

Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



**Proposta e implementação de sistema para caracterização
eletromecânica estática e dinâmica de motores rotativo e linear de
relutância chaveada**

Danilo Nobre Oliveira

Fortaleza
Setembro 2008

Danilo Nobre Oliveira

**PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO
ELETROMECÂNICA ESTÁTICA E DINÂMICA DE MOTORES ROTATIVO E
LINEAR DE RELUTÂNCIA CHAVEADA**

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

**Fortaleza
Setembro 2008**

DANILO NOBRE OLIVEIRA

**PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA
CARACTERIZAÇÃO ELETROMECCÂNICA ESTÁTICA E DINÂMICA
DE MOTORES ROTATIVO E LINEAR DE RELUTÂNCIA
CHAVEADA.**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.


DANILO NOBRE OLIVEIRA

Banca Examinadora:


Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.
Orientador


Prof. Cláudio Sá, Dr.
Examinador


Prof. Otacílio da Mota Almeida, Dr.
Examinador


Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.
Examinador

Fortaleza, 25 de setembro de 2008

A minha mãe, Lucineide, exemplo de Ser.

A meu pai Gilvan (in memoriam).

Ao meu irmão Adriano e a minha irmã Denize, por mostrarem ser o presente o melhor momento para transformarmos sonhos em realidade.

A minha sobrinha, Marina, um dom, um sonho, um som, uma alegria.

A minha companheira, Naiara, pelo carinho e compreensão.

Eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, em particular ao Departamento de Engenharia Elétrica, pela oportunidade que me foi concedida de desenvolver este projeto e cursar o mestrado em Engenharia Elétrica.

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio fornecido através de recursos financeiros para a bolsa de mestrado e aquisição de equipamentos fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Artimar® (representante da Microchip® no Brasil), na pessoa da Srta. Lorinne Brentel, pelo fornecimento de amostras dos DSCs utilizados neste trabalho.

À empresa mikroEletronika®, por disponibilizar gratuitamente, em sua página na *internet*, uma versão de demonstração do compilador mikroC®, utilizado na programação dos dsPICs.

À ONG brasileira BrOffice.org, por apoiar a utilização do *software* livre e disponibilizar gratuitamente o pacote de programas “BrOffice”, que foi utilizado para a elaboração desta dissertação (textos, planilhas, apresentações, etc).

Ao professor Dr. Ricardo Thé, por ter apoiado e incentivado o projeto desde o início, principalmente na superação dos maiores obstáculos.

Aos professores Dr. Henrique Cunha Jr. e Dr. Darizon Andrade (Universidade Federal de Uberlândia – UFU) pelas contribuições e sugestões apresentadas, proporcionando a publicação de artigos em congressos e obtenção de resultados bastante motivadores.

À Dra. Simone Viana, pelas colaborações com a análise computacional pelo método dos elementos finitos e pelo constante cuidado no rigor com os procedimentos adotados e com os resultados obtidos.

Ao professor Dr. Roberto Bezerra (Departamento de Eng. Mecânica – UFC), ao tecnólogo e professor do SENAI-CE, Venicio Soares e ao técnico Bonfim, servidor da oficina mecânica (Departamento de Eng. Mecânica – UFC), pelo suporte prestado nas etapas de ajuste e implementação de componentes mecânicos, fundamentais nas etapas de medição e operação das máquinas estudadas.

A David C. Meeker, pela disponibilização do programa FEMM versão 4.2, utilizado na análise computacional pelo método dos elementos finitos.

A minha família, que me apoiou durante todo esse período sem qualquer cobrança.

A minha namorada, Naiara, pela motivação, carinho, confiança e alegria.

A todos os colegas de laboratório, em especial aos engenheiros, Rômulo Nunes e Fernando Sobreira, pela ajuda na implementação dos sistemas de controle das máquinas estudadas.

A todos os professores, funcionários, colegas de curso, amigos e pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com a prosperidade deste trabalho.

“Onde há vontade, há um caminho.”

provérbio chinês

“Sou caboclo do Nordeste, criado dentro da mata, caboclo cabra da peste.”

trecho da poesia “O agregado e o operário”, do poeta e compositor cearense Patativa do Assaré

RESUMO

Oliveira, D. N., “Proposta e implementação de sistema para caracterização eletromecânica estática e dinâmica de motores rotativo e linear de relutância chaveada”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008, 203p.

O presente trabalho tem como objetivos principais propor e implementar sistemas para caracterização eletromecânica – estática e dinâmica – de máquinas rotativa e linear de relutância chaveada, de baixa potência. Através da caracterização estática e dinâmica destas máquinas, são estabelecidos modelos matemáticos de ambas as máquinas, que permitem desenvolver a simulação integrada da máquina e do seu sistema de controle, além de possibilitar a verificação dos valores teóricos de projeto, bem como o aprimoramento da metodologia de projeto das máquinas rotativa e linear de relutância chaveada. A análise das características estáticas eletromagnéticas de ambas as máquinas baseou-se em simulação computacional (através dos métodos dos elementos finitos em 2-D e da análise do circuito magnético) e respectiva validação através de medições experimentais (utilizando três métodos de medição), enquanto a análise das características estáticas mecânicas foram realizadas somente para a máquina rotativa, sendo baseada no cálculo do conjugado médio. A análise das características dinâmicas de ambas as máquinas baseou-se na implementação e desenvolvimento de sistema de acionamento e controle específicos para cada uma das duas máquinas, utilizando-se sensores de posição e controle de corrente por histerese.

Palavras-chave: máquinas de relutância chaveada, características eletromecânicas estáticas e dinâmicas, conversor assimétrico, controle de corrente por histerese.

ABSTRACT

Oliveira, D. N., "Proposition and implementation of a system for static and dynamic electromechanical characterization of rotary and linear switched reluctance machines", Universidade Federal do Ceará – UFC, 2008, 203p.

The main objectives of this work are the proposition and implementation of a system for the static and dynamic characterization of low power rotary and linear switched reluctance machines. Through the static and dynamic characterization of those machines, mathematical models are developed for both machines, which allow the development of the simulation of the machine integrated with its control system. Furthermore, the models also allow the verification of design values, as well as the possibility of improvement in the machine design methodology – for the rotary and linear switched reluctance machines. The analysis of the electromagnetic static characteristics of both machines was based on simulation (using finite element and the magnetic circuit analysis methods) which was validated by experimental procedures (using three measurement methods), while the analysis of the mechanical static characteristics were carried out only for the rotary machine, involving the simulation and measurement of the mean torque value. The analysis of the dynamic characteristics of both machines was done through the development and implementation of two different electronic drive and control systems (one system for the rotary machine and other for the linear machine), with closed loop control for the position (of the movable part) and hysteresis current control.

Keywords: switched reluctance machines, static and dynamic electromechanical characteristics, assymetric converter, hysteresis current control.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiv
CAPÍTULO 1	
Introdução às máquinas de relutância chaveada (MRC).....	1
1.1. Breve histórico.....	1
1.2. Características gerais, aspectos básicos de funcionamento e modelo matemático geral.....	4
1.3. Classificação das máquinas de relutância chaveada (MRCs).....	8
1.4. Principais aspectos de projeto.....	10
1.5. Aspectos de aperfeiçoamento.....	11
1.6. Motivação para estudo e desenvolvimento no Brasil.....	12
1.7. Informações sobre as máquinas estudadas nesta dissertação.....	13
1.7.1. Máquina Rotativa de Relutância Chaveada (MRRC).....	13
1.7.2. Máquina Linear de Relutância Chaveada (MLRC).....	14
1.8. Objetivos desta dissertação.....	16
1.9. Trabalhos publicados.....	17
1.10. Estrutura da dissertação.....	18
CAPÍTULO 2	
Modelagem das características estáticas da máquina de relutância chaveada.....	20
2.1. Modelagem das características eletromagnéticas.....	21
2.1.1. Método dos elementos finitos (MEF).....	22
2.1.2. Método de análise do circuito magnético (MACM).....	24
2.1.2.1. Máquina rotativa.....	26
2.1.2.2. Máquina linear.....	29
2.2. Características mecânicas – métodos de estimação analítica.....	32
2.2.1. Máquina rotativa – estimação do conjugado médio.....	32
2.2.1.1. Método trapezoidal.....	33
2.2.1.2. Método da parábola.....	34
CAPÍTULO 3	
Simulação das características estáticas da máquina de relutância chaveada.....	37
3.1. Simulação das características eletromagnéticas.....	37
3.1.1. Método dos elementos finitos (MEF).....	38
3.1.1.1. Máquina rotativa.....	39
3.1.1.2. Máquina linear.....	41
3.1.2. Método de análise do circuito magnético (MACM).....	47
3.1.2.1. Máquina rotativa.....	47
3.1.2.2. Máquina linear.....	49
3.2. Estimação das características mecânicas.....	51

3.2.1.Método dos elementos finitos (MEF).....	51
3.2.1.1.Máquina rotativa – estimação do conjugado médio.....	51
3.2.1.1.1.Método trapezoidal.....	51
3.2.1.1.2.Método da parábola.....	52
3.2.2.Método de análise do circuito magnético (MACM).....	52
3.2.2.1.Máquina rotativa – estimação do conjugado médio.....	52
3.2.2.1.1.Método trapezoidal.....	52
3.2.2.1.2.Método da parábola.....	53
3.3. Comparação dos resultados das simulações das características estáticas.....	53
3.3.1.Características eletromagnéticas.....	53
3.3.1.1.Máquina rotativa.....	54
3.3.1.2.Máquina linear.....	55
3.3.2.Características mecânicas.....	55
3.3.2.1.Máquina rotativa.....	57

CAPÍTULO 4

Medição das características eletromecânicas da máquina de relutância chaveada.. 58

4.1. Caracaterísticas eletromagnéticas.....	58
4.1.1.Método do teste de carga RL alimentada por corrente alternada (c.a.).....	64
4.1.1.1.Máquina rotativa.....	68
4.1.1.2.Máquina linear.....	70
4.1.2.Método do tempo de subida da corrente de fase.....	70
4.1.2.1.Máquina rotativa.....	77
4.1.2.2.Máquina linear.....	78
4.1.3.Método do tempo de extinção da corrente de fase.....	79
4.1.3.1.Máquina rotativa.....	83
4.1.3.2.Máquina linear.....	85
4.2. Caracaterísticas mecânicas.....	85
4.2.1.Máquina rotativa – medição do conjugado.....	87
4.3.Comparação dos resultados das simulações das características estáticas.....	88
4.3.1.Características eletromagnéticas.....	89
4.3.1.1.Máquina rotativa.....	89
4.3.1.2.Máquina linear.....	92
4.3.2.Características mecânicas.....	96
4.3.2.1.Máquina rotativa.....	96

CAPÍTULO 5

Sistemas de acionamento e controle..... 98

5.1. Sistema de acionamento.....	98
5.1.1.Máquina rotativa.....	98
5.1.2.Máquina linear.....	105
5.2. Sistema de controle.....	108
5.2.1.Máquina rotativa.....	110
5.2.2.Máquina linear.....	112

CAPÍTULO 6

Ensaio experimentais dinâmicos e análise do desempenho das máquinas rotativa e linear..... 114

6.1. Máquina rotativa.....	114
6.2. Máquina linear.....	122
6.3. Comentários sobre os resultados obtidos.....	129

CAPÍTULO 7

Conclusão e propostas de trabalhos futuros.....	130
---	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
---	-----

APÊNDICE

Listagem dos programas de simulação pelo MACM.....	140
1. Máquina rotativa.....	140
2. Máquina linear.....	154

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – A ferradura eletromagnética de William Sturgeon.
- Figura 1.2a – Guindaste de Henry, baseado na “ferradura eletromagnética” de Sturgeon.
- Figura 1.2b – Detalhe do eletroímã utilizado por Henry.
- Figura 1.3a – Principais características e elementos construtivos da máquina rotativa
- Figura 1.3b – Principais características e elementos construtivos da máquina linear
- Figura 1.4a – Princípio de funcionamento da máquina rotativa
- Figura 1.4b – Princípio de funcionamento da máquina linear
- Figura 1.5a – Variação da indutância e do conjugado, em função da posição da parte móvel, para a máquina rotativa
- Figura 1.5b – Variação da indutância e da força de propulsão, em função da posição da parte móvel, para a máquina linear
- Figura 1.6 – Circuito elétrico representando a modelagem geral da máquina de relutância
- Figura 1.7a – Exemplo de variação construtiva na geometria do estator e da parte móvel da MRC: uma máquina rotativa 4/2, com rotor em formato assimétrico, e que permite uma redução no número de fases e simplificação no sistema de acionamento
- Figura 1.7b – Exemplo de variação construtiva na geometria do estator e da parte móvel da MRC: uma máquina linear 8/6 de fluxo magnético transversal, para aplicação no transporte ferroviário urbano.
- Figura 1.8 – Esboço das curvas características de uma MRC
- Figura 1.9 – MRRC
- Figura 1.10 – MLRC
- Figura 2.1a – Detalhe da análise da MRRC através do MEF, mostrando a definição da geometria da máquina, com a definição das condições de contorno
- Figura 2.1b – Detalhe da análise da MRRC através do MEF, mostrando a geração da malha de elementos finitos
- Figura 2.1c – Detalhe da análise da MRRC através do MEF, mostrando a solução final do problema, através de linhas de fluxo magnético
- Figura 2.2 – Posições do rotor da MRRC consideradas para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM
- Figura 2.3a – Circuitos magnéticos associados ao caminho 1 de fluxo magnético
- Figura 2.3b – Circuitos magnéticos associados ao caminho 2 de fluxo magnético, ambos para a posição alinhada.

- Figura 2.4 – Fluxograma do processo iterativo do MACM aplicado à máquina rotativa, utilizado no cálculo da indutância para cada posição do rotor
- Figura 2.5a – Posição de total alinhamento do translador da MLRC considerada para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM.
- Figura 2.5b – Posição de 1/3 de desalinhamento do translador da MLRC considerada para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM.
- Figura 2.5c – Posição de 2/3 de desalinhamento do translador da MLRC considerada para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM.
- Figura 2.5d – Posição de total desalinhamento do translador da MLRC considerada para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM.
- Figura 2.6 – Fluxograma do processo iterativo do MACM aplicado à máquina linear, utilizado no cálculo da indutância para cada posição do translador.
- Figura 2.7 – Energia e coenergia.
- Figura 2.8 – Método trapezoidal para cálculo da coenergia.
- Figura 2.9 – Método da parábola para cálculo da coenergia.
- Figura 3.1 – Curva B versus H, do aço que compõe o núcleo magnético das máquinas rotativa e linear.
- Figura 3.2a – Geração de malhas da geometria da MRRC para simulação através do MEF, para a posição alinhada
- Figura 3.2b – Geração de malhas da geometria da MRRC para simulação através do MEF, para a posição desalinhada.
- Figura 3.3a – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da MRRC pelo MEF, para a posição alinhada
- Figura 3.3b – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da MRRC pelo MEF, para a posição desalinhada.
- Figura 3.4 – Curvas características da MRRC, obtidas através de simulação pelo MEF.
- Figura 3.5a – Geração de malhas da geometria da fase A da MLRC para simulação através do MEF, para a posição alinhada, .
- Figura 3.5b – Geração de malhas da geometria da fase A da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.5c – Geração de malhas da geometria da fase A da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento
- Figura 3.5d – Geração de malhas da geometria da fase A da MLRC para simulação através do MEF, para a posição desalinhada

- Figura 3.6a – Geração de malhas da geometria da fase B da MLRC para simulação através do MEF, para a posição alinhada, .
- Figura 3.6b – Geração de malhas da geometria da fase B da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.6c – Geração de malhas da geometria da fase B da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento
- Figura 3.6d – Geração de malhas da geometria da fase B da MLRC para simulação através do MEF, para a posição desalinhada
- Figura 3.7a – Geração de malhas da geometria da fase C da MLRC para simulação através do MEF, para a posição alinhada, .
- Figura 3.7b – Geração de malhas da geometria da fase C da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.7c – Geração de malhas da geometria da fase C da MLRC para simulação através do MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento
- Figura 3.7d – Geração de malhas da geometria da fase C da MLRC para simulação através do MEF, para a posição desalinhada
- Figura 3.8a – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase A da MLRC pelo MEF, para a posição alinhada
- Figura 3.8b – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase A da MLRC pelo MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.8c – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase A da MLRC pelo MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento
- Figura 3.8d – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase A da MLRC pelo MEF, para a posição desalinhada
- Figura 3.9a – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase B da MLRC pelo MEF, para a posição alinhada
- Figura 3.9b – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase B da MLRC pelo MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.9c – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase B da MLRC pelo MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento
- Figura 3.9d – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase B da MLRC pelo MEF, para a posição desalinhada
- Figura 3.10a – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase C da MLRC pelo MEF, para a posição alinhada
- Figura 3.10b – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase C da MLRC pelo MEF, para a posição de 2/3 de alinhamento
- Figura 3.10c – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase C da MLRC pelo MEF, para a posição de 1/3 de alinhamento

- Figura 3.10d – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase C da MLRC pelo MEF, para a posição desalinhada
- Figura 3.11 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF
- Figura 3.12 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF
- Figura 3.13 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF
- Figura 3.14 – Curvas características da MRRC, obtidas através de simulação pelo MACM.
- Figura 3.15 – Curvas características da MLRC, obtidas através de simulação pelo MACM.
- Figura 3.16 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo MACM
- Figura 3.17 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF (considerando as 3 fases) e pelo MACM
- Figura 4.1 – Diagrama representativo do sistema de medição das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear.
- Figura 4.2 – Ilustração do sistema de medição das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear.
- Figura 4.3a – Relação entre o valor de entrada e o valor da tensão de saída, obtidos a partir de ensaios experimentais, para o sensor de corrente
- Figura 4.3b – Relação entre o valor de entrada e o valor da tensão de saída, obtidos a partir de ensaios experimentais, para o sensor de tensão
- Figura 4.4 – Placa de aquisição utilizada para captura e tratamento dos dados em microcomputador.
- Figura 4.5 – Sistema de travamento mecânico do rotor da MRRC.
- Figura 4.6a – Vista lateral do sistema de travamento do translador da MLRC.
- Figura 4.6b – Vista frontal do sistema de travamento do translador da MLRC
- Figura 4.7a – Lâminas de material não-magnético para garantir o entreferro de 1mm nas medições das características estáticas da MLRC.
- Figura 4.7b – Posicionamento das lâminas de material não-magnético entre os pólos do estator e do translador, para garantir o entreferro de 1mm nas medições das características estáticas da MLRC.
- Figura 4.8 – Modelo elétrico para análise do método do teste de carga RL alimentada por c.a.
- Figura 4.9 – Triângulo de potências.
- Figura 4.10 – Circuito para medição das características estáticas da MRC, pelo método do teste de carga RL em c.a.
- Figura 4.11 – Implementação do circuito da Figura 4.10.

