanto, a metodologia empregada pode ser adaptada para outras linhas ferroviárias e cenários, possibilitando diferentes estudos comparativos e otimização da eficiência energética em acionamentos de tração ferroviária.

8. TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes tópicos podem ser considerados como sugestões para a continuidade do trabalho, em seguimento aos desenvolvimentos recentes acerca do tema identificados no estado da arte da literatura:

- a) Estudo de modificações construtivas e análises magnéticas em termos de geometria do rotor e estator para o motor síncrono de ímãs permanentes, também por meio de modelos de eficiência, com objetivo de comparação para as diferentes soluções como incrementação aos níveis de eficiência energética e otimização das densidades de potência e torque, perante a aplicação específica em ferrovias. Destaca-se o exemplo de novas topologias construtivas para o PMSM, como as configurações duplamente alimentadas ou multifásicas, também em benefício da suavização do torque, além dos motores de fluxo axial e transversal.
- b) Detalhamento com maior aprofundamento das técnicas de controle para o motor síncrono de ímãs permanentes, também com a proposta de otimização dos controladores e lógicas de modo a obter, ainda considerando o uso ferroviário, a melhor performance e eficiência para determinada magnitude de corrente consumida, a exemplo dos métodos de controle de máximo torque por ampere (MTPA) e sensorless.
- c) Desenvolvimento de estudos em relação a novas estratégias de proteção para o PMSM de tração, com a finalidade de aumento de robustez e redução de custos, tendo em vista os desafios para a obtenção de medidas destinadas principalmente à proteção do rotor.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, P. ASHOK, S. **Design and implementation of an efficient regenerative braking system for a vector controlled PMSM drive**. 2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2016. pp. 312-317. doi: 10.1109/ICEES.2016.7510660.
- ACAMPA, D. PIZZO, A. RIZZO, R. **A control algorithm of AC-brushless drives for railways traction application**. 2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. 2007. pp. 33-38. doi: 10.1109/ACEMP.2007.4510479.
- ADNANES, A. **Torque analysis of permanent magnet synchronous motors**. PESC '91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1991. pp. 695-701. doi: 10.1109/PESC.1991.162751.
- AGUIRRE, M. et al. **FOC and DTC comparison in PMSM for railway traction application**. Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. 2011. pp. 1-10.
- ALLENBACH, J. **Traction Électrique**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 2016. Disponível em: <http://www.traction-electrique.ch/documents/Fich1109.pdf>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.
- ALSTOM. **Permanent Magnet Motor**. Alstom Transportation. 2015.
- BELAHCEN, A. et al. **Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 63. no. 6. pp. 3533-3545. 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2524415.
- BOSSIO, J. et al. **Rotor fault diagnosis in permanent magnet synchronous machine using the midpoint voltage of windings**. IET Electric Power Applications. vol. 14. no. 2. pp. 256-261. 2020. doi: 10.1049/iet-epa.2019.0428.

BOMBARDIER. **Electric Locomotive Class ALP-46A**. Bombardier Transportation. 2008.

BRAINARD, M. **Synchronous Machines with Rotating Permanent-Magnet Fields: Part I. Characteristics and Mechanical Construction**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems. vol. 71. no. 3. pp. 670-676. 1952. doi: 10.1109/AIEEPAS.1952.4498525.

BRENNNA, M. et al. **Electrical Railway Transportation Systems**. 1. ed. Wiley-IEEE Press. 2018. 603p.

CAHILL, D. ADKINS, B. **The permanent magnet synchronous motor**. Proc. Inst. Elect. Eng. vol. 109 no. 48 pp. 483-491. Dec. 1962.

CHAPMAN, S. **Fundamentos de Máquinas Eléctricas**. 5. ed. AMGH. 2013. 700 p.

CHEN, Y. et al. **Multi-field coupled analysis of a permanent magnet synchronous motor: Application to high-speed rail traction**. 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). 2016. pp. 1-6. doi: 10.1109/EVER.2016.7476391.

CHENG, M. et al. **Cooling System Design and Thermal analysis of a PMSM for Rail Transit**. 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2020, pp. 1912-1915. doi: 10.1109/ICIEA48937.2020.9248320.

