



## SISTEMA DE FRENAGEM REGENERATIVA COM MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA

Roberto André Henrique de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Rio de Janeiro  
Agosto de 2013

SISTEMA DE FRENAGEM REGENERATIVA COM MOTOR DE INDUÇÃO  
LINEAR DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA

Roberto André Henrique de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Ivan Eduardo Chabu, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
AGOSTO DE 2013

Oliveira, Roberto André Henrique de

Sistema de Frenagem Regenerativa com Motor de Indução Linear do Veículo MagLev-Cobra/Roberto André Henrique de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 84 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 76 – 78.

1. Eletrônica de Potência. 2. Frenagem Regenerativa.
3. Motor de Indução Linear. 4. Supercondutividade.
5. Transporte Urbano. I. Stephan, Richard Magdalena. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*À Flávia, minha esposa, por  
acreditar quando eu desacreditei,  
à Roberta Julia, minha  
primogênita, que mesmo estando  
longe sempre esteve tão perto e  
ao pequeno Juliano, o príncipe.*

# Agradecimentos

“Agradeço Àquele que é poderoso para me guardar de tropeçar e apresentar-me irrepreensível, com alegria, perante a Sua glória. Agradeço ao único Deus, meu Salvador e Senhor”.(Jd 1.24,25)

Aos meus pais (Nina e Oduvaldo) e avós (Wilma *in-memorian* e Augusta), que contribuíram de maneira indizível ao longo da minha vida, o meu muito obrigado. Agradeço, de igual forma, a todos os meus familiares.

Agradeço ao meu orientador Richard Magdalena Stephan, por me abrir muitas portas, aos professores, pesquisadores e colegas do LABMAQ e do LASUP. À esta Universidade (UFRJ) e a este Centro de Pesquisas e Pós-Graduação (COPPE) os meus sinceros agradecimentos, por terem me facilitado o acesso ao conhecimento e proporcionado a interação com os mais excelentes engenheiros e pesquisadores.

Agradeço ao Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro. Obrigado Fundação de Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos - COPPETEC.

Elkin, Laércio, Felipe Costa, Saas, Vina, Dantas, Carlos, Barbosa, Sérgio, Ocione, Edeval, Flávio, Wagner, Dálvio, Bia, Tamires, Genésio, Érik, Rubens, Antônio Carlos, Richard... Obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## SISTEMA DE FRENAGEM REGENERATIVA COM MOTOR DE INDUÇÃO LINEAR DO VEÍCULO MAGLEV-COBRA

Roberto André Henrique de Oliveira

Agosto/2013

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Programa: Engenharia Elétrica

As cidades do futuro exigirão que os sistemas de transporte de passageiros apresentem uma elevada eficiência energética, tenham um custo de implantação reduzido e sejam menos agressivos ao ambiente.

O MagLev-Cobra, trem de levitação magnética supercondutora desenvolvido nos laboratórios da COPPE/UFRJ, insere-se no contexto mundial do transporte de passageiros por atender as demandas apresentadas. Este veículo apresenta características que o permitem vencer aclives com inclinação de 15% sendo desnecessário a escavação de túneis, reduzindo grandemente o custo de implantação. A construção modular confere ao veículo a capacidade de realizar curvas com raios de 50m, garantindo adaptação aos contornos das cidades. Movido à energia elétrica, cuja geração no Brasil é predominantemente de origem hidráulica, o sistema opera sem a emissão de gases poluentes. Por ser levitante não produz poluição sonora.

A presente dissertação, propõe-se a analisar a implementação e a operação do sistema de frenagem regenerativa com motor de indução linear do MagLev-Cobra. Este tipo de frenagem permite recuperar a energia gerada durante a desaceleração, aumentando a eficiência energética do veículo. Os resultados experimentais, incluindo o cálculo da energia gerada estão apresentados neste trabalho. Também será descrito o funcionamento do conversor bidirecional de potência implementado no acionamento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

REGENERATIVE BRAKING SYSTEM WITH LINEAR INDUCTION MOTOR  
OF THE VEHICLE MAGLEV-COBRA

Roberto André Henrique de Oliveira

August/2013

Advisor: Richard Magdalena Stephan

Department: Electrical Engineering

The cities of the future will require the public transport systems to present a high energetic efficiency, to have a reduced implantation cost and to be less aggressive to the environment.

MagLev-Cobra, superconductor magnetic levitation train developed in the labs of COPPE/UFRJ, is inserted in the world context of passengers transport because it meets the demands presented. This vehicle presents features that allow it to ascend acclivities with a 15% slope, being the excavation of tunnels unnecessary, largely reducing the implantation cost. The modular construction allows the vehicle to make 50-m-radius curves, ensuring the adjustment to the cities' contours. Powered by electrical energy, whose generation in Brazil is predominantly hydraulic, the system operates without emitting polluting gases. Since the train levitates, it does not produce any noise pollution.

This dissertation, proposes the analysis of the implementation and operation of MagLev-Cobra's regenerative braking system with linear induction motor. This type of braking enables the recovery of the energy generated during deceleration, increasing the vehicle's energetic efficiency. The experimental results, including the calculation of the energy generated, are presented in this work. The operation of the bidirectional power converter, implemented in the drive, will also be described.

# Sumário

|   |            |
|---|------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                   | <b>x</b>   |
| <b>Lista de Tabelas</b>                   | <b>xiv</b> |
| <b>1 Introdução</b>                       | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivação . . . . .                   | 1          |
| 1.2 Objetivo . . . . .                    | 3          |
| 1.3 Metodologia . . . . .                 | 3          |
| 1.4 Organização da Dissertação . . . . .  | 4          |
| <b>2 Motor de Indução Linear</b>          | <b>5</b>   |
| 2.1 História . . . . .                    | 5          |
| 2.2 Topologia do Motor Linear . . . . .   | 7          |
| 2.2.1 Impulsão . . . . .                  | 8          |
| 2.2.2 Geometria . . . . .                 | 10         |
| 2.2.3 Construção . . . . .                | 11         |
| 2.2.4 MIL - EALP 1000/6 . . . . .         | 12         |
| 2.3 Campo Trafegante . . . . .            | 14         |
| 2.4 Circuito Equivalente . . . . .        | 16         |
| 2.5 Efeitos de Extremidade . . . . .      | 19         |
| 2.6 Força de Tração e Atração . . . . .   | 20         |
| 2.6.1 Força de Tração . . . . .           | 21         |
| 2.6.2 Força de Atração . . . . .          | 26         |
| 2.7 Controle Escalar $V/f$ . . . . .      | 30         |
| <b>3 Operação do Veículo MagLev-Cobra</b> | <b>32</b>  |
| 3.1 Levitação . . . . .                   | 32         |
| 3.2 Frenagem Mecânica . . . . .           | 33         |
| 3.3 Modelo Matemático . . . . .           | 35         |
| 3.4 Simulação de Operação . . . . .       | 38         |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Conversor Bidirecional de Potência</b>                 | <b>40</b> |
| 4.1      | Conversor Regenerativo AFW-11 . . . . .                   | 40        |
| 4.1.1    | Alimentação Geral . . . . .                               | 40        |
| 4.1.2    | Pré-Carga do Banco de Capacitores . . . . .               | 41        |
| 4.1.3    | Filtro de Entrada . . . . .                               | 44        |
| 4.1.4    | Ponte Conversora CFW11-105-RB . . . . .                   | 45        |
| 4.2      | Topologia do Conversor Bidirecional de Potência . . . . . | 47        |
| <b>5</b> | <b>Frenagem Elétrica</b>                                  | <b>49</b> |
| 5.1      | Introdução . . . . .                                      | 49        |
| 5.2      | Métodos de Frenagem Elétrica . . . . .                    | 49        |
| 5.2.1    | Frenagem Contra-Corrente . . . . .                        | 49        |
| 5.2.2    | Frenagem CC . . . . .                                     | 53        |
| 5.3      | Frenagem Regenerativa / Dinâmica . . . . .                | 56        |
| 5.3.1    | Frenagem Regenerativa . . . . .                           | 56        |
| 5.3.2    | Conversor Operando no Modo Inversor . . . . .             | 58        |
| 5.3.3    | Frenagem Dinâmica . . . . .                               | 60        |
| 5.3.4    | Simulação - Frenagem Regenerativa . . . . .               | 61        |
| 5.3.5    | Resultados Experimentais . . . . .                        | 63        |
| <b>6</b> | <b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>                      | <b>74</b> |
| 6.1      | Conclusão . . . . .                                       | 74        |
| 6.2      | Trabalhos Futuros . . . . .                               | 75        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                         | <b>76</b> |
| <b>A</b> | <b>Anexos</b>   | <b>79</b> |
| A.1      | Diagrama Multifilar do AFW-11 . . . . .                   | 79        |
| A.2      | Sensores . . . . .  | 79        |
| A.3      | Motor . . . . .   | 79        |

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | JR-MagLev em operação desde 1997. . . . .   | 6  |
| 2.2  | Transrapid-TR08. . . . .  | 7  |
| 2.3  | HSST japonês. . . . .   | 7  |
| 2.4  | CT-1 e CT-2 na UFRJ. . . . .  | 7  |
| 2.5  | Ilustração da via elevada . . . . .   | 7  |
| 2.6  | Modelo em escala real do veículo MagLev-Cobra . . . . .   | 8  |
| 2.7  | MSL Imã Permanente no Indutor. . . . .  | 9  |
| 2.8  | Face Simples . . . . .  | 10 |
| 2.9  | Face Dupla . . . . .  | 10 |
| 2.10 | Motor de Indução Linear - Tubular Cilíndrico (face dupla e face simples, respectivamente) . . . . .   | 11 |
| 2.11 | Motor Linear - Tubular (secção cilíndrica ou retangular) . . . . .                                    | 11 |
| 2.12 | Energização setorial do primário-longo. . . . .   | 12 |
| 2.13 | Motor de Indução Linear utilizado na tração do MagLev-Cobra . . . . .                                 | 13 |
| 2.14 | Primário Curto e Secundário Longo . . . . .   | 13 |
| 2.15 | Campo Trafegante . . . . .  | 15 |
| 2.16 | Linearização da Máquina Rotativa . . . . .  | 15 |
| 2.17 | Circuito Equivalente do Motor de Indução Linear . . . . .   | 16 |
| 2.18 | Q - Indicador de influência do efeito de extremidade no MIL . . . . .                                 | 18 |
| 2.19 | Representação do efeito de extremidade dinâmico . . . . .   | 19 |
| 2.20 | Ilustração das forças atuantes no motor de indução linear - <i>Cortesia de L. S. Mattos</i> . . . . . | 21 |
| 2.21 | Sistema de medição de força longitudinal no EALP 1000/6 . . . . .                                     | 21 |
| 2.22 | Força longitudinal desenvolvida com a variação do entreferro. . . . .                                 | 23 |
| 2.23 | Corrente de pico na fase com a variação do entreferro. . . . .  | 23 |
| 2.24 | Descontinuidade elétrica e magnética no secundário do MIL. . . . .                                    | 24 |
| 2.25 | Afundamento na corrente de pico do MIL devido a descontinuidade elétrica e magnética. . . . .         | 24 |
| 2.26 | Conexão entre as barras de alumínio do secundário (gaiola). . . . .                                   | 25 |
| 2.27 | Configuração do MIL com secundário contínuo e descontínuo. . . . .                                    | 25 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.28 | Corrente de pico no primário com secundário contínuo e descontínuo<br>- entreferro=8mm. . . . .  | 25 |
| 2.29 | Força de propulsão (tração) do primário com secundário contínuo e<br>descontínuo - entreferro=8mm. . . . .   | 26 |
| 2.30 | Sistema de medição da força de atração desenvolvida pelo motor<br>linear. Primário=257kg, plataforma=98kg, inversor=36kg, guarda-<br>corpo:23.15kg e carga=35.85kg . . . . . | 27 |
| 2.31 | Força (líquida) de atração constante entre 3 e 6Hz (m=450kg, g=8mm)  | 27 |
| 2.32 | Gap de Levitação e Velocidade em um percurso de 4.5m . . . . .   | 29 |
| 2.33 | Sensor de distância ultrassônico utilizado na medição o gap de levi-<br>tação do MagLev-Cobra. . . . .   | 29 |
| 2.34 | Secundário em forma de "C". . . . .  | 30 |
| 2.35 | Operação do MIL com o LADDER PROGRAMMER . . . . .  | 31 |
| 2.36 | Funcionamento dos blocos do WLP - WEG LADDER PROGRAMMER  | 31 |
|      |  |    |
| 3.1  | Trilho de ímãs e criostato com supercondutores. <i>Cortesia de G.Sotelo.</i>   | 33 |
| 3.2  | Proporcionalidade inversa entre o Gap de Levitação e o Entreferro. . .   | 33 |
| 3.3  | Força de levitação obtida com <i>Field Cooling</i> = 25mm. . . . .   | 34 |
| 3.4  | Freio mecânico do veículo MagLev-Cobra. <i>Cortesia de F. Costa.</i> . . .   | 34 |
| 3.5  | Dinâmica do veículo no percurso entre CT-I e CT-II. . . . .  | 36 |
| 3.6  | Reta de Aceleração×Força - (demanda do sistema com carga máxima<br>- 60000N). . . . .  | 37 |
| 3.7  | Diagrama de corpo livre no plano inclinado . . . . .   | 37 |
| 3.8  | Comportamento da velocidade e da corrente no motor na aceleração<br>- $F = 2500N$ . . . . .  | 38 |
| 3.9  | Comportamento da velocidade e da corrente no motor na desacelera-<br>ção - $F = 2500N$ . . . . .   | 39 |
| 3.10 | Comportamento da corrente no motor na aceleração - $F = 4500N$ . .   | 39 |
| 3.11 | Comportamento da corrente no motor na desaceleração - $F = 4500N$  | 39 |
|      |  |    |
| 4.1  | Fusíveis tipo faca - $F1$ , $F2$ e $F3$ . . . . .  | 40 |
| 4.2  | Diagrama Multifilar resumido do circuito de Pré-Carga . . . . .  | 42 |
| 4.3  | Disjuntor-Motor MPW25 . . . . .  | 42 |
| 4.4  | Contactora - $I_n = 9A$ . . . . .  | 42 |
| 4.5  | Resistores Pré-Carga . . . . .   | 43 |
| 4.6  | Ponte Trif. de Diodo . . . . .   | 43 |
| 4.7  | Circuito LC . . . . .  | 43 |
| 4.8  | Filtro LC . . . . .  | 45 |
| 4.9  | Filtro LRC . . . . .   | 45 |
| 4.10 | Módulo Conversor CFW11-105-RB . . . . .  | 46 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.11 | Topologia do Conversor Bidirecional de Potência . . . . .   | 48 |
| 5.1  | Inversão de fases na Frenagem Contra-Corrente . . . . .   | 50 |
| 5.2  | Curva característica de torque para as sequências de fase ABC e ACB . . . . .   | 51 |
| 5.3  | Circuito equivalente do rotor . . . . .   | 51 |
| 5.4  | Aplicação de tensão CC no circuito do primário . . . . .  | 54 |
| 5.5  | Ponte Inversora de 6 níveis . . . . .   | 54 |
| 5.6  | Comando para frenagem CC de um motor de indução . . . . .   | 55 |
| 5.7  | Tensão Vdc x Corrente Idc . . . . .   | 55 |
| 5.8  | Curva característica de torque com variação de velocidade . . . . .   | 57 |
| 5.9  | Circuito equivalente do rotor . . . . .   | 57 |
| 5.10 | Circuito monofásico com fonte $V_{An}$ e $I_A$ . . . . .  | 59 |
| 5.11 | Diagrama fasorial de tensão e corrente . . . . .  | 59 |
| 5.12 | Conversor Bidirecional - frenagem regenerativa . . . . .  | 60 |
| 5.13 | Ponte Inversora Trifásica - frenagem dinâmica . . . . .   | 60 |
| 5.14 | Conversor Trifásico PWM . . . . .   | 61 |
| 5.15 | Tensão na fase A do motor - $v = 6.2m/s$ e $T1 = -100N$ . . . . .   | 62 |
| 5.16 | Corrente média no Link DC - $v = 6.2m/s$ e $T1 = -100N$ . . . . .   | 62 |
| 5.17 | Corrente na fase A do motor - $v = 6.2m/s$ e $T1 = -100N$ . . . . .   | 62 |
| 5.18 | Tensão no Link DC - $v = 6.2m/s$ e $T1 = -100N$ . . . . .   | 62 |
| 5.19 | Tensão na fase A do motor - $v = 6.2m/s$ e $T_2 = -50N$ . . . . .   | 63 |
| 5.20 | Corrente média no Link DC - $v = 6.2m/s$ e $T_2 = -50N$ . . . . .   | 63 |
| 5.21 | Corrente na fase A do motor - $v = 6.2m/s$ e $T_2 = -50N$ . . . . .   | 63 |
| 5.22 | Tensão no Link DC - $v = 6.2m/s$ e $T_2 = -50N$ . . . . .   | 63 |
| 5.23 | Plataforma Inclinada . . . . .  | 64 |
| 5.24 | Trajetoária Trapezoidal . . . . .   | 64 |
| 5.25 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 450kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 0.36m/s$ , $a_a = 0.37m/s^2$ , $v_d = 0.89m/s$ , $d_d = 1.72m/s^2$ . . . . .   | 66 |
| 5.26 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 450kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 0.72m/s$ , $a_a = 0.74m/s^2$ , $v_d = 1.23m/s$ , $d_d = 4.94m/s^2$ . . . . .   | 67 |
| 5.27 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 450kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 1.12m/s$ , $a_a = 1.15m/s^2$ , $v_d = 1.60m/s$ , $d_d = 16.16m/s^2$ . . . . .  | 67 |
| 5.28 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 450kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 1.38m/s$ , $a_a = 1.4m/s^2$ , $v_d = 1.75m/s$ , $d_d = 13.86m/s^2$ . . . . .   | 68 |
| 5.29 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 0.63m/s$ , $a_a = 0.65m/s^2$ , $v_d = 2.0m/s$ , $d_d = 20.0m/s^2$ . . . . .   | 68 |
| 5.30 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> =<br>10%, $v_a = 0.76m/s$ , $a_a = 0.77m/s^2$ , $v_d = 2.24m/s$ , $d_d = 37.31m/s^2$ . . . . . | 69 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.31 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 10%, $v_a = 1.08m/s$ , $a_a = 1.22m/s^2$ , $v_d = 2.32m/s$ , $d_d = 13.64m/s^2$ . . .  | 69 |
| 5.32 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 10%, $v_a = 0.50m/s$ , $a_a = 0.87m/s^2$ , $v_d = 2.92m/s$ , $d_d = 16.23m/s^2$ . . .  | 70 |
| 5.33 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $v_a = 0.3m/s$ , $a_a = 0.40m/s^2$ , $v_d = 2.92m/s$ , $d_d = 26.56m/s^2$ . . .   | 70 |
| 5.34 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $v_a = 0.34m/s$ , $a_a = 0.46m/s^2$ , $v_d = 3.12m/s$ , $d_d = 24.03m/s^2$ . . .  | 71 |
| 5.35 | Tensão no Link CC e Corrente no motor - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $v_a = 0.36m/s$ , $a_a = 0.49m/s^2$ , $v_d = 3.14m/s$ , $d_d = 22.47m/s^2$ . . .  | 71 |
| 5.36 | Corrente no elo CC - $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $a_d = 8.59m/s^2$ , $v_d = 2.92m/s$ , $d_d = 16.23m/s^2$ . . . . .   | 72 |
| 5.37 | Potência fornecida à fonte, consideradas as perdas no conversor, na resistência do motor e perdas mecânicas. Condição do teste: $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $a_d = 8.59m/s^2$ , $v_d = 2.92m/s$ . . . . . | 72 |
| 5.38 | Energia regenerada durante o intervalo de frenagem. Condição do teste: $m = 1000kg$ , <i>inclinação</i> = 15%, $a_d = 8.59m/s^2$ , $v_d = 2.92m/s$ . . . . .  | 73 |
| A.1  | Diagrama Multifilar - Folha 1/6 . . . . .   | 80 |
| A.2  | Diagrama Multifilar - Folha 2/6 . . . . .   | 81 |
| A.3  | Folha de dados do sensor ultrassônico utilizado para medir o gap de levitação do MagLev-Cobra. . . . .  | 82 |
| A.4  | Especificação Técnica da ponteira de corrente Hall. . . . .   | 83 |
| A.5  | Corte geral do secundário . . . . .   | 84 |

# Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Dados do Conversor Bidirecional de Potência . . . . .             | 4  |
| 2.1 | Características Técnicas do EALP 1000/6 . . . . .                 | 14 |
| 2.2 | Dados do Primário e do Secundário do EALP 1000/6 . . . . .        | 14 |
| 2.3 | Descrição dos parâmetros do circuito equivalente do MIL . . . . . | 17 |
| 2.4 | Relação V/f do ensaio estático . . . . .                          | 22 |
| 2.5 | Tensão e Corrente de modo comum . . . . .                         | 29 |
| 3.1 | Condições de Tráfego do MagLev-Cobra . . . . .                    | 37 |
| 4.1 | Características Técnicas - Filtro Trifásico LB1 e LF1 . . . . .   | 46 |
| 5.1 | Condições de Ensaio no Plano Inclinado . . . . .                  | 64 |
| 5.2 | Simbologia utilizada nos testes de regeneração. . . . .           | 64 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Com o crescente aumento populacional e a rápida urbanização, temos hoje 50% das pessoas do mundo habitando em cidades e estima-se que até 2050 esse percentual atinja 70% [1]. Essa perspectiva gera a necessidade do consumo eficiente de energia elétrica e do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Transportar esta população urbana nas megacidades apresenta-se como um grande desafio pois há uma crescente preocupação com o custo de implantação, segurança e poluição sonora dos novos modais além da competição pelo espaço urbano. O setor de transporte pode ser considerado como um dos maiores responsáveis pela poluição local por emitir gases como o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio e de enxofre, os aldeídos e os materiais particulados [2].

No Brasil, predomina o modal rodoviário no transporte de passageiros<sup>1</sup>. O Rio de Janeiro possui a segunda maior frota de veículos, movidos a combustíveis fósseis, do Brasil conforme apresentado por [2]. A região metropolitana do Rio de Janeiro<sup>2</sup> tem cerca de 90% de sua demanda de passageiros atendida pelo modal rodoviário. Os ônibus convencionais não podem ser considerados como a melhor solução para o transporte de massa, pois são lentos, causadores de congestionamentos e grandes emissores de  $CO_2$ .

Predomina em países desenvolvidos, nas cidades com mais de 500 mil habitantes, o transporte de passageiros através do modal ferroviário<sup>3</sup>. O uso de trens roda-trilho melhora o escoamento do tráfego urbano porém possui elevado custo

---

<sup>1</sup>Modal Rodoviário: Ônibus, caminhão e carros.

<sup>2</sup>Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Mangaratiba, Maricá, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica, Tinguá.

<sup>3</sup>Modal Ferroviário: Trens, metrô e bonde.

de implantação em instalações subterrâneas e afeta significativamente a vida das cidades nas instalações de superfície.

Motivada por estas demandas, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) vem desenvolvendo em seus laboratórios um veículo de transporte urbano chamado MagLev-Cobra, um trem de levitação magnética supercondutora, inovador e com baixo impacto ambiental. Este trem pode ser visto como um componente importante na solução dos problemas de transporte urbano e do consumo eficiente de energia elétrica. Aliado as características apresentadas, o MagLev-Cobra irá operar com um sistema de frenagem regenerativa capaz de converter a energia cinética associada à desaceleração do veículo em energia elétrica.

A regeneração de energia está sendo aplicada em máquinas elétricas ou motores à combustão. Veículos como carros de corrida aproveitam a energia cinética após uma frenagem e armazenam em volantes inerciais, veículos híbridos armazenam esta energia em suas baterias aumentando a autonomia, transportes verticais, como elevadores de passageiros, regeneram a energia proveniente das desacelerações e reduzem custos com consumo elétrico. Acreditando ser uma tecnologia promissora, a frenagem com regeneração de energia através de um motor de indução linear tornou-se um objeto de estudo o qual nos propomos realizar.

A COPPE/UFRJ mantém em andamento pesquisas na área da Eletrônica de Potência - Acionamento de Máquinas Elétricas - Levitação e Tração Linear. Em 2010, foi apresentado o resultado de uma pesquisa sobre a sincronização da operação do protótipo do trem de levitação magnética tracionado por um motor linear (ML) de primário longo, conforme [3]. Neste mesmo ano, um estudo da operação sincronizada entre ML's de primário curto foi submetido por [4]. Visando a adequação do veículo às normas internacionais, uma proposta de tese foi submetida à COPPE em 2012 por [5]. Esta normatização permite que o veículo opere em modo autônomo.

Pesquisas com motores lineares e frenagem regenerativa também estão em desenvolvimento na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e alguns resultados estão apresentados nos trabalhos de [6] e [7].

A presente dissertação se propõe a contribuir com estas linhas de pesquisas mencionadas, agregando ao primeiro veículo de levitação magnética supercondutora do mundo um sistema de frenagem regenerativa através do motor de indução linear.

## 1.2 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo a especificação, implantação e a análise do sistema de frenagem regenerativa com motor de indução linear. A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios LABMAQ e LASUP e pretende-se avaliar também:

- a capacidade de carga do motor em acíves variando a massa transportada,
- a descontinuidade elétrica e magnética do secundário que geram perdas de tração e são uma característica dos motores lineares de primário curto,
- a atração entre o primário e o secundário mostrando a contribuição que a topologia do motor linear fornece ao sistema de levitação, e
- a capacidade de frenagem do motor com o controle utilizado e a quantidade de energia gerada durante a frenagem regenerativa.

## 1.3 Metodologia

O projeto do sistema de frenagem regenerativa passou pelas etapas de especificação, implantação, análise e operação. A especificação do conversor bidirecional de potência está apresentada na Tabela 1.1.

A capacidade de carga do motor e seu comportamento em acíves foi observado em um plano inclinado. Uma plataforma conectada ao motor linear servirá de base para a carga a ser transportada. Um acionamento  $V/f$  em malha aberta será utilizado nesta aplicação.

Para verificar o efeito da descontinuidade elétrica e magnética nas forças longitudinal e de atração, um sistema pesador de carga será ancorado em pontos fixos e conectados no motor. Com a variação da posição do primário em relação ao secundário, mediremos a influência do efeito na tração.

A investigação da quantidade de energia, recuperada através da frenagem regenerativa aplicada ao motor de indução linear, foi feita no plano inclinado. Um controle, que varia a frequência de um valor determinado até zero, foi desenvolvido de modo a garantir a operação do motor no 4º quadrante. Dessa maneira, pretende-se também avaliar a capacidade de frenagem do sistema.

Tabela 1.1: Dados do Conversor Bidirecional de Potência

| <b>Parâmetros</b>     | <b>Amplitude</b>        | <b>Unidade</b> |
|-----------------------|-------------------------|----------------|
| Tensão de Entrada     | 380 - 440, trifásico    | $V_{ca}$       |
| Frequência de Entrada | 60                      | Hz             |
| Potência              | 32                      | kW             |
| Tensão de Saída       | 500 - 650               | $V_{dc}$       |
| Corrente Nominal      | 100, <i>normal duty</i> | A              |

## 1.4 Organização da Dissertação

O capítulo dois apresenta a história, topologia e característica do motor de indução linear utilizado neste trabalho. O efeito de extremidade e o comportamento da força de tração e de atração devido às características do motor também são abordadas.

O capítulo três apresenta o MagLev-Cobra e o método de levitação utilizado no veículo. Menciona-se brevemente a frenagem mecânica, desenvolvida pela engenharia mecânica, proposta para ser utilizada em determinadas situações. Um modelo matemático simplificado do veículo e simulações de operação também estão disponíveis.

O capítulo quatro descreve o funcionamento do conversor bidirecional de potência.

A frenagem elétrica e as diversas técnicas de desaceleração e paralisação de um motor elétrico são apresentadas no capítulo cinco. A frenagem regenerativa e os resultados obtidos durante as medições também são apresentas neste capítulo.

A conclusão e os trabalhos futuros compõem o capítulo seis.

# Capítulo 2

## Motor de Indução Linear

### 2.1 História

O conceito de motor linear foi introduzido no século XIX quando Charles Wheatstone construiu um protótipo do equipamento. Em 1902, Zehden submeteu um pedido de patente na França e em 1907 nos Estados Unidos para um “sistema de tração elétrica” que utilizava um motor linear de primário curto e secundário longo [8]. Em 1923 uma esteira móvel, tracionada por motor linear, foi projetada para o transporte de pedestres entre o Grand Central Terminal e a Times Square em Nova York pela 42<sup>nd</sup> Street. Em 1945 a Westinghouse Company of America, uma empresa americana, construiu um mecanismo de propulsão de aeronaves militares. Este dispositivo, chamado *Electropult*, era tracionado por um motor de indução linear (MIL) e foi usado em porta-aviões podendo desenvolver um impulso de 75600N, acelerando uma carga de 5000kg até uma velocidade de 185km/h em poucos segundos [9]. A aplicação de motor linear em sistemas com o mesmo princípio de funcionamento do *Electropult* promoveu avanços na área automobilística no início da década de 1960, onde várias empresas utilizavam estes “arremessadores” para testes de segurança em simuladores de colisão de automóveis que os acelerava até 100km/h.

Existe uma ampla aplicação de motor linear em sistemas de transportes que inclui os aeroportos com as esteiras de passageiros, elevadores e etc.; na indústria temos um vasto uso dos MIL em seus processos de produção através das máquinas ferramentas, prensas, separadores, tensionadores, portas deslizantes, robôs, entre outros. Áreas como instrumentação, eletrônica e escritório utilizam os MIL em túneis aerodinâmicos, plataformas vibratórias, equipamentos de som, transportes de cartas e dinheiro além de outros documentos [9].