- Figura 4.12 – Interface desenvolvida na plataforma LabVIEW®, para captura e tratamento dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do teste de carga RL em c.a.
- Figura 4.13 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.
- Figura 4.14 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.
- Figura 4.15 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.
- Figura 4.16 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.
- Figura 4.17 – Modelo elétrico para análise do método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.18 – Ilustração do transitório inicial de corrente em um circuito RL série, alimentado por corrente contínua.
- Figura 4.19 – Circuito para medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.20 – Implementação do circuito da Figura 4.19.
- Figura 4.21 – Interface do módulo SignalExpress, utilizado para captura dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.22 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.23 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.24 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.25 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Figura 4.26 – Ilustração do transitório da extinção de corrente em um circuito RL série, alimentado por corrente contínua.
- Figura 4.27 – Interface do módulo SignalExpress®, utilizado para captura dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Figura 4.28 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Figura 4.29 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Figura 4.30 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Figura 4.31 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de

- medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Figura 4.32 – Diagrama (vista lateral) da ligação mecânica do torquímetro com as duas máquinas.
 - Figura 4.33 – Bancada de fixação mecânica das duas máquinas e do torquímetro.
 - Figura 4.34 – Bancada de ensaios eletromecânicos da MRRC.
 - Figura 4.35 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do teste de carga RL
 - Figura 4.36 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de subida da corrente
 - Figura 4.37 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de extinção da corrente
 - Figura 4.38 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do teste de carga RL
 - Figura 4.39 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de subida da corrente
 - Figura 4.40 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de extinção da corrente
 - Figura 5.1 – Circuito de controle da corrente de partida da ponte retificadora.
 - Figura 5.2 – Circuito da ponte retificadora com filtro capacitivo na saída.
 - Figura 5.3 – Circuito do conversor eletrônico assimétrico.
 - Figura 5.4 – Modos de condução do conversor assimétrico.
 - Figura 5.5 – Formas de onda das correntes de fase obtidas por simulação estática do conversor assimétrico da MRRC.
 - Figura 5.6 – Circuito de acionamento dos transistores do circuito de potência.
 - Figura 5.7 – Discos ranhurados sobrepostos, acoplados à parte traseira do eixo da MRRC.
 - Figura 5.8 – Fixação dos sensores de posição na parte traseira do estator da MRRC.
 - Figura 5.9 – Implementação do sistema de acionamento para a MRRC.
 - Figura 5.10 – Circuito da fonte regulada ajustável implementado para alimentar a MLRC.
 - Figura 5.11 – Formas de onda das correntes de fase obtidas por simulação estática do conversor assimétrico da MLRC.
 - Figura 5.12 – Sensores utilizados para detecção da posição dos pólos do translador.
 - Figura 5.13 – Detalhe dos adesivos brancos fixados na face lateral de cada um dos pólos do estator, para minimizar a atenuação do sinal dos sensores de posição.
 - Figura 5.14 – Implementação do sistema de acionamento para a MLRC.

- Figura 5.15 – Dinâmica eletromagnética que determina o controle de comutação das fases.
- Figura 5.16 – Ilustração do controle de corrente por histerese.
- Figura 5.17 – Circuito do sistema de controle da MRRC.
- Figura 5.18 – Circuito do controle remoto para seleção do sentido de rotação da máquina e ajuste do valor de referência da corrente de fase da MRRC.
- Figura 5.19 – Implementação do controle remoto da MRRC.
- Figura 5.20 – Circuito do sistema de controle da MLRC.
- Figura 5.21 – Circuito do controle remoto para seleção do sentido de deslocamento da MLRC.
- Figura 5.22 – Implementação do controle remoto da MLRC.
- Figura 6.1 – Diagrama representando a estrutura dos ensaios experimentais realizados com a MRRC.
- Figura 6.2 – Ilustração da bancada de ensaios experimentais da MRRC.
- Figura 6.3 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando sem carga, com 50% da corrente nominal.
- Figura 6.4 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando sem carga, com corrente nominal.
- Figura 6.5 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com 50% de carga nominal e 50% da corrente nominal.
- Figura 6.6 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com 50% de carga nominal e corrente nominal.
- Figura 6.7 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com carga nominal e 50% da corrente nominal.
- Figura 6.8 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com carga e corrente nominais.
- Figura 6.9 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com 50% de sua corrente nominal.
- Figura 6.10 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com sua corrente nominal.
- Figura 6.11 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com falta de 1 fase, e 50% da corrente nominal.
- Figura 6.12 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com falta de 2 fases, e 50% da corrente nominal.
- Figura 6.13 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com falta de 1 fase, e corrente nominal.

- Figura 6.14 – Variação das grandezas mecânicas, na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição operação da MRRC com falta de 2 fases, e corrente nominal.
- Figura 6.15 – Diagrama representando a estrutura dos ensaios experimentais realizados com a MLRC.
- Figura 6.16 – Ilustração da bancada de ensaios experimentais da MLRC.
- Figura 6.17 – Formas de onda das correntes de fase da MLRC, operando em vazio, com corrente nominal.
- Figura 6.18 – Formas de onda das correntes de fase da MLRC, operando com carga e corrente nominais.
- Figura 6.19 – Variação da forma de onda do sensor de posição (sensor ótico reflexivo) em função da variação da posição do translador em relação ao estator.
- Figura 6.20 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando a vazio, com corrente nominal.
- Figura 6.21 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando com carga e corrente nominais.
- Figura 6.22 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando a vazio, com corrente nominal e falta de uma fase.
- Figura 6.23 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando a vazio, com corrente nominal e falta de duas fases.
- Figura 6.24 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando com carga nominal, com corrente nominal e falta de uma fase.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.1 – Parâmetros estáticos para simulação e avaliação do projeto da MRC
- Tabela 1.2 – Principais características mecânicas da MRRC
- Tabela 1.3 – Principais características elétricas da MRRC
- Tabela 1.4 – Principais características mecânicas da MLRC
- Tabela 1.5 – Principais características elétricas da MLRC
- Tabela 2.1 – Dados de entrada e saída relacionados aos métodos de simulação das características estáticas da MRC rotativa e linear
- Tabela 3.1 – Parâmetros de simulação da MRRC através do MEF
- Tabela 3.2 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através do MEF
- Tabela 3.3 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase A)
- Tabela 3.4 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase B)
- Tabela 3.5 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase C)
- Tabela 3.6 – Parâmetros de simulação da MRRC através do MACM
- Tabela 3.7 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através do MACM
- Tabela 3.8 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MACM
- Tabela 3.9 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método trapezoidal com base no MEF
- Tabela 3.10 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método da parábola com base no MEF
- Tabela 3.11 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método trapezoidal com base no MACM
- Tabela 3.12 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método da parábola com base no MACM
- Tabela 3.13 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através de simulações computacionais
- Tabela 3.14 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através de simulações computacionais
- Tabela 3.15 – Comparação entre os valores do conjugado médio da MRRC obtidos por simulação computacional
- Tabela 4.1 – Condições das medições da MRRC através do método do teste de carga RL em c.a.
- Tabela 4.2 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL com alimentação em c.a.
- Tabela 4.3 – Condições das medições da fase A da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.

- Tabela 4.4 – Condições das medições da fase B da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.
- Tabela 4.5 – Condições das medições da fase C da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.
- Tabela 4.6 – Condições das medições da MRRC através dos métodos dos tempos de subida e de extinção da corrente de fase
- Tabela 4.7 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.
- Tabela 4.8 – Condições das medições da fase A da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.
- Tabela 4.9 – Condições das medições da fase B da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.
- Tabela 4.10 – Condições das medições da fase C da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.
- Tabela 4.11 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.
- Tabela 4.12 – Valores de conjugado médio fornecidos pela MRRC.
- Tabela 4.13 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do teste de carga RL
- Tabela 4.14 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do tempo de subida da corrente
- Tabela 4.15 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do tempo de extinção da corrente
- Tabela 4.16 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do teste de carga RL
- Tabela 4.17 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do tempo de subida da corrente
- Tabela 4.18 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do tempo de extinção da corrente
- Tabela 4.19 – Comparação entre os valores do conjugado médio da MRRC obtidos por simulação computacional
- Tabela 5.1 – Tabela verdade dos modos de condução do conversor assimétrico
- Tabela 6.1 – Valores obtidos para a velocidade média da MLRC em regime permanente.
- Tabela 6.2 – Valores obtidos para a velocidade média da MLRC em regime permanente, considerando falta em uma ou duas fases.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MACM	Método de análise do circuito magnético
MEF	Método dos elementos finitos
MLRC	Máquina Linear de Relutância Chaveada
MRC	Máquina de Relutância Chaveada
MRRC	Máquina Rotativa de Relutância Chaveada
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (ou “Projeto com auxílio de computador”)

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade (por extenso)	Unidade (abreviatura)
A	Vetor potencial magnético		
B	Densidade de fluxo magnético	Tesla	T
$B_{MÁX}$	Densidade de fluxo magnético máximo	Tesla	T
$C_{(med)}$	Conjugado médio da MRRC	Newton*metro	N*m
ct	ciclo de trabalho dos canais PWM utilizado para acionamento das fases da MRC	percentual	%
ct_{alto}	valor alto do ciclo de trabalho dos canais PWM utilizado no controle da corrente de fase por histerese	percentual	%
ct_{baixo}	valor baixo do ciclo de trabalho dos canais PWM utilizado no controle da corrente de fase por histerese	percentual	%
D_{EIXO}	Diâmetro do eixo	metro	m
D_{EXT}	Diâmetro externo da MRRC	metro	m
f	frequência da onda de tensão alternada	Hertz	Hz
$F_{MM(n)}$	Força magnetomotriz do n-ésimo caminho de fluxo	Weber*espiras	Wb*esp
H	Intensidade de campo magnético	Ampère/metro	A/m
h_{CE}	Espessura da culatra do estator	metro	m
h_{CR}	Espessura da culatra do rotor	metro	m
h_{CT}	Altura da culatra do translador	metro	m
h_{PE}	Altura do pólo do estator	metro	m
h_{PR}	Altura do pólo do rotor	metro	m
h_{PT}	Altura do pólo do translador	metro	m

Símbolo	Descrição	Unidade (por extenso)	Unidade (abreviatura)
i	Corrente elétrica referente à curva de conversão eletromecânica	Ampère	A
$I(t)$	valor instantâneo da corrente de fase da MRC	Ampère	A
I_{cc}	Corrente contínua em regime permanente	Ampère	A
$I_{(ef)}$	valor eficaz da corrente aplicada à fase da MRC	Ampère	A
I_{NOM}	Corrente de fase – valor nominal	Ampère	A
i_j	Corrente na j-ésima fase	Ampère	A
i_S	Corrente correspondente ao joelho da curva de conversão eletromecânica	Ampère	A
J	Densidade superficial de corrente	Ampère/metro quadrado	A/m ²
l_g	Comprimento do entreferro de ar	metro	m
L	Indutância própria de fase da MRC	Henry	H
L_{FASE}	Indutância própria de fase medida da MRC	Henry	H
L_j	Indutância própria na j-ésima fase	Henry	H
L_N	Comprimento do empilhamento de material magnético que forma o núcleo da máquina	metro	m
m	número de pares de pólos por fase	-	-
N_c	Número de comutações de fases para que haja um ciclo de movimento da parte móvel	-	-
N_{ESP}	Número de espiras por fase	-	-
N_{PE}	Número de pólos do estator	-	-
N_{PR}	Número de pólos do rotor	-	-
N_{PT}	Número de pólos do translador	-	-

Símbolo	Descrição	Unidade (por extenso)	Unidade (abreviatura)
P	Potência ativa	Watt	W
$P_{(NOM)}$	Potência nominal de saída	Watt	W
ρ_j	posição relativa entre os pólos do estator e da parte móvel da j-ésima fase da MRC	grau ou metro	° ou m
q	Número de fases da máquina	-	-
Q	Potência reativa	Volt-Ampére reativo	VAr
$R_{(MEDIDO)}$	Resistência de fase – valor medido	Ohms	Ω
$R_{ar(n)}$	Relutância magnética do n-ésimo caminho de fluxo no entreferro de ar	Ampére*espiras / Weber	A*esp/Wb
$R_{CE(n)}$	Relutância magnética do n-ésimo caminho de fluxo na culatra do estator	Ampére*espiras / Weber	A*esp/Wb
$R_{CR(n)}$	Relutância magnética do n-ésimo caminho de fluxo na culatra do rotor	Ampére*espiras / Weber	A*esp/Wb
R_{EXT}	Resistência externa para medição das características eletromagnéticas da MRC	Ohm	Ω
R_{FASE}	Resistência de fase da MRC	Ohm	Ω
R_j	Resistência da j-ésima fase	Ohm	Ω
$R_{PE(n)}$	Relutância magnética do n-ésimo caminho de fluxo no pólo do estator	Ampére*espiras / Weber	A*esp/Wb
$R_{PR(n)}$	Relutância magnética do n-ésimo caminho de fluxo no pólo do rotor	Ampére*espiras / Weber	A*esp/Wb
S	Potência aparente	Volt-Ampére	VA
t	tempo	segundo	s
t_0	instante inicial de medição do transitório da corrente de fase da MRC	segundo	s
t_e	duração do transitório de extinção da corrente de fase	segundo	s

Símbolo	Descrição	Unidade (por extenso)	Unidade (abreviatura)
t_s	duração do transitório de subida da corrente de fase até atingir o regime permanente	segundo	s
$V(t)$	valor instantâneo da tensão de fase da MRC	Volt	V
V_{cc}	Tensão contínua em regime permanente	Volt	V
$V_{(ef)}$	valor eficaz da tensão aplicada à fase da MRC	Volt	V
$V_{(NOM)}$	Velocidade nominal mecânica linear da MLRC	metro/segundo	m/s
$V_{(NOM)}$	Tensão de fase – valor nominal	Volt	V
V_j	Tensão da j-ésima fase	Volt	V
V_{med}	Velocidade média da MLRC	metro/segundo	m/s
W_C	Coenergia envolvida no processo de conversão eletromecânica	Joule	J
W_D	Porção da curva de conversão eletromecânica abaixo da coenergia	-	-
W_E	Energia magnética armazenada no processo de conversão eletromecânica	Joule	J
w_E	Comprimento do estator	metro	m
w_{PE}	Largura do pólo do estator	metro	m
w_{RE}	Largura da ranhura do estator	metro	m
w_{PT}	Largura do pólo do translador	metro	m
w_{RT}	Largura da ranhura do translador	metro	m
X_L	Reatância indutiva	Ohm	
β_{PE}	Comprimento angular da sapata polar do estator	grau	°
β_{PR}	Comprimento angular da sapata polar do rotor	grau	°

Símbolo	Descrição	Unidade (por extenso)	Unidade (abreviatura)
β_{RE}	Comprimento angular da ranhura do estator	grau	°
β_{RR}	Comprimento angular da ranhura do rotor	grau	°
Δi	Diferencial de corrente da curva de conversão eletromecânica	Ampère	A
Δt	intervalo de tempo entre cada ciclo do sinal de saída do sensor de posição da MLRC	segundo	s
$\Delta\theta_c$	Intervalo angular entre cada comutação de fase da MRC	grau	°
$\Phi_{(n)}$	Fluxo magnético do n-ésimo caminho	Weber	Wb
μ	Permeabilidade magnética do meio/material	Tesla*metro/Ampère	T*m/A
Ψ_A	Fluxo concatenado da posição alinhada	Weber*espiras	Wb*esp
Ψ_D	Fluxo concatenado da posição desalinhada	Weber*espiras	Wb*esp
Ψ_j	Fluxo concatenado na j-ésima fase	Weber*espiras	Wb*esp
Ψ_k	Fluxo concatenado correspondente do k-ésimo diferencial de corrente da curva de conversão eletromecânica	Weber*espiras	Wb*esp
Ψ_S	Fluxo concatenado do joelho da curva de conversão eletromecânica	Weber*espiras	Wb*esp
θ	ângulo entre os fasores potência ativa e potência aparente	grau	°
ω	frequência angular da onda de tensão alternada	radiano/segundo	rad/s
$\omega_{M(NOM)}$	Velocidade angular nominal mecânica da MRRC	rotações por minuto	rpm

Capítulo 1

Introdução às máquinas de relutância chaveada (MRC)

No presente capítulo é apresentado um resumo histórico sobre a máquina de relutância chaveada (MRC), bem como seus principais aspectos de funcionamento e projeto. Como consequência destes aspectos, é destacado o eminente potencial de consolidação da MRC (excetuando os componentes eletrônicos necessários para seu acionamento) como uma tecnologia com viabilidade de desenvolvimento e produção totalmente nacional, no setor de motores e geradores elétricos. Ao final deste capítulo, são apresentadas informações técnicas sobre as MRCs utilizadas neste trabalho.