CHOI, S. et al. **Fault Diagnosis Techniques for Permanent Magnet AC Machine and Drives—A Review of Current State of the Art**. IEEE Transactions on Transportation Electrification. vol. 4. no. 2. pp. 444-463. 2018. doi: 10.1109/TTE.2018.2819627.

COROIU, M. **Energy efficiency holistic approach for new energy business model towards 2030**. 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). 2019. pp. 1-8. doi: 10.1109/MPS.2019.8759665.

DING, H. GONG, X. GONG. Y. **Estimation of Rotor Temperature of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Reference Fuzzy Adaptive Control**. Mathematical Problems in Engineering. 2020. pp. 1-11. doi: 10.1155/2020/4183706

DOUGLAS, H. et al. **Evaluation of Permanent Magnet Motor energy saving technology for different types of railways**. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). 2016. pp. 123-129. doi: 10.1109/ICIRT.2016.7588721.

DUAN, M. OU, Z. DENG, C. **Analysis of Shaft Voltage in Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor System for Traction**. 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2020. pp. 1908-1911. doi: 10.1109/ICIEA48937.2020.9248127.

EDWARD, I. WAHSH, S. BADR, M. **Analysis of PMSM drives for electric vehicles**. Proceedings of the 37th SICE Annual Conference. International Session Papers. 1998. pp. 979-984. doi: 10.1109/SICE.1998.742963.

FENG, J. et al. **Compare of Permanent Magnet Synchronous Motor Applied to Railway Vehicle Traction System**. 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. 2007. pp. 74-77. doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318372.

FRANKO, M. KUČHTA, J. BUDAY, J. **Development and performance investigation of permanent magnet synchronous traction motor**. International Symposium on Power Electronics Power Electronics. Electrical Drives. Automation and Motion. Sorrento. 2012. pp. 70-74. doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264450.

FRANKO, M. ONDREJIČKA, J. KUČHTA, J. **Development and examination of interior Permanent Magnet Synchronous Traction Motor**. 2012 ELEKTRO. 2012. pp. 179-184. doi: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225634.

FREERE, P. PILLAY, P. **Design and evaluation of current controllers for PMSM drives.** [Proceedings] IECON '90: 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. 1990. pp. 1193-1198 vol.2. doi: 10.1109/IECON.1990.149306.

FRENZKE, T. PIEPENBREIER, B. **Position-sensorless control of direct drive permanent magnet synchronous motors for railway traction.** 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551). 2004. pp. 1372-1377. Vol.2. doi: 10.1109/PESC.2004.1355623.

FUNIERU, B. BINDER, A. **Thermal design of a permanent magnet motor used for gearless railway traction.** 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2008. pp. 2061-2066. doi: 10.1109/IECON.2008.4758274.

GARCIA, X. et al. **Comparison Between FOC And DTC Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motors.** Advances in Electrical and Electronic Engineering. vol. 5. 2006. pp. 76-81.

GIERAS, J. **Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications.** 3. ed. CRC Press. 2009. 608 p.

HALDER, S. AGARWAL, P. SRIVASTAVA, S. **Permanent magnet synchronous motor drive with wheel slip control in traction application.** 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS). Chandigarh. 2015. pp. 1-4. doi: 10.1109/RAECS.2015.7453402.

HAYES, J. GOODARZI, G. **Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles.** 2. ed. Wiley. 2017. 536 p.

HIMEI, T. et al. **Analysis of Voltage Source Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Taking Account of Converter Performance.** IEEE Transactions on Industry Applications. vol. IA-21. no. 1. pp. 279-284. 1985, doi: 10.1109/TIA.1985.349705.

HONSINGER, V. **The Fields and Parameters of Interior Type AC Permanent Magnet Machines**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-101. no. 4. pp. 867-876. 1982. doi: 10.1109/TPAS.1982.317152.

HUANG, Z. et al. **Design of an interior permanent magnet synchronous traction motor for high-speed railway applications**. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). 2012. pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2012.0253.

JAHNS, T. KLIMAN, G. NEUMANN, T. **Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives**. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. IA-22. no. 4. pp. 738-747. 1986. doi: 10.1109/TIA.1986.4504786.