Desde 1970, utiliza-se o motor linear em transportes ferroviários. Em 1997 o

JR-Maglev desenvolvido no Japão, pelo *Railway Technical Research Institute*<sup>1</sup>, e tracionado por um motor linear entrou em operação na cidade de Yamanashi traçando um percurso de 18,4 km, apresentado na Figura 2.1<sup>2</sup>. Este veículo utiliza a técnica de levitação eletrodinâmica (EDL), que necessita do movimento de um campo magnético próximo a um material condutor, onde serão induzidas correntes parasitas. Estas correntes induzidas darão origem a outro campo que se oporá ao campo do material magnético. A interação entre os dois campos produz uma força repulsiva no material magnético, que fará com que este levite [10].

Na China o motor linear está sendo utilizado para o transporte de passageiros desde 2003, em um trecho de 30 km, no trem de levitação Transrapid<sup>3</sup> de fabricação alemã. O veículo está apresentado na Figura 2.2<sup>4</sup>. Em 2005, o HSST<sup>5</sup> japonês, tracionado por um motor linear, entrou em operação e já transportou mais de 30 milhões de pessoas. O HSST está apresentado na Figura 2.3<sup>6</sup>. Estes veículos utilizam a técnica de levitação eletromagnética (EML), que consiste em aproximar um material ferromagnético de um campo magnético gerado pela injeção de corrente em um enrolamento. Devido à instabilidade do sistema, este tipo de levitação, requer um controle robusto em malha fechada.



Figura 2.1: JR-MagLev em operação desde 1997.

Utiliza-se o motor de indução linear na propulsão do MagLev-Cobra. Desde 2012, o veículo está sendo operado em um ambiente controlado nas bancadas dos

<sup>1</sup>Sítio do *Railway Technical Research Institute*: <http://www.rtri.or.jp/eng/index.html>

<sup>2</sup>Imagem do Wikimedia Commons, um acervo de conteúdo livre da Wikimedia Foundation - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:JR-Maglev-MLX01-2.jpg>

<sup>3</sup>Sítio do *ThyssenKrupp Transrapid*: <http://www.transrapid.de/cgi-tdb/en/basics.prg>

<sup>4</sup>Imagem do Wikimedia Commons - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Shanghai-Transrapid-002.jpg>

<sup>5</sup>Sítio do *HSST*: [http://hsst.jp/index\\_e.htm](http://hsst.jp/index_e.htm)

<sup>6</sup>Imagem do Wikimedia Commons - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AYES89-HSST.jpg>



Figura 2.2: Transrapid-TR08.



Figura 2.3: HSST japonês.

laboratórios da UFRJ. Em 2014, entrará em fase de operação, para transporte de passageiros, ligando o CT-1 ao CT-2<sup>7</sup> na Cidade Universitária - RJ - Brasil, conforme apresentado na Figura 2.4. Essa ligação entre os dois blocos do centro de pesquisa será feita através de uma via elevada com um percurso de 200m ilustrado na Figura 2.5 [11]. O *mock-up*<sup>8</sup> do veículo esta apresentado na Figura 2.6.

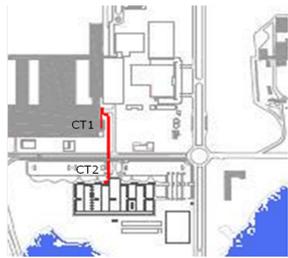


Figura 2.4: CT-1 e CT-2 na UFRJ. Figura 2.5: Ilustração da via elevada

## 2.2 Topologia do Motor Linear

O motor linear (ML) permite o deslocamento de uma carga em percurso longitudinal sem necessitar de engrenagens, polias, e outros métodos de translação de movimento. Neste trabalho, será adotada a seguinte nomenclatura para definir um motor linear:

1. Primário: Componente do motor que contém as bobinas das fases.

<sup>7</sup>No CT-1 encontra-se a Escola Politécnica e o Programa de Pós-Graduação (COPPE) de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O CT-2 concentra o corpo administrativo da Fundação COPPETEC.

<sup>8</sup>Mock-up é uma escala ou modelo em tamanho real de um projeto ou dispositivo, utilizado para o ensino, demonstração, avaliação de concepção e etc.



Figura 2.6: Modelo em escala real do veículo MagLev-Cobra .

2. Secundário: Parte do motor composta de ferro laminado e barras curto-circuitadas entre si ou uma fonte de excitação magnética.

## 2.2.1 Impulsão

O motor linear possui duas principais configurações para a produção de movimento, ou impulsão, que são: motores de indução (MIL) e motores síncronos (MSL). O motor de corrente contínua linear (MCCL) não possui aplicação em transportes, sendo usado em máquinas ferramentas.

### 2.2.1.1 Síncrono (MSL)

O motor síncrono não apresenta torque de partida, ou seja, não parte de modo independente. Alguns modos de excitação utilizados no MSL são apresentados a seguir [12]:

**Imã Permanente no Indutor** Utiliza ímãs permanentes (PM) no interior do indutor ou na sua superfície, conforme apresentado na Figura 2.7 (a) e (b) respectivamente. Quando os ímãs estão na superfície do indutor este precisa ser constituído de material ferromagnético pois os ímãs são magnetizados na direção perpendicular ao induzido. Caso os ímãs estejam no interior do indutor estes serão magnetizados na direção do campo tráfegante e o indutor deverá ser constituído de material não-ferromagnético, podendo ser o alumínio. Um motor síncrono linear com ímã permanente deve ter um enrolamento amortecedor. Para velocidades diferentes da velocidade síncrona, uma corrente será induzida no enrolamento amortecedor que juntamente com a ação do campo magnético do induzido permite a partida assíncrona. Este modo de excitação utiliza o indutor fixo ao longo do percurso e considerando o elevado custo dos

ímãs de terras raras<sup>9</sup>, torna-se caro este sistema de excitação para grandes trechos.

**Imã Permanente no Induzido** Este modo de excitação consiste em colocar os ímãs permanentes no induzido e considerando que este seja a parte móvel do motor. O campo magnético gerado pelos ímãs criam pólos magnéticos no indutor, construído de material ferromagnético. A vantagem deste modo consiste em utilizar menos ímãs permanentes ou ainda substituí-los por eletroímãs.

**Excitação Eletromagnética** Este sistema de excitação utiliza pólos salientes e um enrolamento de excitação de campo. Se montado na parte móvel a corrente pode ser entregue utilizando escovas ou sistemas de transferência de energia por indução (ITP).

**Excitação Supercondutora** Em motores síncronos lineares de potência elevada, os eletroímãs com núcleo ferromagnético podem ser substituídos por eletroímãs supercondutores. A densidade de fluxo magnético dos eletroímãs supercondutores é alta comparativamente à solução tradicional.

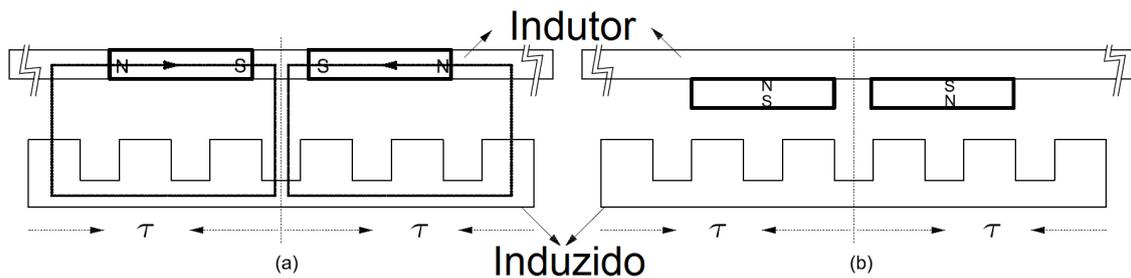


Figura 2.7: MSL Imã Permanente no Indutor.

### 2.2.1.2 Indução (MIL)

O motor de indução linear (MIL) caracteriza-se por ser uma máquina de simples construção e robusta, semelhante a uma máquina rotativa. As bobinas de fase estão fixadas no primário e o secundário constitui-se por um núcleo com ranhuras onde são inseridos condutores em forma de barras e curto-circuitados formando um secundário tipo gaiola de esquilo. Ao contrário do MSL, que só produz torque à velocidade síncrona, o motor de indução não opera nesta condição, sendo por isso denominado assíncrono.

<sup>9</sup>As terras raras ou metais de terras raras são um grupo de 17 elementos químicos, dos quais 15 pertencem ao grupo dos lantanídeos (elementos com número atômico entre  $Z=57$  e  $Z=71$ ) juntamente com o escândio ( $Z=21$ ) e o ítrio ( $Z=39$ ), elementos que ocorrem nos mesmos minérios e apresentam propriedade físico-químicas semelhantes.

Na subseção 2.2.4 o MIL está apresentado com maior nível de detalhes.

## 2.2.2 Geometria

O motor linear seja síncrono ou de indução admite uma geometria tubular ou plana. Segue a apresentação destas características:

### 2.2.2.1 Plano - Face Simples

Um motor de indução linear de face simples deve ser construído de forma que o primário induza corrente em apenas uma das faces do secundário, conforme ilustrado na Figura 2.8. Este tipo de motor planar pode ser entendido como uma máquina de indução rotativa com rotor tipo gaiola. Motores síncronos lineares também utilizam esta geometria.

O motor de indução deve ser construído de modo a ter um entreferro mínimo para que a corrente de magnetização e a potência aparente de entrada seja reduzida e apresente um fator de potência mais elevado. Com a potência de entrada menor podemos ter inversores de menor potência.

### 2.2.2.2 Plano - Face Dupla

O motor de indução linear de face dupla constitui-se por dois primários induzindo corrente nas duas faces do secundário, conforme ilustrado na Figura 2.9, e podem ajudar-se mutuamente na condução do fluxo através do secundário. Motores síncronos lineares também são construídos utilizando esta configuração.

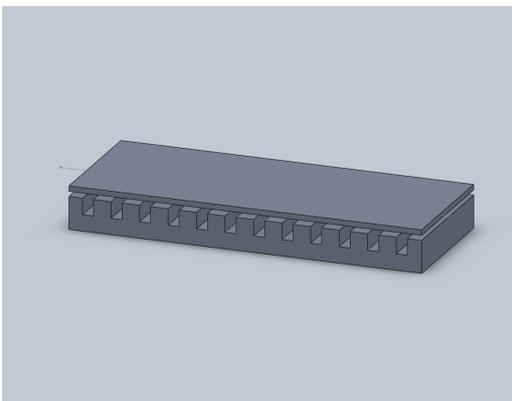


Figura 2.8: Face Simples

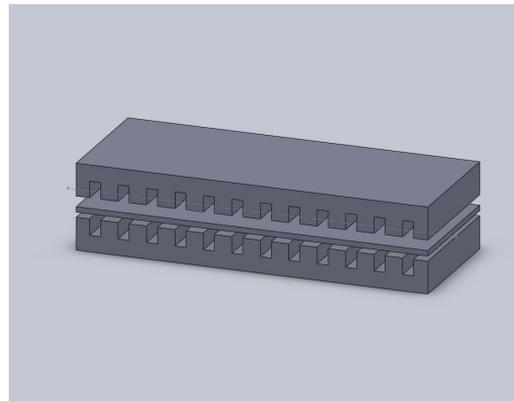


Figura 2.9: Face Dupla

### 2.2.2.3 Tubular

Quando tubular o motor linear pode ser de face simples ou de face dupla [9],[13]. Estas geometrias estão ilustradas na Figura 2.10.

Alguns motores tubulares, usualmente cilíndricos, estão ilustrados na Figura 2.11. A relação de comprimento entre o primário e o secundário pode variar de acordo com a aplicação.

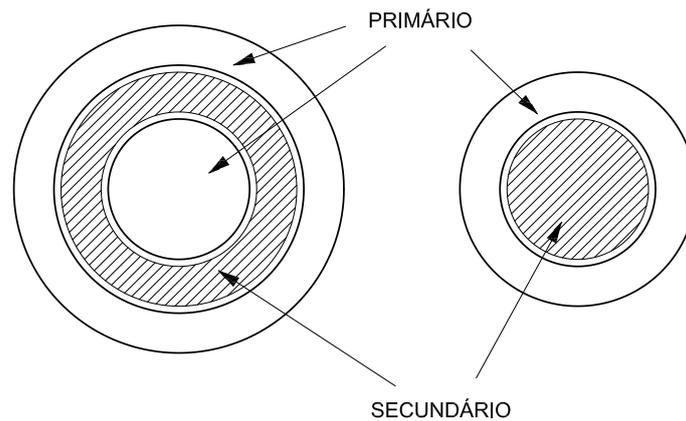


Figura 2.10: Motor de Indução Linear - Tubular Cilíndrico (face dupla e face simples, respectivamente)

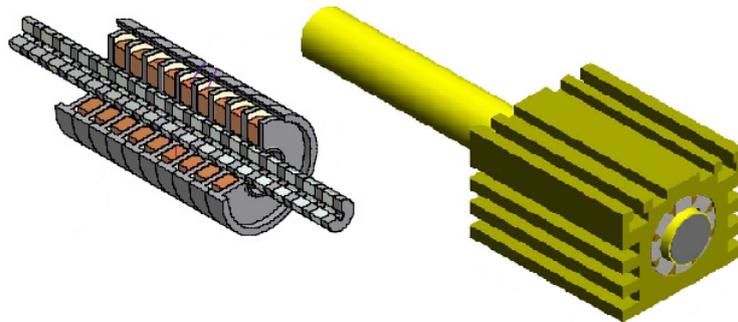


Figura 2.11: Motor Linear - Tubular (seção cilíndrica ou retangular)

### 2.2.3 Construção

Quanto à construção, o motor linear pode ter o primário curto ou longo. Para um motor linear de primário-curto, deve-se associar um motor rotativo com o raio do rotor tendendo ao infinito e estator com comprimento limitado. Ao motor linear de primário-longo, associa-se um motor rotativo com o raio do estator tendendo ao infinito e o rotor limitado no comprimento.

### 2.2.3.1 Primário-Curto

Na configuração de primário-curto e secundário-longo, reduz-se o custo com a construção do motor pois as bobinas de fase possuem um comprimento menor. Outra vantagem apresentada, por este tipo construtivo de motor, reside na simplicidade do controle utilizado já que não requer a energização setorial. Para levar a corrente ao primário, são utilizadas escovas coletoras, catenárias, transferência de energia por indução, ultra-capacitores ou um sistema com baterias.

### 2.2.3.2 Primário-Longo

Com o primário-longo e o secundário-curto, torna-se necessário um controle setorial do enrolamento de fase para manter a eficiência do motor. O controle exige maior grau de complexidade, quando comparado com os motores de primário-curto. O monitoramento da posição do veículo durante todo o trajeto precisa ser realizado para energizar, com o sincronismo necessário, o setor em que o secundário atravessa. A Figura 2.12 ilustra os trechos que devem estar energizados a medida que o secundário, fixado ao veículo, trafega na via. Este modo construtivo dispensa o uso de coletores de corrente aumentando a confiabilidade da máquina.

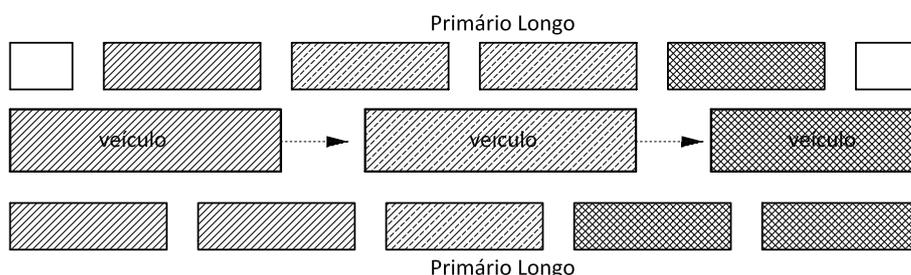


Figura 2.12: Energização setorial do primário-longo.

## 2.2.4 MIL - EALP 1000/6

Um motor de indução linear planar de face simples denominado EALP 1000/6, apresentado na Figura 2.13, traciona o veículo MagLev-Cobra. No MIL EALP 1000/6 o primário mede 1.27m, sendo composto por 54 bobinas contendo 13 espiras cada, possuindo 6 pólos. O secundário, do tipo gaiola-de-esquilo com um núcleo laminado e barras laterais de curto-circuito, apresenta seções de 1.51m caracterizando-o como um motor de primário-curto e secundário-longo. Com esta configuração, o primário está fixado ao veículo e o secundário ao longo de todo o percurso, conforme mostrado na Figura 2.14.

Os dados de placa do motor com as características do primário e do secundário estão apresentadas nas Tabelas 2.1 e 2.2, conforme relatório técnico do fabricante [14]. Esse motor tem uma geometria diferenciada, desenvolvida com o objetivo de contribuir com a força de levitação apresentando um formato em “C”. Essa forma construtiva motivou um pedido de patente, pela UFRJ, ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) [15].

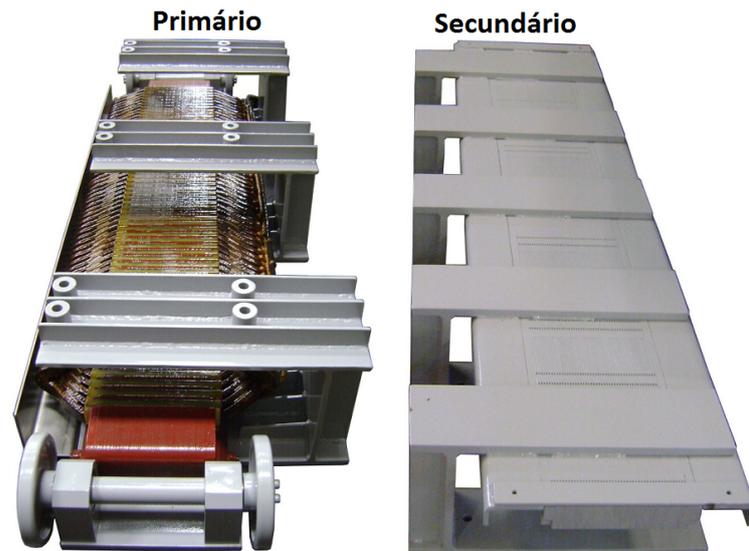


Figura 2.13: Motor de Indução Linear utilizado na tração do MagLev-Cobra

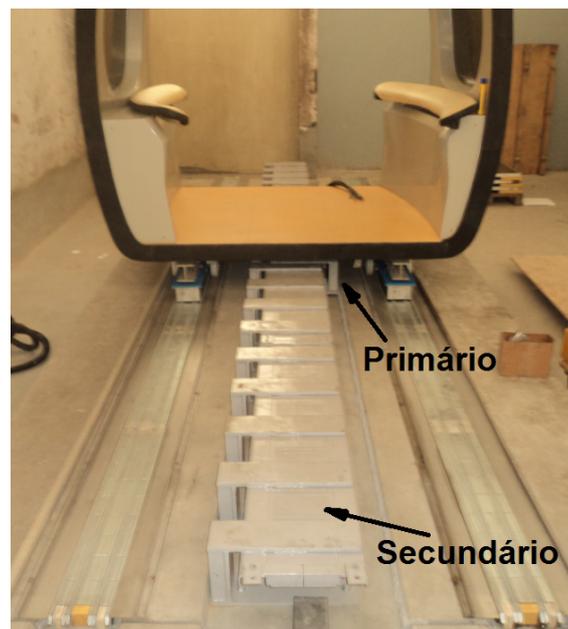


Figura 2.14: Primário Curto e Secundário Longo

Tabela 2.1: Características Técnicas do EALP 1000/6

| Parâmetros               | Amplitude    | Unidade |
|--------------------------|--------------|---------|
| Força Longitudinal $F_x$ | 900          | N       |
| Frequência de operação   | 25           | Hz      |
| Tensão no Primário       | 420          | V - (Y) |
| Corrente no Primário     | 53           | A       |
| Número de polos          | 6            | polos   |
| Dimensão                 | retangular   | mm      |
| Material                 | cobre        | -       |
| Passo Polar, $\tau$      | 0.156        | m       |
| Entreferro               | 10           | mm      |
| Velocidade               | 7,8          | m/s     |
| Fluxo Magnético          | Longitudinal | -       |
| Primário                 | 1270         | mm      |
| Secundário (secção)      | 1510         | mm      |

Tabela 2.2: Dados do Primário e do Secundário do EALP 1000/6

| Enrolamento                             | Gaiola do Secundário                      |
|---|---|
| 18 grupos de bobina - 6 por fase        | Barras de alumínio nas ranhuras           |
| 3 bobinas por grupo                     | Dim. barras $12.7 \times 12.7$ mm         |
| 13 espiras por bobina                   | Barras de curto-circuito de alumínio      |
| Condutor Retangular $1.3 \times 9.2$ mm | Dim. barra de curto $12.7 \times 25.4$ mm |
| Grupos conectados em série              | -   |
| Fases conectadas em Estrela             | -   |

## 2.3 Campo Trafegante

Diferente de um motor de indução rotativo convencional, o motor de indução linear apresenta um circuito magnético linear e esta característica faz com que o campo magnético tenha um deslocamento transversal e não girante, dando origem ao termo campo trafegante conforme ilustrado na Figura 2.15. A Figura 2.16 apresenta a linearização de uma máquina rotativa permitindo um melhor entendimento do comportamento do campo.

Ao injetar um sistema polifásico de correntes alternadas  $I$ , dada pela Eq.(2.1), no enrolamento do primário cria-se um campo magnético  $B$ , Eq.(2.2), que induz corrente alternada no secundário. A corrente induzida no secundário produz um campo que irá interagir com o campo do primário e produzir uma força que deslocará a parte móvel do MIL.

A velocidade do MIL não depende do número de pólos, mas do passo polar ( $\tau$ ) e da frequência da fonte ( $f$ ) conforme observado na Eq.(2.3) que apresenta a velocidade do campo magnético trafegante ( $v_s$ ) ou, simplesmente, velocidade

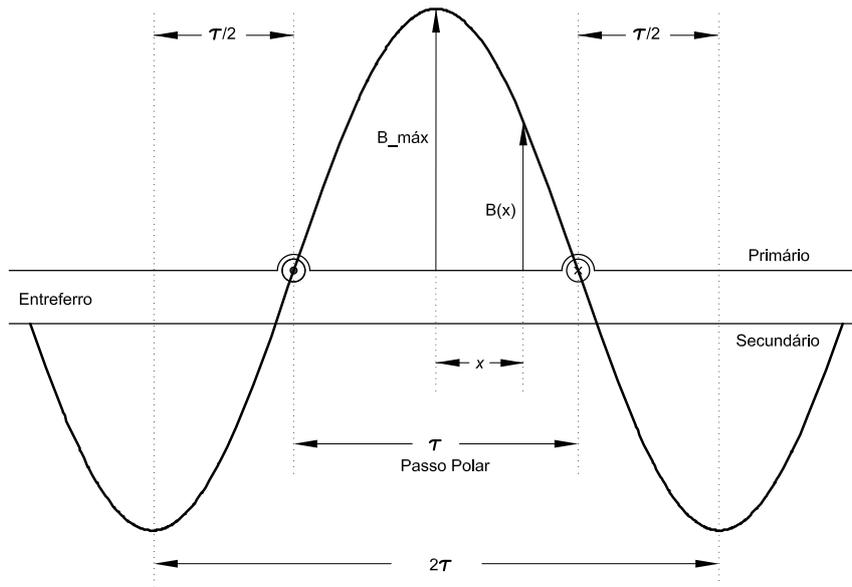


Figura 2.15: Campo Trafegante

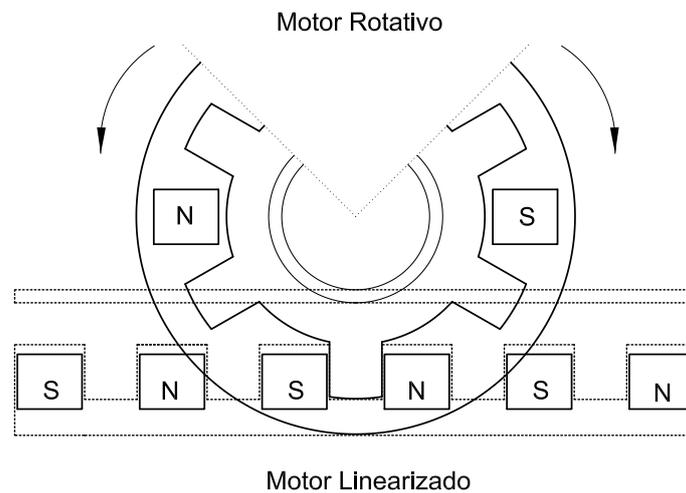


Figura 2.16: Linearização da Máquina Rotativa

síncrona. A definição de  $v_s$  pode ser feita através da derivada da função posição quando a amplitude do campo magnético for máxima, o que ocorre quando o cosseno da função é zero.

$$I = I_m \sin[\omega t + \phi] \tag{2.1}$$

$$B(x, t) = B_{max} \sin \left[ \omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right] \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
\omega t - \frac{\pi}{\tau}x &= k \\
2\pi ft - \frac{\pi}{\tau}x &= k \\
x &= k + \frac{2\pi\tau ft}{\pi} \\
v_s &= \frac{dx}{dt} = 2\tau f
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

A operação de uma máquina assíncrona está fundamentada na diferença entre as velocidades do campo e da parte móvel, ao que denomina-se de velocidade de escorregamento. Não existe ação-motora nem ação-geradora à velocidade síncrona nos motores de indução. O escorregamento ( $s$ ), definido pela Eq.(2.4), será a diferença de velocidade em p.u.

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \tag{2.4}$$

## 2.4 Circuito Equivalente

O circuito equivalente do motor linear desenvolvido por *Duncan* para o MIL está apresentado na Figura 2.17 e considera o efeito de extremidade, característico do motor de indução linear [16]. A tabela 2.3 descreve a simbologia do circuito equivalente do motor. O circuito equivalente considera tensões equilibradas e está referido a uma única fase, simplificadamente, pode-se considerar que os enrolamentos são simétricos e as demais fases deslocadas de  $\pm 120^\circ$ .

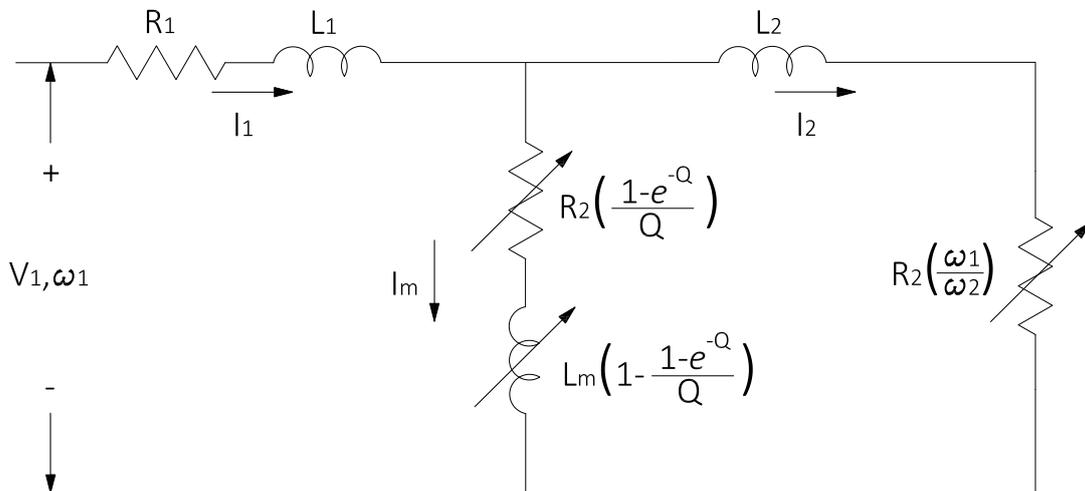


Figura 2.17: Circuito Equivalente do Motor de Indução Linear

Tabela 2.3: Descrição dos parâmetros do circuito equivalente do MIL

| Simbologia | Descrição   |
|------------|---|
| $R_1$      | Resistência do primário                                     |
| $R_2$      | Resistência do secundário refletida no primário             |
| $L_1$      | Indutância de dispersão no primário                         |
| $L_2$      | Indutância de dispersão no secundário refletida no primário |
| $L_m$      | Indutância de magnetização                                  |
| $\omega_1$ | Frequência síncrona   |
| $\omega_2$ | Frequência no secundário                                    |
| $Q$        | Indicador de efeito de extremidades                         |

Para uma análise em regime permanente utiliza-se o modelo proposto e algumas grandezas podem ser determinadas conforme [17]. A potência eletromagnética ( $P_{em}$ ) total desenvolvida pelo motor será dada pela Eq.(2.5). Parte da potência eletromagnética converte-se em potência útil, chamada de ( $P_{conv}$ ), e será entregue efetivamente ao motor gerando uma força longitudinal ( $F_x$ ) dada pela Eq.(2.6). A frequência angular mecânica ( $\omega_m$ ) pode ser definida como sendo a diferença entre a frequência no primário e a frequência no secundário, conforme mostrado na expressão (2.7). A força longitudinal desenvolvida pela corrente induzida no secundário, considerando os efeitos de extremidade, está apresentada na Eq.(2.8). Estes efeitos característicos dos motores lineares, são discutidos na seção 2.5.

$$P_{em} = 3I_2^2 R_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.5)$$

$$F_x = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_2} \quad (2.6)$$

$$\omega_m = \omega_1 - \omega_2 \quad (2.7)$$

$$P_{sec} = \frac{3I_m^2 (1 - e^{-Q}) R_2}{Qv} \quad (2.8)$$

A grandeza adimensional, denominada  $Q$  apresentada na Eq.(2.9), indica a capacidade que o motor tem de não ser influenciado pelos efeitos de extremidade sendo definido pelo tempo  $T_v$  normalizado por  $T_2$ . A constante de tempo do circuito indutivo do MIL,  $T_2$ , está definida na Eq.(2.10). A constante  $T_v$ , definida na Eq.(2.11), representa o tempo utilizado para um primário de comprimento  $D$  atravessar um ponto qualquer no secundário.

$$Q = \frac{DR_2}{v(L_m + L_2)} \quad (2.9)$$

$$T_2 = \frac{L_m + L_2}{R_2} \quad (2.10)$$

$$T_v = \frac{D}{v} \quad (2.11)$$

Quando o indicador  $Q$  apresenta um valor alto, de acordo com os parâmetros da Figura 2.18, significa que o motor não sofre a influência dos efeitos de extremidade, pois quando  $Q \rightarrow \infty$  a resistência do secundário refletida no primário ( $R_2[(1 - \exp^{-Q})/Q]$ ) tende a zero já que  $[(1 - \exp^{-Q})/Q] \rightarrow 0$ . Em baixas velocidades a indutância de magnetização tende a  $L_m$ , pois  $\{1 - [(1 - \exp^{-Q})/Q]\} \rightarrow 1$ . Nessas condições de operação, não ocorre perda de potência no motor nem há o enfraquecimento do campo magnético no entreferro.