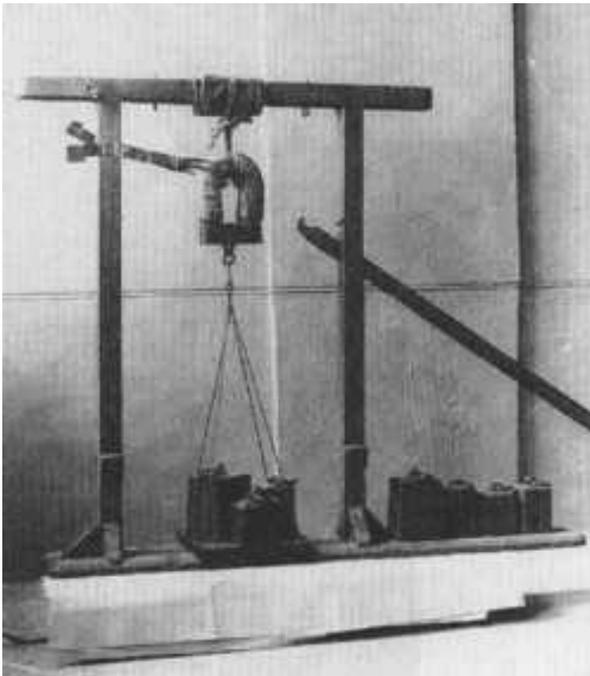
1.1. Breve histórico

A máquina de relutância é considerada como sendo um dos primeiros tipos de motores elétricos a serem implementados na história – ainda que realizando apenas movimentos não-contínuos ou não-oscilatórios – tendo surgido entre as décadas de 1820 e 1850 [1], a partir dos experimentos realizados por William Sturgeon [2 e 3] – em 1824 – que implementou uma versão primitiva da “ferradura eletromagnética”, alimentada por uma bateria, mostrada na Figura 1.1.



Figura 1.1 – A ferradura eletromagnética de William Sturgeon.

Em 1831, Joseph Henry aperfeiçoou este dispositivo, aplicando-o como um tipo de “guindaste” de pequena elevação, capaz de erguer uma massa total de até 500kg [1 e 4], mostrado nas Figuras 1.2a e 1.2b.



(a)



(b)

Figura 1.2 – (a) Guindaste de Henry, baseado na “ferradura eletromagnética” de Sturgeon. (b) Detalhe do eletroímã utilizado por Henry.

A partir dos anos 1930, foram realizados testes com duas grandes aplicações práticas utilizando motores elétricos sem escovas e comutação eletrônica de fases, baseada em chaves eletrônicas primitivas: os retificadores de arco-mercúrio¹ e os thyratrons². A primeira aplicação era a de uma locomotiva, acionada por um cicloconversor composto de 6 retificadores de arco-mercúrio, construída pela *Brown Boveri* para a companhia suíça *Swiss railways* [1 e 8]. A segunda aplicação, desenvolvida nos Estados Unidos, foi um motor de 400cv, sem comutadores mecânicos, controlado por *thyratrons* (um total de 18 *thyratrons* alimentados diretamente por uma fonte trifásica alternada), e que estava acoplado a um ventilador [1, 9, 10 e 11]. Contudo, outro obstáculo tornava-se evidente: ambas as

1 Retificadores de arco-mercúrio (ou retificadores de vapor de mercúrio), inventados em 1902, foram os primeiros dispositivos eletrônicos para conversão de tensão alternada em contínua, tendo sido largamente utilizados até a década de 1970, a partir de quando deram lugar aos retificadores de estado sólido, utilizados mundialmente em larga escala, desde então.

2 *Thyratrons* são dispositivos em formato tubular e que são preenchidos com algum tipo de gás (como vapor de mercúrio, neônio e xenônio), sendo empregados como chaves para controle ou comutação do fluxo de grandes quantidades de energia, tendo sido inventados em 1920, a partir dos tubos de vácuo. A partir da década de 1960, este dispositivo foi sendo substituído pelos tiristores e triacs (em aplicações de baixa e média potência), porém ainda são amplamente utilizados em aplicações que requerem tensões acima de 20kV e curtíssimos transitórios de chaveamento.

aplicações esbarraram na elevada taxa de falhas e substituição destes dispositivos eletrônicos bem como no elevado custo dos mesmos, para a época [1].

A partir dos anos 1960, o surgimento dos tiristores e dos transistores de potência levou a uma reavaliação sobre a possibilidade do estudo e desenvolvimento de sistemas de acionamento com variação de velocidade e de corrente contínua [1]. Somando-se a isso, o fato da quantidade e do arranjo de chaves eletrônicas, requeridas nas topologias de dispositivos de acionamento existentes até o momento (como os inversores trifásicos), tender a serem complexos, levaram o Dr. Arthur Cruickshank, de 1961 a 1965, a iniciar estudos sobre as possibilidades de combinar as características de simplicidade construtiva da máquina de relutância, com uma topologia de conversor (baseada nos tiristores) que utilizasse um menor número de chaves eletrônicas do que conversores utilizados no acionamento de outros tipos de máquinas [1]. Nesta fase de estudo e desenvolvimento da máquina de relutância, se faziam as primeiras tentativas concretas de buscar um casamento adequado entre as características construtivas da máquina e a topologia do conversor eletrônico para seu acionamento, de forma a otimizar razoavelmente o funcionamento do conjunto máquina-acionamento [1]. Avanços significativos foram feitos nesta década, principalmente no estudo das características construtivas da máquina (dimensões geométricas, quantidade de pólos, disposição e geometria dos pólos ao redor do estator, etc.) e do tipo de material utilizado como núcleo magnético [1]. Contudo, os componentes eletrônicos para acionamento da máquina de relutância ainda tinham um custo elevado (para que se tornassem viáveis em aplicações práticas), e a técnica empregada para comutação das fases (i.e., acionamento das chaves eletrônicas), que utilizava fontes trifásicas de corrente alternada, ainda não permitia um funcionamento estável da máquina, especialmente quando se aumentava sua velocidade de rotação [1].

O ano de 1965 é considerado como sendo o “marco histórico” entre o “período clássico” e o “período moderno” para as máquinas de relutância, especialmente devido a quatro grandes avanços ocorridos na indústria, entre as décadas de 1960 e 1970 – de maneira mais lenta – e a partir de meados da década de 1980 – em maior escala [1]:

- o desenvolvimento de transistores de potência (TJBs, seguidos dos MOSFETs e dos IGBTs), que facilitaram a comutação forçada de fases e o controle de corrente por PWM, em frequências muito maiores do

que as permitidas pelos tiristores;

- o desenvolvimento de microprocessadores e outros sistemas digitais, capazes de executar satisfatoriamente diversos algoritmos de controle;
- o desenvolvimento de microcomputadores com elevada capacidade de processamento e linguagens de programação mais sofisticadas, junto com o aprimoramento de vários métodos numéricos empregados na análise por elementos finitos e resolução de equações diferenciais no domínio do tempo;
- a expansão na demanda por motores elétricos e sistemas de tração com velocidade variável, tanto na indústria como em automóveis, eletrodomésticos e sistemas auxiliares de aplicações aeroespaciais.

Todos estes avanços permitiram um aumento considerável da competitividade da máquina de relutância, em relação às demais máquinas elétricas (máquinas de indução, síncronas, de corrente contínua e de ímã permanente), em diversas aplicações e faixas de potência [12 a 32], especialmente nas aplicações embarcadas, onde se deseja uma alta relação potência/peso, que é uma das vantagens da máquina de relutância [1].

Em termos de publicações que abordaram diretamente algum aspecto da máquina de relutância, já foram contabilizados mais de 2.000 artigos científicos em congressos e revistas, em nível mundial nos últimos 40 anos, além de dezenas de dissertações e teses, sobre a MRC, produzidas somente no Brasil [33 a 41] nos últimos 10 anos.

1.2. Características gerais, aspectos básicos de funcionamento e modelo matemático geral

A máquina de relutância é um tipo de máquina elétrica de construção mecânica bastante simples, sendo composta, basicamente, de uma parte fixa, chamada de estator – onde geralmente ficam concentrados os enrolamentos de fase – e uma parte móvel, chamada de rotor (máquina rotativa) ou translador (máquina linear) [42]. Ainda em seu aspecto construtivo, a máquina de relutância é denominada uma máquina de dupla saliência, pois apresenta pólos salientes nas suas partes fixa e móvel. Estas características construtivas são mostradas nas Figuras 1.3a e 1.3b, onde são representadas a máquina rotativa e a máquina

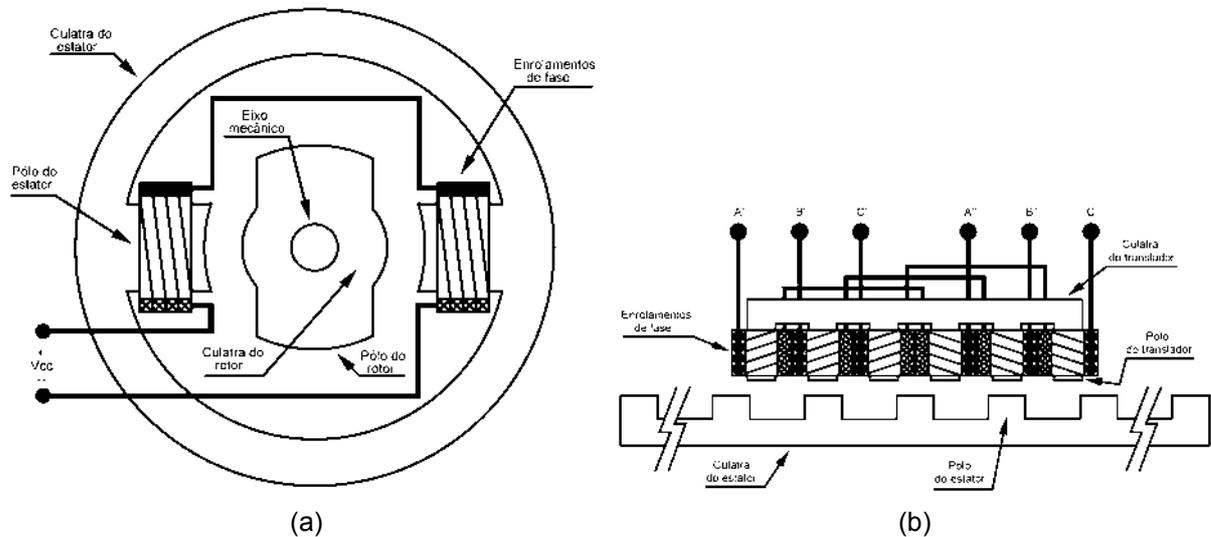


Figura 1.3 – Principais características e elementos construtivos da (a) máquina rotativa e da (b) máquina linear.

linear, respectivamente.

A dupla saliência e os enrolamentos concentrados nas fases do estator são características da máquina de relutância que determinam seu funcionamento. A geração de conjugado (na máquina rotativa) ou força de propulsão (na máquina linear) ocorre devido à tendência dos pólos da parte móvel se alinharem com os da parte fixa, quando uma das fases é energizada. Este efeito de alinhamento dos pólos das partes móvel e fixa obedece ao princípio da mínima relutância magnética, sendo ilustrado através das Figuras 1.4a e 1.4b.

Quanto ao número de pólos, a máquina mostrada na Figura 1.4a é classificada como “máquina rotativa 2/2”, por apresentar 2 pólos na parte fixa 2 pólos na parte móvel.

As principais grandezas envolvidas no movimento das máquinas das Figuras 1.4a e 1.4b são representadas, de maneira ideal, nas Figuras 1.5a e 1.5b, respectivamente. Através das Figuras 1.5a e 1.5b, fica evidente a necessidade de se conhecer a posição da parte móvel em relação à parte fixa, para que se possa determinar o tipo de movimento mecânico a ser realizado: aceleração, quando as fases são acionadas no intervalo de subida da indutância ou frenagem, quando as fases são acionadas no intervalo de descida da indutância (Figuras 1.4a e 1.4b) [1 e 42].

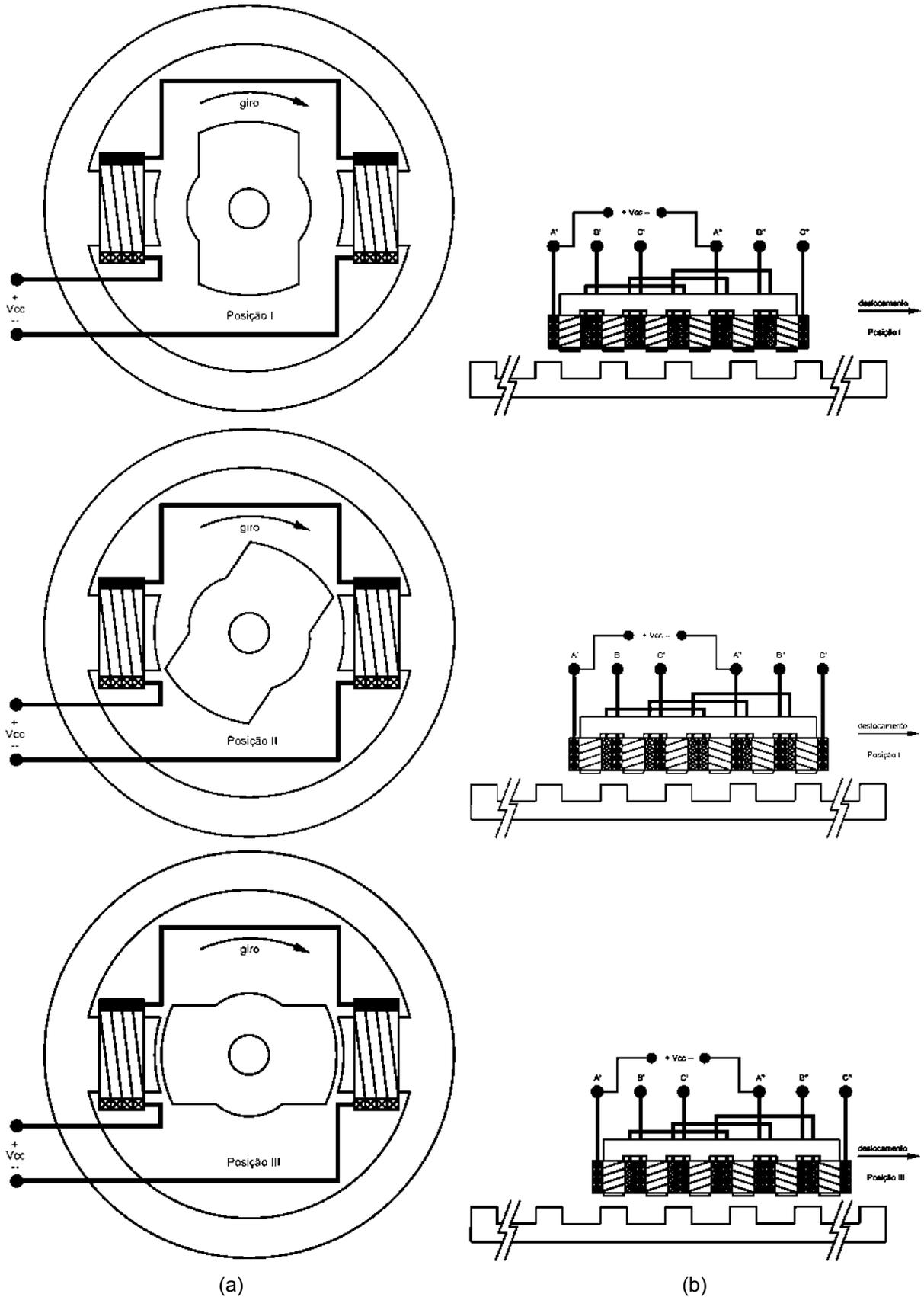


Figura 1.4 – Princípio de funcionamento da (a) máquina rotativa e da (b) máquina linear.

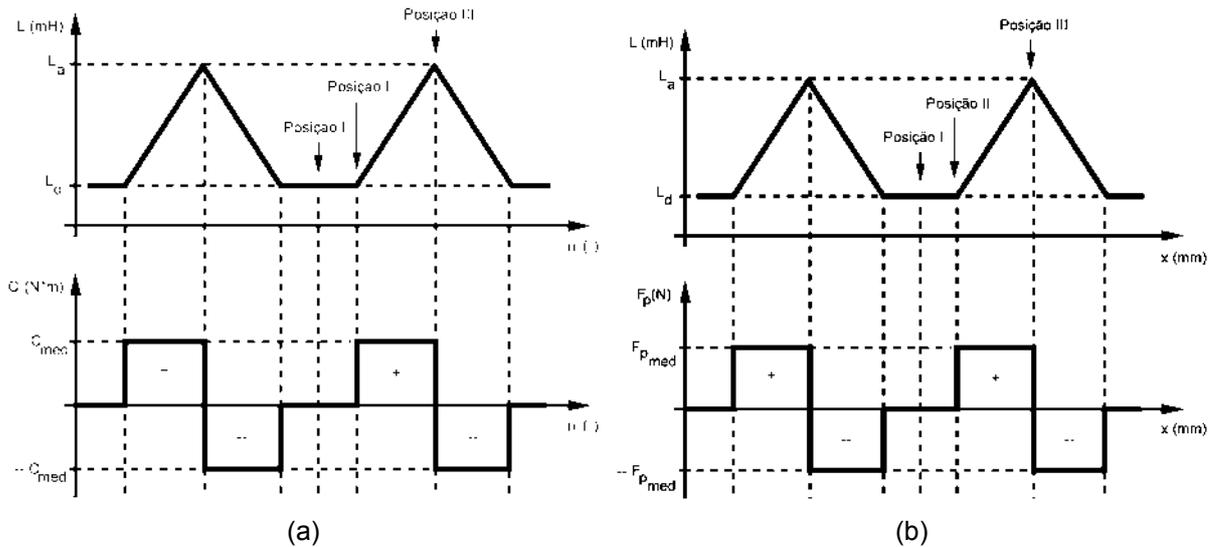


Figura 1.5 – Variação da indutância e do conjugado/força de propulsão, em função da posição da parte móvel, para a (a) máquina rotativa e a (b) máquina linear, respectivamente.