KOERNER, O. CAI, J. ADAM, C. **Permanent magnet motor technology for Velaro high speed train**. Zev Rail Rolling Stock. no. 141. 2017. pp. 462-468

KONDOU, K. MATSUOKA, K. **Permanent magnet synchronous motor control system for railway vehicle traction and its advantages**. Proceedings of Power Conversion Conference - PCC '97. 1997, pp. 63-68 vol.1. doi: 10.1109/PCCON.1997.645587.

KREUAWAN, S. et al. **Optimal design of traction motor in railway propulsion system**. 2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. 2007. pp. 343-348. doi: 10.1109/ACEMP.2007.4510527

LIU, S. SHENG, Y. **Efficiency optimization of IPMSM for urban rail traction based on switching frequency optimization control**. Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. 2011. pp. 1997-2001.

LIU, W. et al. **Design and HIL simulation of proportional compression salient-pole permanent magnet synchronous motor for electrical traction vehicle**. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009. pp. 884-889. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289752.

LUO, X. et al. **Novel MTPA control strategy for IPMSM based on multiple virtual signals injection**. IET Electric Power Applications. 2020. pp. 457-463. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0558>.

LUTONIN, A. SHKLYARSKIY, A. SHKLYARSKIY, Y. **Control Strategy of Dual Fed Open-End Winding PMSM Drive for Traction Applications**. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2020. pp. 746-749. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039424.

MADICHETTY, S. MISHRA, S. BASU, M. **New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems**. IET. Electr. Syst. Transp. 11(3), 186–199. 2021. <https://doi.org/10.1049/els2.12018>

MAROUFIAN, S. PILLAY, P. **Design and Analysis of a Novel PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Topology with Alnico Magnets**. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 55. no. 5. pp. 4733-4742. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2925784.

MERRILL, F. **Permanent magnet excited synchronous motors**. Electrical Engineering. vol. 74. no. 2. pp. 143-143. 1955. doi: 10.1109/EE.1955.6439788.

METROOPTM. **Trem Intercidades até Campinas deve ser operado com veículos de dois andares**. 2022. Disponível em: <https://www.metrooptm.com.br/trem-intercidades-ate-campinas-deve-ser-operado-com-veiculos-de-dois-andares/>. Acesso em: 10 de AGOSTO de 2022.

MOGHBELLI, H. RASHID, M. **Performance review of AC adjustable drives**. [Proceedings] IECON '90: 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. 1990. pp. 895-902 vol.2. doi: 10.1109/IECON.1990.149258.

MOHAN, N. **Máquinas Elétricas e Acionamentos – Curso Introdutório**. 1. ed. LTC. 2017. 537 p.

OETTMEIER, M. et al. **Flux-based control of PMSM**. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. 2010. pp. 383-388. doi: 10.1109/OPTIM.2010.5510527.

PARSA, L. TOLIYAT, H. **Fault-Tolerant Interior-Permanent-Magnet Machines for Hybrid Electric Vehicle Applications**. in IEEE Transactions on Vehicular Technology. vol. 56. no. 4. pp. 1546-1552. July 2007. doi: 10.1109/TVT.2007.896978.

PEROUTKA, Z. et al. **New generation of full low-floor trams: Control of wheel drives with permanent magnet synchronous motors**. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2009. pp. 1833-1840, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316438.

PETROV, I. PYRHONEN, J. **Performance of Low-Cost Permanent Magnet Material in PM Synchronous Machines**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 60. no. 6. pp. 2131-2138. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2191757.

PIRES, C. **Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária - do Trólebus ao Trem de Alta Velocidade**. 1. ed. LTC. 2013. 448 p.

PIRES, C. **Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-22042007-212920/pt-br.php>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2022.

POLATER, N. KAMEL, T. TRICOLI, P. **Control and Power Sharing Strategy of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor for Light Railway Applications**. 2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2021. pp. 1-6. doi: 10.1109/VPPC53923.2021.9699264.

POZA, J. et al. **Sensorless torque control of PMSMs for railway traction applications**. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2013. pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2013.6634615.