Quanto menor for o indicador ( $Q \rightarrow 0$ ), condição de operação em velocidades elevadas, maior a influência do efeito de extremidade. Nessa condição a resistência do secundário tende ao seu valor máximo gerando maiores perdas de potência, pois  $[(1 - \exp^{-Q})/Q] \rightarrow 1$ . No ramo magnetizante,  $1 - [(1 - \exp^{-Q})/Q]$  tende a zero e conseqüentemente  $L_m \rightarrow 0$  resultando em perda de magnetização da máquina.

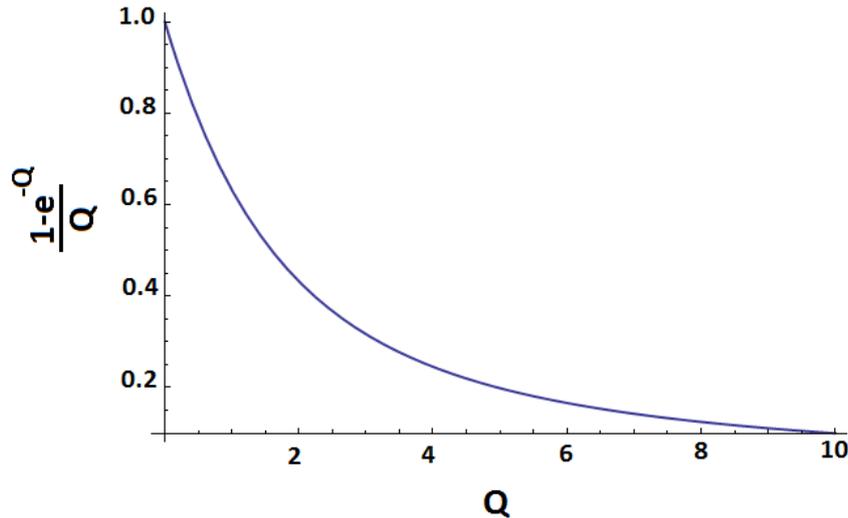


Figura 2.18:  $Q$  - Indicador de influência do efeito de extremidade no MIL

## 2.5 Efeitos de Extremidade

O MIL apresenta fenômenos particulares denominados efeitos de extremidade conforme descrito a seguir:

**Efeito de Extremidade Longitudinal Estático** Ocasionado pela assimetria entre a posição dos enrolamentos de fase nas extremidades do motor linear.

**Efeito de Extremidade Longitudinal Dinâmico** A descontinuidade do circuito magnético do primário em relação ao secundário, em função de seu comprimento finito, gera uma relutância magnética no entreferro a medida que o primário se desloca. Isso deve-se ao aumento súbito do fluxo causado pela penetração do campo magnético em uma nova secção do secundário. Esse evento ocorre em ambos os lados do motor, mas de forma diferenciada. Considerando um motor com primário curto e secundário longo e tomando como referencial o seu sentido de deslocamento, a extremidade do primário que penetra antecipadamente o secundário será  $E_{ext1}$ . Essa extremidade deixa o campo magnético em direção a uma secção que oferece uma relutância maior e o fluxo enlaçado em  $E_{ext1}$  sofrerá oposição ao seu decaimento, pelo fluxo gerado através das correntes induzidas. No entanto a extremidade  $E_{ext2}$  se desloca de modo a entrar em uma região sob a ação do campo magnético, contudo as correntes induzidas produzirão um fluxo que irá se opor ao crescimento do fluxo enlaçado em  $E_{ext2}$ . A Figura 2.19 ilustra as extremidades do motor e o sentido de deslocamento do primário.

**Efeito de Extremidade Transversal** A não-uniformidade da corrente induzida no secundário em função da sua largura limitada gera um efeito nas bordas do primário, que passa a possuir uma densidade de fluxo maior que a densidade na parte central. Motores lineares que possuam um secundário com barra de curto circuito nas laterais, reduzem este efeito por criarem um caminho para a circulação da corrente. A distribuição do fluxo magnético no entreferro com a ação do efeito de borda e desprezando-a, pode ser encontrado em [9].

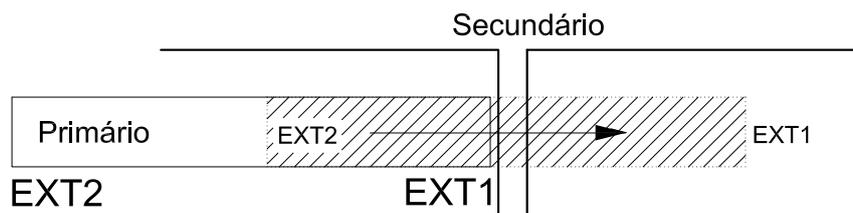


Figura 2.19: Representação do efeito de extremidade dinâmico

O efeito de extremidade influi na distribuição de campo magnético no entreferro e a densidade de fluxo magnético pode ser dada pela soma do campo trafegante à velocidade síncrona com uma parcela exponencialmente atenuada e defasada conforme mostrado na equação (2.12). Nesta equação,  $B_{max}$  está definido como a amplitude do campo à velocidade síncrona,  $B_{ext}$  a amplitude do campo amortecido pelo efeito de extremidade,  $1/\alpha_e$  a constante de amortecimento,  $\tau_e$  o meio comprimento de onda e  $\delta$  o ângulo de fase [18].

A parcela atenuada da Eq.(2.12) é causada pela descontinuidade do circuito magnético referente a extremidade de entrada do primário, ou seja, a que primeiro atravessa cada nova secção do secundário. Uma parcela da densidade do fluxo magnético, referente à extremidade de saída, pode ser desprezada conforme apresentado em [7].

$$B(x, t) = B_{max} \sin \left[ \omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right] + B_{ext} e^{-\frac{x}{\alpha_e}} \sin \left[ \omega t - \frac{\pi}{\tau_e} x + \delta \right] \quad (2.12)$$

Esta dinâmica do campo no MIL influencia o desempenho do motor e tende a comprometer a capacidade de tração, a eficiência da máquina e o fator de potência. A intensidade dos efeitos deste fenômeno cresce proporcionalmente com a velocidade de operação da máquina podendo ser desprezada em baixas velocidades. A topologia e a forma construtiva do MIL podem minimizar os efeitos de extremidade. Estudos recentes mostram que motores de indução lineares de dupla face e primário longo operando em altas velocidades não sofrem redução significativa na força de tração [19]. A influência do efeito de extremidade no motor linear pode ser analisada através do ramo de magnetização de acordo com [16]-[17].

## 2.6 Força de Tração e Atração

O motor de indução linear de face simples (MILS) desenvolve uma força no sentido longitudinal ( $F_x$ ), responsável pelo movimento, e uma força no sentido normal ao plano ( $F_n$ ), conforme ilustrado na Figura 2.20.

A força de tração ( $F_x$ ), ou impulso, será desenvolvida pela interação entre o campo gerado pela corrente induzida no secundário com o campo trafegante no entreferro. Os dois campos magnéticos presentes no motor tentam alinhar-se gerando movimento.

A força normal ( $F_n$ ) aparece como resultado da interação do fluxo magnético,

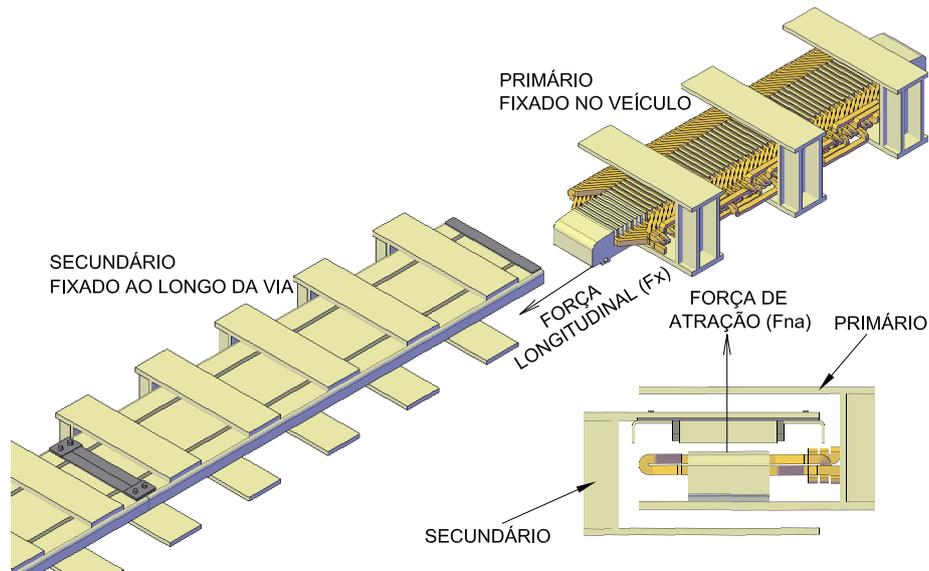


Figura 2.20: Ilustração das forças atuantes no motor de indução linear - *Cortesia de L. S. Mattos.*

que atravessa o entreferro, com o secundário e possui duas componentes. A primeira componente ( $F_{na}$ ), representa a força atrativa entre o primário e o núcleo de ferro do secundário. A segunda componente ( $F_{nr}$ ), representa a força de repulsão entre o primário e a  $FMM$  no secundário. Uma análise do comportamento destas forças no desempenho do MILS está apresentada a seguir [20].

### 2.6.1 Força de Tração

O circuito equivalente do motor linear permite definir a potência eletromagnética desenvolvida pelo motor linear, também denominada força longitudinal ou força de tração, conforme mostrado na Eq.(2.5). A corrente de magnetização apresenta valores elevados quando comparado com motores que possuem o fluxo magnético transversal, porém fornecem uma força longitudinal maior. Através de ensaio, utilizando *Strain Gage*, foi possível mensurar a magnitude da força de tração desenvolvida pelo MIL para diferentes valores de entreferro. O sistema de medição completo esta mostrado na Figura 2.21.



Figura 2.21: Sistema de medição de força longitudinal no EALP 1000/6

O teste foi realizado com o primário bloqueado, variando o entreferro e mantendo a relação  $V/f$  constante conforme apresentado na tabela 2.4. O entreferro pode se tornar uma alta relutância e para reduzir as perdas de potência no circuito magnético e aumentar a eficiência do motor elétrico deve ser o menor possível. Os resultados obtidos evidenciam que a eficiência de um motor depende do entreferro. Força e corrente, para valores de entreferro entre 8 e 20mm, são apresentados nas Figuras 2.22 e 2.23.

Tabela 2.4: Relação  $V/f$  do ensaio estático

| <b>f</b> | <b>V</b> | <b>V/f</b> |
|----------|----------|------------|
| 5        | 85       | 17.0       |
| 10       | 165      | 16.5       |
| 15       | 245      | 16.3       |
| 20       | 320      | 16.0       |
| 25       | 390      | 15.7       |

Os resultados se assemelham aos dados fornecidos pelo fabricante [14], que utilizou o seguinte método para determinar a força longitudinal: “O levantamento da curva Força x Escorregamento foi realizado de forma estática, impondo a frequência secundária por meio da alimentação primária, simulando o ponto de escorregamento. A tensão de referência utilizada não foi a primária, e sim a induzida na bobina exploratriz, a qual indica a indução magnética no entreferro. Tendo em mãos o valor da tensão induzida em vazio ( $f_2 = 0Hz$ ) e em “curto-circuito”, ou seja, secundário travado ( $f_2 = 25Hz$ ), traçamos o perfil da queda de tensão no ramo magnetizante (linear). Para cada ponto, porém, foi realizada a correção  $V/f$  para se obter a tensão de referência na bobina exploratriz em cada frequência secundária”(CHABU, 2009) [14].

### 2.6.1.1 Perdas por Descontinuidade Elétrica e Magnética

Devido à descontinuidade elétrica e magnética do circuito formado pelo secundário do MIL, ocorrem perdas na capacidade de tração.

A descontinuidade elétrica e magnética ocorrem por razões construtivas, já que o MIL possui um secundário-longo e precisa ser conectado entre suas muitas seções de comprimento  $L = 1512mm$ , conforme apresentado na Figura 2.24.

A Figura 2.25 apresenta a corrente no primário do motor quando este passa por duas regiões com descontinuidade, elétrica e magnética, no secundário. Durante a

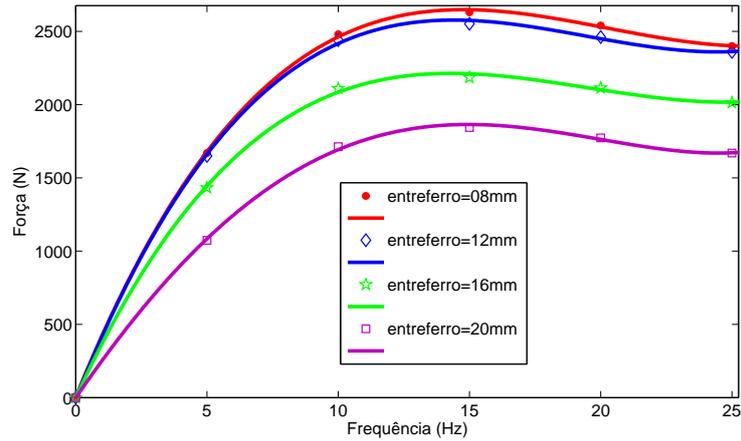


Figura 2.22: Força longitudinal desenvolvida com a variação do entreferro.

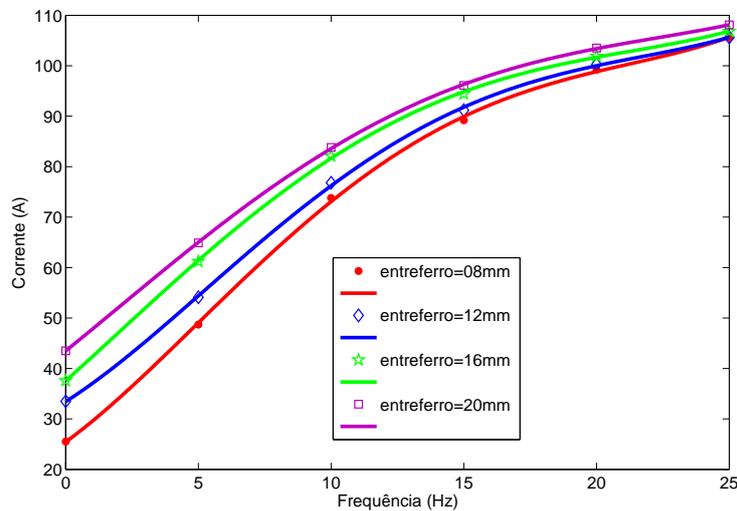


Figura 2.23: Corrente de pico na fase com a variação do entreferro.

passagem pela junção dos secundários a corrente sofre um afundamento (indicado no gráfico) e de acordo com a equação (2.5) ocorre uma perda na força de tração desenvolvida pelo motor. Para minimizar esta perda, foram realizadas conexões entre as barras de curto-circuito do secundário<sup>10</sup>, anulando a descontinuidade elétrica e fornecendo assim um caminho para a corrente conforme apresentado na Figura 2.26. A descontinuidade magnética continua presente no MIL já que não foi possível eliminar o gap entre os secundários.

Foram realizados testes de força de tração no MIL para determinar o comportamento do motor com diferentes configurações do secundário, conforme ilustrado na Figura 2.27:

<sup>10</sup>A Equacional, fabricante do motor, projetou uma emenda para os secundários que esta apresentada no Anexo A.5.

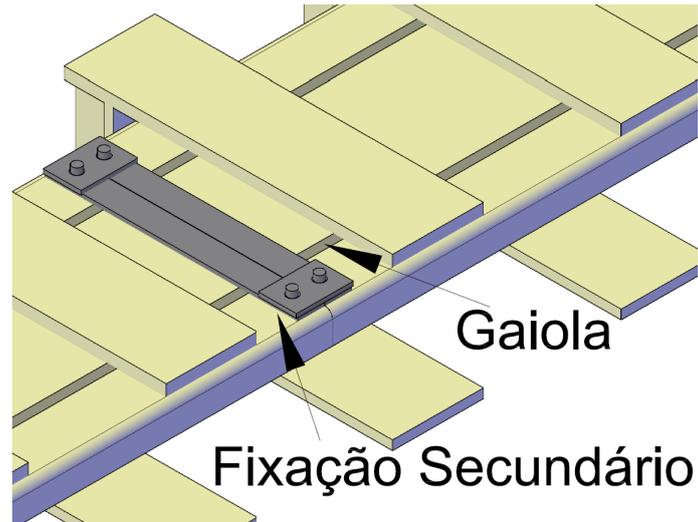


Figura 2.24: Descontinuidade elétrica e magnética no secundário do MIL.

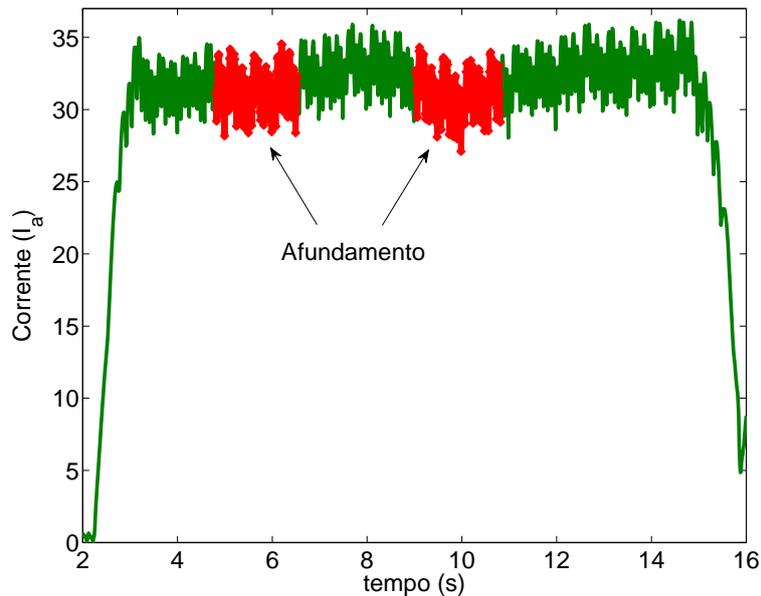


Figura 2.25: Afundamento na corrente de pico do MIL devido a descontinuidade elétrica e magnética.

- Secundário contínuo
- Secundário com descontinuidade magnética
- Secundário com descontinuidade elétrica e magnética

Utilizando uma relação  $V/f$  constante, de acordo com a Tabela 2.4, foram impostas diferentes frequências ao MIL e medidas as resposta de corrente e força para cada uma das configurações de secundário. As Figuras 2.28 e 2.29 mostram a

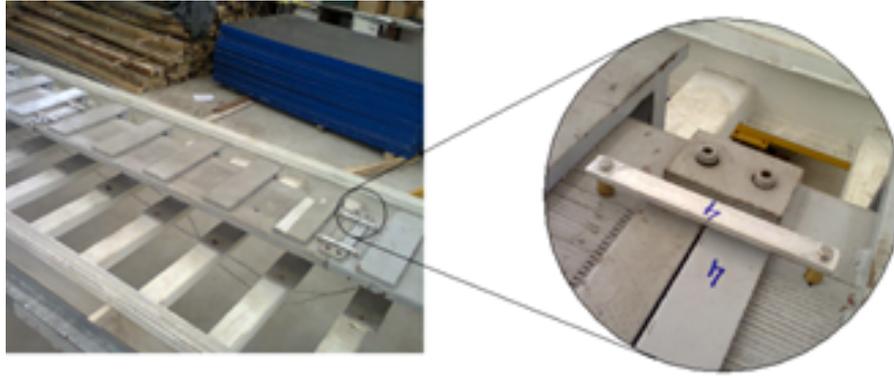


Figura 2.26: Conexão entre as barras de alumínio do secundário (gaiola).

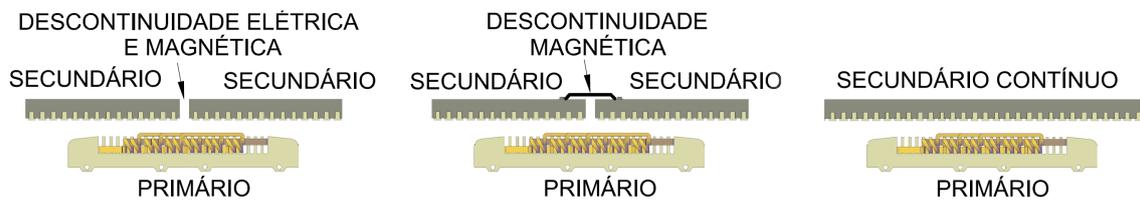


Figura 2.27: Configuração do MIL com secundário contínuo e descontínuo.

corrente e a força desenvolvidas pelo motor.

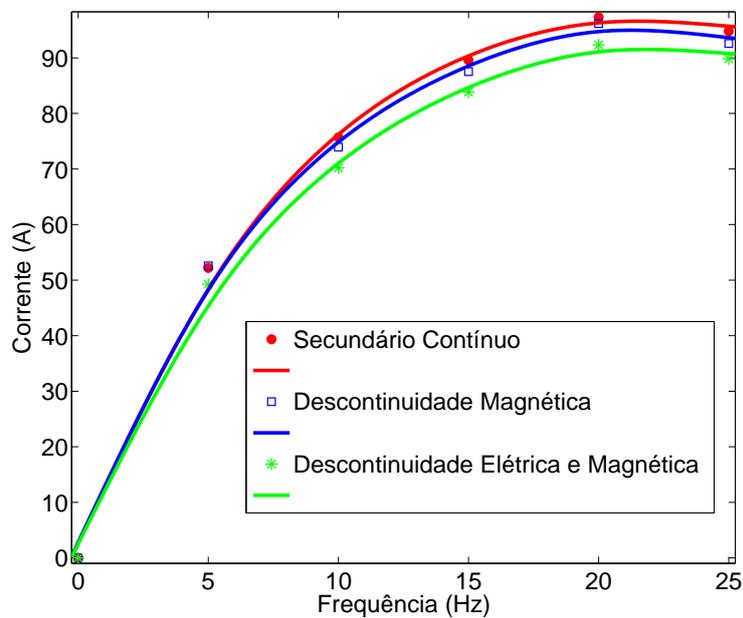


Figura 2.28: Corrente de pico no primário com secundário contínuo e descontínuo - entreferro=8mm.

Os resultados mostram que o MIL com o **secundário contínuo** desenvolve maior força de tração e naturalmente serve de controle para as demais configu-

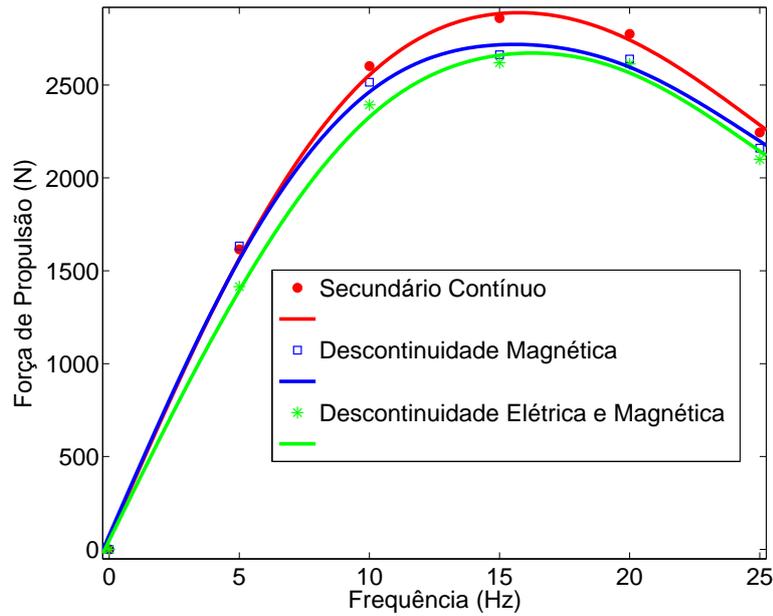


Figura 2.29: Força de propulsão (tração) do primário com secundário contínuo e descontínuo - entreferro=8mm.

rações. A conexão elétrica melhora a relação de força, mas o desacoplamento magnético influencia negativamente no motor. O **secundário com descontinuidade magnética** garante um melhor desempenho do motor quando comparado com a configuração de **secundário com descontinuidade elétrica e magnética**.

## 2.6.2 Força de Atração

A força de atração no MIL possui duas componentes, sendo uma componente de repulsão ( $F_{nr}$ ) e uma de atração ( $F_{na}$ ). A Figura 2.20 ilustra o comportamento atrativo entre o primário e o secundário. A força de repulsão ( $F_{nr}$ ) ocorre pela interação entre a corrente no secundário  $I_2$  e a corrente no enrolamento do primário  $I_1$ , conforme apresentado por [16]. Na Eq.(2.13) que descreve a força de repulsão,  $N$  representa o número de fases e  $d$  a distância entre o primário e a lâmina do secundário e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética [21].

A força de atração ocorre pela interação do campo magnético gerado pela circulação de corrente nos enrolamentos do motor com o material ferromagnético do núcleo do secundário. Tem origem no fluxo que atravessa o entreferro  $g$  podendo ser descrita pela equação (2.14). O campo magnético apresenta proporcionalidade com a relação  $V/f$  e a força de atração permanece constante para uma determinada faixa de frequência.

O motor de indução linear utilizado no veículo MagLev-Cobra pode fornecer uma força de atração ( $F_{na}$ ) entre 410 e 660kg, como função do entreferro [14]. A Figura 2.30 mostra o sistema utilizado para a realização do teste estático da força de atração. A resposta está apresentada na Figura 2.31. Para baixas frequências, a resistência do primário mostra-se significativa e para frequências elevadas a impedância do primário contribui para reduzir a força de atração.



Figura 2.30: Sistema de medição da força de atração desenvolvida pelo motor linear. Primário=257kg, plataforma=98kg, inversor=36kg, guarda-corpo:23.15kg e carga=35.85kg

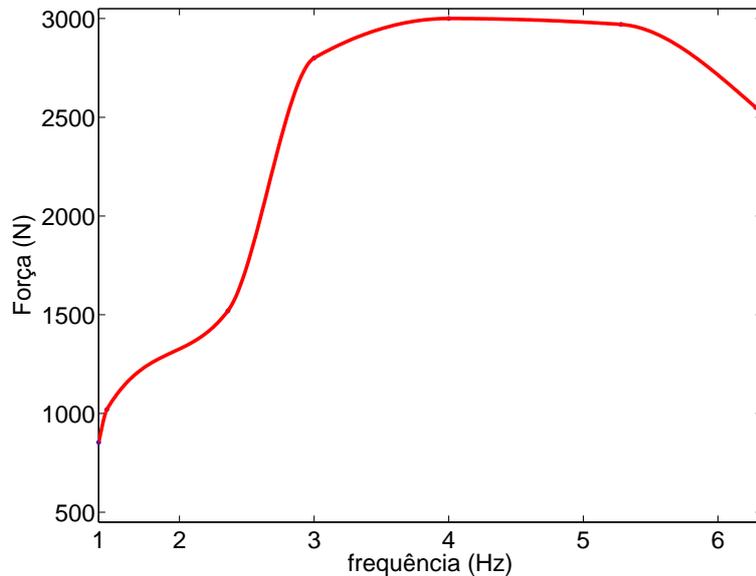


Figura 2.31: Força (líquida) de atração constante entre 3 e 6Hz ( $m=450\text{kg}$ ,  $g=8\text{mm}$ )

Em uma análise dinâmica do motor a força de atração pode ser descrita pela equação (2.15). Já uma análise estática demonstra que a representação da força

de atração vertical deve ser dada pela equação (2.16), uma vez que a grandeza  $Q$  depende da velocidade [16].

$$F_{nr} = N \frac{\mu_0 I_2^2}{4\pi d} \quad (2.13)$$

$$F_{na} = -\frac{1}{\mu_0} |B|^2 A \therefore B \propto \frac{V}{f} \quad (2.14)$$

$$F_{na} = I_m^2 L_m \frac{N}{2g} \left\{ 1 - \frac{(1 - e^{-Q})(3 - e^{-Q})}{2Q} \right\} \quad (2.15)$$

$$F_{na} = I_m^2 L_m \frac{N}{2g} \quad (2.16)$$

Um teste dinâmico avaliou a contribuição da geometria do EALP 1000/6 para o sistema de levitação do veículo. O experimento foi realizado com o motor linear suportando uma carga de 1000kg, distribuídos entre o peso do módulo veicular e os passageiros. Foi imposta uma frequência de 5Hz ao enrolamento do primário e o veículo operava com um gap de levitação inicial de  $\sim 11$ mm e com entreferro de  $\sim 13$ mm dada a proporcionalidade inversa entre estas características, ilustradas na Figura 3.2, conforme será abordado no capítulo 03. Os resultados apresentados na Figura 2.32 demonstram que a geometria do MIL proporciona um ganho na capacidade de carga do veículo, pois o gap de levitação obteve um valor médio de  $\sim 16.8$ mm durante o ensaio. Para a realização destas medidas foi utilizado um sensor ultrassônico (BALLUFF - BUS M18K0-XAER-040-S92K), Figura 2.33. A folha de dados encontra-se no Apêndice A.3.