É importante ressaltar que curvas de indutância e conjugado/força de propulsão, mostradas nas Figuras 1.5a e 1.5b, são esboços do caso ideal de funcionamento da MRC. Na prática, a energia magnética armazenada na MRC, a cada impulso de acionamento e desligamento das fases, gera transitórios de corrente de fase e de conjugado/força de propulsão, que devem ser considerados em uma aplicação prática que envolva a MRC. Este comportamento transitório é representado por um modelo geral, através do circuito elétrico da Figura 1.6 e da equação (1.1) [1, 42 e 43], a seguir.

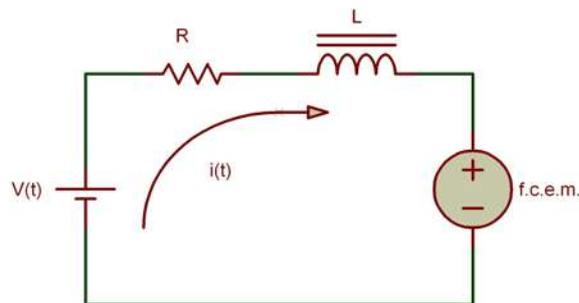


Figura 1.6 – Circuito elétrico representando a modelagem geral da máquina de relutância.

$$V_j(t) = R_j i_j(t) + \frac{\partial \psi_j(t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

onde, o fluxo concatenado da j -ésima fase, $\psi_j(t)$, é expressado por [44]:

$$\psi_j(t) = L_j(p_j(t), i_j(t)) \cdot i_j(t) \quad (1.2)$$

E a indutância da j -ésima fase, $L_j(p_j(t), i_j(t))$, varia em função da posição relativa entre os pólos da parte fixa e da parte móvel, $p_j(t)$, e da corrente de fase, $i_j(t)$. Evidentemente, as equações (1.1) e (1.2) representam o modelo geral não-linear da MRC. Dependendo da aplicação e do grau de precisão desejado, pode-se fazer aproximações ou até desprezar certas não-linearidades do modelo, com o objetivo de facilitar a análise do comportamento da máquina e a implementação de estratégias de controle [1, 35 e 42].

Na MRC, o sentido de movimento é determinado pela sequência de acionamento das fases [1 a 42]. A inversão deste sentido resulta em uma inversão do sentido de movimento da máquina. Cada rotação da máquina de rotativa de relutância chaveada (MRRC) é composta de vários “impulsos” de movimento (em inglês, são chamados “*strokes*”), e cada impulso de movimento é resultado do acionamento de uma fase durante o intervalo de subida da curva de indutância.

Também há registros na literatura de otimizações no funcionamento da MRC, baseadas em variações construtivas do formato geométrico do estator e da parte móvel, conforme mostrado na Figura 1.7 [42, 45 e 46]. No caso da Figura 1.7a, a geometria assimétrica do rotor da MRRC permite um aumento do conjugado de partida da máquina, seguida da redução da oscilação de seu conjugado. Já no caso a MLRC mostrada na Figura 1.7b, é construída com um translador “modulado” (i.e. separado em diversas partes iguais que são interconectadas para formar todo o translador), o que acarreta uma grande independência elétrica, magnética e térmica entre as fases, mantendo a característica de baixo custo construtivo.

1.3. Classificação das máquinas de relutância chaveada (MRCs)

Em geral, a classificação das máquinas de relutância está baseada na sua configuração mecânica, principalmente na quantidade e na geometria dos pólos do estator e da parte móvel [42].

No caso da máquina rotativa, os seguintes aspectos determinam a classificação da máquina:

- quantidade de pólos no estator e na parte móvel;

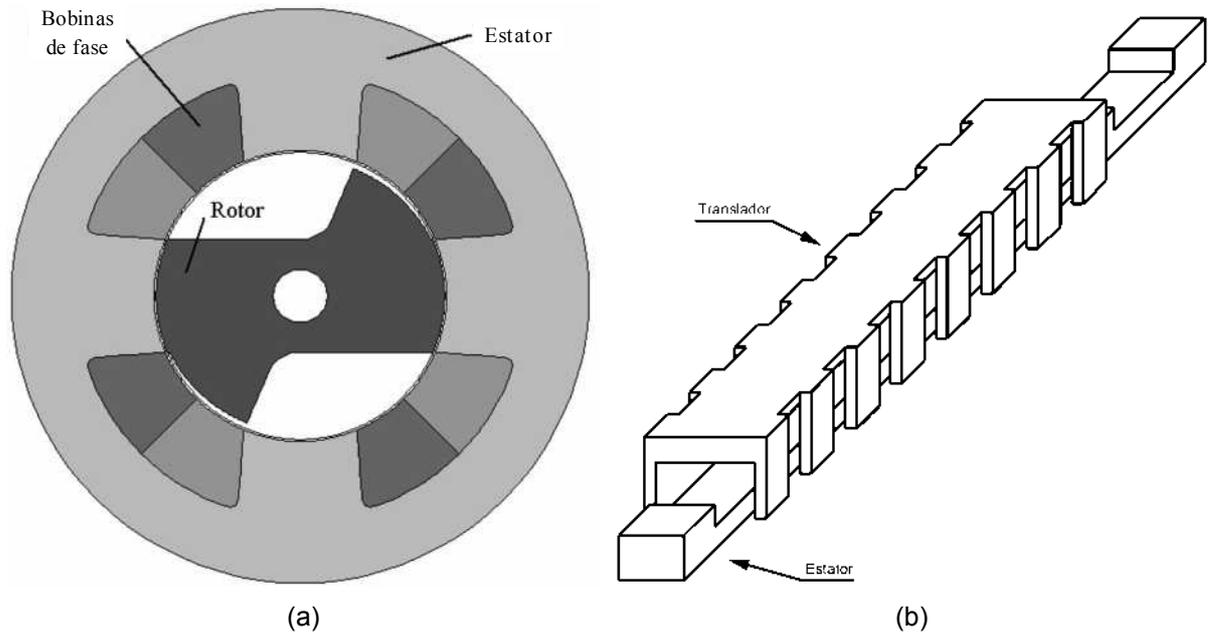


Figura 1.7 – Exemplo de variação construtiva na geometria do estator e da parte móvel da MRC: (a) uma máquina rotativa 4/2, com rotor em formato assimétrico, e que permite uma redução no número de fases e simplificação no sistema de acionamento; (b) uma máquina linear 8/6 de fluxo magnético transversal, para aplicação no transporte ferroviário.

- quantidade de pólos do estator acionados simultaneamente (geralmente, esta quantidade é um divisor inteiro do total de pólos no estator);
- quantidade de fases do estator;
- com relação ao posicionamento do estator: interno ou externo;
- geometria dos pólos: simétricos (igualmente espaçados entre si) assimétricos (espaçados de maneira desigual entre si, como na Figura 1.7a);
- geometria da sapata polar: lisa ou ranhurada (em inglês, chamada de “*castleing*”) [44];
- geometria das extremidades dos pólos: arredonda ou em forma de bico.

No caso da máquina linear, além dos aspectos mencionados para a máquina rotativa, os seguintes aspectos também determinam sua classificação:

- localização das espiras de fase: translador passivo (espiras no estator) ou translador ativo (espiras no próprio translador);

- configuração mecânica do núcleo magnético, com respeito à direção do fluxo magnético: máquina de fluxo longitudinal ou de fluxo transversal;
- configuração mecânica do núcleo magnético, com respeito ao tipo de translador utilizado: translador aberto [39] ou translador tubular [26 e 33].

1.4. Principais aspectos de projeto

A otimização do desempenho no funcionamento de uma MRC, qualquer que seja a aplicação, está baseada em três aspectos, igualmente importantes:

- técnicas de projeto da máquina;
- sistema de acionamento eletrônico (incluindo o conversor de potência);
- sistema de controle.

Ainda na fase de projeto da máquina, estes três aspectos devem ser criteriosamente avaliados, o que geralmente é feito com auxílio de simulações computacionais, das características estáticas e dinâmicas da MRC, de forma a se obter informações de boa precisão sobre o comportamento real da máquina que pretende-se acionar.

Na tabela 1.1 são sintetizados as principais características estáticas de entrada e saída, que podem ser analisadas durante o projeto da MRC e utilizadas como parâmetros de desempenho da máquina que pretende-se acionar.

Tabela 1.1 – Parâmetros estáticos para simulação e avaliação do projeto da MRC

Tipo de parâmetro	Parâmetro da máquina
Entrada	<ul style="list-style-type: none"> ● dimensões mecânicas do núcleo magnético da máquina; ● curva característica $B(T)$ versus $H(A/m)$, referente ao material do núcleo magnético; ● dados sobre os enrolamentos de fase da máquina (número de voltas por fase e espessura de condutor); ● corrente de fase; ● quantidade de pólos por fase;
Saída	<ul style="list-style-type: none"> ● curvas de indutância; ● conjugado/força de propulsão; ● o nível de potência na saída do conversor eletrônico; ● intervalos do transitório do chaveamento da corrente de fase.

Em termos de projeto da MRC, um outro importante aspecto, e que geralmente é o primeiro resultado de simulação a ser analisado no projeto da

máquina, são suas curvas características de fluxo magnético concatenado, $\psi_j(\rho_j, i_j)$, versus corrente de fase, i_j , para diversas posições relativas, ρ_j , entre o estator e a parte móvel da máquina. Estas curvas – apesar de, a rigor, descreverem uma “superfície característica” da MRC, formada pelos eixos $\psi_j(\rho_j, i_j)$, ρ_j e i_j – geralmente são representadas em um plano, desde a posição de desalinhamento até a de alinhamento dos pólos do estator e da parte móvel, conforme a Figura 1.8.

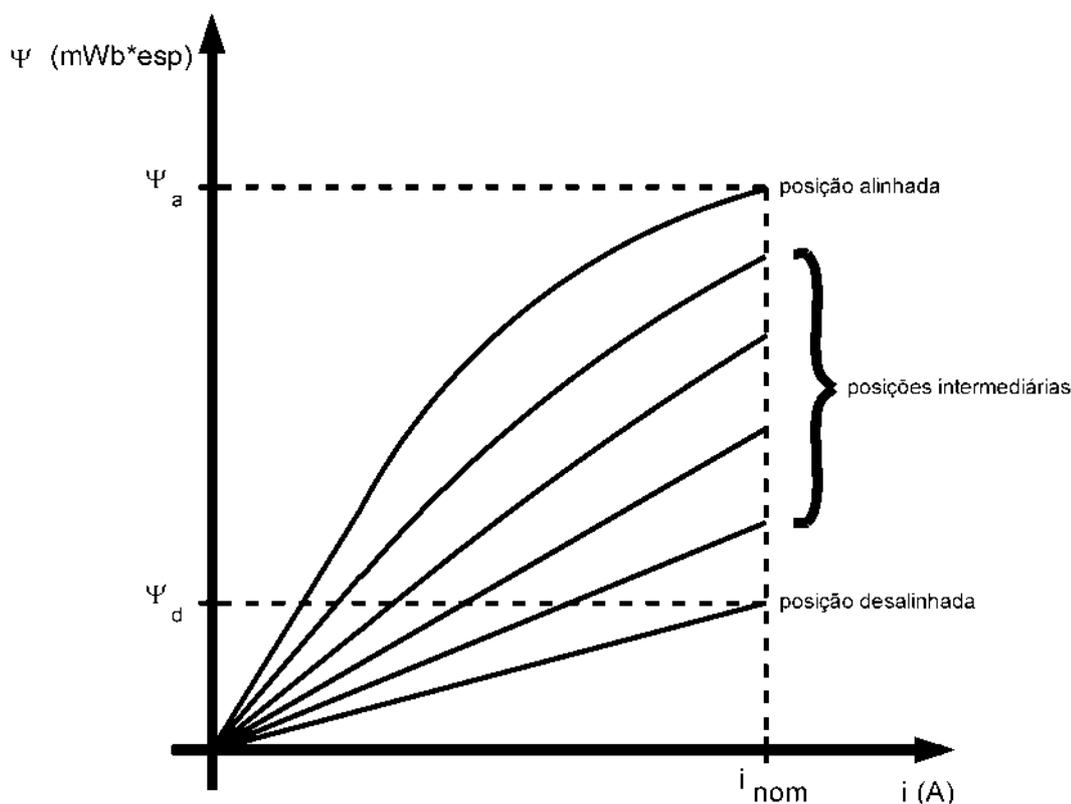


Figura 1.8 – Esboço das curvas características de uma MRC.

A partir das curvas características de uma MRC, obtém-se informações que quantificam importantes parâmetros estáticos da máquina, já mencionados, como curva de indutância de fase, conjugado médio (ou força de propulsão média), o nível de potência na saída do conversor eletrônico e intervalos do transitório do chaveamento da corrente de fase [1].

1.5. Aspectos de aperfeiçoamento

Devido às suas não-linearidades intrínsecas, o comportamento operacional MRC apresenta uma forte interdependência entre os parâmetros de

projeto da máquina e do sistema de acionamento e controle. Ou seja, o projeto da MRC envolve subsistemas (máquina, acionamento e controle) que devem ser analisados de forma integrada, fazendo com que se busque, na fase de especificação de todos os sistemas relacionados à MRC, o melhor equilíbrio possível entre custos e benefícios operacionais. Dentre os aspectos mais críticos relacionados à operação da MRC, os que têm merecido maior investigação são [42]:

- métodos de sensoreamento da posição da parte móvel;
- topologia do conversor de potência e do circuito de acionamento do mesmo;
- vibração mecânica;
- ruído acústico;
- aquecimento;
- perdas no núcleo magnético e no cobre;
- dimensão do entreferro.

O tratamento destes aspectos, a nível de projeto da MRC, possibilita redução na manutenção e maior vida útil da máquina, e deve levar em consideração a aplicação desejada e as condições ambientais às quais estará submetida a máquina [42].

Além disso, também devem ser mencionadas as peculiaridades operacionais da MRC em baixas, médias e altas velocidades, o que geralmente requer modelos e sistemas de controle específicos, dependendo da aplicação.

1.6. Motivação para estudo e desenvolvimento no Brasil

Do ponto de vista de produção em território brasileiro, a MRC apresenta um grande potencial, já que sua construção requer, basicamente, aço magnético e cobre, que são substâncias existentes em abundância no país. Atualmente, o Brasil é o 2o. maior produtor de minério de ferro do mundo [47], e até 2012, o país deve tornar-se autosuficiente na produção de cobre [48]. Tais aspectos, somados ao avanço nas técnicas de projeto da MRC (como uma máquina tecnicamente e financeiramente competitiva às demais) e à redução no custo de componentes eletrônicos (empregados no sistema de acionamento e controle da MRC), apontam para a viabilidade de desenvolvimento e produção integral da MRC em território brasileiro, o que colaboraria para uma notável expansão do parque fabril nacional de

máquinas elétricas, para atender à demanda deste tipo de produto nos mercados internos e externo.

1.7. Informações sobre as máquinas estudadas nesta dissertação

Nesta dissertação foram utilizadas duas MRCs, sendo uma rotativa e outra linear, e cujos projetos foram totalmente desenvolvidos no Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica (GPAR) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC) [36]. As características de projeto de ambas as máquinas são mostradas nos 2 últimos subitens deste capítulo.

1.7.1. Máquina Rotativa de Relutância Chaveada (MRRC)

A máquina rotativa de relutância chaveada (MRRC) foi projetada em [36] e tem suas principais características mecânicas e elétricas descritas nas Tabelas 1.2 e 1.3, respectivamente, além de fotos do protótipo, na Figura 1.9.

Vale ressaltar que as duas fotos que estão posicionadas à esquerda, na Figura 1.9 mostram a MRRC aberta no laboratório do GPAR, para realização de pequenos ajustes mecânicos na própria máquina.