SANDBERG, A. **PM motors for railway applications**. Grona Taget - Bombardier. 2010. Disponível em:

<http://www.gronataget.se/upload/PM%20motors%20for%20railway%20applications.pdf>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. **Audiência pública do projeto Trem Intercidades – Eixo Norte**. São Paulo. 2021a. Disponível em:

<http://www.parcerias.sp.gov.br/Parcerias/Projetos/Detalhes/136>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. **Concorrência internacional TIC Eixo Norte - Anexo II.F Diretrizes mandatórias e recomendadas para aquisição de material rodante**. São Paulo. 2021b.

SHEN, Q. et al. **Design of a Permanent Magnet Synchronous Motor and Performance Analysis for Subway**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu. 2010. pp. 1-4. doi: 10.1109/APPEEC.2010.5449212.

SHIKATA, K. et al. **PMSM propulsion system for Tokyo Metro**. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. 2012. pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2012.6387456.

SIMANEK, J. et al. **Control Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Traction Motor**. EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool". Warsaw. 2007. pp. 1839-1844. doi: 10.1109/EURCON.2007.4400368.

SINCHUK, O. KOZAKEVICH, I. **Research of regenerative braking of traction permanent magnet synchronous motors**. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Kremenchuk. 2017. pp. 92-95. doi: 10.1109/MEES.2017.8248961.

SOUALMI, A. et al. **Comparative study of permanent-magnet synchronous machines with concentrated windings for railway application**. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2011. pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073614.

SULAIMAN, S. **Energy Efficiency in Mobility Systems**. 1. ed. Springer. 2019. 210 p.

TAKAHASHI, A. et al. **High-Efficiency Technology for Railway-Vehicle Traction Motors**. 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2020. pp. 2114-2117. doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291012.

UMANS, S. **Máquinas Eléctricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. AMGH. 2014. 728 p.

VAGATI, A. **Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application**. IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 59. no. 2. pp. 803-811. Feb. 2012. doi: 10.1109/TIE.2011.2151825.

WANG, W. et al. **A Fault-Tolerant Permanent-Magnet Traction Module for Subway Applications**. IEEE Transactions on Power Electronics. vol. 29. no. 4. pp. 1646-1658. 2014. doi: 10.1109/TPEL.2013.2266377.

WANG, M. HSIEH, M. LIN, H. **Operational Improvement of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Field-Weakening Control**. Electronics. MDPI. 2018. <https://doi.org/10.3390/electronics7120452>

WEI, C. et al. **Rotor Design of Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motors in Rail Traffic Vehicle**. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2018. pp. 2762-2765. doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549125.

WIKIPEDIA. **Bombardier ALP-46**. 2022a. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Bombardier_ALP-46. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.

WIKIPEDIA. **Bombardier MultiLevel Coach**. 2022b. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Bombardier_MultiLevel_Coach. Acesso em: 28 de fevereiro de 2022.

XU, Z. et al. **Predictive current control method for dual three-phase PMSM drives with reduced switching frequency and low-computation burden**. IET Electric Power Applications. vol. 14. pp. 668-677. 2020. doi: 10.1049/iet-epa.2019.0529

YI, P. WANG, X. SUN, Z. **Interior permanent magnet synchronous motor minimum current harmonics torque ripple suppression strategy based on magnetic co-energy model**. IET Electric Power Applications. vol. 14. no. 2. pp. 234-244. 2020. doi: 10.1049/iet-epa.2019.0276.

YU, D. et al. **Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high-speed railway applications**. IEEE Workshop on Electrical Machines Design. Control and Diagnosis (WEMDCD). Nottingham. 2017. pp. 58-62. doi: 10.1109/WEMDCD.2017.7947724.

ZADEH, S. **Control of Permanent Magnet Synchronous Motors**. 1. ed. Oxford University Press. 2018. 368 p.

ZHANG, H. et al. **Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Motor in Rail Transit Application Using Segmented Synchronous Modulation**. IEEE Access. vol. 7. pp. 76669-76679. 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921916.

ZHAO, X. et al. **Exploring and modeling on constant speed control strategy of permanent magnet synchronous motor for direct drive system**. 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008. pp. 3070-3073.