O motor foi projetado com rodas de proteção, ou mancal de proteção do primário, e estão ilustradas na Figura 2.34. Esta proteção impede que o secundário se acople ao primário devido a atração eletromagnética. Os mancais eram construídos com material condutor, mas foi constatado que as impedâncias capacitivas, que na maioria das vezes era um curto-circuito<sup>11</sup>, tornam-se baixas nas altas frequências produzidas pelo inversor possibilitando a circulação de corrente entre o mancal e o secundário. Os resultados do ensaio estão apresentados na Tabela 2.5, e a substituição do mancal condutor por um mancal não condutor foi realizada.

O controle do entreferro torna-se importante, para garantir que o gap de levitação seja constante e o sistema mais robusto não sofrendo com o desbalanço de

---

<sup>11</sup>O curto-circuito ocorre pelo contato físico entre o mancal de proteção do primário com o secundário, sempre que a força de atração se torna maior que a força normal.

massa durante o transporte de passageiros.

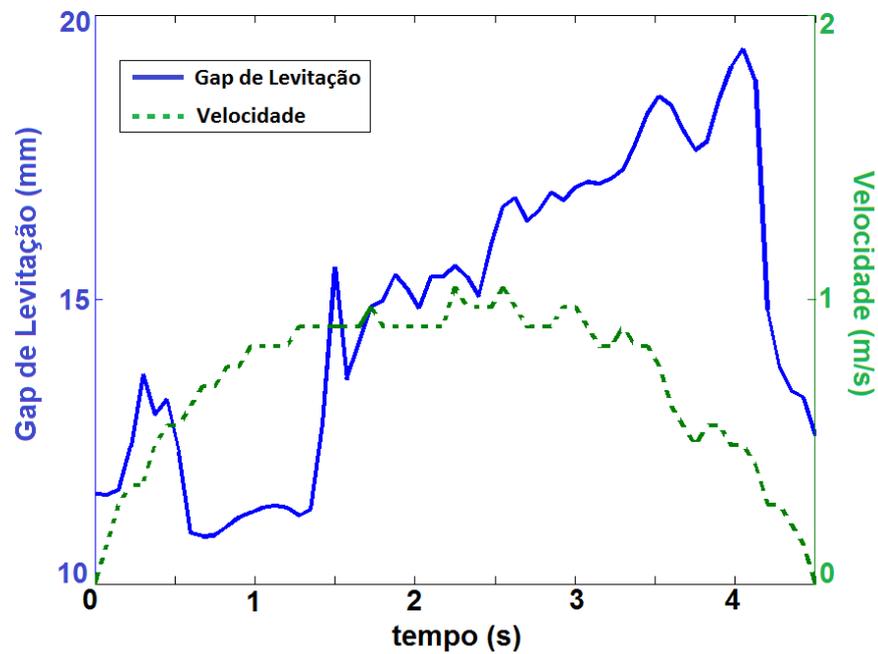


Figura 2.32: Gap de Levitação e Velocidade em um percurso de 4.5m

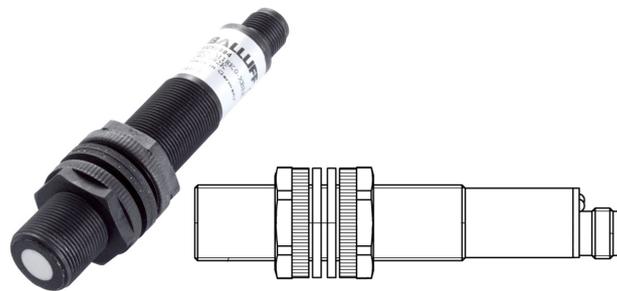


Figura 2.33: Sensor de distância ultrassônico utilizado na medição o gap de levitação do MagLev-Cobra.

Tabela 2.5: Tensão e Corrente de modo comum

| Frequência de Chaveamento  | 1.25kHz            | 10kHz              |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| Tensão do barramento CC    | 630V <sub>cc</sub> | 630V <sub>cc</sub> |
| Tensão de Modo Comum RMS   | 320V               | 340V               |
| Tensão de Modo Comum Média | 4V                 | 20V                |
| Corrente de Modo Comum     | 500mA              | 500mA              |

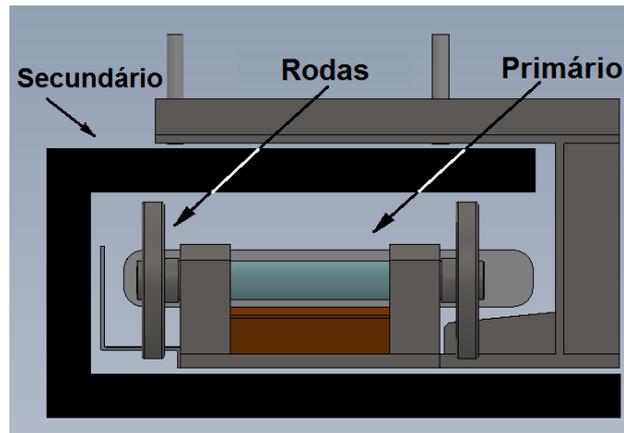


Figura 2.34: Secundário em forma de “C”.

## 2.7 Controle Escalar $V/f$

O motor de indução linear pode ser controlado através de diversas técnicas de variação da frequência, classificadas em [22]:

- Controle Direto do Fluxo e do Torque (DTFC)
- Controle Vetorial do Fluxo no Estator
- Controle Vetorial do Fluxo no Rotor
- Controle Escalar  $V/f$

O controle escalar  $V/f$  com malha aberta foi adotado na realização dos experimentos apresentados neste trabalho. Este tipo de controle apresenta uma resposta satisfatória quando a operação não requer variação rápida de velocidade.

Os motores de indução linear foram controlados com o  $V/f$  implementado com um programa Ladder fornecido pela WEG S/A denominado *WLP - WEG LADDER PROGRAMMER*<sup>12</sup>. A página do Ladder esta apresentada na Figura 2.35. A lógica implementada foi responsável pela trajetória do MIL, e o funcionamento dos blocos apresentado na Figura 2.36.

<sup>12</sup>WLP - <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-wlp-software-de-programacao-ladder-weg-10000051020-9.1x-manual-portugues-br.pdf>

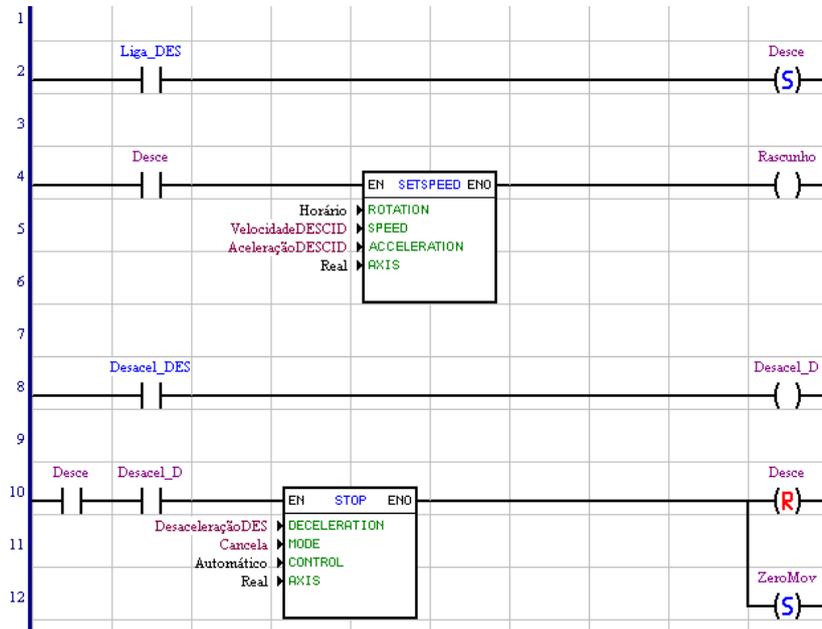


Figura 2.35: Operação do MIL com o LADDER PROGRAMMER

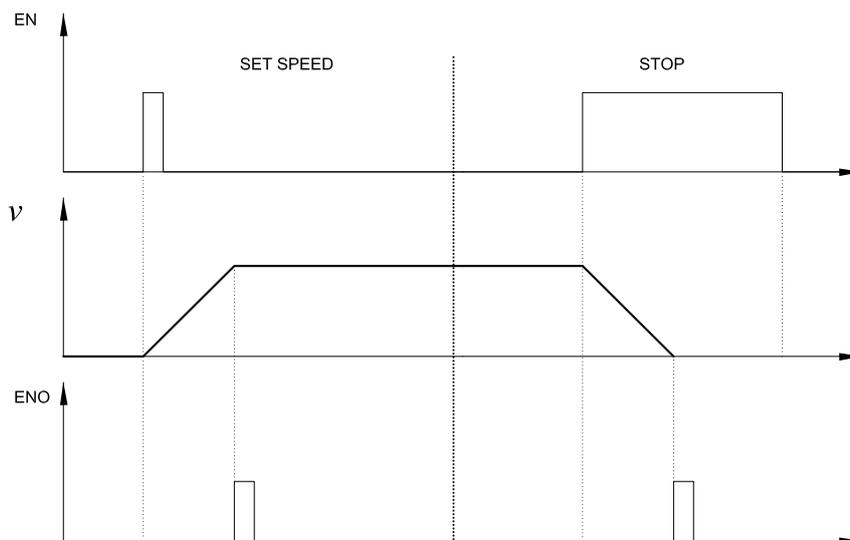


Figura 2.36: Funcionamento dos blocos do WLP - WEG LADDER PROGRAMMER

# Capítulo 3

## Operação do Veículo MagLev-Cobra

### 3.1 Levitação

O MagLev-Cobra<sup>1</sup> utiliza a técnica de levitação magnética supercondutora (SML). Essa técnica consiste, basicamente, em colocar um material supercondutor refrigerado na presença de um campo magnético. A fonte do campo magnético são os ímãs permanentes de neodímio, ferro e boro ( $Ne_2 - Fe_{14} - B$ ) que formam o trilho por onde trafega o veículo. Utiliza-se uma cerâmica de ítrio, bário e cobre ( $Y - Ba_2 - Cu_3 - O_7$ ) como material supercondutor.

O supercondutor precisa ser resfriado à  $-196^\circ C$ , com nitrogênio líquido ( $LN_2$ ), e permanece encapsulado em um criostato envolvido em uma câmara de vácuo. Quando exposto a campos magnéticos, o YBaCO expulsa parcialmente o fluxo magnético do seu interior, a este comportamento chama-se efeito Meissner [21]. Este estado termodinâmico proporciona uma força de levitação e garante a estabilidade na levitação sem necessitar da ajuda de controladores [23]. O criostato e o trilho de ímãs estão ilustrados na Figura 3.1. Devido à geometria do EALP 1000/6, existe uma relação de proporcionalidade inversa entre o entreferro e o gap de levitação, que pode ser vista na Figura 3.2.

A força de levitação será maior para os menores valores de gap de levitação, e portanto forçando o sistema a um determinado ponto de operação. Na Figura 3.3, vemos o resultado da medição da força de levitação obtida para diferentes gap's de levitação e com 24 amostras de material supercondutor no interior do criostato. A geometria adotada para o trilho do veículo descarta o uso de ímãs laterais, por

---

<sup>1</sup>Sítio do *MagLev-Cobra*: <http://www.dee.ufrj.br/lasup/maglev/>

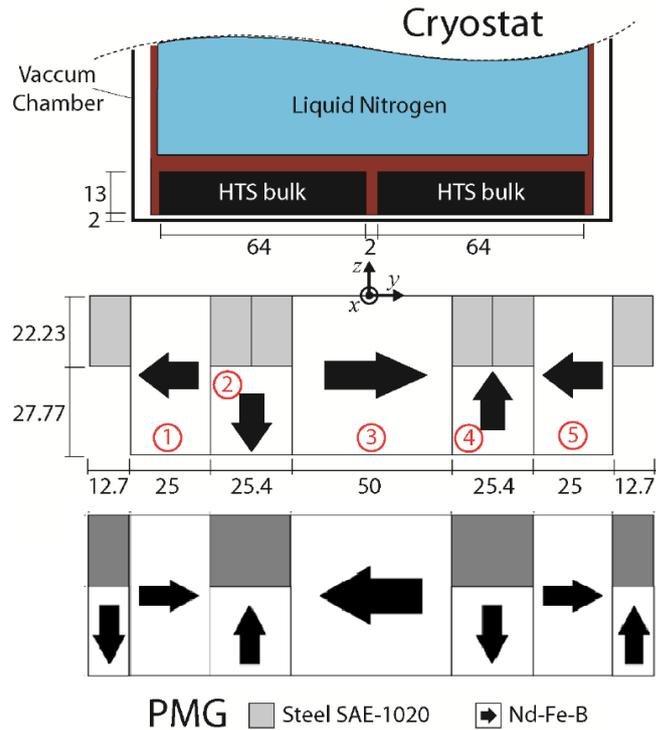


Figura 3.1: Trilho de imãs e criostato com supercondutores. *Cortesia de G.Sotelo.*

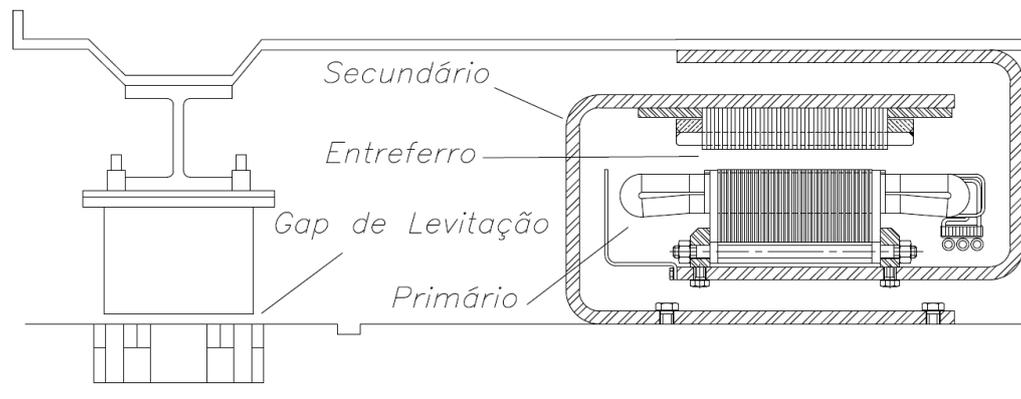


Figura 3.2: Proporcionalidade inversa entre o Gap de Levitação e o Entreferro.

contribuírem de maneira desprezível com a força de levitação conforme observado nos resultados apresentados na Figura 3.3 por G. Sotelo [24].

## 3.2 Frenagem Mecânica

O trem de levitação magnética necessita de uma frenagem mecânica, pois a frenagem elétrica não deve ser o único método de paralisação do veículo de acordo com as normas existentes [25].

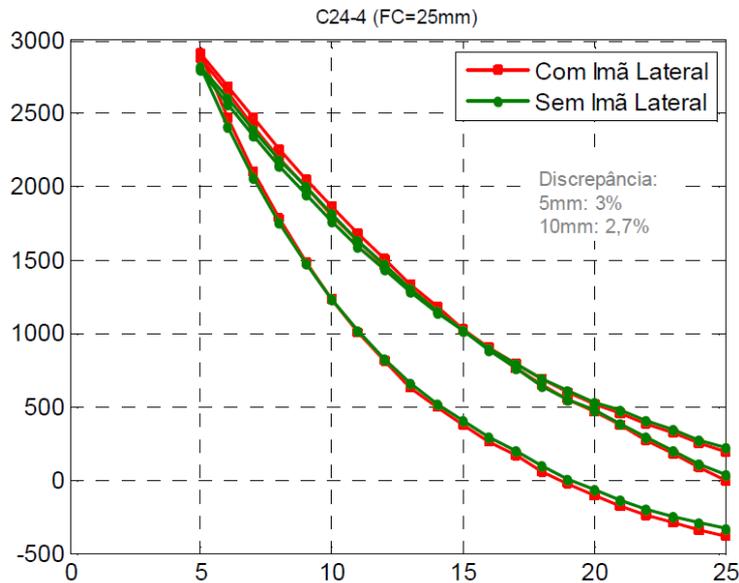


Figura 3.3: Força de levitação obtida com *Field Cooling* = 25mm.

O MagLev irá operar com um sistema de frenagem híbrido, ou seja, elétrico e mecânico da seguinte forma: Quando a velocidade nominal de operação do motor na linha de testes ( $v_{nom} = 5.56m/s$ ) for reduzida para  $\sim v_{nom}/40$ , razão utilizada em transportes verticais, a frequência será baixa e o controle aplicará uma corrente DC no motor. Essa componente DC irá desenvolver um torque de equilíbrio, em que as forças atuantes sobre o motor serão nulas  $\sum F = 0$ , mantendo o MIL paralisado. Neste momento, as sapatas do freio mecânico, ilustrados na Figura 3.4, atuarão. Esse aspecto operacional de frenagem impede que ocorra desgaste desnecessário nas lonas de freio.

Como método de frenagem emergencial utilizam-se também os freios mecânicos.

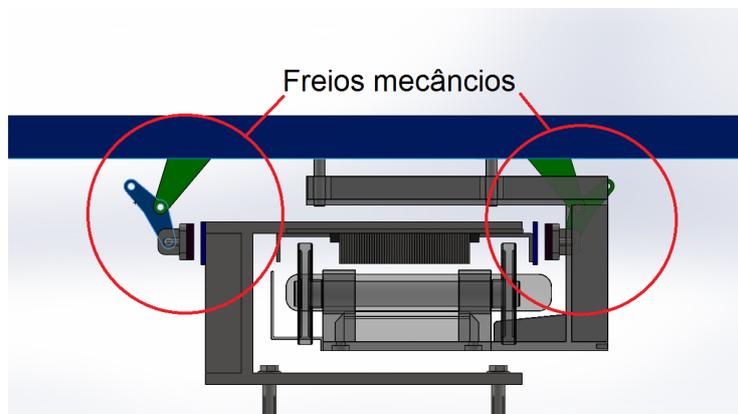


Figura 3.4: Freio mecânico do veículo MagLev-Cobra. *Cortesia de F. Costa.*

### 3.3 Modelo Matemático

O trem de levitação magnética MagLev-Cobra apresenta uma modelagem matemática simples quando comparado ao trem roda-trilho convencional. Os trens convencionais devem considerar forças de resistência devido à diferença de alinhamento entre os eixos da cada vagão, forças inerentes ao arrasto aerodinâmico, forças de resistência em função da curvatura do percurso [7]. Os trens de levitação magnética, devido a sua natureza construtiva, podem desprezar estas considerações feitas nos trens roda-trilho.

O movimento linear foi estudado através das equações da cinemática para corpos com aceleração uniforme. O deslocamento total será composto pela rampa de aceleração, velocidade nominal e rampa de desaceleração e as definições de cada uma destas fases operacionais podem ser facilmente deduzidas através da Figura 3.5. Assim o tempo de aceleração ( $t_a$ ), desaceleração ( $t_d$ ) além do tempo na velocidade nominal ( $t_n$ ), para determinada aceleração ( $a$ ) e desaceleração ( $d$ ), são dadas por:

$$\begin{aligned}t_a &= \frac{v_{nom}}{a} \\t_d &= \frac{v_{nom}}{d} \\t_n &= t_t - t_a - t_d\end{aligned}$$

A distância que o veículo irá percorrer durante a operação:

$$\begin{aligned}d_a &= \frac{t_a v_{nom}}{2} \\d_d &= \frac{t_d v_{nom}}{2} \\d_n &= t_n v_{nom}\end{aligned}$$

Na linha de testes, em fase de construção na UFRJ e com conclusão prevista para setembro de 2014, o tempo total do percurso será de  $t_t = 40s$ , a velocidade nominal  $v_{nom} = 5.56m/s$  e o percurso  $d_t = 200m$ , que possui inclinação de 0.89%, são grandezas que serão mantidas constantes. A capacidade de carga do veículo depende da força de tração e do gap de levitação [24]. A Figura 3.6 apresenta uma reta que relaciona a aceleração com a carga transportada para as condições de tráfego mencionadas ( $v_{nom} = 5.56m/s$  e  $t_t = 40s$ ).

Considerando ( $v = 0$ ) na Eq.(3.1), obtém-se a Eq.(3.2). A aceleração expressa na Eq.(3.4), permite definir a variação da posição em função da velocidade e do

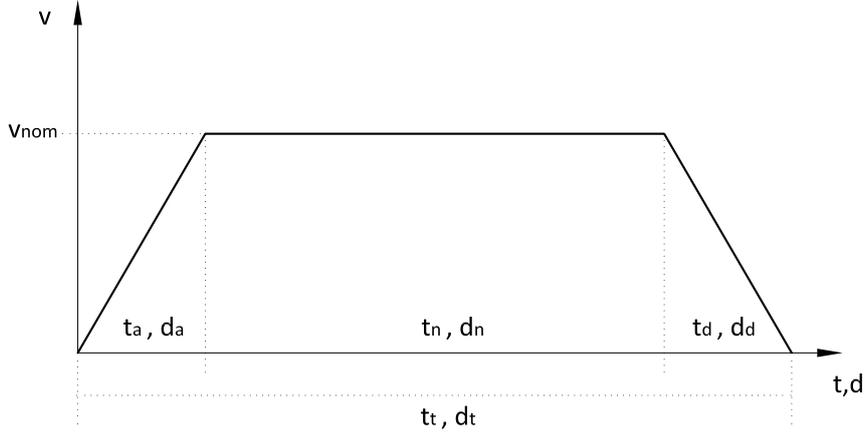


Figura 3.5: Dinâmica do veículo no percurso entre CT-I e CT-II.

tempo. Substituindo (3.3) em (3.2) obtém-se a Eq.(3.4).

$$v = v_0 + at \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} v &= 0 \therefore \\ v_0 &= -at \\ |a| &= \frac{v_0}{t} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \\ x - x_0 &= v_0t + \frac{1}{2}at^2 \\ \Delta x &= v_0t + \frac{1}{2}\left(-\frac{v_0}{t}\right)t^2 = v_0t + \frac{1}{2}(-v_0t) \\ \Delta x &= \Delta t\left(v_0 - \frac{v_0}{2}\right) = \Delta t\frac{v_0}{2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{v_0}{\Delta t} \\ a &= \frac{v_0}{2\Delta x}v_0 = \frac{v_0^2}{2\Delta x} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Os dois primários do motor linear são responsáveis por tracionar uma carga de 6000kg, o que corresponde a 1500kg por módulo. A Figura 3.7 mostra o diagrama do sistema no plano inclinado e as forças que agem sobre o corpo estão representadas. A força de aceleração e de frenagem podem ser descritas utilizando a Eq.(3.5) incrementando ou decrementando a massa do corpo ( $m$ ) e o módulo da

aceleração, conforme as Eq.(3.6) e (3.7), onde ( $\mu$ ) é o coeficiente de atrito e ( $g$ ) a aceleração da gravidade. Os resultados dos testes de força de tração permitem determinar as condições de tráfego do veículo. A Tabela 3.1 mostra as possíveis condições de operação do veículo em função da demanda de potência do MIL e da sensação de conforto dos usuários no veículo.

Tabela 3.1: Condições de Tráfego do MagLev-Cobra

| <b>a</b> ( $m/s^2$ ) | <b>ta</b> (s) | <b>td</b> (s) | <b>tn</b> (s) | <b>Fx</b> (N) |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.80                 | 6.95          | 6.95          | 26.10         | 48425.3       |
| 0.90                 | 6.17          | 6.17          | 27.64         | 54478.4       |
| 1.00                 | 5.56          | 5.56          | 28.88         | 60531.6       |
| 1.11                 | 5.00          | 5.00          | 29.98         | 67190.1       |
| 1.20                 | 4.63          | 4.63          | 30.73         | 72637.9       |

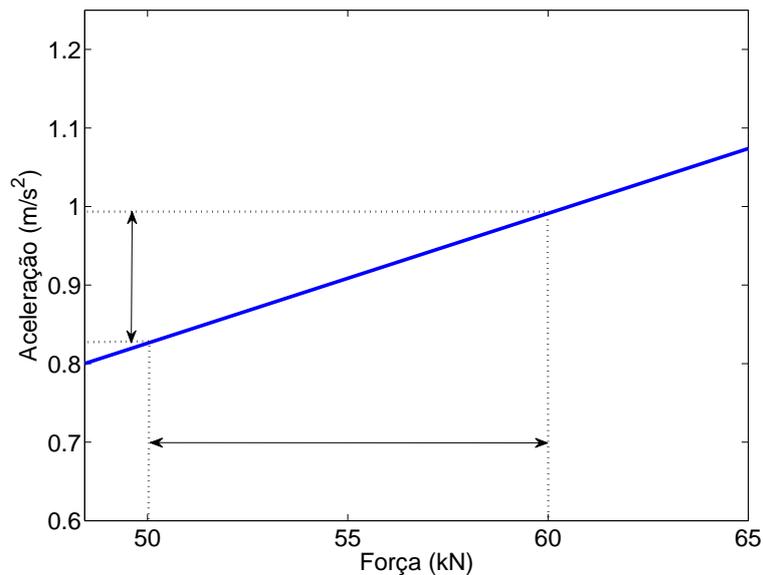


Figura 3.6: Retas de Aceleração×Força - (demanda do sistema com carga máxima - 60000N).

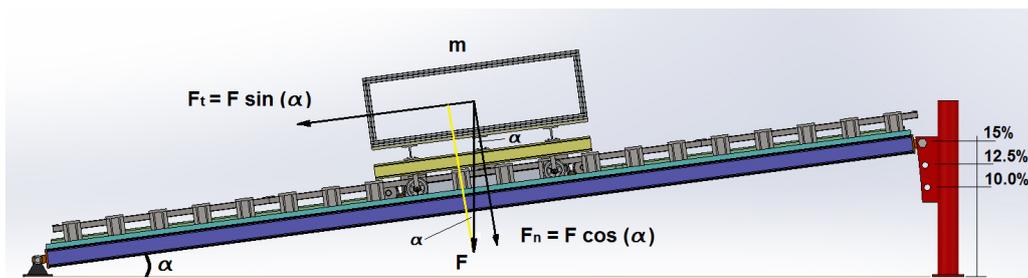


Figura 3.7: Diagrama de corpo livre no plano inclinado

$$\begin{aligned}
 F_x &= \mu mg \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha) \\
 F_x &= [\mu m \cos(\alpha) + m \sin(\alpha)]g
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

$$F_{xa} = \{[\mu m \cos(\alpha) + m \sin(\alpha)]g + ma\} \tag{3.6}$$

$$F_{xd} = \{[\mu m \cos(\alpha) + m \sin(\alpha)]g - ma\} \tag{3.7}$$

### 3.4 Simulação de Operação

Foi simulado a operação do MagLev-Cobra com o MIL tracionando uma carga de 250kg. O percurso foi realizado com o veículo desenvolvendo uma rampa de aceleração até atingir a velocidade nominal e em seguida entrando na rampa de desaceleração. Os resultados desta simulação estão apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9.

Durante os instantes de tempo  $t = 4 - 6s$  da Figura 3.8, percebe-se um aumento na corrente do motor em função da aceleração do veículo. O comportamento da corrente durante a desaceleração, entre os instantes  $t = 10 - 10.5s$ , esta apresentado na Figura 3.9. O MIL fornece força de partida sem exceder sua capacidade de carga.

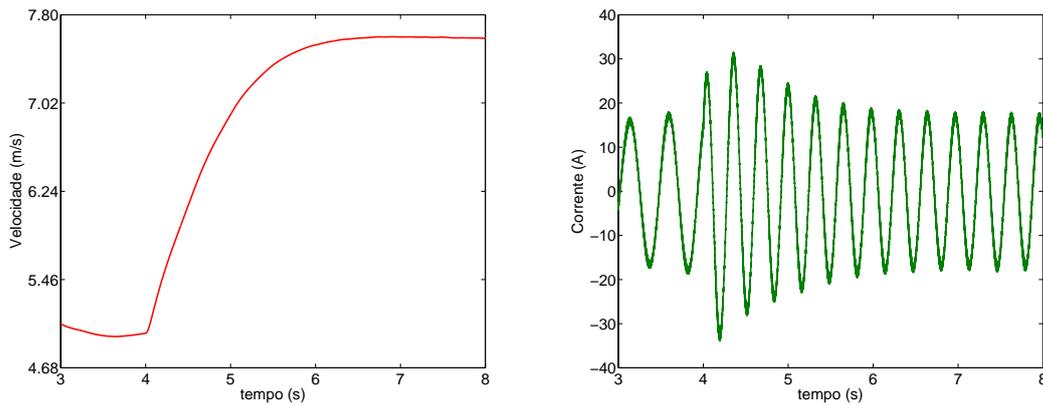


Figura 3.8: Comportamento da velocidade e da corrente no motor na aceleração -  $F = 2500N$

A simulação da operação do MIL tracionando uma carga de 450kg foi realizada e os resultados estão apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11. A corrente demandada

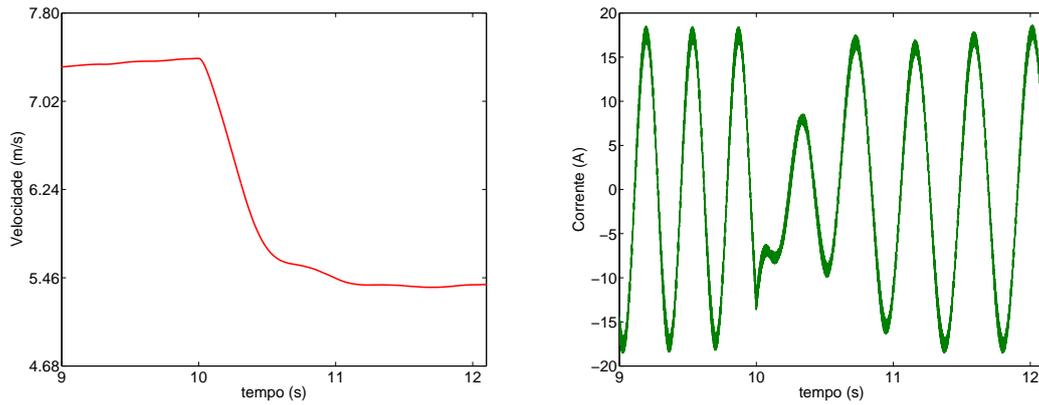


Figura 3.9: Comportamento da velocidade e da corrente no motor na desaceleração -  $F = 2500N$

está abaixo da corrente nominal ( $I_n = 53A$ ).