Tabela 1.2 – Principais características mecânicas da MRRC

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade nominal ($\omega_{M(NOM)}$)	2.000	rpm
Número de pólos do estator (N_{PE})	6	pólos
Número de pólos do rotor (N_{PR})	4	pólos
Comprimento da pilha do núcleo magnético (L_N)	45	mm
Diâmetro externo (D_{EXT})	120	mm
Espessura da culatra do estator (h_{CE})	9,3	mm
Altura do pólo do estator (h_{PE})	20,7	mm
Comprimento angular da sapata polar do estator (β_{PE})	30	°
Comprimento angular da ranhura do estator (β_{RE})	30	°
Comprimento do entreferro de ar (l_g)	0,25	mm
Comprimento angular da sapata polar do rotor (β_{PR})	34	°
Comprimento angular da ranhura do rotor (β_{RR})	56	°
Altura do pólo do rotor (h_{PR})	6,2	mm
Espessura da culatra do rotor (h_{CR})	9,3	mm
Diâmetro do eixo (D_{EIXO})	28,5	mm
Número de espiras por fase (N_{ESP})	110	espiras

Tabela 1.3 – Principais características elétricas da MRRC

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de fases (q)	3	fases
Potência nominal de saída ($P_{(NOM)}$)	1	cv
Tensão de fase – valor nominal ($V_{(NOM)}$)	120	Vcc
Corrente de fase – valor nominal ($i_{(NOM)}$)	10	Acc
Resistência de fase – valor medido ($R_{(MEDIDO)}$)	0,4	Ω
Material do núcleo magnético	E230	-



Figura 1.9 – MRRC utilizada neste trabalho.

1.7.2. Máquina Linear de Relutância Chaveada (MLRC)

A máquina linear de relutância chaveada (MLRC) foi projetada em [36] e tem suas principais características mecânicas e elétricas descritas nas Tabelas 1.4 e

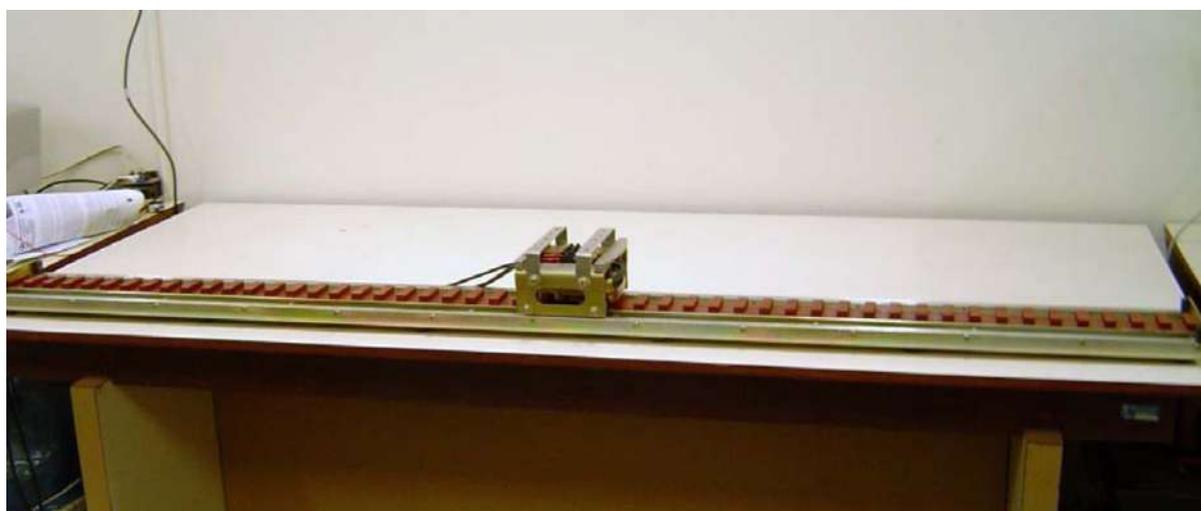
1.5, respectivamente, além de fotos do protótipo, na Figura 1.10.

Tabela 1.4 – Principais características mecânicas da MLRC

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade nominal ($v_{(NOM)}$)	0,5	m/s
Número de pólos do estator (N_{PE})	50	pólos
Número de pólos do translador (N_{PT})	6	pólos
Comprimento da pilha do núcleo magnético (L_N)	50	mm
Comprimento do estator (w_E)	1.800	mm
Altura da culatra do estator (h_{CE})	15	mm
Altura do pólo do estator (h_{PE})	10	mm
Largura do pólo do estator (w_{PE})	15	mm
Largura da ranhura do estator (w_{RE})	21	mm
Comprimento do entreferro de ar (l_g)	1	mm
Largura do pólo do translador (w_{PT})	12	mm
Largura da ranhura do translador (w_{RT})	12	mm
Altura do pólo do translador (h_{PT})	33	mm
Altura da culatra do translador (h_{CT})	12	mm
Número de espiras por fase (N_{ESP})	226	espiras

Tabela 1.5 – Principais características elétricas da MLRC

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de fases (q)	3	fases
Potência nominal de saída ($P_{(NOM)}$)	22,8	W
Tensão de fase – valor nominal ($V_{(NOM)}$)	5	Vcc
Corrente de fase – valor nominal ($i_{(NOM)}$)	8,5	Acc
Resistência de fase – valor medido ($R_{(MEDIDO)}$)	0,92	Ω
Material do núcleo magnético	E230	-



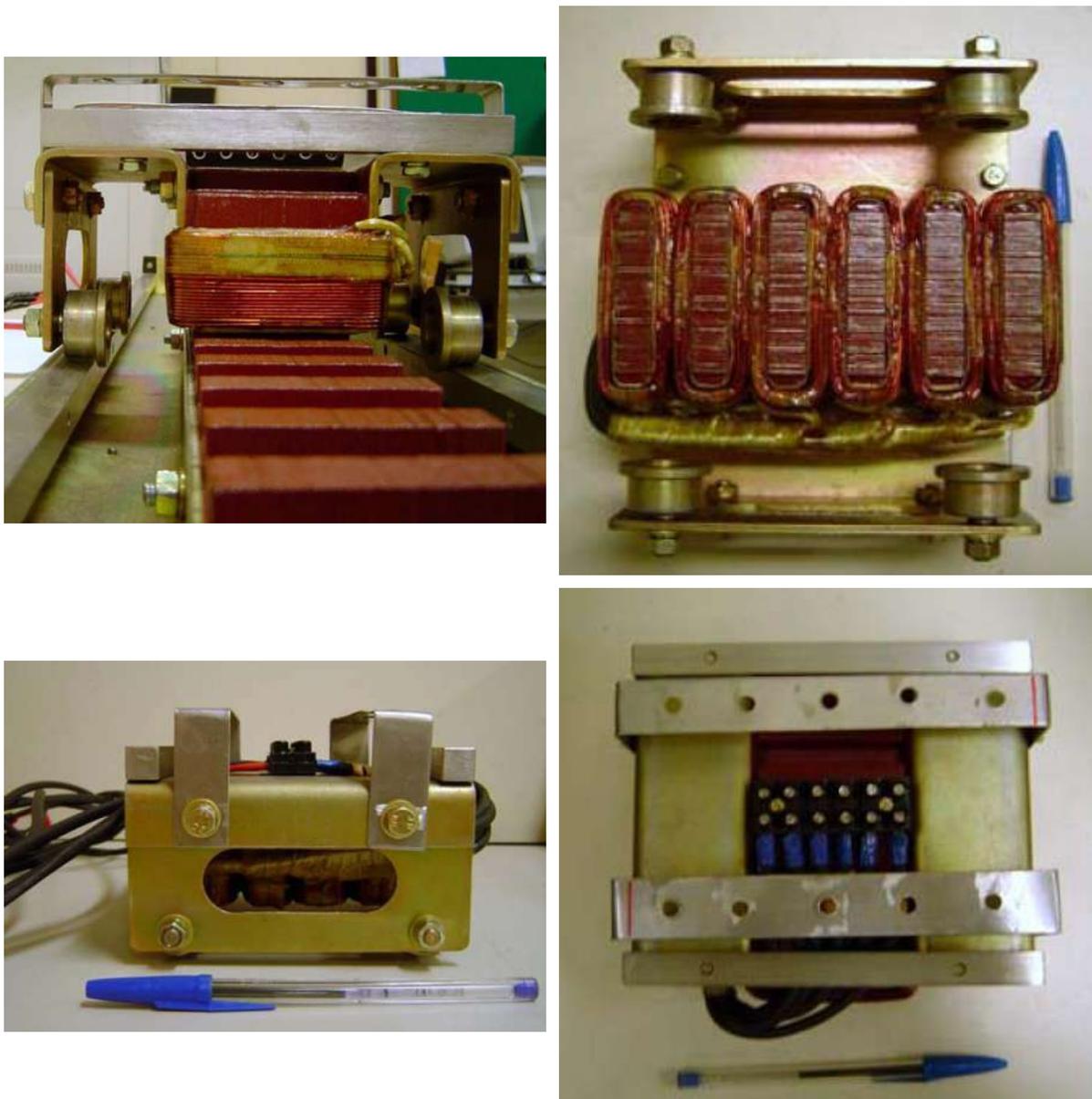


Figura 1.10 – MLRC utilizada neste trabalho.

1.8. Objetivos desta dissertação

Os principais objetivos deste trabalho são:

- apresentar um estudo comparativo entre 2 métodos de simulação computacional e 3 métodos de medição das características eletromecânicas estáticas das máquinas rotativa e linear de relutância chaveada;
- comparar e validar os resultados obtidos através de simulação computacional das características estáticas das máquinas rotativa e linear de relutância chaveada, com os respectivos resultados experimentais;

- implementar sistemas de acionamento e controle específicos para as máquinas rotativa e linear de relutância chaveada, que possibilitem a caracterização e a implementação experimental de diferentes técnicas de controle da máquina de relutância;
- implementar sistemas alternativos específicos para controle da posição da parte móvel da máquina rotativa (utilizando sensores ótico-transmissivos) e da máquina linear (utilizando sensores ótico-reflexivos);
- a partir dos resultados obtidos neste trabalho e com base nas principais características construtivas e operacionais da máquina de relutância, incentivar a viabilidade para o desenvolvimento e fabricação da máquina de relutância com tecnologia nacional.

1.9. Trabalhos publicados

Foram produzidos e aceitos para publicação em congressos, os seguintes artigos científicos, a partir das pesquisas realizadas e apresentadas nesta dissertação:

- Teixeira, V. S. C., Oliveira, D. N., Cunha Jr., H., Pontes, R. S. T., “Bond Graph na representação do motor linear de relutância chaveado”, XVI Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Salvador, 2006.
- Oliveira, D. N., Teixeira, V. S. C., Aguiar, V. P. B., Cunha Jr., Reis, L. L. N., Pontes, R. S. T., “Método iterativo para cálculo da variação da indutância do motor rotativo de relutância chaveada”, IX Encontro de Modelagem Computacional, Belo Horizonte, 2006.
- Teixeira, V. S. C., Oliveira, D. N., Cunha Jr., H., Reis, L. L. N., Pontes, R. S. T., “Influence of the project parameters on the LSRM – Project optimization”, IEEE International Electrical Machines and Drives Conference 2007 (IEMDC'07), Antalya, Turquia, 2007.
- Teixeira, V. S. C., Oliveira, D. N., Pontes, R. S. T., Viana, S. A., “Influence of the Switched Reluctance Machines design parameters on its steady-state operation characteristics”, International Conference on Electrical Machines and Systems 2007 (ICEMS'07), Seul, Coréia, 2007.
- Oliveira, D. N., Pontes, R. S. T., “Comparison of simulation and measurement methods of the static magnetization characteristics of a 1

hp RSRM”, XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM'08), Vilamoura, Portugal, 2008.

- Oliveira, D. N., Pontes, R. S. T., “Comparison of simulation and measurement methods of the static magnetization characteristics of a low power LSRM”, XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM'08), Vilamoura, Portugal, 2008.

Foi ainda aceito para publicação em congresso nacional, porém, não publicado em sua versão final , o seguinte artigo:

- Oliveira, D. N., Fernandes Neto, T. R., Teixeira, V. S. C., Cunha Jr., H., Pontes, R. S. T., “Desenvolvimento de máquinas elétricas de relutância variável para automação industrial”, V Seminário Nacional de Controle e Automação (SNCA), Salvador, 2007.

1.10. Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi estruturada em 7 capítulos, visando uma análise clara e objetiva dos principais tópicos estudados, sobre as máquinas rotativa e linear:

No Capítulo 1 é feita uma introdução geral, integrando uma abordagem geral e sucinta sobre a máquina de relutância com os principais tópicos de estudo nesta dissertação. Também são apresentadas as especificações técnicas das máquinas utilizadas neste trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas as modelagens matemáticas para as simulações computacionais das grandezas eletromecânicas estudadas nas máquina rotativa e linear.

No capítulo 3, são apresentados e discutidos os resultados das simulações das grandezas eletromecânicas, das máquinas rotativa e linear.

No capítulo 4, são abordados as técnicas de medição utilizadas e os sistemas de medição construídos para obtenção das características eletromecânicas das máquinas rotativa e linear.

No capítulo 5, são apresentadas as simulações e a implementação dos sistemas de acionamento implementados para as máquinas rotativa e linear, bem como a técnica de controle utilizada para ambas as máquinas.

No capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados de diversos ensaios experimentais dinâmicos, realizados com as máquinas rotativa e linear.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como as propostas de trabalhos futuros para as máquinas rotativa e linear.

No apêndice, é apresentada a listagem do programa computacional, através do qual foi implementada a modelagem matemática pelo MACM, para as máquinas rotativa e linear.

Capítulo 2

Modelagem das características estáticas da máquina de relutância chaveada

As máquinas elétricas são geralmente estudadas a partir de modelagens matemáticas que descrevem o comportamento de um ou vários de seus parâmetros, utilizando técnicas matemáticas que variam em termos de precisão, complexidade matemática e flexibilidade para resolução de diferentes problemas. Dentre os principais modelos matemáticos de máquinas elétricas, pode-se citar o modelo algébrico linear (para a máquina de corrente contínua com escovas), a transformada de Park, ou modelo $dq0$ (para as máquinas de indução e de ímã permanente), e o método dos elementos finitos em duas e três dimensões (aplicável para modelagem da maioria das máquinas elétricas).

No caso da MRC, uma de suas principais características de projeto refere-se à sua curva de conversão eletromecânica de energia (também chamada de “curva característica”), mostrada na Figura 1.8.

Por depender das características construtivas da MRC (dimensões geométricas de rotor e estator, tipo e quantidade de aço do núcleo magnético e de condutores das bobinas de fase) a curva característica pode ser considerada sua “carteira de identidade”, pois, a partir desta curva, importantes parâmetros de projeto da MRC podem ser calculados, dentre os quais pode-se citar [1]:

- fator de potência (ou taxa de conversão eletromecânica);
- conjugado médio nominal da máquina;
- intervalos de chaveamento das fases.

Em outras palavras, qualquer alteração nas características construtivas da MRC implicará na alteração de pelo menos um de seus parâmetros de projeto. Somando-se a isso a característica eminentemente não-linear da MRC e a necessidade de um conversor eletrônico para seu acionamento (conforme mencionado no capítulo 1), o projeto desta máquina geralmente requer uma criteriosa análise do conjunto “conversor-máquina”, de forma a se obter a melhor relação custo/benefício para a aplicação desejada [1].

De acordo com a aplicação, outros parâmetros também podem ser

considerados no projeto da MRC, como níveis de aquecimento (em geral, uma função do valor nominal da corrente de fase), ruído e vibração.

Neste capítulo são apresentadas as modelagens da MRRC e da MLRC, com base em dois métodos [42]:

- Método dos elementos finitos (MEF);
- Método de análise do circuito magnético (MACM);

A partir destes dois métodos de modelagem das características estáticas da MRC, foram analisados apenas dois tipos de parâmetros, que, nesta etapa de desenvolvimento da MRC, representam o maior interesse de estudo em laboratório (além da disponibilidade de equipamentos para medição experimental destas características): taxas de conversão eletromecânica da MRRC e da MLRC e o conjugado médio da MRRC.

Os dados de entrada e saída relacionados a ambos os métodos são sintetizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Dados de entrada e saída relacionados aos métodos de simulação das características estáticas da MRC rotativa e linear

Máquina	Dados de entrada	Dados de saída
rotativa	<ul style="list-style-type: none"> ● características eletromagnéticas (tipo de material utilizado no núcleo magnético e o valor da corrente de fase); 	<ul style="list-style-type: none"> ● indutância de fase; ● fluxo magnético concatenado de fase; ● conjugado mecânico.
linear	<ul style="list-style-type: none"> ● características mecânicas (geometria das espiras de fase, do estator e da parte móvel, além da quantidade de espiras por fase). 	<ul style="list-style-type: none"> ● indutância de fase; ● fluxo magnético concatenado de fase;

A partir do conhecimento das grandezas de saída, mostradas na Tabela 2.1, é possível quantificar os parâmetros de saída da MRC definidos no projeto, bem como especificar parâmetros para projeto dos sistemas de acionamento e controle.

As modelagens através do MEF e o MACM são detalhados nos subitens 2.1 e 2.2, respectivamente.

2.1. Modelagem das características eletromagnéticas

As características eletromagnéticas (fluxo concatenado e indutância de fase) são fatores determinantes na conversão eletromecânica de energia, e são

intrínsecas a cada MRC, sendo definidas a partir dos valores escolhidos para os dados de entrada (Tabela 2.1) do projeto da máquina.

Nos subitens 2.1.1 e 2.1.2 são apresentados os 2 métodos utilizados para se obter as curvas características (similares às da Figura 1.8) da MRRC e da MLRC, através de simulação computacional.