ZHENG, B. et al. **Carrier frequency harmonic suppression in dual three-phase permanent magnet synchronous motor system**. IET Electric Power Applications. 2019. pp. 1763-1772. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0054>.

APÊNDICE – Códigos MATLAB desenvolvidos no trabalho

Fórmula e curva de Davis para a locomotiva do estudo de caso considerando uso de motores de indução

```

mv=90;
l=2.95;
h=4.47;
eixos=4;
mmedia=mv/eixos
sv=h*l
peso=882
a=((0.65+(13.15/mmedia))*peso)/1000
b=((0.00932)*peso)/1000
c=((0.00456*(sv/mv))*peso)/1000
x = 0:200;
y = a+b*x+c*power(x,2);
plot(x,y)
ylim([0 28])
xlabel ('v [km/h]');
ylabel ('R0 [kN]');
xticks(0:10:200);
yticks(0:2:30);

```

Fórmula e curva de Davis para o modelo de carro de passageiros do estudo de caso:

```

mv=60.323;
l=3.05;
h=4.42;
eixos=4;
mmedia=mv/eixos
sv=h*l
peso=591.1654
a=((0.65+(13.15/mmedia))*peso)/1000
b=((0.00932)*peso)/1000
c=((0.000645*(sv/mv))*peso)/1000
x = 0:200;
y = a+b*x+c*power(x,2);
plot(x,y)
ylim([0 6])
xlabel ('v [km/h]');
ylabel ('R0 [kN]');
xticks(0:10:200);
yticks(0:0.5:6);

```

Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de motores de indução, contendo respectiva curva da fórmula de Davis:

```

fm=354.4794651
pot=5300;
interseccao=(pot*3.6)/fm;
x1 = 0:interseccao;
x2 = interseccao:300;
y = 0:400;

```

```

y1 = 0*x1+fm;
plot(x1,y1,'b')
hold on
y2=(5300*3.6)./x2;
plot(x2,y2,'g')
ylim([0 500])
xlabel ('v [km/h]');
ylabel ('Fm [kN]');
hold off
hold on
y3 = (3099153.079)./x2.^2
plot(x2,y3,'-r')
hold off
hold on
a=6.48720506
b=0.04127820917
c=0.00110055871
x4 = 0:300;
y4 = a+b*x4+c*power(x4,2);
plot(x4,y4,'m')
hold off
legend('Esforço Constante','Potência Constante','Potência Reduzida','Resistência ao Movimento da
Composição')
ylim([0 500])
xticks(0:10:300);

```

Curvas de esforço motor em função da velocidade para a composição do estudo de caso considerando uso de PMSM's, contendo respectiva curva da fórmula de Davis:

```

fm=353.4857115
pot=5300;
interseccao=(pot*3.6)/fm;
x1 = 0:interseccao;
x2 = interseccao:300;
y = 0:400;
y1 = 0*x1+fm;
plot(x1,y1,'b')
hold on
y2=(5300*3.6)./x2;
plot(x2,y2,'g')
ylim([0 500])
xlabel ('v [km/h]');
ylabel ('Fm [kN]');
hold off
hold on
hold off
hold on
a=6.47905146
b=0.04116129909
c=0.00110055871
x4 = 0:300;
y4 = a+b*x4+c*power(x4,2);
plot(x4,y4,'m')
hold off
legend('Esforço Constante','Potência Constante','Resistência ao Movimento da Composição')
ylim([0 500])
xticks(0:10:300);

```


Curvas de esforço de freagem em função da velocidade da composição do estudo de caso:

```
fm=150
pot=5300;
interseccao=(pot*3.6)/fm;
x1 = 0:interseccao;
x2 = interseccao:300;
y = 0:400;
y1 = 0*x1+fm;
plot(x1,y1,'b')
hold on
y2=(5300*3.6)./x2;
plot(x2,y2,'g')
ylim([0 500])
xlabel ('v [km/h]');
ylabel ('Ff [kN]');
hold off
legend('Esforço de Freagem Constante','Potência de Freagem Constante')
ylim([0 250])
xticks(0:10:300);
```