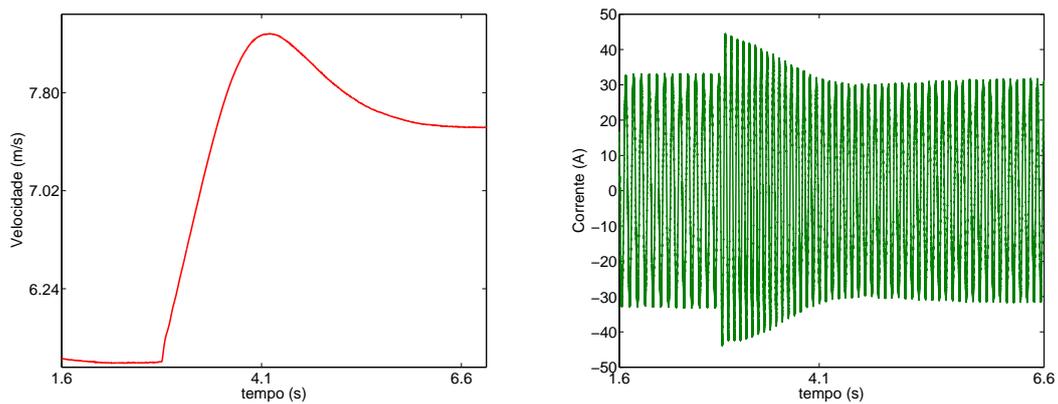


Figura 3.10: Comportamento da corrente no motor na aceleração -  $F = 4500N$

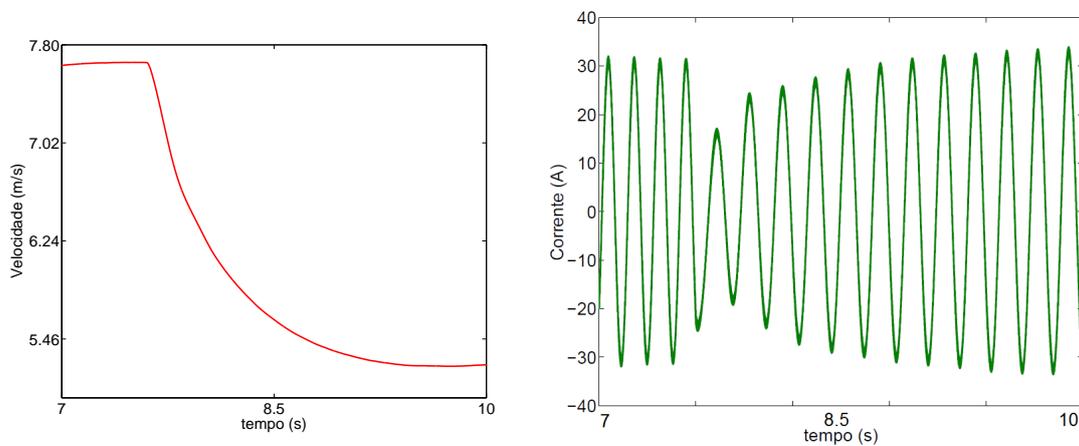


Figura 3.11: Comportamento da corrente no motor na desaceleração -  $F = 4500N$

# Capítulo 4

## Conversor Bidirecional de Potência

### 4.1 Conversor Regenerativo AFW-11

O retificador regenerativo, ou conversor bidirecional de potência, foi especificado para o controle de dois motores de indução lineares que operam com tensão de  $420V_{ac}$  @ $25Hz$ . O equipamento foi fornecido pela WEG S.A. Uma descrição do AFW-11 será feita a seguir juntamente com um estudo de cada fase da operação.

#### 4.1.1 Alimentação Geral

O retificador regenerativo será energizado através de um transformador trifásico ligado em  $\Delta$  com tensão de linha de  $380V_{ac}$  @ $60Hz$ . O equipamento está aterrado em um barramento de  $Cu\#25 \times 5mm$  no esquema TN-S. Utiliza-se na proteção contra curto-circuito, em semicondutores e/ou equipamentos eletrônicos até  $690V_{ac}$ , fusíveis ultrarrápidos tipo NH aR denominados  $F1$ ,  $F2$  e  $F3$  conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1: Fusíveis tipo faca -  $F1$ ,  $F2$  e  $F3$

## 4.1.2 Pré-Carga do Banco de Capacitores

O circuito de pré-carga limita a corrente de energização também chamada de corrente de *inrush*. Este circuito consiste na inserção de resistores em série com um contactor que permite controlar a carga no banco de capacitores do elo CC evitando que correntes elevadas provoquem transitórios eletromagnéticos indesejáveis o que pode variar o valor da frequência.

No Retificador Regenerativo AFW11, o circuito de Pré-Carga foi projetado e implementado conforme o diagrama multifilar apresentado na Figura 4.2, com os seguintes componentes:

1. Disjuntor motor de 3 pólos (Q3), mostrado na figura 4.3 que possui uma capacidade de interrupção elevada assegurando uma excelente proteção ao circuito elétrico através de seus protetores térmicos e magnéticos. A proteção térmica garante atuação em sobrecargas e falta de fase, e a proteção magnética garante atuação contra curtos-circuitos.
2. Contactor (K2), apresentado na Figura 4.4
3. Banco de resistores (PC1) com resistência nominal de  $20\Omega - 200W$ , conforme mostrado na figura 4.5
4. Ponte retificadora não controlada trifásica (V1) apresentada na figura 4.6.

O comportamento do sistema, sem a pré-carga, pode ser observado através do circuito monofásico  $LC$  apresentado na Figura 4.7. O circuito  $LC$  tem origem no diagrama multifilar da Figura 4.2, e a descrição de sua simbologia está dada a seguir:

- Resistores de (PC1) são desprezados,
- $L$  representa a indutância da fonte dada pelo auto-transformador,
- $D$  representa a chave, que ao ser fechada, indica o instante de condução da ponte a diodos (V1) em uma das fases,
- $C$  representa o banco de capacitor, em (A1).

Quando o capacitor está descarregado, com a impedância muito baixa, assume uma característica de curto-circuito o que justifica os valores elevados que a corrente poderá assumir no transitório. A corrente de *inrush* pode ser determinada analisando o circuito  $LC$ .

A equação (4.1) descreve o comportamento deste circuito  $LC$  no tempo.

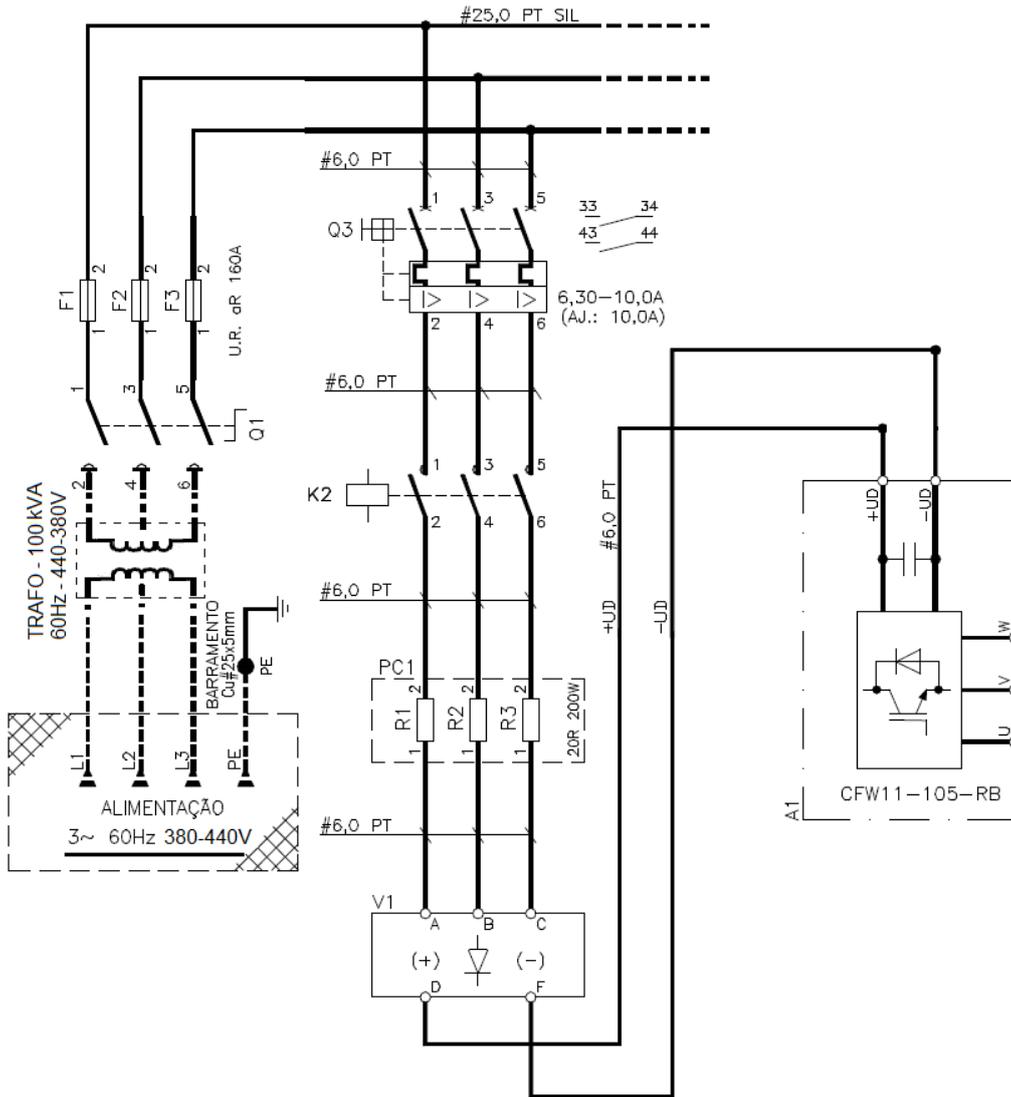


Figura 4.2: Diagrama Multifilar resumido do circuito de Pré-Carga



Figura 4.3: Disjuntor-Motor MPW25



Figura 4.4: Contactor -  $I_n = 9A$

$$V = L \frac{d}{dt} i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (4.1)$$

Quando aplica-se a Transformada de Laplace na Eq.(4.1), utilizando a tensão de



Figura 4.5: Resistores Pré-Carga



Figura 4.6: Ponte Trif. de Diodo

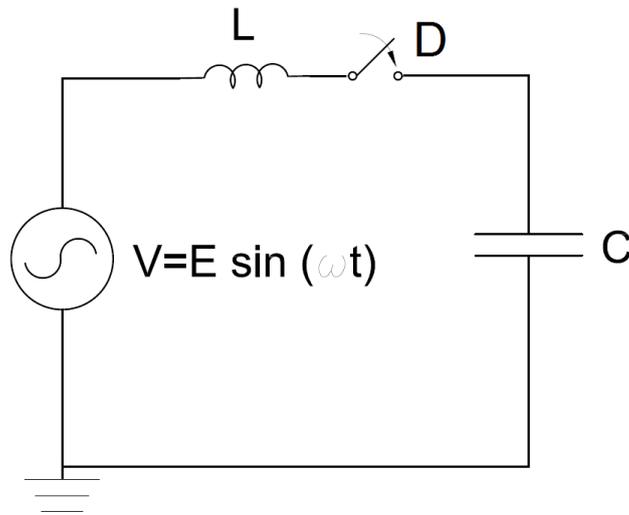


Figura 4.7: Circuito LC

pico, obtém-se a Eq.(4.2).

$$\sqrt{2}\frac{E}{s} = sLI(s) + \frac{1}{sC}I(s) \quad (4.2)$$

Isolando a corrente  $I(s)$  na Eq.(4.2), obtém-se a Eq.(4.3).

$$I(s) = \frac{\sqrt{2}E}{s\left(\frac{1}{sC} + sL\right)} \quad (4.3)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na equação da corrente (4.3), obtém-se a Eq.(4.4).

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}CE \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)}{\sqrt{L}} \quad (4.4)$$

A frequência angular de ressonância, chamada de  $\omega_r$ , será dada pela expressão (4.5).

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

Reescrevendo a equação da corrente no tempo (4.4), a corrente no circuito será máxima, de acordo com Eq.(4.6), quando  $\sin(\omega_r t) = 1$  conforme apresentado na Eq.(4.7).

$$i(t) = \sqrt{\frac{2C}{L}} E \sin(\omega_r t) \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} i(t)_{\max} &= \frac{\sqrt{2CE}}{\sqrt{L}} = \sqrt{2} \sqrt{E^2 \frac{C}{L} \omega} = \\ &= \sqrt{2} \sqrt{E^2 \frac{1}{\omega L} \omega C} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{E}{X_C} \frac{E}{X_L}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Como a corrente é a razão entre a tensão e a reatância, podemos dizer que a corrente de *inrush* será dada pela Eq.(4.8). Estes cálculos indicam que se a corrente não for limitada por resistores, os diodos do retificador serão danificados.

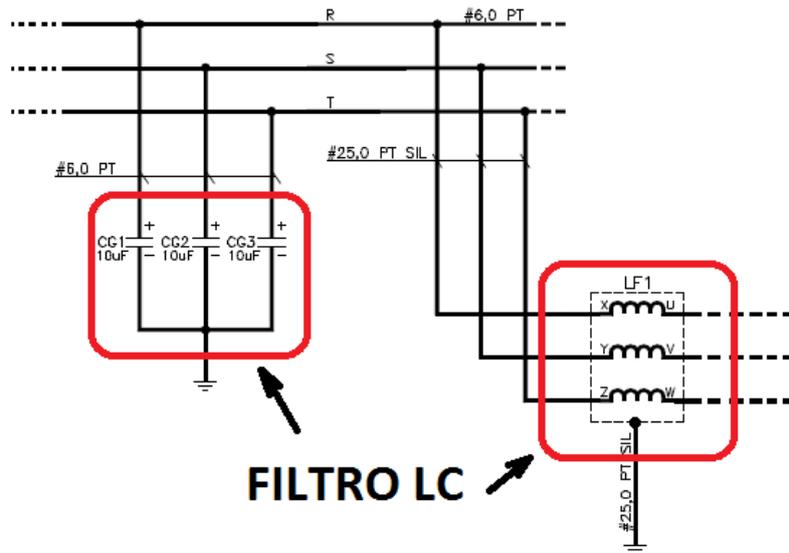
$$I_{inrush} = \sqrt{2 \cdot I_L \cdot I_C} \quad (4.8)$$

### 4.1.3 Filtro de Entrada

O conversor regenerativo opera com uma reatância trifásica entre a entrada e a fonte, denominada LBOOST. Entre a reatância de BOOST e a fonte, existe um filtro LC para eliminar correntes de alta frequência geradas pelo chaveamento dos semicondutores de potência.

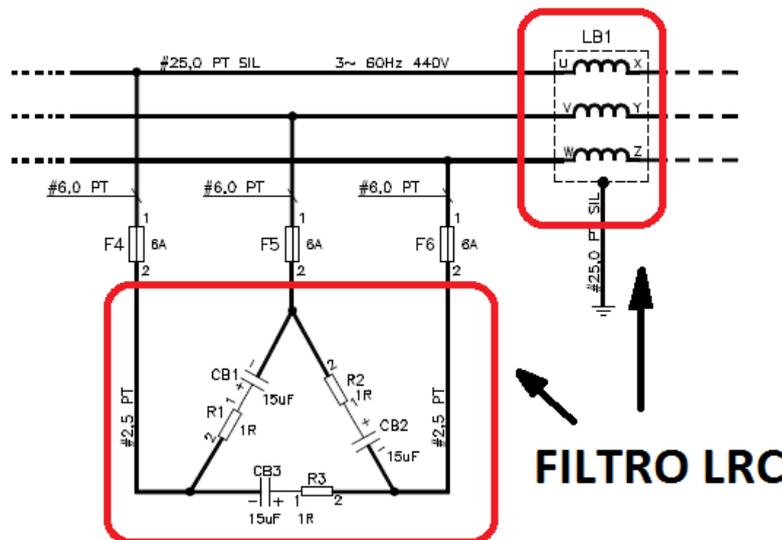
O filtro LC, indutor de linha ou reatância de rede, está apresentado de maneira simplificada na Figura 4.8 e maiores detalhes podem ser consultados através da folha 1/6 do diagrama multifilar no Anexo A.1. Este filtro opera do lado da fonte de alimentação protegendo equipamentos que reagem mal a perturbações e filtrando harmônicos gerados pelo inversor em torno dos múltiplos da frequência de chaveamento.

O sistema tem um filtro LRC, mostrado na Figura 4.9 e na folha 2/6 do diagrama multifilar no Anexo A.2. Trabalha reduzindo o gradiente  $dV/dt$  da tensão e os picos de corrente. Este filtro proporciona um desacoplamento de circuitos da rede e limita a taxa de aumento da corrente com o uso de chaveamento de alta frequência, especificamente até  $2.5kHz$ . A característica técnica dos filtros estão mostradas na tabela 4.1.



**FILTRO LC**

Figura 4.8: Filtro LC



**FILTRO LRC**

Figura 4.9: Filtro LRC

#### 4.1.4 Ponte Conversora CFW11-105-RB

A ponte conversora trifásica utilizada no sistema, CFW11-105-RB, está apresentada na Figura 4.10. Este conversor tem como característica principal o fluxo bidirecional de potência, possibilitando a devolução da energia gerada para a rede elétrica, no momento da frenagem.

Tabela 4.1: Características Técnicas - Filtro Trifásico LB1 e LF1

| <b>Tipo Reator</b>                         | <b>LBoost</b>   | <b>Filtro LF</b> |
|--|-----------------|------------------|
| Corrente Nominal Eficaz [A]                | 105             | 105              |
| Corrente Sobrecarga Eficaz [A]             | 157,5           | 157,5            |
| Ind. Nominal [ $\mu$ H]                    | 1.100           | 365              |
| Ind. Sobrecarga [ $\mu$ H]                 | 550             | 180              |
| Regime Sobrecarga                          | 150% 1min/10min | 150% 1min/10min  |
| Corrente Térmica                           | 110.3A          | 110.3A           |
| Tensão Nominal Eficaz                      | 380-480V        | 380-480V         |
| Classe Tensão                              | 1kV             | 1kV              |
| Freq. Fundamental                          | 50/60Hz         | 50/60Hz          |
| Freq. Chaveamento Máx.                     | 2.500Hz         | -                |
| <i>Ripple</i> em $2 \times$ Freq. Chaveam. | 26A             | -                |
| Classe Temp.                               | F - 150°C       | F - 155°C        |
| Temp. Ambiente                             | 40°C            | 40°C             |
| Elevação Temp.                             | 80°C            | 80°C             |
| Grau de Proteção                           | IP00            | IP00             |
| Mat. Enrolamento                           | Cobre           | Cobre            |
| Mat. Conexão                               | Cobre           | Cobre            |
| Núcleo                                     | Ferro           | Ferro            |
| Tipo de Refrigeração                       | Natural         | Natural          |



Figura 4.10: Módulo Conversor CFW11-105-RB

## 4.2 Topologia do Conversor Bidirecional de Potência

O conversor bidirecional de potência apresenta uma topologia diferente de um *back-to-back* convencional, conforme ilustrado na Figura 4.11. Utiliza uma ponte retificadora a diodos (V1) em série com um banco de resistor (PC1) para a pré-carga do banco de capacitores, que após atingir 70% da carga nominal, a ponte a diodos (V1) e os resistores de pré-carga (R1,R2,R3) são desconectados do circuito através de chaves contactoras.

O diagrama multifilar apresenta, com linhas vermelhas e setas descontínuas, o circuito de pré-carga. Detalhes podem ser consultados no diagrama do Anexo A.1.

A partir deste ponto, o fluxo de potência fica estabelecido entre o CFW11-105-RB e o CFW11-88A conforme apresentado na Figura 4.11 com linhas verdes e setas contínuas. O inversor de frequência CFW11-88A realiza o controle do MIL. O CFW11-105-RB controla o barramento CC, devolvendo para a rede elétrica a energia acumulada no banco de capacitores durante a frenagem.



# Capítulo 5

## Frenagem Elétrica

### 5.1 Introdução

A frenagem de um motor elétrico pode ser feita com freios mecânicos ou através de frenagem elétrica. As técnicas de frenagem elétrica necessitam de pouquíssima manutenção, são eficientes e garantem a precisão da parada durante a operação do motor além de possibilitar a regeneração de energia. Os métodos de frenagem mencionados a seguir estão supondo a aplicação em motores de indução [26]:

- Frenagem Contra-Corrente
- Frenagem CC
- Frenagem Regenerativa / Dinâmica

### 5.2 Métodos de Frenagem Elétrica

#### 5.2.1 Frenagem Contra-Corrente

A frenagem por contra-corrente pode ser obtida invertendo a sequência de fases do motor conforme ilustrado na Figura 5.1, e esta inversão deverá ser feita com contactores eletromecânicos.

A direção do campo magnético gerado pela circulação de corrente no enrolamento depende da sequência de ligação das fases nos terminais da máquina. A mudança nesta sequência provoca uma alteração no sentido de giro do campo magnético. A Figura 5.2 apresenta a curva característica do torque de um motor de indução onde a dinâmica da frenagem por contra-corrente pode ser observada.

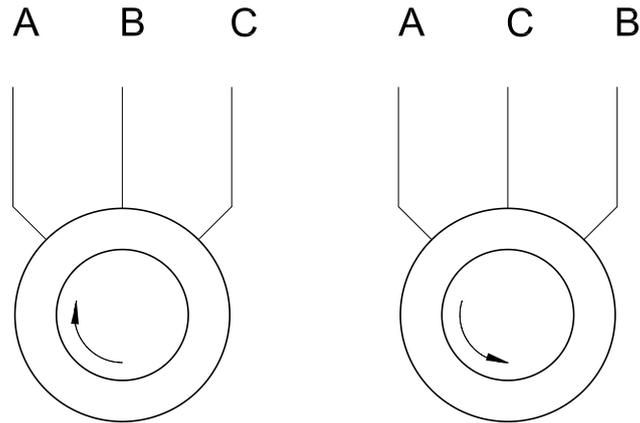


Figura 5.1: Inversão de fases na Frenagem Contra-Corrente

Quando o motor de indução parte com a sequência de fase ABC, ele atinge um estado estacionário de operação, representado pelo ponto (1), no 1º quadrante. Considerando que uma carga apresente a característica descrita na Figura 5.2, se a sequência de fase for invertida, passando para ACB, o motor sairá do ponto (1) e buscará um novo estado de operação estacionário, o que irá acontecer no ponto (4) localizado no 3º quadrante. Antes de se acomodar no novo estado estacionário o motor se move do ponto (1) para o ponto (2), mas devido a diferença de torque de carga ele continua se movendo até atingir o ponto (3) onde a velocidade tem valor zero e o motor pode ser parado. Se o motor não for desenergizado ao atingir o ponto (3), ele se moverá até o ponto (4).

A frenagem por contracorrente, ou inversão da sequência de fase, não consegue recuperar a energia gerada durante a desaceleração do motor e essa característica pode ser compreendida com a análise da curva de torque e do circuito equivalente do MIL. A curva apresentada na Figura 5.2 mostra que no ponto (1) - sequência ABC - o escorregamento será definido pela expressão (5.1) e no ponto (2) - sequência ACB - o escorregamento será definido pela expressão (5.2).

Definido o escorregamento para estas duas condições de operação do motor observa-se, através do circuito equivalente apresentado na Figura 5.3, que o ramo de conversão de energia elétrica em mecânica do modelo será positivo quando a máquina se comportar como motor e negativo quando o comportamento for de gerador. Substituindo o escorregamento do ponto (1) em  $R_2(1 - s)/s$  fica demonstrado que a máquina opera como motor e está consumindo potência, visto que a resistência tem valor positivo, conforme mostra a expressão (5.3). No ponto (2) a resistência se torna negativa, conforme a expressão (5.4), o motor está entregando potência e a máquina opera como um gerador de calor. Neste ponto de operação, a resistência rotórica consome energia da fonte e do motor simultaneamente.

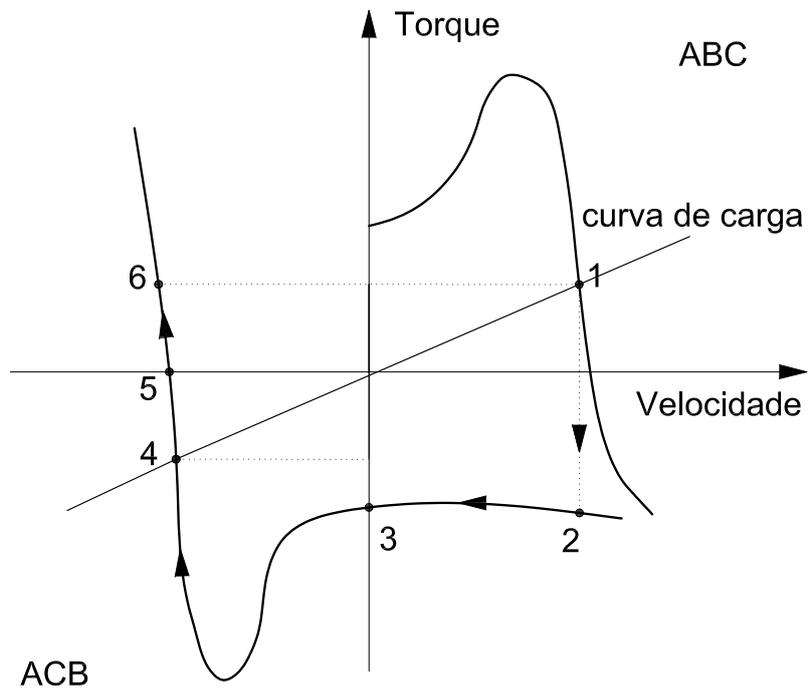


Figura 5.2: Curva característica de torque para as seqüências de fase ABC e ACB

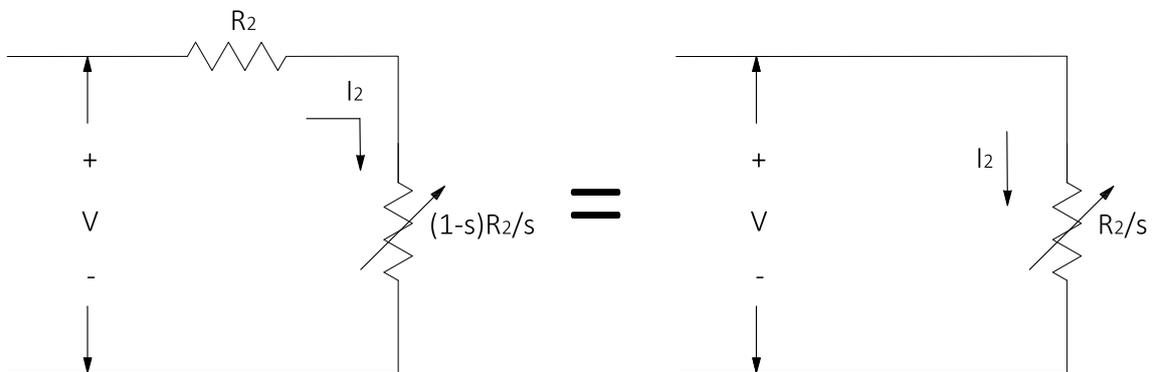


Figura 5.3: Circuito equivalente do rotor

$$s_{1cc} = \frac{v_s - v}{v_s}$$

$$\therefore 0 < s_{1cc} < 1 \quad (5.1)$$

$$s_{2cc} = \frac{-v_s - v}{-v_s}$$

$$= \frac{v_s + v}{v_s}$$

$$\therefore 1 < s_{2cc} < 2 \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{1 - s_{1cc}}{s_{1cc}} \right) &> 0 \therefore \\ R_2 &> 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{1 - s_{2cc}}{s_{2cc}} \right) &< 0 \therefore \\ R_2 &< 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

O modelo equivalente do circuito do rotor, Figura 5.3, e a Eq.(5.5) mostram que a potência gerada será consumida pela resistência rotórica ( $R_2$ ), ou resistência do secundário do MIL, não havendo nenhuma parcela de energia devolvida e ainda consumirá uma parcela de energia da fonte de alimentação do motor.

A potência dissipada, por fase, em função das perdas por aquecimento no rotor  $P_d$  e a potência convertida em movimento  $P_m$ , são descritas pela Eq.(5.6) e (5.7) respectivamente.

$$R_2 + R_2 \left( \frac{1 - s}{s} \right) = \frac{R_2}{s} \quad (5.5)$$

$$P_d = R_2 I^2 \quad (5.6)$$

$$P_m = R_2 \left( \frac{1 - s}{s} \right) I^2 \quad (5.7)$$

À vazio, o torque e a potência mecânica são definidos pelas Eq.(5.8) e (5.9). A energia total dissipada na resistência rotórica, será dada pela expressão (5.10). Na partida, a frequência inicial é  $\omega_1 = 0$  e a final  $\omega_2 = \omega_s$ . Assim define-se que a energia cinética armazenada no motor durante a partida, dada pela Eq.(5.11), será igual a energia dissipada na resistência rotórica.