O valor do fluxo concatenado de fase pode ser calculado com base nos valores obtidos para a indutância de fase, nas diversas posições e valores de corrente de fase da máquina, através da equação (2.1):

$$\psi = L \cdot i \quad (2.1)$$

2.1.1. Método dos elementos finitos (MEF)

O MEF começou a ser desenvolvido na década 1950, com o objetivo de solucionar problemas ligados à engenharia mecânica, como, por exemplo, análise tensorial em estruturas, difusão do calor e escoamento de fluidos [50]. Em 1970, foram iniciados os estudos envolvendo a aplicação do MEF a problemas de eletromagnetismo através da proposição de métodos eficazes para resolução das equação diferenciais de 2a. ordem [49 e 50], contornando a problemática de resultados insatisfatórios fornecidos por métodos para determinação de campos – utilizados até a década de 1970 – que envolvessem geometrias complexas ou materiais ferromagnéticos que apresentassem saturação [50]. Estes estudos abriram caminho para que o MEF tenha se tornado um método confiável e largamente utilizado para resolução de diversos problemas de determinação de campos – impulsionado pela crescente capacidade de processamento dos microcomputadores [50 e 51].

A facilidade na representação de diversas geometrias da MRC (tanto em 2D como em 3D) e a elevada precisão nos resultados do problema de cálculo da densidade de fluxo magnético em diversos pontos da máquina, além da possibilidade de análise de parâmetros mecânicos (como aquecimento, ruído e vibração), tornam o MEF uma técnica matemática bastante útil para análise dos parâmetros de projeto da MRC [50 e 51].

A formulação de um problema através do MEF consiste na redução de um problema que, em geral, é descrito por poucas equações diferenciais de difícil

resolução, em vários problemas menores, descritos por equações mais simples e de resolução mais fácil. Esta redução é feita dividindo-se a geometria do problema em uma malha composta por vários elementos finitos, como o triângulo ou o quadrado (no caso de problemas em 2D).

Em geral, a formulação dos problemas utilizando o MEF no estudo do eletromagnetismo, envolve métodos variacionais ou residuais, sendo o segundo método o mais utilizado nas formulações e resoluções de problemas pelo MEF, por apresentar as seguintes vantagens [51]:

- primeiro, a formulação matemática do problema é feita a partir das próprias equações físicas a serem resolvidas – e que regem o comportamento físico do problema;
- em segundo lugar, é um método cuja concepção e aplicação são mais simples do que os métodos variacionais.

Nesta dissertação, o MEF é aplicado ao problema de estudo, em 2D, dos campos magnéticos, baseado no vetor potencial (pois a geometria da máquina é composta do núcleo magnético e das espiras que conduzem corrente estática e de valor não-nulo, i.e., $\vec{J} \neq 0$). O comportamento físico deste tipo de problema é descrito pelas equações (2.2) e (2.3):

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.2)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (2.3)$$

O vetor potencial magnético, \vec{A} , está relacionado à densidade de fluxo magnético conforme a equação (2.4):

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.4)$$

Substituindo as equações (2.4) e (2.3) em (2.2), obtém-se a equação de Poisson, que descreve o potencial vetor magnético em 2D, conforme a equação (2.4).

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) \right] = -\vec{J} \quad (2.5)$$

Aplicando o método residual de Galerkin à equação (2.5), pode-se resolver numericamente a equação (2.5) e obter-se o valor do potencial vetor magnético, com resíduo nulo, no domínio de um elemento finito específico. Este procedimento deve se repetido para todos os elementos finitos que compõem a malha do domínio do problema, e ao final, é obtido comportamento numérico e gráfico do campo no domínio especificado para o problema.

Em síntese, a análise da MRC, através do MEF, pode ser descrita em 5 etapas:

- definição da geometria do problema, ou seja, desenho das partes fixa e móvel da MRC (geralmente feita com auxílio de CAD);
- definição dos materiais envolvidos no problema e das condições de contorno;
- definição dos elementos finitos (triângulo, quadrado ou outras geometrias) e da malha problema (quantidade de elementos finitos e de nós);
- resolução do problema de cálculo do fluxo magnético para cada elemento finito;
- apresentação da solução final do problema através do formato das linhas de fluxo magnético ou da densidade de fluxo magnético.

O procedimento de resolução do fluxo concatenado para uma posição da parte móvel MRC, através da MEF (utilizando o programa FEMM 4.2), é ilustrado tomando como exemplo a análise da MRRC, conforme mostrado nas Figuras 2.1a, 2.1b e 2.1c.

Atualmente, uma vasta literatura encontra-se disponível tanto sobre a formulação matemática e técnicas de resolução do MEF, utilizando os métodos variacionais e residuais, como acerca de aplicações a diversos problemas de eletromagnetismo em 2D e 3D [49 a 54].

2.1.2. Método de análise do circuito magnético (MACM)

O método de análise do circuito magnético (MACM) é um método para

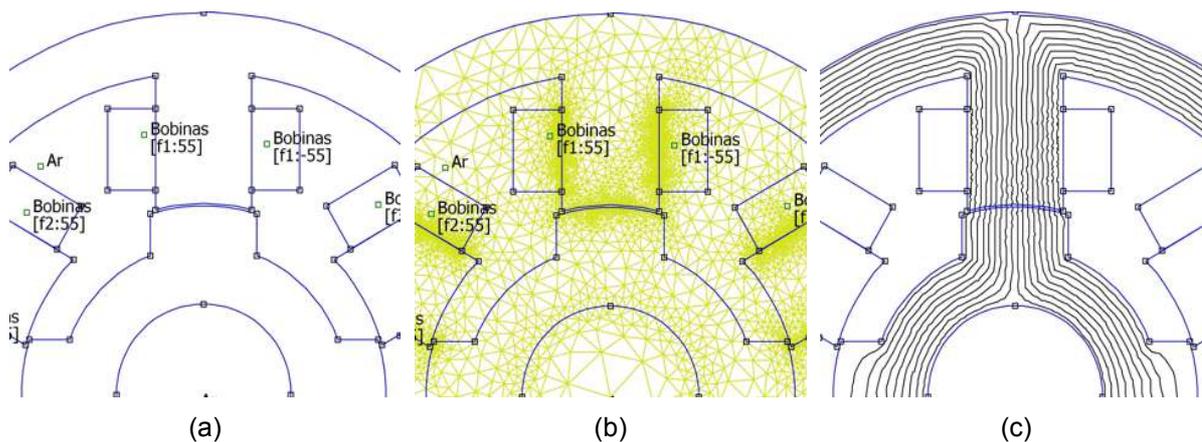


Figura 2.1 – Detalhe da análise da MRRC através do MEF, mostrando (a) a definição da geometria da máquina, com a definição das condições de contorno, (b) a geração da malha de elementos finitos e (c) a solução final do problema, através de linhas de fluxo magnético.

cálculo do fluxo magnético, na MRC, mais simples do que o MEF, porém, não possui a mesma flexibilidade e é específico para um determinado perfil geométrico de máquina de relutância.

O MACM baseia-se na escolha e no equacionamento das linhas de fluxo magnético que atravessam a máquina, para uma determinada posição da parte móvel. As linhas de fluxo são equacionadas a partir das dimensões geométricas da máquina, e o valor do fluxo magnético é obtido através de um processo matemático iterativo de aproximação numérica, separadamente, para cada uma das cinco partes do problema:

- culatra do estator;
- pólo do estator;
- entreferro de ar;
- pólo da parte móvel;
- culatra da parte móvel.

Ao final de cada processo iterativo, obtém-se o valor de fluxo magnético para cada uma das cinco partes do problema, para um determinado caminho de fluxo magnético e um determinado circuito magnético (que está associada a cada caminho de fluxo, para cada posição da parte móvel). O processo é repetido para cada um dos outros caminhos e posições da parte móvel escolhidos, sendo, ao final, contabilizados os valores de cada caminho de fluxo, a fim de se obter o valor total de fluxo magnético para uma posição específica da máquina.

A modelagem e as restrições na implementação do MACM, aplicado às máquinas rotativa e linear, são abordados nos subitens 2.1.2.1 e 2.1.2.2, respectivamente.

2.1.2.1. Máquina rotativa

Na implementação do MACM para a máquina rotativa, foram equacionadas as linhas de fluxo magnético para apenas duas posições do rotor da máquina: alinhamento e desalinhamento em relação aos pólos do estator, conforme as Figuras 2.2a e 2.2b, respectivamente.

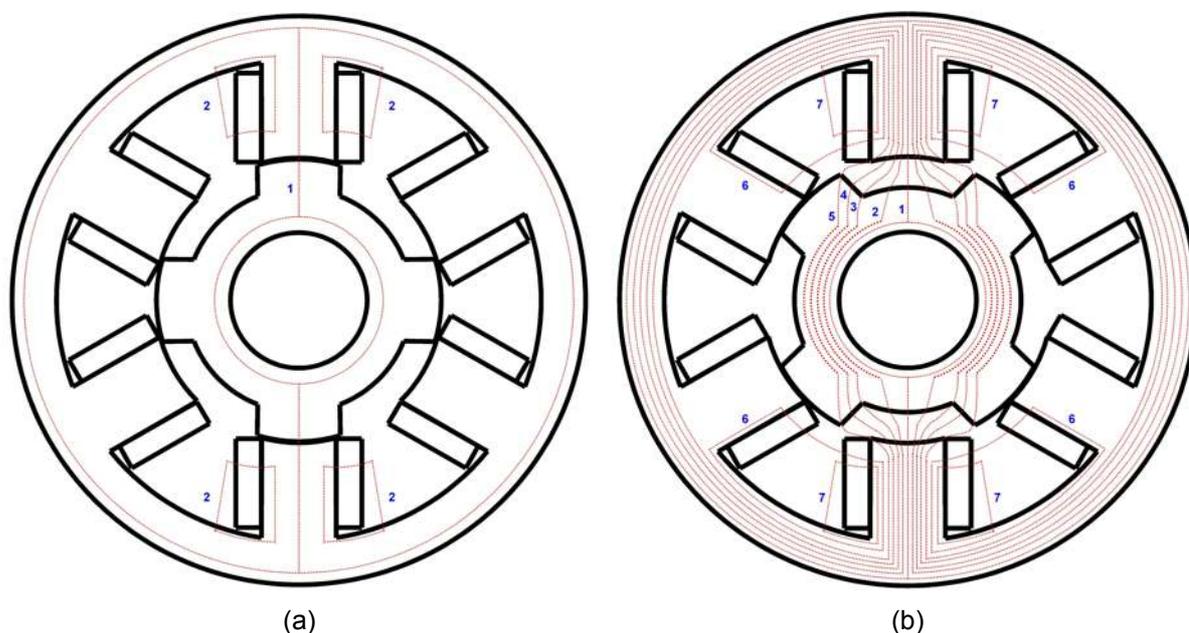


Figura 2.2 – Posições do rotor da MRRC consideradas para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM.

A implementação do MACM para a máquina rotativa seguiu o caso geral [42], no qual são definidas 7 linhas (ou caminhos) de fluxo magnético para a posição desalinhada (Figura 2.2a), e 2 linhas (ou caminhos) de fluxo magnético para a posição alinhada (Figura 2.2b) [42].

Para cada um destes caminhos (que, em geral, são todos distintos entre si) é deduzido um circuito magnético, cujas equações serão utilizadas no processo iterativo para obter o fluxo magnético que passa pelo caminho. Como exemplo ilustrativo deste procedimento, os circuitos magnéticos associados aos caminhos 1 e 2 da posição alinhada (Figura 2.2a) são mostrados nas Figuras 2.3a e 2.3b,

respectivamente.

O processo iterativo para cálculo do fluxo magnético em cada caminho é detalhado no fluxograma da Figura 2.4.

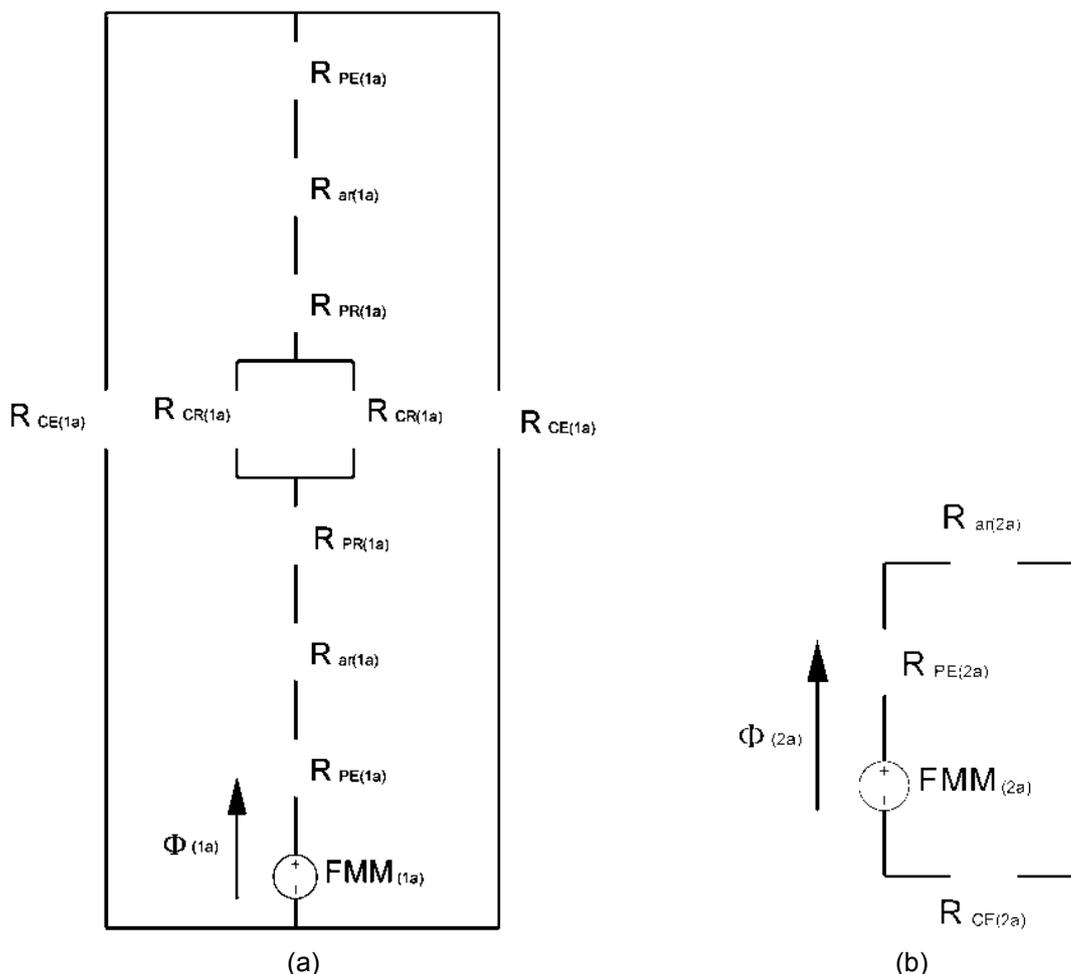


Figura 2.3 – Circuitos magnéticos associados ao (a) caminho 1 de fluxo magnético e ao (b) caminho (2) de fluxo magnético, ambos para a posição alinhada.

A modelagem do MACM para a máquina rotativa apresenta as seguintes restrições [42]:

- as linhas de fluxo magnético no entreferro consistem somente de arcos concêntricos e/ou de linhas retas;
- as linhas de fluxo magnético entram e saem do ferro ortogonalmente à própria superfície do ferro;
- as linhas de fluxo magnético nos pólos do rotor e do estator são paralelas ao eixo polar;

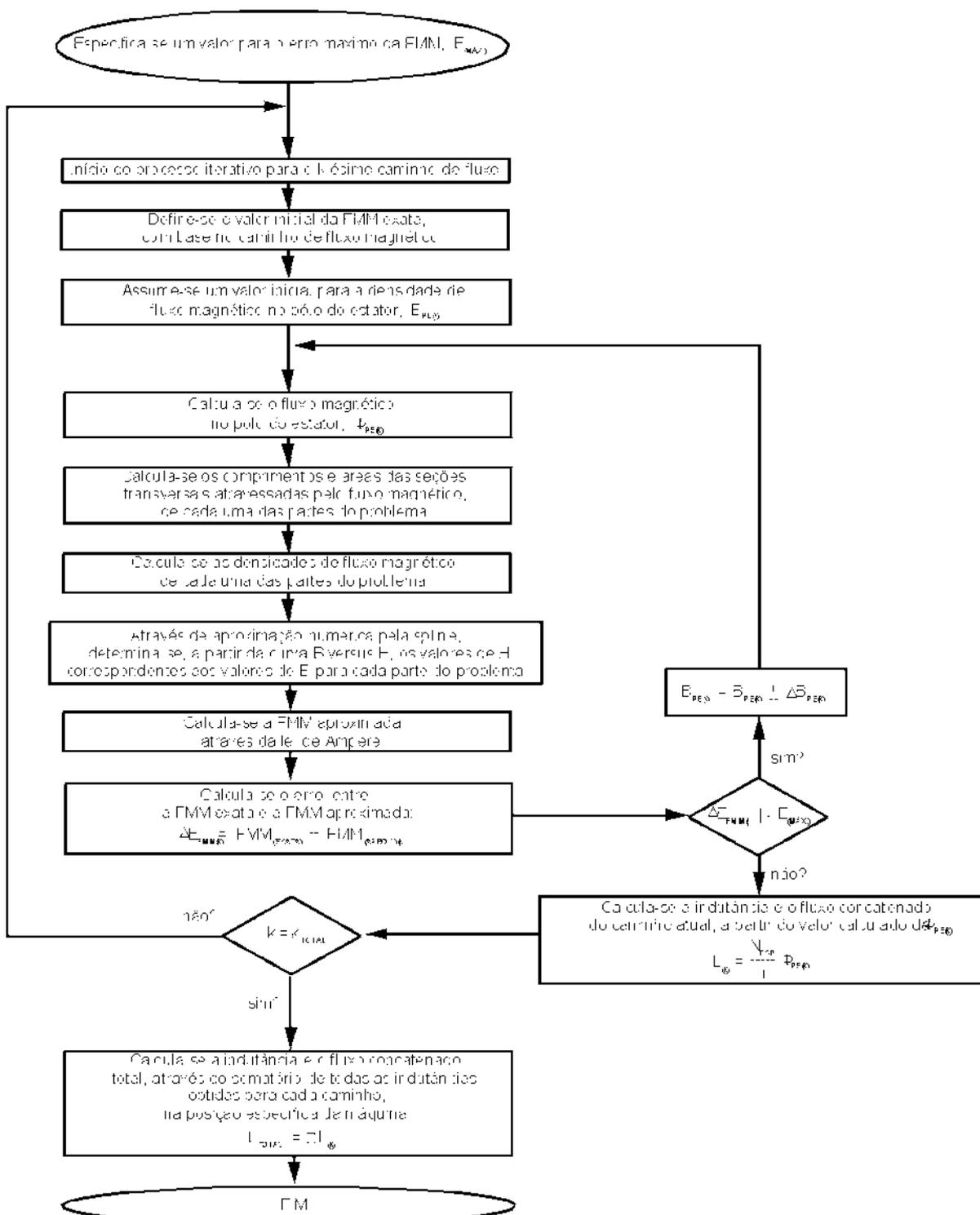


Figura 2.4 – Fluxograma do processo iterativo do MACM aplicado à máquina rotativa, utilizado no cálculo da indutância para cada posição do rotor.

- as linhas de fluxo magnético nas culatras do estator e do rotor são concêntricas;
- os enrolamentos são representados por bloco retangulares e as ranhuras do estator são preenchidas apenas parcialmente por estes

enrolamentos;

- o eixo da MRRC é constituído de material puramente não-magnético.

Para análise e implementação do cálculo das características de cada caminho de fluxo magnético, adotou-se a seguinte sequência [42]:

- (a) desenho do caminho de fluxo magnético;
- (b) elaboração do circuito magnético a partir do desenho do caminho de fluxo;
- (c) equacionamento das dimensões (comprimento e área transversal) do caminho de fluxo, a partir do desenho feito no item (a);
- (d) equacionamento da densidade de fluxo magnético, “ B ”, para cada caminho de fluxo;
- (e) definição da FMM nominal do caminho de fluxo;
- (f) equacionamento da FMM aproximada, a partir do circuito magnético do item (b) e com base na lei de Ampere;
- (g) equacionamento da indutância do caminho de fluxo magnético.

Em geral, o valor inicial da densidade de fluxo magnético no pólo do estator (B_{PE}), utilizado no início do processo iterativo de cada caminho, é considerado como sendo um valor intermediário da densidade de fluxo, na curva B versus H do material magnético, utilizado na simulação.

2.1.2.2. Máquina linear

A modelagem da máquina linear através do MACM é bastante similar à modelagem apresentada para a máquina rotativa, onde as duas principais diferenças, são:

- o equacionamento das linhas (caminhos) de fluxo magnético, devido às próprias peculiaridades na geometria construtiva da máquina linear;
- a forma para cálculo do erro, em cada iteração, que permite uma convergência mais rápida em cada execução do processo iterativo para cálculo do fluxo magnético na MLRC, já que a modelagem dos caminhos de fluxo magnético desta máquina envolve uma maior quantidade de equações;

O MACM, aplicado à máquina linear, foi implementado para 4 posições do

translador, em relação aos pólos do estator, que são as posições de total alinhamento dos pólos, de $1/3$ de desalinhamento, de $2/3$ de desalinhamento e de total desalinhamento, conforme mostrado nas Figuras 2.5a, 2.5b, 2.5c e 2.5d, respectivamente [42].

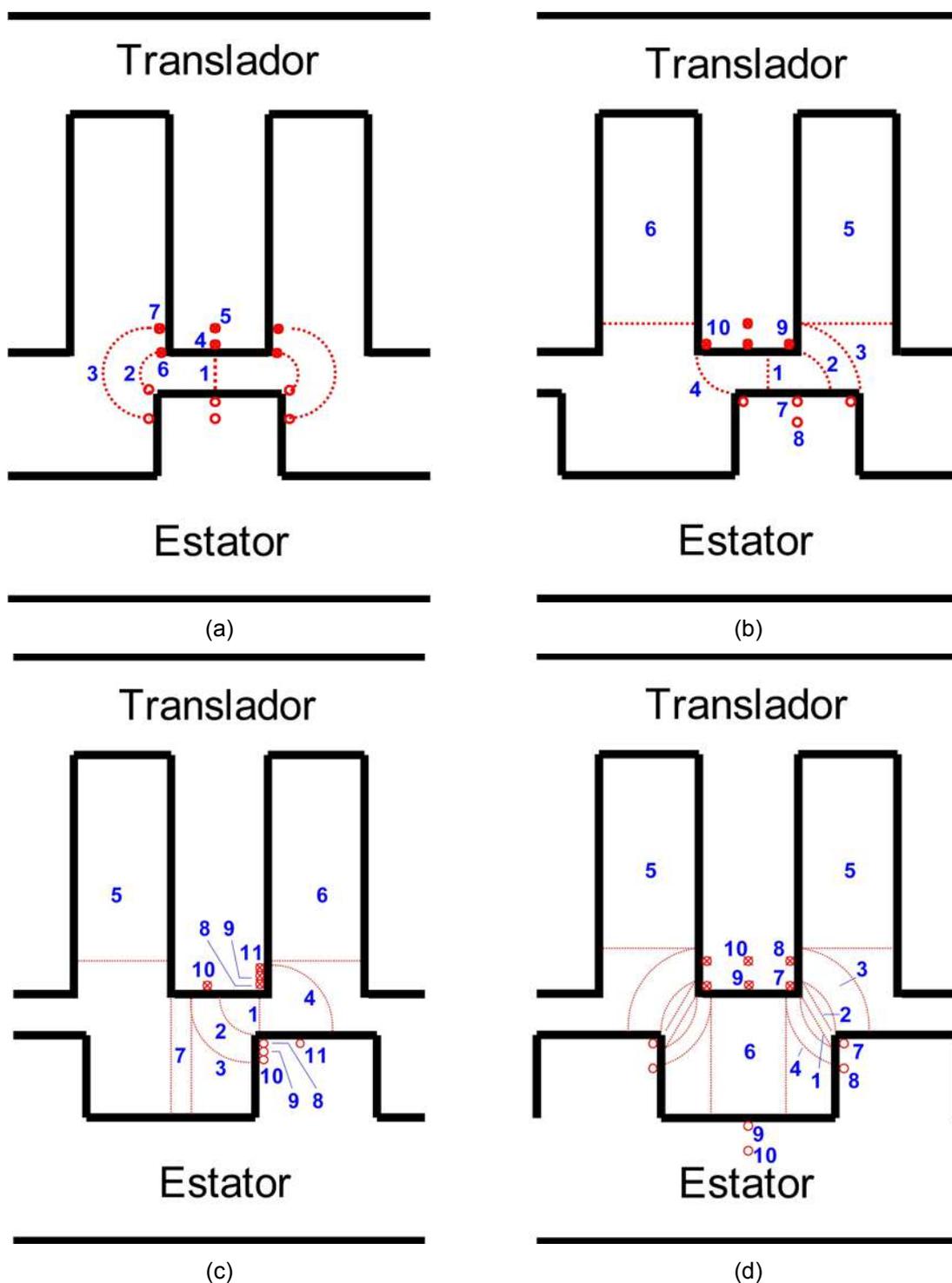


Figura 2.5 – Posições do translador da MLRC consideradas para o equacionamento das linhas de fluxo magnético, através do MACM. As posições indicadas são de (a) total alinhamento, (b) $1/3$ de desalinhamento, (c) $2/3$ de desalinhamento e (d) total desalinhamento entre os pólos do translador e do estator.

Para as 4 posições relativas entre os pólos do translador e do estator, mostrados nas Figuras 2.5a, 2.5b, 2.5c e 2.5d, foram definidos 7, 10, 11 e 10 caminhos de fluxo, respectivamente [42]. Nestas figuras, os caminhos de fluxo magnético representados por pequenos círculos indicam que as linhas de fluxo

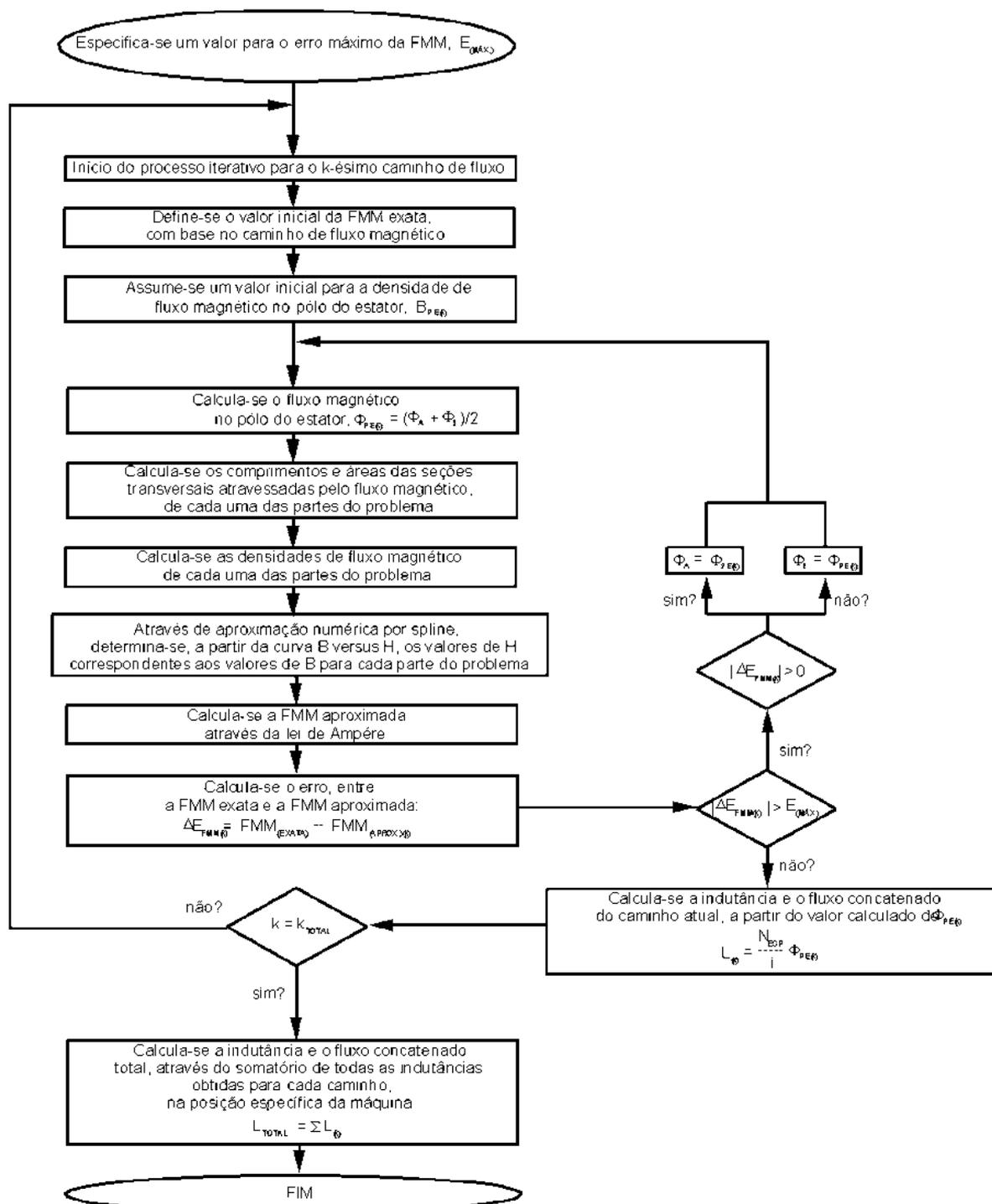


Figura 2.6 – Fluxograma do processo iterativo do MACM aplicado à máquina linear, utilizado no cálculo da indutância para cada posição do translador.

saem pelos círculos cheios e entram pelos círculos vazados (perpendiculares à superfície do desenho), determinando um caminho de fluxo com formato semiesférico nestes pontos.

O procedimento para o equacionamento dos comprimentos e áreas das seções transversais de cada caminho de fluxo magnético, bem como para a aplicação do método iterativo são bastante similares ao que foi apresentado para a máquina rotativa, no subitem 2.1.2.1. O fluxograma do processo iterativo para a máquina linear, com as diferenças já mencionadas, é mostrado na Figura 2.6 [42].

As etapas para análise do circuito magnético e implementação do processo iterativo também são similares ao que foi apresentado para a máquina rotativa, no subitem 2.1.2.1 [42].

2.2. Características mecânicas – métodos de estimação analítica

As características mecânicas analisadas referem-se somente à verificação dos valores nominais de conjugado médio da máquina rotativa, por meio de métodos de estimação destas grandezas, que estão baseados nas curvas características, ψ versus i , obtidas a partir das características eletromagnéticas [42].

2.2.1. Máquina rotativa – estimação do conjugado médio

A estimação do conjugado médio da máquina rotativa baseia-se na variação da coenergia, W_c , das curvas características ψ versus i , conforme mostrado na Figura 2.7.

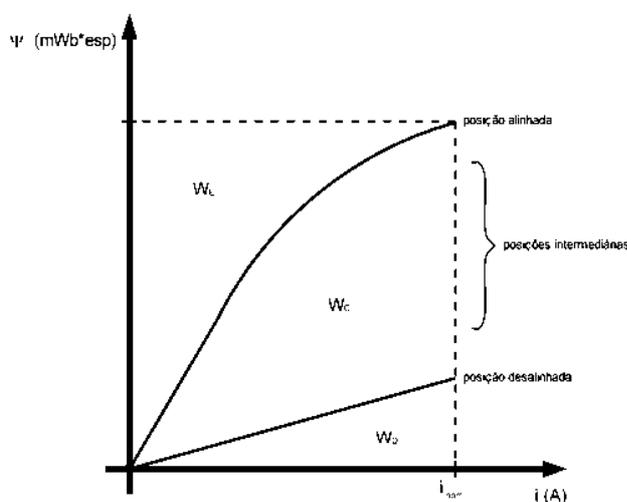


Figura 2.7 – Energia e coenergia.

Em termos matemáticos, o cálculo da coenergia consiste no cálculo da área W_C , que pode ser definido através da seguinte integral [42]:

$$W_C = \left(\int \psi di \right) - W_D \quad (2.6)$$

A partir do valor da coenergia, obtém-se o conjugado médio, conforme a equação (2.7) [42]:

$$C_{(med)} = \frac{N_c \cdot W_C}{2 \cdot \pi} \quad (2.7)$$

Onde N_c é a quantidade de comutações de fases (conforme definido no subitem 1.2) necessários para que haja uma volta completa, sendo esta grandeza definida – para máquinas rotativas de geometria simétrica e regular – através da equação (2.8):

$$N_c = m \cdot q \cdot N_{PR} \quad (2.8)$$

Onde m é o número de par de pólos por fase, q é o número de fases da máquina e N_{PR} é o número de pólos do rotor.

A solução da equação (2.6) é obtida através dos dois métodos de estimação do conjugado médio, apresentados nos subitens 2.2.1.1 e 2.2.1.2.

2.2.1.1. Método trapezoidal

O primeiro método utilizado para cálculo da coenergia, através da resolução da integral da equação (2.6), baseia-se na aplicação do método trapezoidal para aproximação numérica de integrais definidas [55].

Com base na Figura 2.8, verifica-se que o primeiro e o segundo termos do segundo membro da equação (2.6), podem ser representados pelas equações (2.9) e (2.10), respectivamente:

$$\int \psi di \approx \Delta i \cdot \left(\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{k-2} + \psi_{k-1} + \frac{1}{2} \cdot \psi_k \right) \quad (2.9)$$

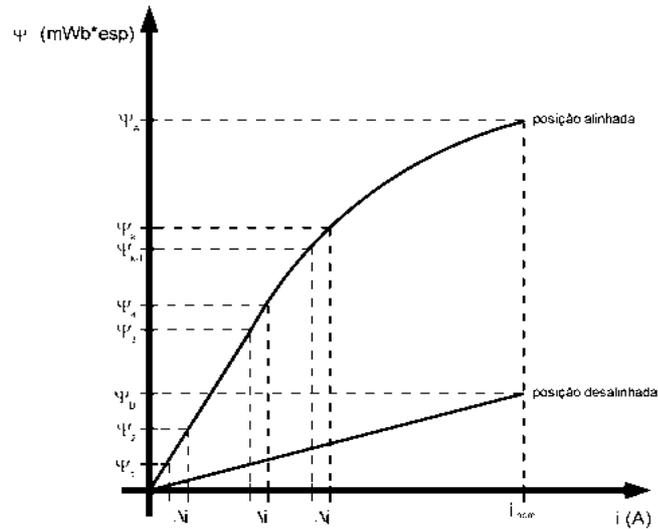


Figura 2.8 – Método trapezoidal para cálculo da coenergia.

$$W_D = \frac{1}{2} \cdot \psi_D \cdot i_{NOM} \quad (2.10)$$

Substituindo os resultados das equações (2.9) e (2.10) na equação (2.6), obtém-se uma expressão para aproximação do valor da coenergia da MRRC, conforme a equação (2.11):

$$W_C = \left[\Delta i \cdot \left(\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_{k-2} + \psi_{k-1} + \frac{1}{2} \cdot \psi_k \right) \right] - \frac{1}{2} \cdot \psi_D \cdot i_{NOM} \quad (2.11)$$

2.2.1.2. Método da parábola

Um segundo método para cálculo da coenergia, através da resolução da integral da equação (2.6), baseia-se na divisão da curva da posição alinhada, no gráfico ψ versus i , em uma reta – região linear – e uma parábola – região de saturação – a partir das quais define-se uma função analítica para cada uma das duas regiões que permite a integração analítica das duas regiões do gráfico, conforme mostrado na Figura 2.9 [56], na qual W_E corresponde à energia magnética armazenada no campo magnético da fase da máquina enquanto W_C corresponde à coenergia magnética convertida em energia mecânica, durante um ciclo de conversão eletromecânica.