Quando o motor esta operando no ponto (1), sem carga, a frequência inicial será  $\omega_1 \cong \omega_s$  e no ponto (2) será  $\omega_2 \cong -\omega_s$ . Esse será o intervalo de integração para a operação de inversão de sequência de fase. Desse modo, a energia dissipada em  $R_2$  com a reversão de fase, apresentado na Eq.(5.12), será quatro vezes maior que a energia cinética armazenada no rotor, conforme a Eq.(5.11).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5.8)$$

$$P_m = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned}
E_d &= \int_{\omega_1}^{\omega_2} P_d dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\omega_s - \omega}{\omega} J \omega \frac{d\omega}{dt} dt \\
&= \int_{\omega_1}^{\omega_2} (\omega_s - \omega) J d\omega = \left[ J \omega_s \omega - \frac{J}{2} \omega^2 \right]_{\omega_1}^{\omega_2} \\
&= J \omega_s (\omega_2 - \omega_1) - \frac{J}{2} (\omega_2^2 - \omega_1^2)
\end{aligned} \tag{5.10}$$

$$\begin{aligned}
E_p &= J \omega_s (\omega_2 - \omega_1) - \frac{J}{2} (\omega_2^2 - \omega_1^2) \\
&= J \omega_s (\omega_s) - \frac{J}{2} ((\omega_s)^2) \\
&= \frac{1}{2} J \omega_s^2
\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}
E_r &= J \omega_s (\omega_2 - \omega_1) - \frac{J}{2} (\omega_2^2 - \omega_1^2) \\
&= J \omega_s (-\omega_s - \omega_s) - \frac{J}{2} ((-\omega_s)^2 - \omega_s^2) \\
&= 2J \omega_s^2
\end{aligned} \tag{5.12}$$

### 5.2.2 Frenagem CC

Na frenagem CC, aplica-se um campo magnético estacionário no entreferro através da injeção de corrente contínua nos enrolamentos de fases do motor conforme ilustrado na Figura 5.4. Ao aplicar uma tensão contínua nos terminais do primário do motor, um campo magnético estacionário e temporário será criado no entreferro. Quando o campo for atravessado pelo secundário induzirá corrente, fazendo com que as perdas no secundário aumentem. O aumento da potência dissipada no secundário diminui a energia cinética armazenada e a velocidade do motor.

O tipo de fonte de tensão CC irá variar conforme a aplicação da frenagem, que deve ser subdividida em:

**Parada em operação regular:** Quando o motor está operando com uma velocidade reduzida, próxima de zero, a paralisação pode ser realizada através do inversor de frequência representado na Figura 5.5. Esta operação consiste em aplicar um torque que permita o equilíbrio entre as forças atuantes no motor  $\sum F = 0$ , de forma a mantê-lo parado. Em seguida aplica-se os freios mecânicos sem que haja atrito entre a massa tracionada e os freios, evitando o desgaste das sapatas.

O campo magnético estacionário pode ser obtido, por exemplo, realizando o

fechamento de  $S_1$ ,  $S_6$  e  $S_5$  em que as tensão nas fases  $A$  e  $C$  serão positivas e na fase  $B$  negativa.

**Parada de emergência:** Para realizar a frenagem de um motor deve-se conectá-lo em uma fonte CC. Esta fonte de campo estacionário deverá ser inserida no circuito da carga através de contactores eletromecânicos, conforme apresentado no diagrama de comando da Figura 5.6, onde  $P$  e  $C$  são contatos das boinas  $KP$  e  $KC$ , respectivamente. Este tipo de frenagem não deve ser feita através do chaveamento do inversor, devido a elevação da corrente e consequentemente a destruição das chaves.

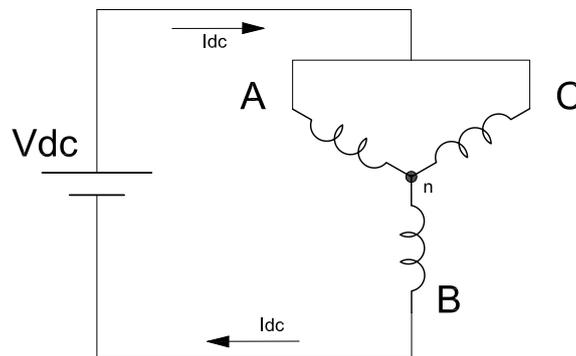


Figura 5.4: Aplicação de tensão CC no circuito do primário

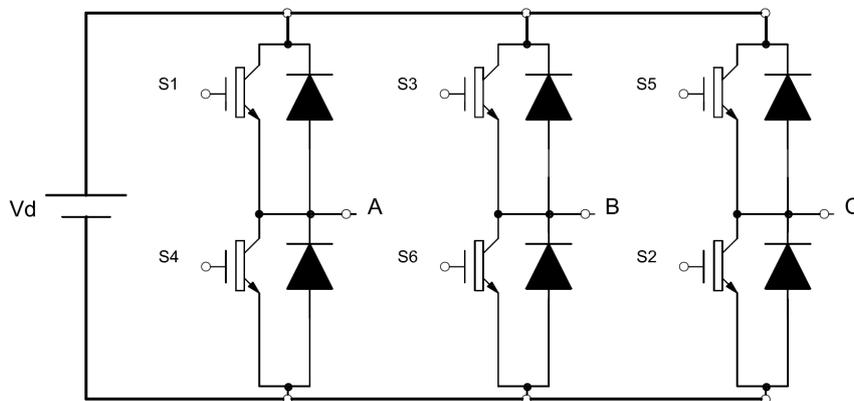


Figura 5.5: Ponte Inversora de 6 níveis

O circuito da Figura 5.4, permite determinar a corrente aplicada durante a frenagem CC. A resistência total  $R_t$  pode ser obtida considerando a resistência de cada enrolamento de fase do primário. A baixa resistência de uma das fases do primário  $R_1 = 0.567\Omega$ , de acordo com os dados do fabricante [14], faz com que a tensão aplicada deva ser pequena para que a corrente de frenagem não ultrapasse 03 vezes a corrente nominal do motor [26]. O gráfico 5.7 apresenta a corrente de frenagem CC ( $I_{dc}$ ) para uma tensão ( $V_{dc}$ ) de até 10% da tensão nominal do Link CC. Esta técnica

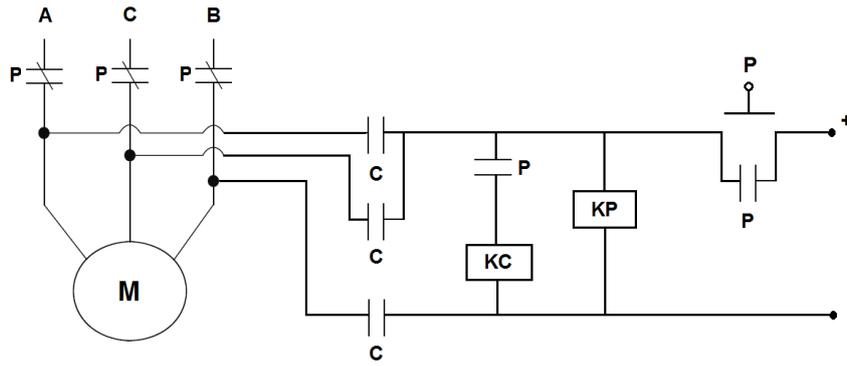


Figura 5.6: Comando para frenagem CC de um motor de indução

de frenagem será utilizada no MagLev-Cobra fornecendo torque de equilíbrio até o acionamento dos freios mecânicos.

$$V_{dc} = R_t I_{dc} \quad (5.13)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{1.5R_1} \quad (5.14)$$

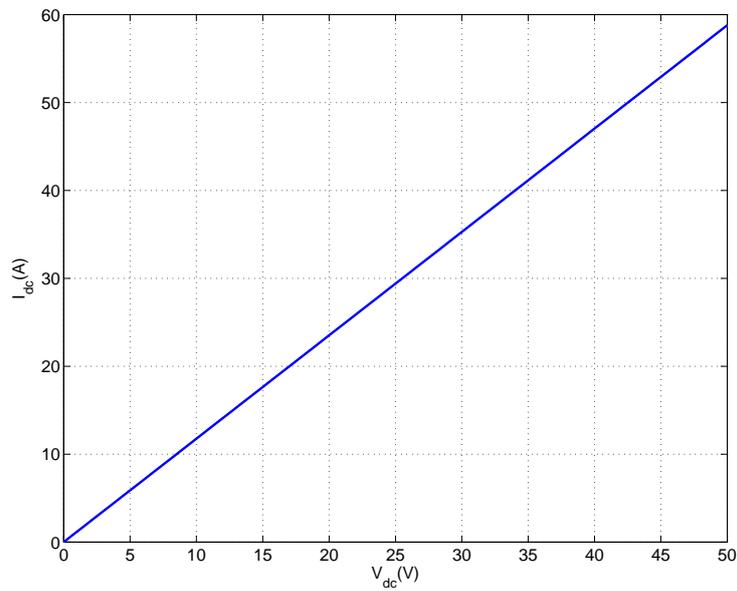


Figura 5.7: Tensão Vdc x Corrente Idc

## 5.3 Frenagem Regenerativa / Dinâmica

### 5.3.1 Frenagem Regenerativa

A frenagem regenerativa consiste em recuperar a energia gerada durante a frenagem de um veículo. A recuperação da energia implica na devolução para a rede elétrica ou na armazenagem em banco de baterias, ultra capacitores, etc.

Esta técnica de frenagem apresenta bons resultados quando aplicada a trens. Quando associada ao freio mecânico, a frenagem elétrica reduz o desgaste das sapatas de freio e diminui a oscilação do torque em baixas velocidades [6]. Frenagem em trens com motores elétricos rotativos e técnicas de controle, foram analisadas em alguns trabalhos [27]-[28].

A regeneração de energia durante a frenagem pode ser analisada através da curva de torque do motor de indução, apresentada na Figura 5.8. Quando o motor está operando no ponto (1) com uma determinada tensão ( $V$ ) e frequência ( $f$ ), a velocidade ( $v$ ) desenvolvida pelo motor de indução será menor que a velocidade síncrona ( $v_s$ ). Assim o escorregamento será positivo e inferior a unidade ( $0 < s_{r1} < 1$ ), como mostra a Eq.(5.15), e o motor está transformando energia elétrica em movimento. Se a frequência ( $f$ ) for variada para ( $f'$ ) de modo que ( $f' < f$ ), o motor passará a operar em um ponto estabelecido na nova curva de torque pois a inércia mecânica não permite a variação imediata da velocidade. Desse modo o motor migra do ponto (1) para o ponto (2), conforme visto na Figura 5.8 antes de estabilizar-se no ponto (3).

No ponto de operação (2), o motor estará desenvolvendo uma velocidade ( $v$ ) superior a velocidade síncrona ( $v'_s$ ). O escorregamento será negativo ( $s_{r2} < 0$ ), de acordo com a Eq.(5.16), podendo ser observado na Figura 5.8. O circuito equivalente do rotor, Figura 5.9, permite analisar o comportamento do motor nesta condição.

O elemento  $R_2/s$  consiste na soma da resistência no secundário  $R_2$ , devido às perdas no cobre, com o elemento que representa a conversão de energia elétrica em mecânica  $R_2(\frac{1-s}{s})$ . Com ( $s_{r2}$ ) negativo, o elemento  $R_2(\frac{1-s}{s})$  torna-se negativo, e o motor se comporta como gerador. A energia regenerada não pode ser totalmente aproveitada pois  $R_2$  continua positivo, evidenciando que parte desta energia será consumida pelas perdas rotóricas. Como  $R_2/s$  apresenta-se negativo, a parcela restante da energia poderá ser devolvida para a fonte.

$$s_{r1} = \frac{v_s - v}{v_s} > 0 \quad (5.15)$$

$$s_{r2} = \frac{v'_s - v}{v'_s} < 0 \quad (5.16)$$

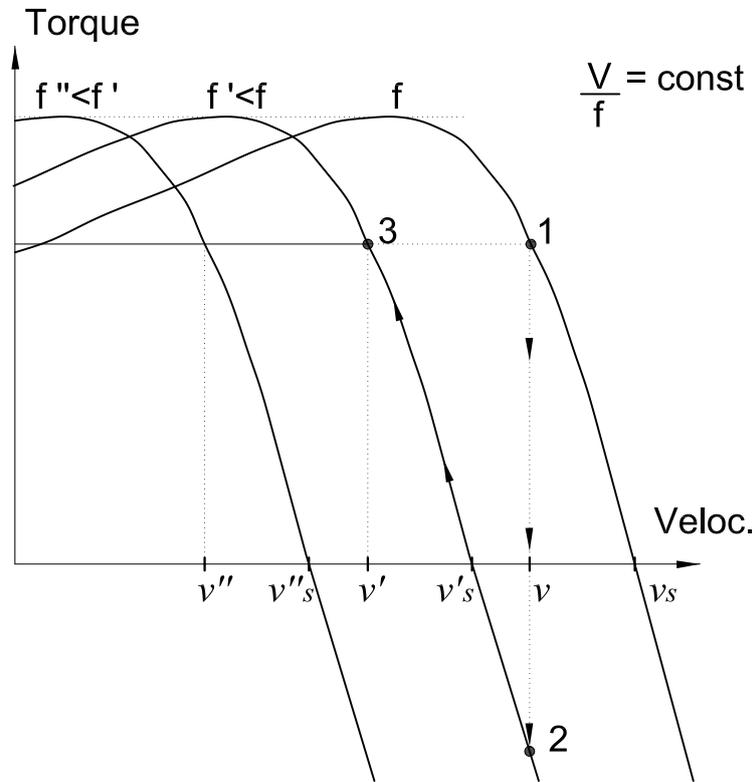


Figura 5.8: Curva característica de torque com variação de velocidade

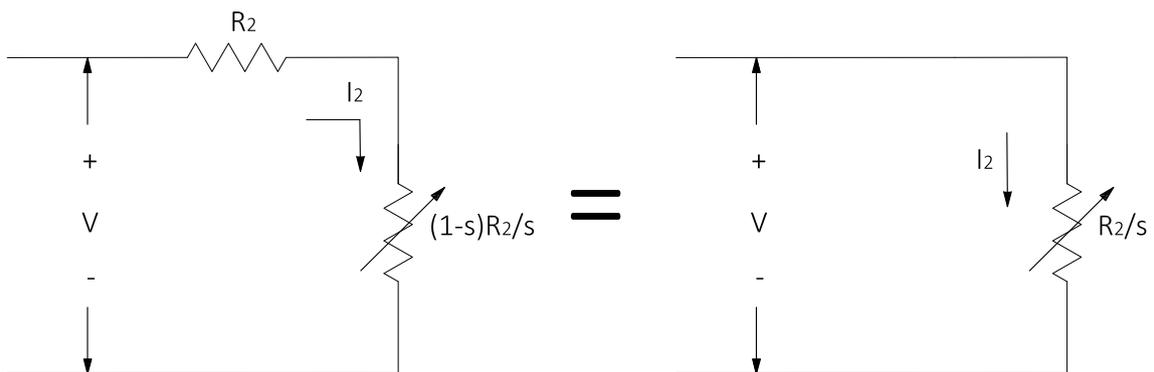


Figura 5.9: Circuito equivalente do rotor

Através do circuito do rotor verifica-se que a quantidade de energia regenerada pode ser maximizada se as perdas no rotor forem mínimas. As perdas na resistência rotórica são dadas pela Eq.(5.19). O escorregamento e a corrente circulante são expressos, respectivamente, pelas Eq.(5.17) e (5.18).

Dessa forma pode-se afirmar que mantendo a velocidade do motor próxima a velocidade síncrona haverá maior quantidade de energia regenerada conforme a expressão (5.20). Entretanto o perfil de desaceleração será dado considerando a importância e predominância das condições cinemáticas da operação, o conforto e segurança dos passageiros.

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (5.17)$$

$$I = \frac{V_s}{R_2} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} P_{rotor} &= R_2 I^2 \\ &= \frac{1}{R_2} V^2 \frac{(\omega_s - \omega)^2}{\omega_s^2} \\ &= \left(\frac{V}{\omega_s}\right)^2 \frac{1}{R_2} (\omega_s - \omega)^2 \\ &= \left(\frac{V}{\omega_s}\right)^2 \frac{1}{R_2} [\omega_s^2 - 2\omega\omega_s + \omega^2] \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\omega} P_{rotor} &= (2\omega_s - 2\omega) \left(\frac{V}{\omega_s}\right)^2 \frac{1}{R_2} \\ \frac{d}{d\omega} P_{rotor} &= 0 \Rightarrow \omega = \omega_s \end{aligned} \quad (5.20)$$

### 5.3.2 Conversor Operando no Modo Inversor

O circuito equivalente monofásico apresentado na Figura 5.10 e o diagrama fasorial da Figura 5.11, permitem uma análise do motor de indução durante sua operação como motor e como gerador.

Com o acionamento das chaves do conversor, através de um gerador de pulso PWM, permite-se controlar a magnitude e a fase da tensão  $V_{An}$  e desse modo definir a amplitude da corrente. A Figura 5.11 apresenta um diagrama fasorial da tensão e da corrente na fase A do motor. Quando a corrente  $I_A$  está no primeiro ou no quarto quadrante, o motor de indução linear demanda potência. Neste caso, a componente ativa  $(I_A)_p$ , da corrente  $I_A$ , está em fase com  $E_A$  indicando que o conversor opera como inversor. A tensão  $V_{An}$  está avançada em relação  $E_A$  de um ângulo  $\delta$  e pode ser descrita pela equação (5.21).

Se  $V_{An}$  for mantida constante e atrasada de um ângulo  $\delta$ , através do controle de fase, em relação a  $E_A$ , a componente ativa da corrente  $I_A$  estará  $180^\circ$  defasada de  $E_A$ . Esta condição indica que o conversor esta operando como retificador. A corrente  $I_A$  estará no segundo ou terceiro quadrante e o MIL se comporta como gerador.  $V_{An}$  pode ser descrita pela equação (5.22), conforme o diagrama fasorial da Figura 5.11 [29]. A potência ativa e reativa estão mostradas nas Eq.(5.23) e (5.24), respectivamente.

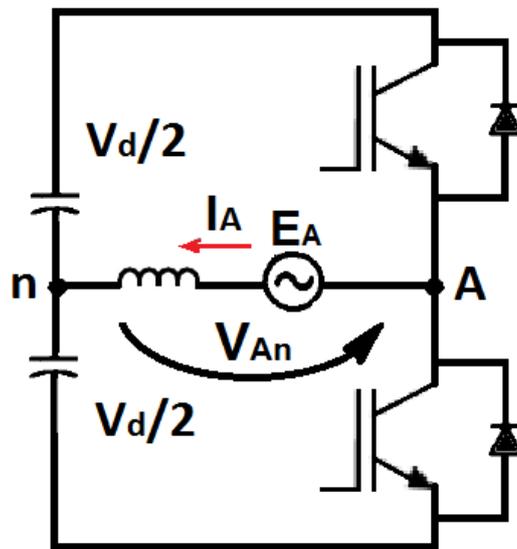


Figura 5.10: Circuito monofásico com fonte  $V_{An}$  e  $I_A$

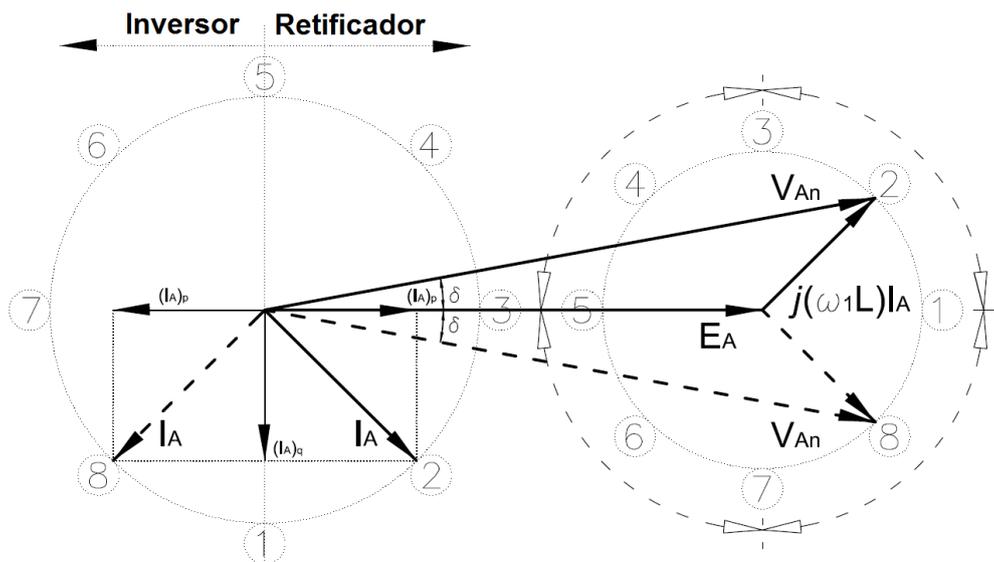


Figura 5.11: Diagrama fasorial de tensão e corrente

$$V_{An} = E_A + (j\omega L)I_A \quad (5.21)$$

$$V_{An} = E_A - (j\omega L)I_A \quad (5.22)$$

$$P = E_A I_A \cos(\theta) = \frac{E_A^2}{\omega L} \left( \frac{V_{An}}{E_A} \sin(\delta) \right) \quad (5.23)$$

$$Q = E_A I_A \sin(\theta) = \frac{E_A^2}{\omega L} \left( 1 - \frac{V_{An}}{E_A} \cos(\delta) \right) \quad (5.24)$$

### 5.3.3 Frenagem Dinâmica

A frenagem dinâmica tem o mesmo princípio da frenagem regenerativa, porém o conversor necessário para implementar estas técnicas apresentam topologias diferentes, conforme apresentado nas Figuras 5.12 e 5.13. Quando a topologia do acionamento não permite a devolução da energia, gerada durante a frenagem, para a rede elétrica ou o armazenamento em banco de baterias, ultracapacitores, esta deverá ser consumida por uma carga resistiva caracterizando então a frenagem dinâmica ou reostática.

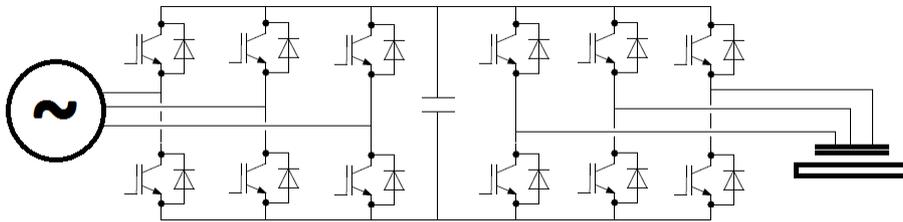


Figura 5.12: Conversor Bidirecional - frenagem regenerativa

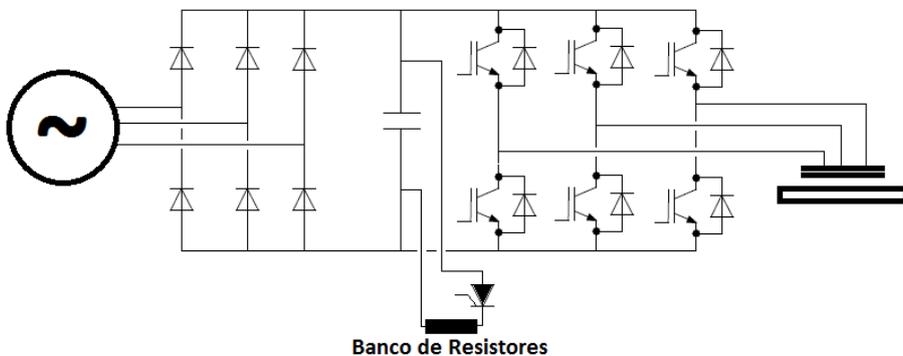


Figura 5.13: Ponte Inversora Trifásica - frenagem dinâmica

A dissipação da energia em banco de resistores, requer uma chave semicondutora para ligar a carga ao circuito. O comando da chave pode ser feito pelo nível de

tensão do link DC, e o tempo necessário para reduzir a velocidade depende da taxa de dissipação da energia nos resistores, que devem ser dimensionados considerando também a inércia da carga.

### 5.3.4 Simulação - Frenagem Regenerativa

O acionamento do motor de indução linear foi simulado em um software CAS (*Computer-Aided System*) denominado *Simulink* / *MATLAB* (*Matrix Laboratory*). O circuito simulado, apresentado na Figura 5.14, formado por duas pontes inversoras representa um conversor bidirecional de potência. Essa simulação permite avaliar o comportamento do sistema durante a frenagem regenerativa.

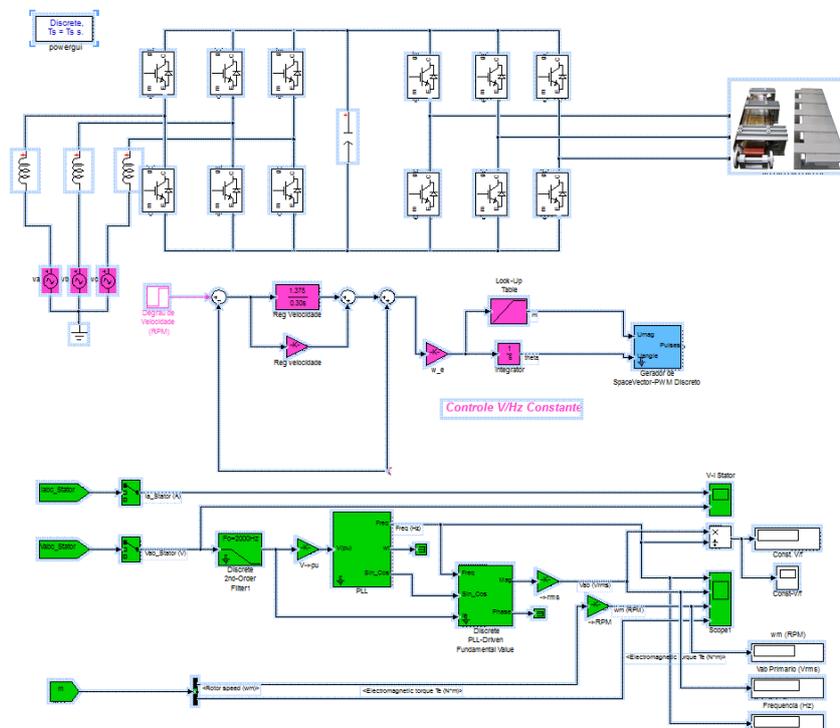


Figura 5.14: Conversor Trifásico PWM

Foi realizada uma simulação com o motor operando com velocidade de  $v = 6.2m/s$  e a força de carga igual a  $T_1 = -100N$  durante a frenagem. A mudança do modo ‘motor’ para ‘gerador’ ocorre no instante de tempo  $t = 0.8s$ . A partir desse momento, a corrente no link DC tornar-se negativa indicando a mudança de sentido conforme mostrado na Figura 5.16. Com a corrente fluindo da carga para o elo CC, a energia armazenada no banco de capacitores aumenta elevando a tensão, conforme apresentado na Figura 5.18. O comportamento da tensão e da corrente no motor durante a desaceleração, quando o torque tem valor negativo, está apresentada nas Figuras 5.15 e 5.17, respectivamente. Nesta condição

de operação, o motor esta regenerando pouca energia devido a baixa inércia da carga.

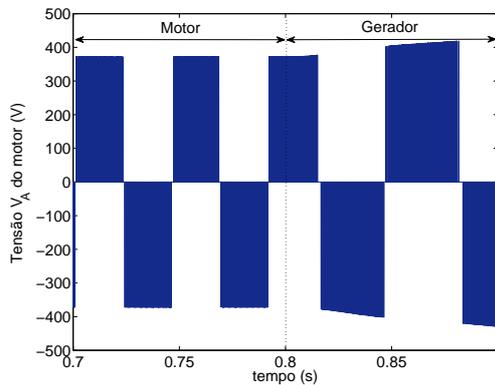


Figura 5.15: Tensão na fase A do motor -  $v = 6.2m/s$  e  $T_1 = -100N$

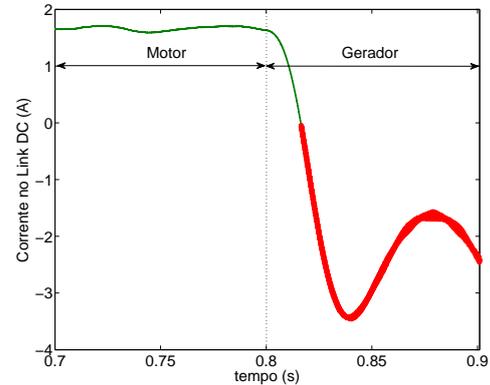


Figura 5.16: Corrente média no Link DC -  $v = 6.2m/s$  e  $T_1 = -100N$

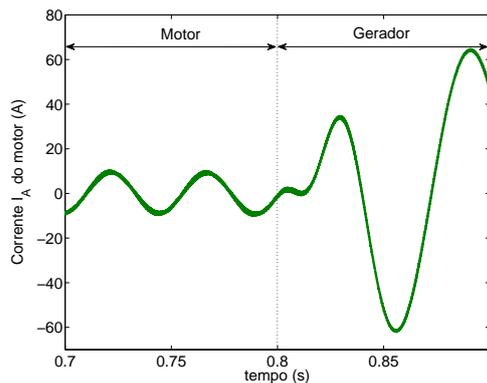


Figura 5.17: Corrente na fase A do motor -  $v = 6.2m/s$  e  $T_1 = -100N$

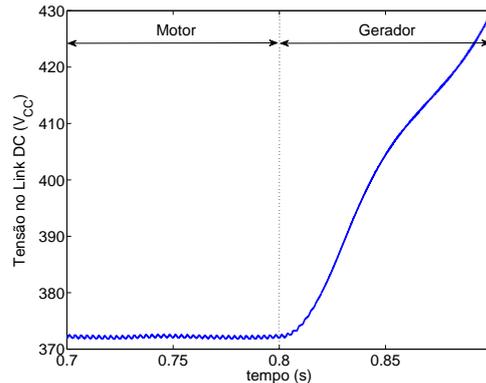


Figura 5.18: Tensão no Link DC -  $v = 6.2m/s$  e  $T_1 = -100N$

Os resultados de simulação apresentados nas Figuras 5.19 - 5.22 foram obtidos considerando uma velocidade de  $v = 6.2m/s$  e um torque igual a  $T_2 = -50N$  na frenagem. Nesta simulação foi imposto um valor a  $T_2$  menor que a  $T_1$ , e as velocidades de operação do motor são idênticas. A Figura 5.20 mostra que mais corrente esta sendo injetada no elo CC. Isso ocorre porque quanto menor for o passo de variação da frequência, menor será a taxa de desaceleração e o motor permanece mais tempo operando na região regenerativa. Assim a quantidade de energia regenerada aumenta, bem como o trajeto percorrido pelo motor até sua total paralisação. A tensão no Link CC apresenta maior elevação, conforme Figura 5.22, quando comparado com a tensão apresentada na Figura 5.18.

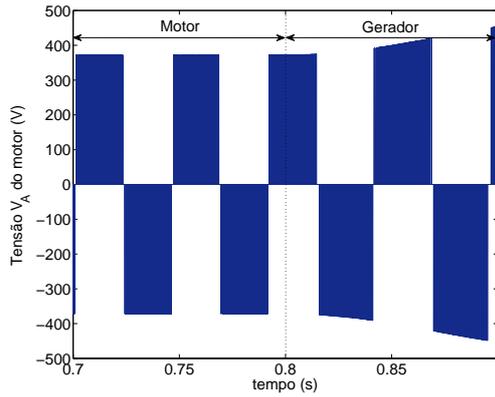


Figura 5.19: Tensão na fase A do motor -  $v = 6.2m/s$  e  $T_2 = -50N$

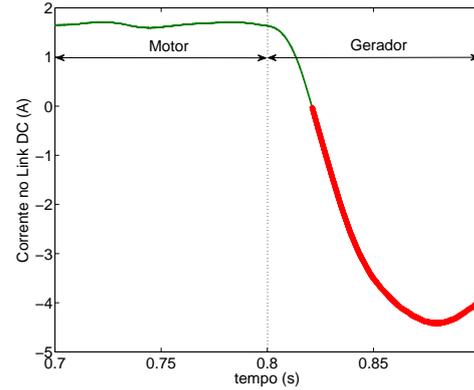


Figura 5.20: Corrente média no Link DC -  $v = 6.2m/s$  e  $T_2 = -50N$

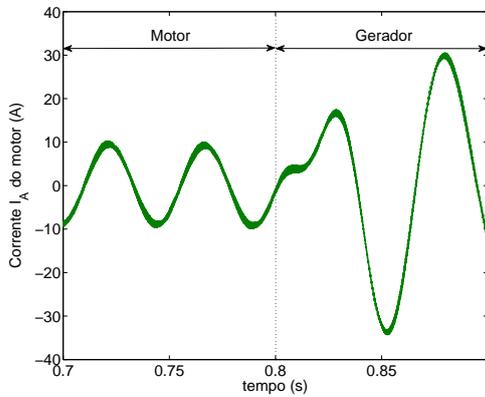


Figura 5.21: Corrente na fase A do motor -  $v = 6.2m/s$  e  $T_2 = -50N$

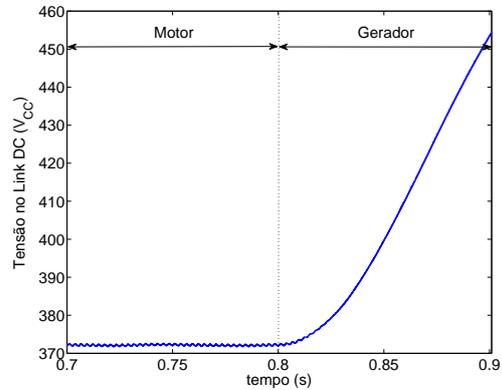


Figura 5.22: Tensão no Link DC -  $v = 6.2m/s$  e  $T_2 = -50N$

### 5.3.5 Resultados Experimentais

Foram realizados testes experimentais no laboratório de máquinas (LABMAQ) para avaliar o sistema de frenagem regenerativa quanto a sua eficiência, além de quantificar a geração durante a operação. Os dados foram obtidos com o MIL operando em um percurso com 6m de comprimento e inclinação entre 10% a 15%, conforme mostrado na Figura 5.23. O percurso em rampa permite acumular energia potencial que poderá ser convertida em energia elétrica durante a frenagem.

No teste de regeneração, o MIL foi acelerado até uma velocidade constante e logo após desacelerado até atingir a velocidade nula, conforme apresentado na Figura 5.24.

Durante esta operação a tensão no elo CC e a corrente no motor são monitoradas. A Tabela 5.1 apresenta as condições de ensaio com a variação da



Figura 5.23: Plataforma Inclinada

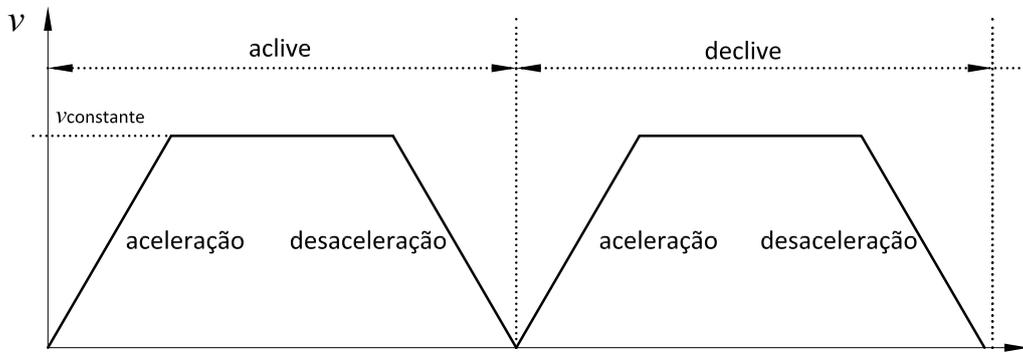


Figura 5.24: Trajetória Trapezoidal

massa tracionada e da inclinação da rampa. A regeneração de energia pode ser percebida pelo aumento da tensão no Link DC em função da mudança no sentido da corrente. Durante a desaceleração da massa transportada, ocorre a regeneração de energia, e essa será a zona de interesse. A simbologia utilizada nas legendas das figuras, com os resultados dos testes de regeneração, estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Condições de Ensaio no Plano Inclinado

| Massa (kg) | Inclinação (%) | Altura (m) |
|------------|----------------|------------|
| 450        | 10             | 0.6        |
| 1000       | 10             | 0.6        |
| 1000       | 15             | 0.9        |

Tabela 5.2: Simbologia utilizada nos testes de regeneração.

|       |                          |       |                            |
|-------|--------------------------|-------|----------------------------|
| $v_a$ | velocidade nom. no ative | $v_d$ | velocidade nom. no declive |
| $a_a$ | aceleração no ative      | $a_d$ | aceleração no declive      |
| $d_a$ | desaceleração no ative   | $d_d$ | desaceleração no declive   |

#### 5.3.5.1 Massa $m = 450kg$ - Inclinação $h = 10\%$

O formato trapezoidal das respostas, apresentadas nas Figuras 5.25-5.28, evidenciam o controle utilizado. A aceleração, velocidade nominal e desaceleração são variadas através da frequência imposta ao conversor. O primeiro trapézio representa a direção de subida na rampa e o segundo trapézio de descida.

No teste foi tracionada uma carga com massa  $m = 450kg$  em um percurso com inclinação  $h = 10\%$ . Na região do gráfico em que a corrente circulante nas fases do motor decai, em função da desaceleração, há uma elevação da tensão do Link CC. Nesta condição o escorregamento torna-se negativo ocorrendo a regeneração de energia.

Os resultados indicam a eficiência da frenagem regenerativa para desacelerar o motor até a sua total paralisação. Com uma inércia de carga baixa, o Link CC não atingiu o nível mínimo para iniciar a devolução da energia para rede. O aumento da massa e da desaceleração permitirá elevar a tensão na malha intermediária. Para reduzir as perdas rotóricas, a taxa de desaceleração deve ter um passo mínimo.

#### 5.3.5.2 Massa $m = 1000kg$ - Inclinação $h = 10\%$

Neste teste, a massa foi elevada para  $1000kg$  e os resultados estão apresentados nas Figuras 5.29-5.32. Para esta nova condição de operação, obteve-se uma elevação na tensão do Link CC.

Aumentando a desaceleração do MIL a característica trapezoidal torna-se menos evidente, mas continua presente no controle. O conversor bidirecional de potência foi parametrizado de modo a inverter o fluxo de potência quando o Link CC  $\geq 585V_{cc}$ .

#### 5.3.5.3 Massa $m = 1000kg$ - Inclinação $h = 15\%$

Com a inclinação da rampa em  $h = 15\%$  percebe-se, de modo mais acentuado, o aumento da tensão na malha intermediária. As respostas para essa nova condição estão apresentadas nas Figuras 5.33-5.35.

Com uma pequena diminuição na taxa de desaceleração, a frenagem regenerativa não foi suficiente para paralisar o motor dentro do percurso disponível.

Observando o sentido da corrente na malha intermediária do conversor com uma ponteira de corrente Hall A.4, verificou-se a corrente que flui da carga para a fonte durante a frenagem regenerativa. A corrente injetada no elo CC, quando o

MIL opera como gerador, pode ser vista na Figura 5.36.

Durante a desaceleração do veículo na rampa, realizada no intervalo de tempo  $t \cong 7.8-8.3s$ , a potência fornecida pelo motor e a energia regenerada, estão apresentadas nas Figuras 5.37 e 5.38, respectivamente. A Figura 5.36 apresenta a corrente no elo CC, durante o tempo em que ocorreu a regeneração.

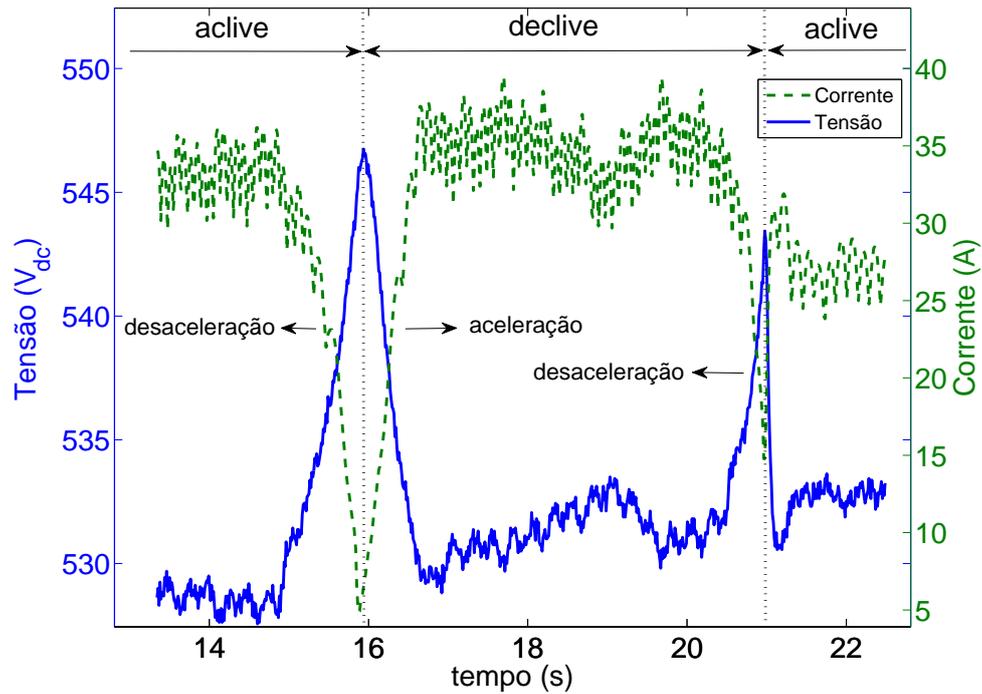


Figura 5.25: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 450kg$ ,  $inclinação = 10\%$ ,  $v_a = 0.36m/s$ ,  $a_a = 0.37m/s^2$ ,  $v_d = 0.89m/s$ ,  $d_d = 1.72m/s^2$

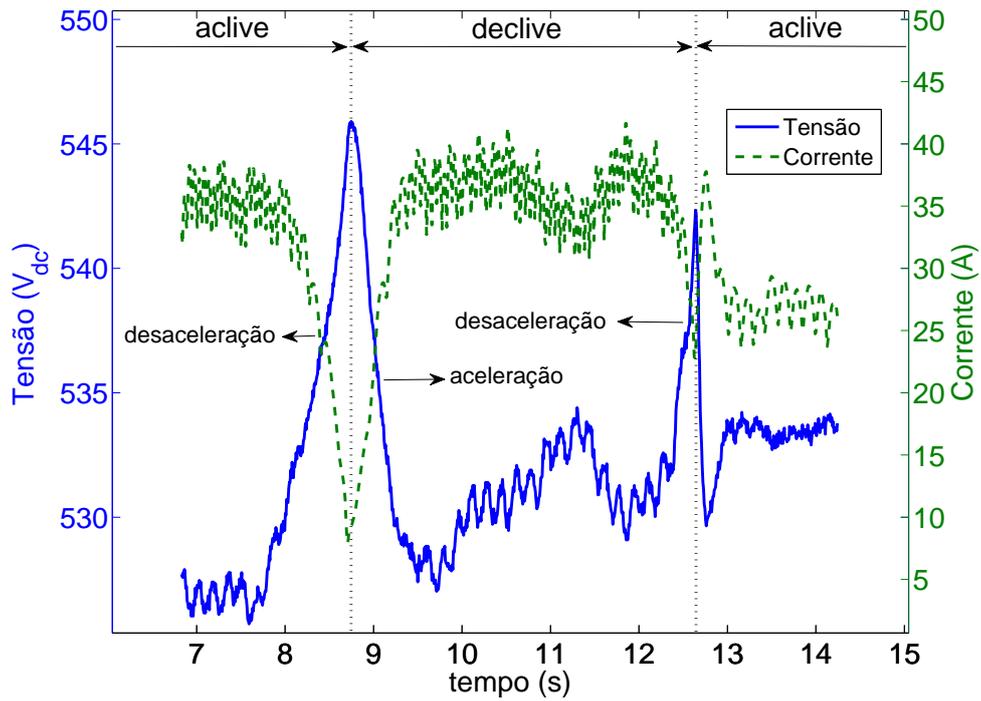


Figura 5.26: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 450kg$ , *inclinação* = 10%,  $v_a = 0.72m/s$ ,  $a_a = 0.74m/s^2$ ,  $v_d = 1.23m/s$ ,  $d_d = 4.94m/s^2$

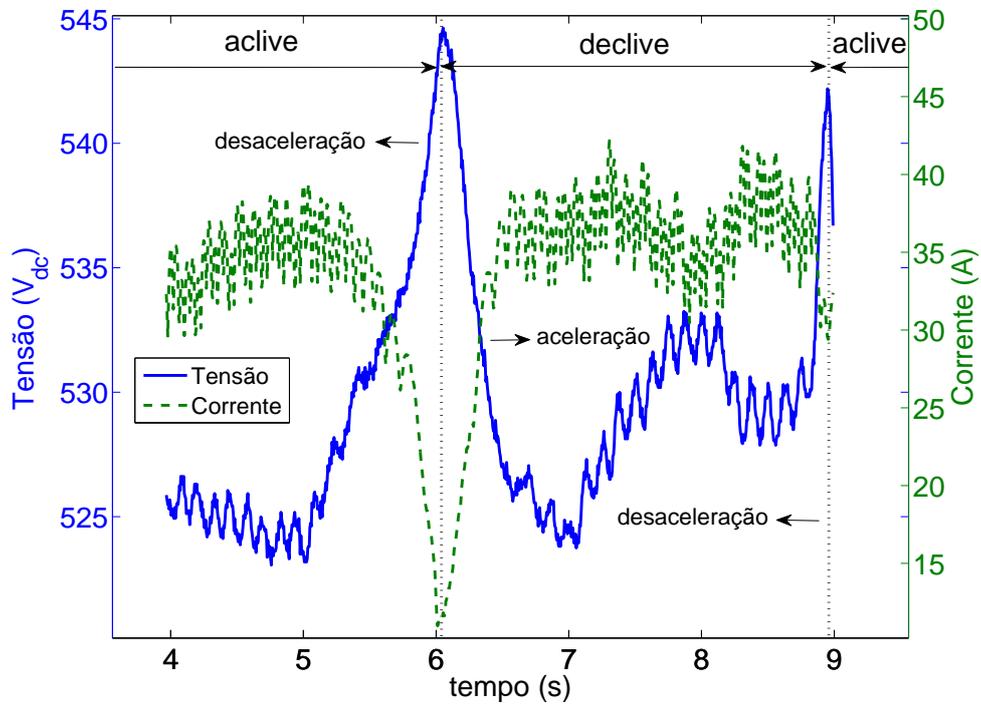


Figura 5.27: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 450kg$ , *inclinação* = 10%,  $v_a = 1.12m/s$ ,  $a_a = 1.15m/s^2$ ,  $v_d = 1.60m/s$ ,  $d_d = 16.16m/s^2$

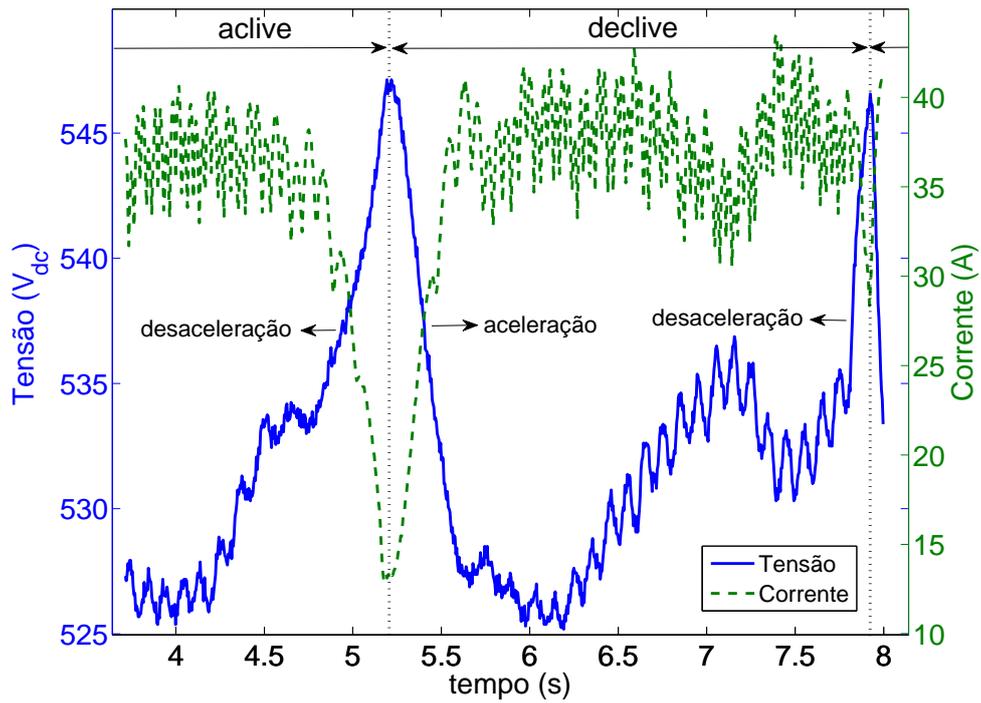


Figura 5.28: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 450kg$ , inclinação = 10%,  $v_a = 1.38m/s$ ,  $a_a = 1.4m/s^2$ ,  $v_d = 1.75m/s$ ,  $d_d = 13.86m/s^2$

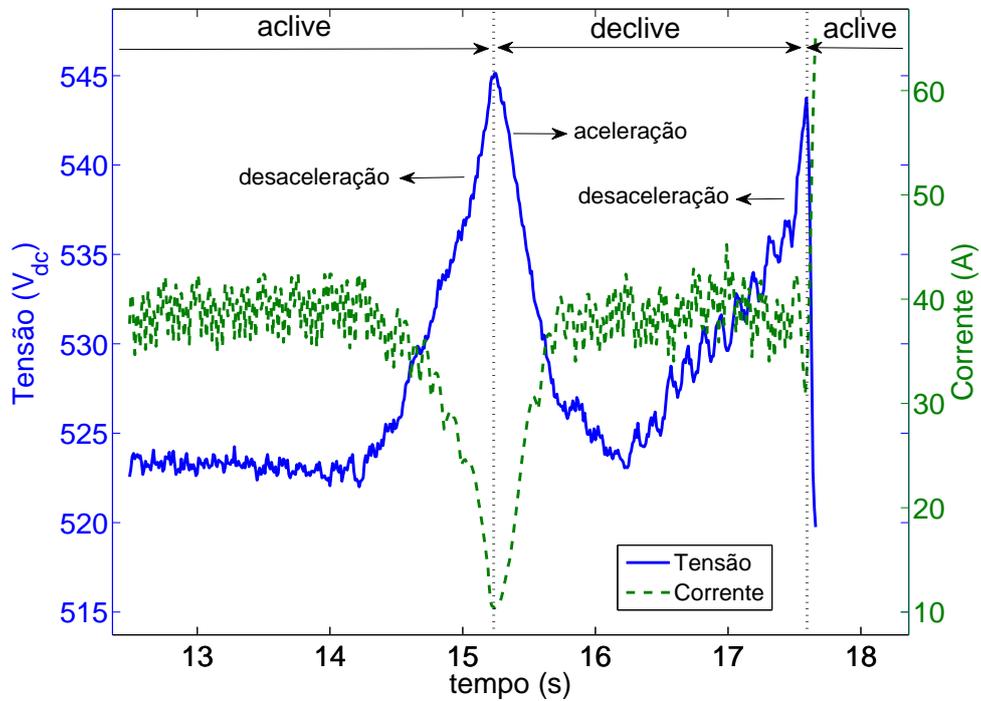


Figura 5.29: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000kg$ , inclinação = 10%,  $v_a = 0.63m/s$ ,  $a_a = 0.65m/s^2$ ,  $v_d = 2.0m/s$ ,  $d_d = 20.0m/s^2$

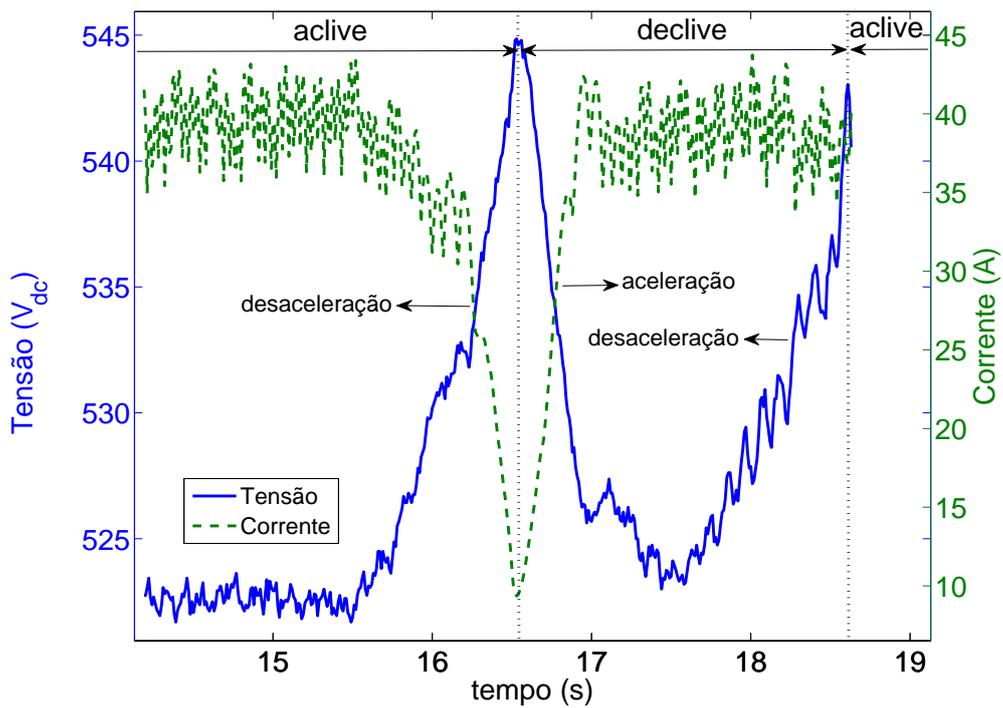


Figura 5.30: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000kg$ , inclinação = 10%,  $v_a = 0.76m/s$ ,  $a_a = 0.77m/s^2$ ,  $v_d = 2.24m/s$ ,  $d_d = 37.31m/s^2$

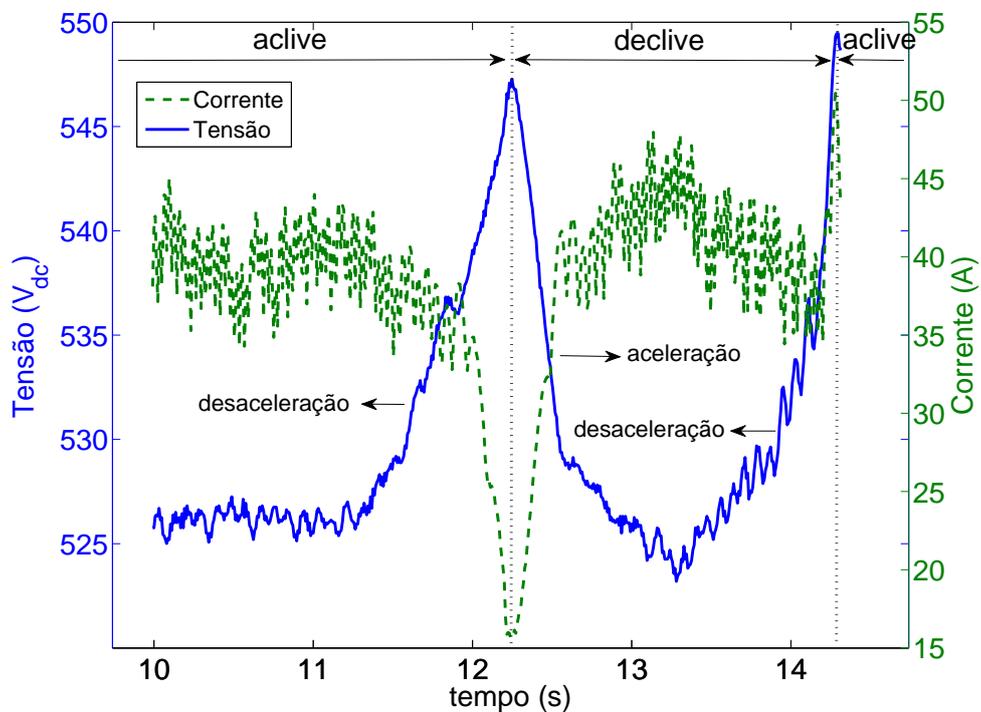


Figura 5.31: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000kg$ , inclinação = 10%,  $v_a = 1.08m/s$ ,  $a_a = 1.22m/s^2$ ,  $v_d = 2.32m/s$ ,  $d_d = 13.64m/s^2$

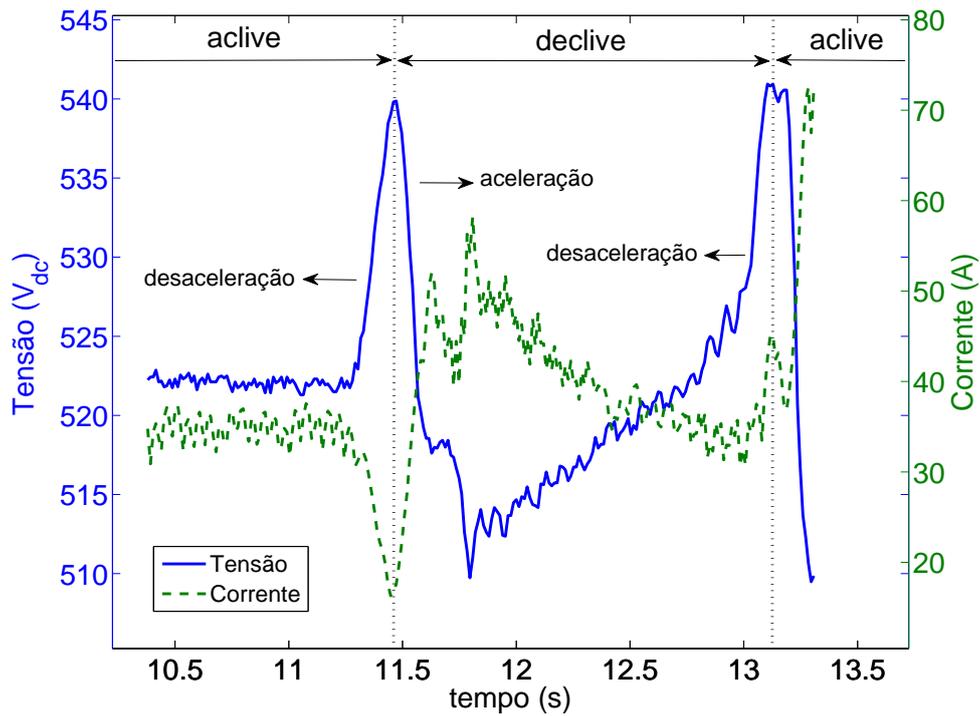


Figura 5.32: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000\text{kg}$ ,  $\text{inclinação} = 10\%$ ,  $v_a = 0.50\text{m/s}$ ,  $a_a = 0.87\text{m/s}^2$ ,  $v_d = 2.92\text{m/s}$ ,  $d_d = 16.23\text{m/s}^2$

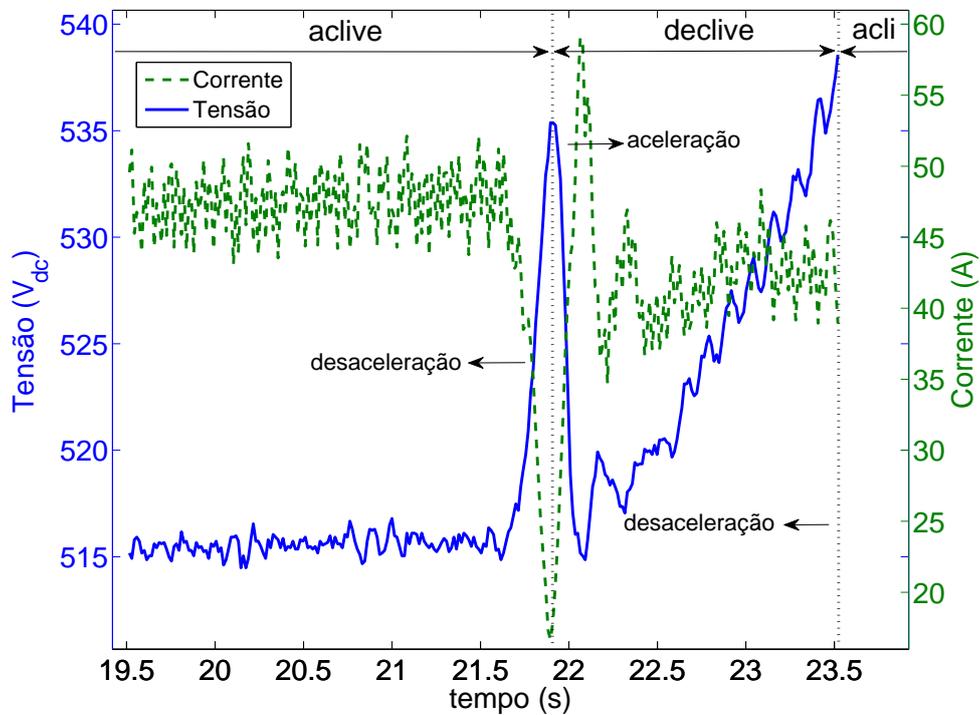


Figura 5.33: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000\text{kg}$ ,  $\text{inclinação} = 15\%$ ,  $v_a = 0.3\text{m/s}$ ,  $a_a = 0.40\text{m/s}^2$ ,  $v_d = 2.92\text{m/s}$ ,  $d_d = 26.56\text{m/s}^2$

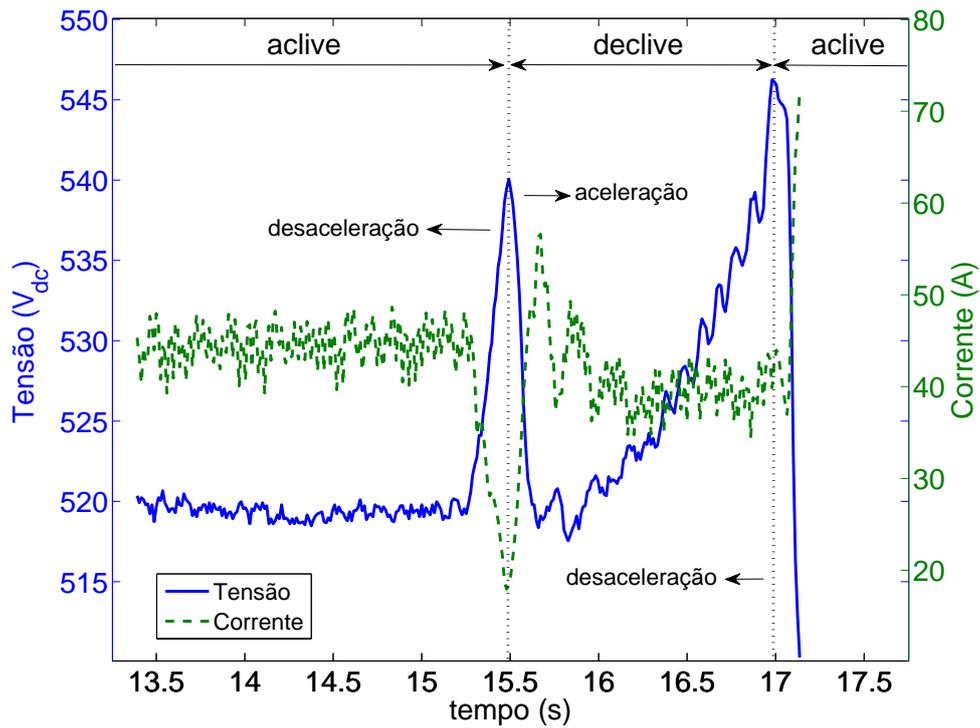


Figura 5.34: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000kg$ , *inclinação* = 15%,  $v_a = 0.34m/s$ ,  $a_a = 0.46m/s^2$ ,  $v_d = 3.12m/s$ ,  $d_d = 24.03m/s^2$

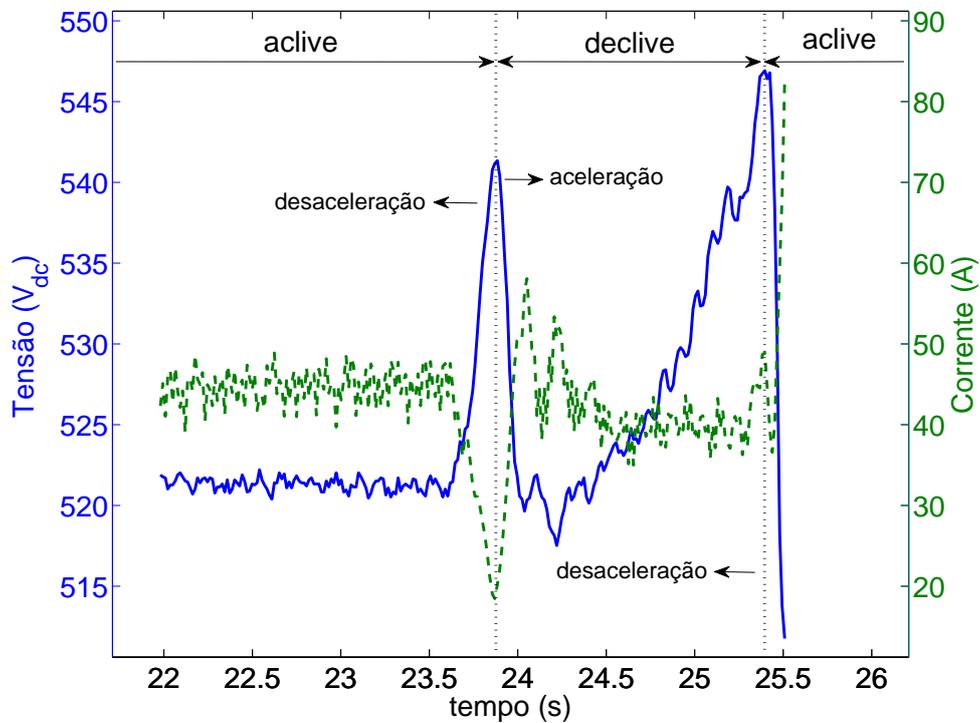


Figura 5.35: Tensão no Link CC e Corrente no motor -  $m = 1000kg$ , *inclinação* = 15%,  $v_a = 0.36m/s$ ,  $a_a = 0.49m/s^2$ ,  $v_d = 3.14m/s$ ,  $d_d = 22.47m/s^2$

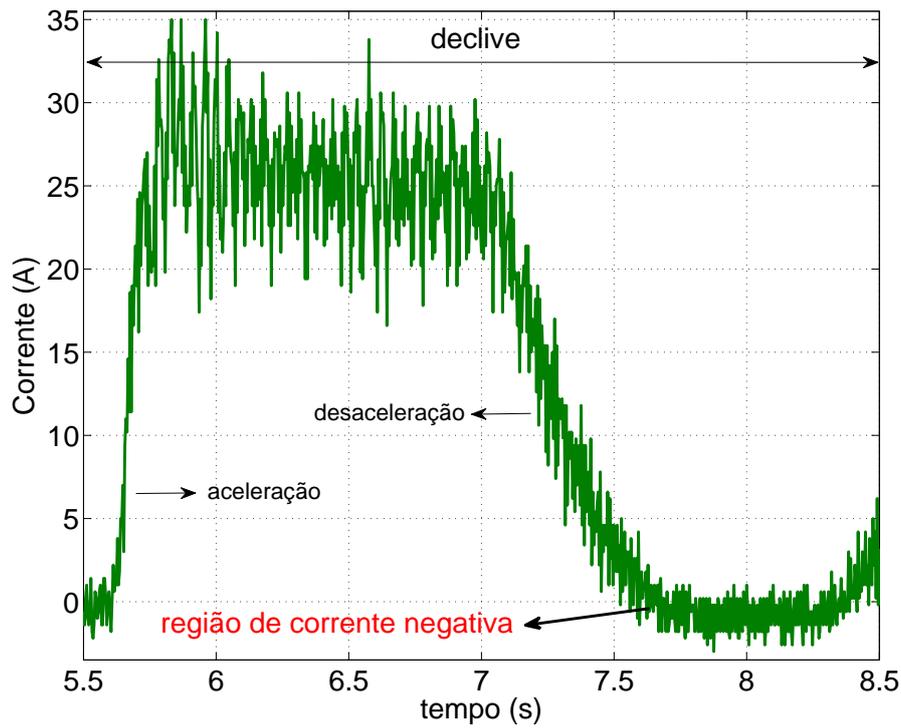


Figura 5.36: Corrente no elo CC -  $m = 1000kg$ , inclinação = 15%,  $a_d = 8.59m/s^2$ ,  $v_d = 2.92m/s$ ,  $d_d = 16.23m/s^2$

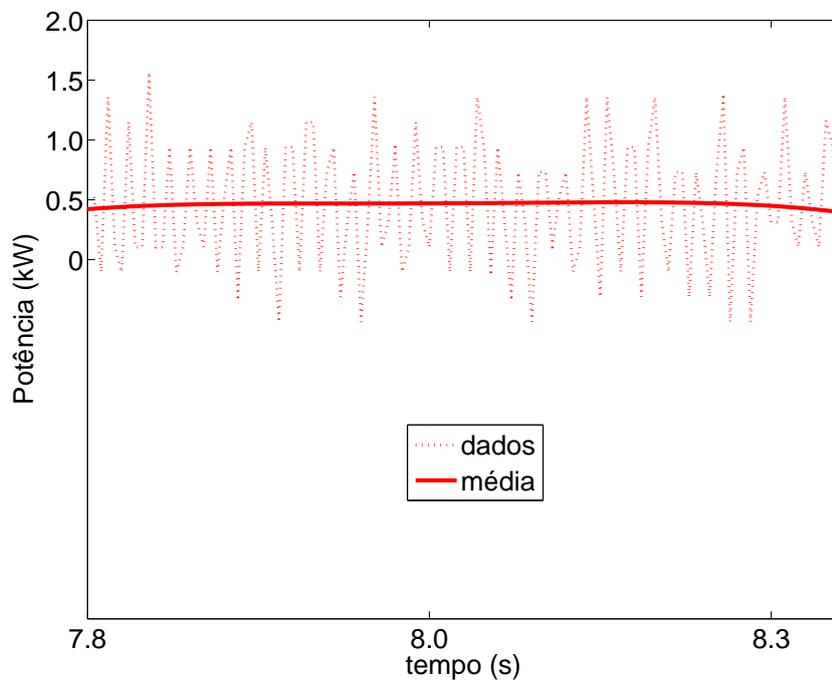


Figura 5.37: Potência fornecida à fonte, consideradas as perdas no conversor, na resistência do motor e perdas mecânicas. Condição do teste:  $m = 1000kg$ , inclinação = 15%,  $a_d = 8.59m/s^2$ ,  $v_d = 2.92m/s$ .

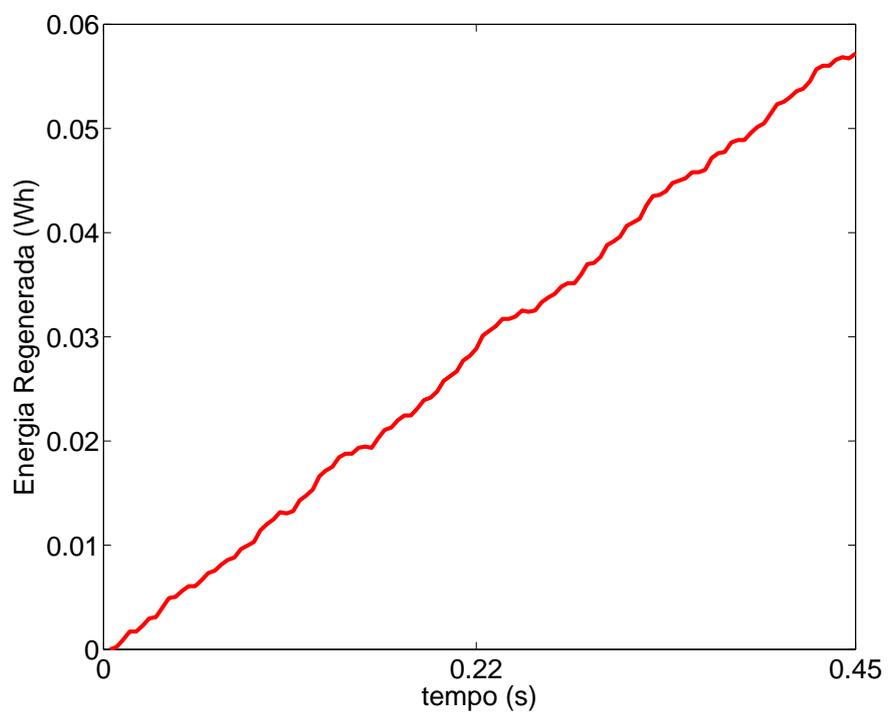


Figura 5.38: Energia regenerada durante o intervalo de frenagem. Condição do teste:  $m = 1000kg$ ,  $inclinação = 15\%$ ,  $a_d = 8.59m/s^2$ ,  $v_d = 2.92m/s$ .

# Capítulo 6

## Conclusão e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusão

O entreferro do motor de indução influencia o desempenho, sendo um parâmetro importante para a eficiência do motor. Em motores rotativos, o entreferro varia de  $g = 0.2mm - 0.8mm$  e no motor linear, utilizado neste trabalho, pode variar de  $g = 8mm - 20mm$ .

A descontinuidade elétrica e magnética do secundário do MIL alteram o desempenho de tração deste motor. Os testes mostraram que criando um caminho para a circulação de corrente induzida no secundário, as perdas de tração são reduzidas, de modo que seus efeitos podem ser desconsiderados para a nossa aplicação.

A bancada de testes, utilizada nos ensaios de frenagem regenerativa, não apresenta um comprimento adequado para testes com massas elevadas e altas velocidades. Esta limitação impede que o MIL opere em modo regenerativo por um longo período de tempo. Uma análise do circuito equivalente do MIL e da curva de força mostrou que é possível regenerar mais energia variando a frequência em passos pequenos, mantendo a velocidade do motor próxima da velocidade síncrona. Os cálculos matemáticos desta análise, apresentados no capítulo 05, foram validados através das simulações computacionais.

A energia regenerada pôde ser medida através da quantidade de corrente injetada no banco de capacitores do CFW11-105-RB. Não foi possível testar a capacidade de devolução da energia regenerada para a rede ou fontes de armazenamento externa, pois o nível de tensão do barramento CC não foi suficientemente elevado. Taxas de desaceleração superior à implementada, ainda que os valores aplicados durante os testes já representassem uma operação desconfortável para os usuários do veículo,

poderiam ter permitido maior regeneração de energia.

O sistema demonstrou eficiência em realizar a frenagem de grandes massas com variação elevada da taxa de desaceleração, evidenciando que não necessita de freios mecânicos auxiliares durante o ciclo de operação normal. A paralisação total do veículo MagLev-Cobra pode ser composta por duas técnicas distintas de frenagem: a regenerativa e a CC. Utiliza-se a frenagem regenerativa até que o motor atinja uma velocidade próxima de zero, recuperando parte da energia elétrica gerada na desaceleração. Em seguida, com a velocidade muito reduzida, aplica-se o freio CC já que a ausência de atrito entre o veículo e o solo pode movimentá-lo apenas pelo desbalanceamento das massas transportadas em seu interior. Em seguida aplica-se o freio mecânico mantendo o veículo parado durante o embarque e desembarque de passageiros. Isso evitaria o desperdício de energia elétrica para mantê-lo estático, além de não sobreaquecer o enrolamento do motor.

A frenagem regenerativa apresenta vantagens quando comparada com a frenagem dinâmica. A frenagem dinâmica necessita que a topologia do conversor inclua uma chave semicondutora de potência dedicada a chavear a energia regenerada para um banco de resistores que dissipará toda a energia associada a desaceleração. O banco de resistores precisa ser refrigerado através de *coolers*, se o ciclo de desaceleração for intenso. Também se sobressai ao método de frenagem por contracorrente, que mostra-se incapaz de devolver a energia gerada na desaceleração, conforme apresentado no capítulo 05, além de necessitar de contactores eletromecânicos.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Os testes em laboratório não permitiram avaliar a operação do motor em velocidade nominal. Esta avaliação poderá ser feita em trabalhos futuros, na via de 200m, que está em fase de construção, com previsão de conclusão em setembro de 2014. Este percurso permitirá avaliar o comportamento do veículo durante o transporte de passageiros, quando a carga transportada pode variar dinamicamente e de forma não balanceada, se os passageiros se movimentarem durante o percurso.

Um estudo para determinar o melhor armazenador para a energia regenerada poderá ser desenvolvido. Avaliar se os circuitos auxiliares precisam de fonte externa de energia, ou podem ser mantidos em funcionamento apenas com a energia recuperada torna-se importante.

# Referências Bibliográficas

- [1] IEA. *Energy Technology Perspectives. Scenarios and Strategies to 2050*. Relatório técnico, IEA, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France, 2008.
- [2] DE MATTOS, L. B. R. *A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa - O Caso do Município do Rio de Janeiro*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril 2001.
- [3] DOS SANTOS, M. D. A. *Sincronização da Operação do Protótipo de Trem de Levitação Magnética Maglev-Cobra*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro 2010.
- [4] LUIZAR, A. E. L. *Operação Sincronizada dos Motores Lineares de Tração para um Veículo de Levitação Magnética*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dezembro 2010.
- [5] MATTOS, L. S. *Automated People Mover (APM) Aplicada ao Veículo de Levitação Magnética MagLev Cobra*. Proposta de tema de tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [6] TAVARES, A. M., FILHO, A. F. F., OSÓRIO, J. O. M., et al. “Um estudo sobre a frenagem regenerativa de trens utilizando gerador linear de indução”. In: CBA (Ed.), *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 17, pp. 40–45, 2010.
- [7] TAVARES, A. M. *Estudo Teórico e Experimental sobre a Frenagem Regenerativa da Máquina de Indução Linear*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dezembro 2012.
- [8] POLOUJADOFF, M. “Linear induction machines - History and theory of operation”, *IEEE Spectrum*, pp. 72–80, February 1971.
- [9] GIERAS, J. F. *Linear Induction Drives*. New York, Oxford Science Publications, 1994.
- [10] SINHA, P. *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*. London, Institution of Electrical Engineers IEE, 1987.

- [11] STEPHAN, R., DE ANDRADE, R., FERREIRA, A. “Superconducting Light Rail Vehicle: A Transportation Solution for Highly Populated Cities”, *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 7, n. 4, pp. 122–127, 2012.
- [12] GIERAS, J. F., PIECH, Z. J. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. 6000 Broken Sound Parkway, NW Suite 300, Boca Raton, FL 33487, 2000.
- [13] RINALDI, V. *Estudo de um Motor Linear Tubular de Relutância Chaveado de Fluxo Transversal*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Abril 2004.
- [14] CHABU, I. E., GOMES, D. R. *Relatório Técnico - FAPERJ PI 56.146*. R. Secundino Domingues, 787, Jardim Independência, São Paulo, SP, 2009.
- [15] UFRJ. “Motor Linear Aplicado a Veículos de Transporte por Levitação Magnética - PI 1103525-0”. 04 de julho de 2011.
- [16] DUNCAN, J. “Linear induction motor-equivalent-circuit model”, *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, v. 130, n. 1, pp. 51 –57, january 1983.
- [17] BOLDEA, I., NASAR, S. A. *The Induction Machines Design Handbook*. CRC Press, 2010.
- [18] GIERAS, J. F., DAWSON, G. E., EASTHAM, A. R. “A New Longitudinal End Effect Factor for Linear Induction Motors”, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. EC-2, n. 1, pp. 152 –159, march 1987.
- [19] LU, J., MA, W. “Research on End Effect of Linear Induction Machine for High-Speed Industrial Transportation”, *Plasma Science, IEEE Transactions on*, v. 39, n. 1, pp. 116–120, 2011.
- [20] SOTELO, G. G., STEPHAN, R. M., BRANCO, P. J., et al. “A Didactic Comparison of Magnetic Forces”, *International Journal of Electrical Engineering Education* 48/2, pp. 117–129, march 2011.
- [21] MOON, F. C. *Superconducting Levitation - Applications to Bearings and Magnetic Transportation*. John Wiley and Sons, Inc., 1993. ISBN: 0-471-55925-3.
- [22] FITZGERALD, A. E., JR, C. K., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas - com introdução a eletrônica de potência*. Bookman, 2006.

- [23] STEPHAN, R. M., PINTO, F. C., DEL NERO GOMES, A. C., et al. *Mancais Magnéticos: Mecatrônica Sem Atrito*. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, 2013.
- [24] SOTELO, G. G. *Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, maio 2007.
- [25] ASCE. *Automated People Mover Standards*. 1801 Alexander Bell Drive - Reston, Virginia 20191, American Society of Civil Engineers, 2006.
- [26] EL-SHARKAWI, M. A. *Fundamentals of electric drives*. Thomson Learning, 2000.
- [27] YU, L., HE, J., YIP, H. T., et al. “Simulation of regenerative braking in DC railway system based on MATLAB/Simulink”. In: *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, pp. 1–5, 2010.
- [28] LIU, J., YOU, X., ZHENG, T. “Efficiency optimal control in braking process for linear metro”. In: *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on*, pp. 1363–1367, 2010.
- [29] MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley and Sons, Inc., 1995.

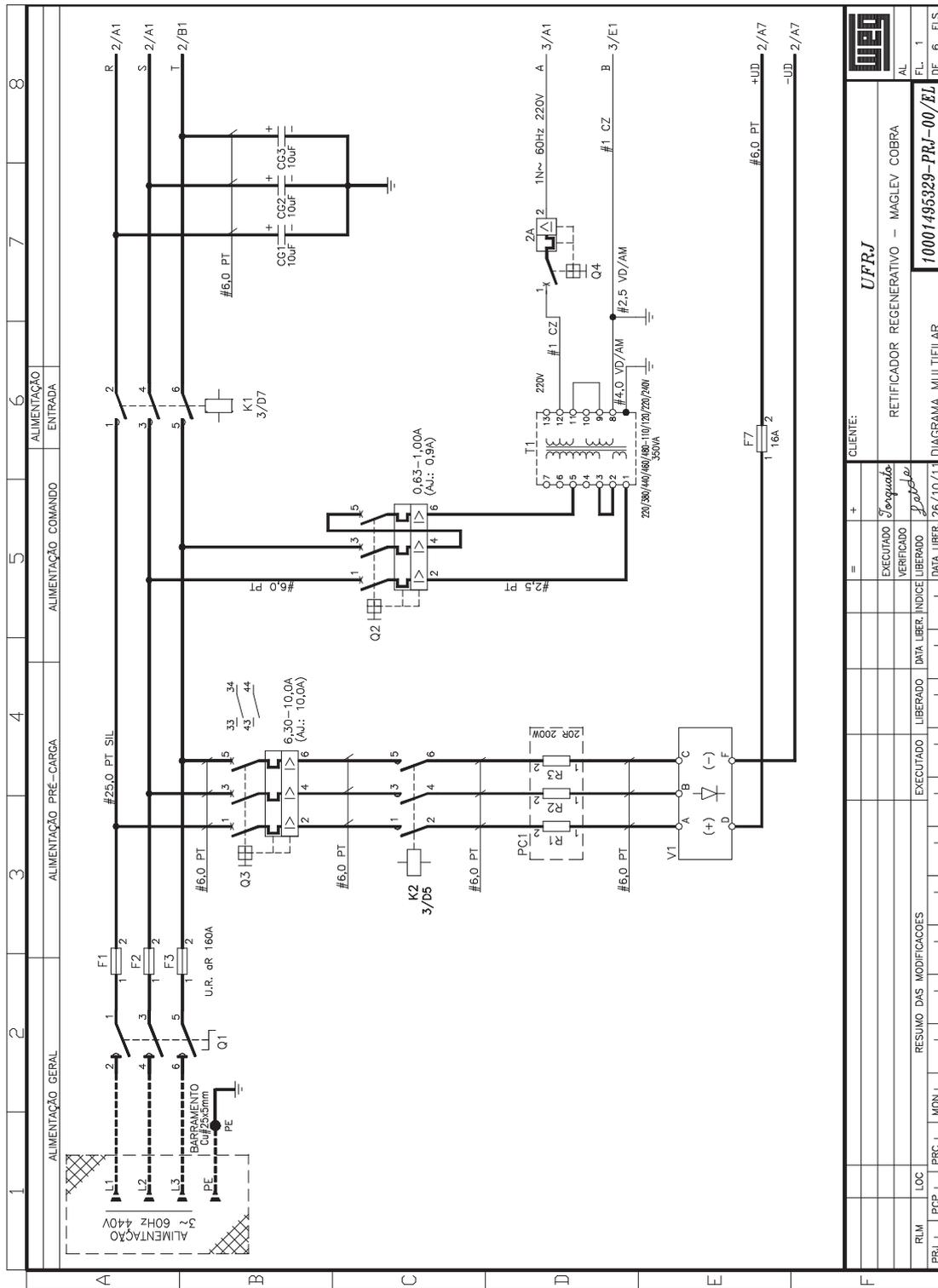
# Apêndice A

## Anexos

**A.1 Diagrama Multifilar do AFW-11**

**A.2 Sensores**

**A.3 Motor**



MOD. 0074 Rev. 07/97

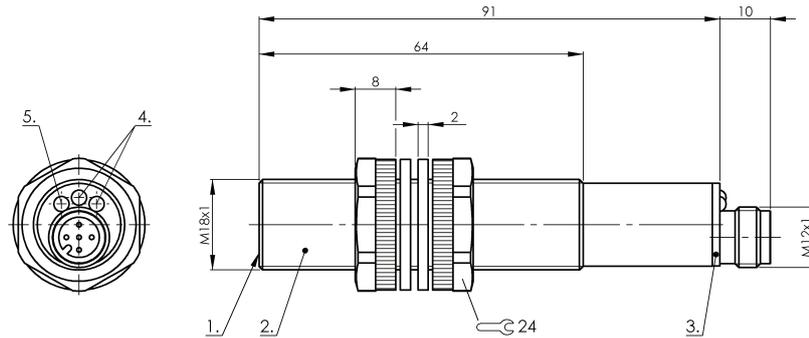
Figura A.1: Diagrama Multifilar - Folha 1/6



**BUS M18KO-PWXER-040-S92K**  
**Ordering code: BUS0001**  
**Ultrasonic sensor**  
**M18**

**Connector, M12x1 5 poles**  
**Working range 30...400 mm**  
**2xPNP NO/NC**

**BALLUFF**  
*sensors worldwide*



1) Active surface, 2) Housing, 3) Top cover, 4) Function indicator yellow, 5) Display echo green

**Characteristic data**

Special properties  
Short-circuit protected  
Protected against polarity reversal  
Switching function indicator  
Setting  
Echo indicator

Hysteresis and window function  
yes  
yes  
LED yellow  
Remote  
LED green

**Electrical data**

Operating voltage  
Rated operating voltage  $U_e$  DC  
Switching output  
Hysteresis H max.  
Switching frequency f  
Output signal adjustable  
Current consumption  
Stability  
Ultrasonic frequency

12...30 V DC  
24 V  $\pm 25\%$  V  
2xPNP NO/NC  
1 %  
15 Hz  
yes  
 $\leq 80$  mA  
EN 61000-4-5  
ca. 360 kHz

**Mechanical data**

Resolution  
Connector type  
Sensing surface material  
Housing material  
Resolution  
Repeat accuracy  
Operating temperature  
Operating temperature min.  
Operating temperature max.  
Weight  
Cover material  
Range min.  
Range max.  
Opening angle, sound cone  
Temperature compensation

0,20 mm  
M12x1 5 poles  
PUR  
Plastic PBT  
0,20 mm  
0,2 %  
-15...+70 °C  
-15 °C  
+70 °C  
45  
Plastic PA  
30  
400  
8°  
yes

**Basic data**

Enclosure type per IEC 60529  
Protection class

IP67  
II



Definitions see main catalog

subject to change

Internet : [www.balluff.com](http://www.balluff.com)  
Balluff Germany : +49 (0) 7153 173-0, 173-370  
Balluff USA : 1-800-543-8380  
Balluff China : +86 (0) 21-50 644131

1 (2)  
Print date: 13.08.2012  
Selection date: 13.08.2012

Figura A.3: Folha de dados do sensor ultrassônico utilizado para medir o gap de levitação do MagLev-Cobra.

| Overview                                       | ★ Reviews ★                                    | Specifications | Models and Accessories | More Info |
|--|--|----------------|------------------------|-----------|
| <b>Specifications</b>                          |  |                |                        |           |
| Nominal current range                          | 10 A, AC/DC<br>100 A, AC/DC                    |                |                        |           |
| Continuous current range                       | 0.1 A - 10 A AC/DC<br>1 A - 100 A AC/DC        |                |                        |           |
| Maximum Non-Destructive Current                | 140 A - 2 kHz                                  |                |                        |           |
| Lowest measurable current                      | 0.1 A  |                |                        |           |
| Basic Accuracy                                 | 3% + 50 mA (@ 10 A)<br>(% reading + floorspec) |                |                        |           |
| Useable frequency                              | DC - 100 kHz                                   |                |                        |           |
| Output level(s)                                | 100 mV/A<br>10 mV/A                            |                |                        |           |
| Zero error adjustment                          | Yes  |                |                        |           |
| <b>Safety Specifications</b>                   |  |                |                        |           |
| Safety   | CAT II, 600 V<br>CAT III, 300 V                |                |                        |           |
| Maximum voltage                                | 600 V  |                |                        |           |
| <b>Mechanical &amp; General Specifications</b> |  |                |                        |           |
| Warranty                                       | 1 year   |                |                        |           |
| Battery Life                                   | 9 V, 55 h                                      |                |                        |           |
| Maximum conductor diameter                     | 11.8 mm  |                |                        |           |
| Output cable length                            | 1.6 m  |                |                        |           |
| BNC Adapter                                    | Yes  |                |                        |           |

Figura A.4: Especificação Técnica da ponteira de corrente Hall.