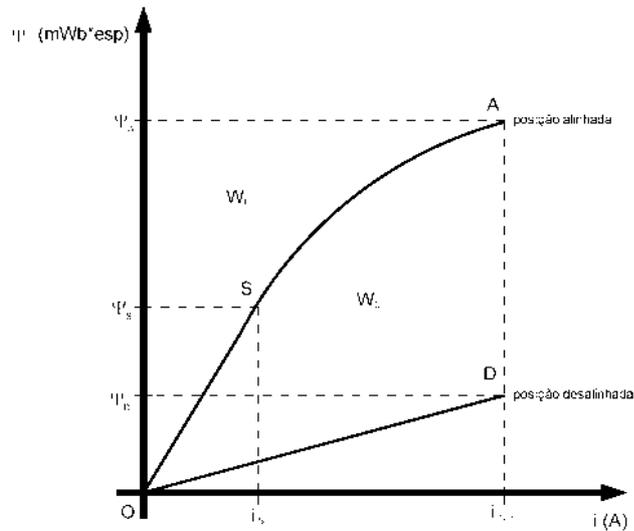


Figura 2.9 – Método da parábola para cálculo da coenergia.

Através do gráfico da Figura 2.9, definem-se a região linear e a região de saturação como sendo a reta OS e a parábola SA, respectivamente, sendo esta última definida através da equação (2.12) [56]:

$$(\psi - \psi_{s0})^2 = 4 \cdot a \cdot (i - i_{s0}) \quad (2.12)$$

Os termos i_{s0} , ψ_{s0} e a são definidos nas equações (2.13) a (2.15):

$$\psi_{s0} = \psi_s - \frac{2 \cdot a}{\psi_s / i_s} \quad (2.13)$$

$$i_{s0} = i_s - \frac{a}{(\psi_s / i_s)^2} \quad (2.14)$$

$$a = \frac{(\psi_A - \psi_s)^2}{4 \cdot \left[(i_{NOM} - i_s) - \left(\frac{\psi_A - \psi_s}{\psi_s / i_s} \right) \right]} \quad (2.15)$$

Onde ψ_s e i_s são os pontos que definem a fronteira entre a região linear e a região de saturação, na curva da posição alinhada, ilustrada na Figura 2.9. As equações (2.13) a (2.15) garantem que as derivadas da reta OS e da parábola

SA – equação (2.12) – são iguais no ponto S [56].

Dessa forma, o valor da energia magnética armazenada, W_E , pode ser calculada por meio de integração analítica [56]:

$$W_E = (\psi_A - \psi_S) \cdot \left[\frac{\psi_A^2 + \psi_A \cdot \psi_S + \psi_S^2}{12 \cdot a} + \frac{\psi_{s0}^2 - \psi_{s0} \cdot (\psi_A + \psi_S)}{4 \cdot a} + i_{s0} \right] + \frac{1}{2} \cdot \psi_S \cdot i_S \quad (2.16)$$

E o valor da coenergia pode ser calculado através da equação (2.17) [56]:

$$W_C = \psi_A \cdot i_{NOM} - W_E - \frac{1}{2} \cdot \psi_D \cdot i_{NOM} \quad (2.17)$$

No método da parábola, é importante ressaltar ainda que os três pares de pontos (ψ_A e i_A , ψ_S e i_S e ψ_D e i_D), indicados no gráfico da Figura 2.9, são utilizados por representarem os três pontos mais críticos da curva ψ versus i , que são, respectivamente: região de saturação, “joelho” e região linear.

Capítulo 3

Simulação das características estáticas da máquina de relutância chaveada

Este capítulo tem como objetivo comparar as modelagens matemáticas definidas no capítulo 2, com base nos resultados obtidos a partir de suas implementações. Ou seja, com base em simulações computacionais (implementadas na plataforma MATLAB®), obteve-se as curvas ψ versus i , que representam as características eletromagnéticas estáticas da MRRC e da MLRC, bem como o valor do conjugado médio nominal da MRRC (também implementado em plataforma MATLAB®), calculado a partir de sua característica eletromagnética estática.

3.1. Simulação das características eletromagnéticas

Para se fazer a simulação computacional das características eletromagnéticas estáticas de uma MRC qualquer, através do MEF e do MACM, é necessário conhecer os valores das características construtivas da máquina (em especial, as dimensões geométricas, a corrente nominal de fase e a nomenclatura do aço empregado como núcleo magnético da máquina). No caso deste trabalho, tais características construtivas estão listadas nas Tabelas 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5, na parte final do capítulo 1.

A importância de se conhecer a nomenclatura do aço utilizado no núcleo magnético da MRC refere-se não apenas às características magnéticas inerentes a cada tipo de aço (e.g., permeabilidade magnética, valor de saturação da densidade de fluxo magnético, etc.) mas também à obtenção da curva de magnetização (B versus H) do próprio aço, que, geralmente, é obtida junto ao seu fabricante ou na literatura especializada.

O aço empregado no núcleo magnético das máquinas rotativa e linear é o modelo E-230, de fabricação da empresa Acesita®S/A. Sua curva de magnetização (B versus H), utilizada nas simulações computacionais deste capítulo, é mostrada na Figura 3.1.

Na Figura 3.1, a “curva exata” refere-se à curva B versus H , fornecida pelo fabricante do aço magnético, enquanto a “curva aproximada” refere-se à aproximação desta curva implementada através do método de *spline* cúbica, e que

foi utilizada no processo iterativo do MACM.

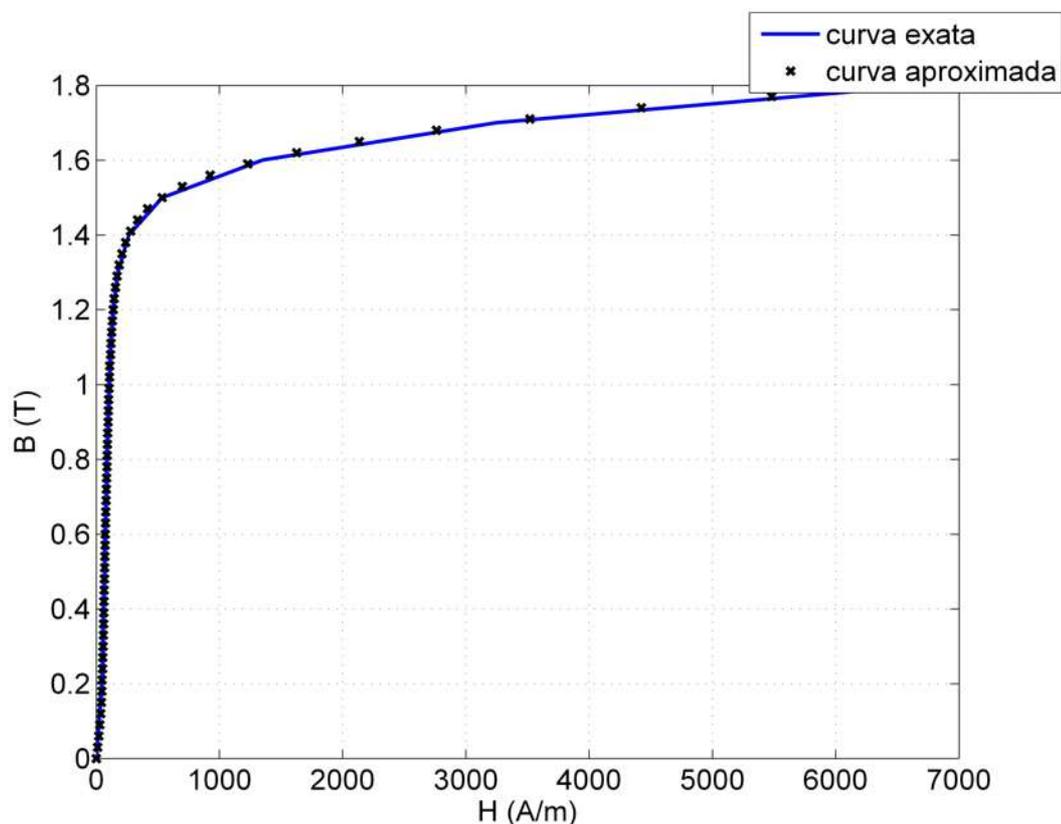


Figura 3.1 – Curva B versus H, do aço que compõe o núcleo magnético da MRRC e da MLRC.

Nos subitens 3.1.1 e 3.1.2 são apresentados os parâmetros utilizados e os resultados obtidos nas simulações das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear.

Para a MRRC, foram aplicados o MEF e o MACM para apenas duas posições do rotor (alinhada e desalinhada), enquanto para a MLRC, foram analisadas 4 posições do translador (alinhada, 1/3 de desalinhamento, 2/3 de desalinhamento e desalinhada).

3.1.1. Método dos elementos finitos (MEF)

Nos subitens 3.1.1.1 e 3.1.1.2 são apresentados os resultados das simulações para a MRRC e a MLRC, através do método dos elementos finitos.

Para simulação das características eletromagnéticas de ambas as máquinas, utilizou-se o programa FEMM 4.2, que permite a análise de problemas de determinação de campos magnéticos em 2D, além de ter licença de uso livre.

3.1.1.1. Máquina rotativa

A análise da máquina rotativa através do MEF é feita para apenas uma fase, já que sua geometria circular garante um caminho fechado e simétrico para as linhas de fluxo magnético em qualquer uma das fases da máquina.

Os parâmetros de simulação utilizados com o MEF, são mostrados na Tabela 3.1. Os valores de nós e elementos utilizados na simulação da MRRC, através do MEF (Tabela 3.1) foram definidos por tentativa e erro, e foram suficientes para obtenção de resultados adequados. A utilização de um número maior de nós e de elementos resultava em um esforço computacional bastante elevado, gerando melhorias nos resultados inferiores a 1%, em relação aos resultados obtidos utilizando os parâmetros da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de simulação da MRRC através do MEF

Posição do rotor (°)	Número de nós	Número de elementos	Elemento finito	Precisão
0 (desalinhada)	22.149	44.200	triângulo	10^{-8}
45 (alinhada)	22.279	44.462	triângulo	10^{-8}

Nas Figuras 3.2a e 3.2b são apresentadas as malhas geradas no FEMM, para a geometria da MRRC, utilizando os valores das Tabelas 1.4 e 1.5.

Nas Figuras 3.3a e 3.3b são apresentadas as linhas de fluxo magnético resultantes da simulação da MRRC pelo FEMM, para as posições alinhada e desalinhada, respectivamente.

O procedimento de simulação através do MEF foi o seguinte:

- (a) elaborou-se a geometria do problema a ser resolvido;
- (b) definiu-se as características eletromagnéticas de cada parte do problema (estator, parte móvel, bobinas de fase e entreferro de ar);
- (c) a parte móvel da máquina é fixada em uma determinada posição;
- (d) gera-se a malha de elementos finitos, para a posição específica;
- (e) define-se um valor de corrente de fase;
- (f) executa-se a simulação e são obtidos os resultados (fluxo concatenado e indutância de fase) para a posição e a corrente de fase específicas;
- (g) aumenta-se o valor de corrente em passos de 0,5A e repete-se o procedimento do item (f), até o valor nominal de corrente, igual a 10A;
- (h) altera-se a posição da parte móvel de máquina e repete-se o

procedimento dos itens (d) a (g), até obter-se as curvas ψ versus i para as posições e correntes de fase especificadas.

O gráfico das curvas características ψ versus i , obtidas através do MEF, para as posições alinhada e desalinhada da MRRC, é mostrado na Figura 3.4.

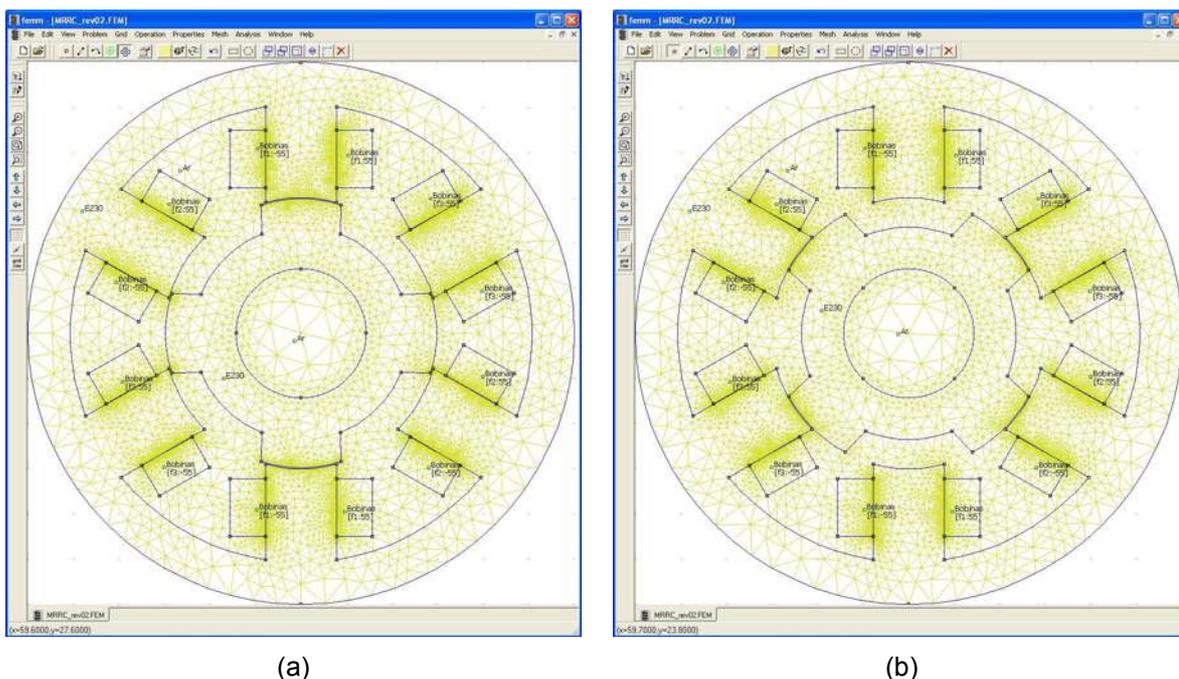


Figura 3.2 – Geração de malhas da geometria da MRRC para simulação através do MEF, para (a) a posição alinhada e (b) a posição desalinhada.

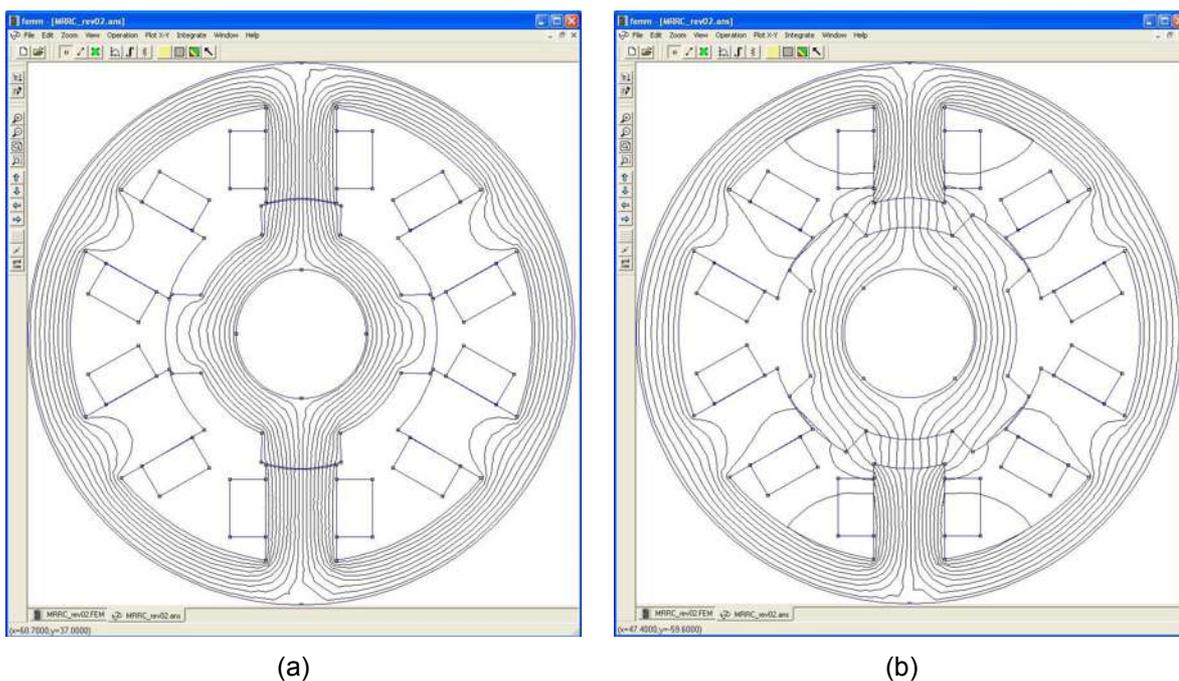


Figura 3.3 – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da MRRC pelo MEF, para (a) a posição alinhada e (b) a posição desalinhada.

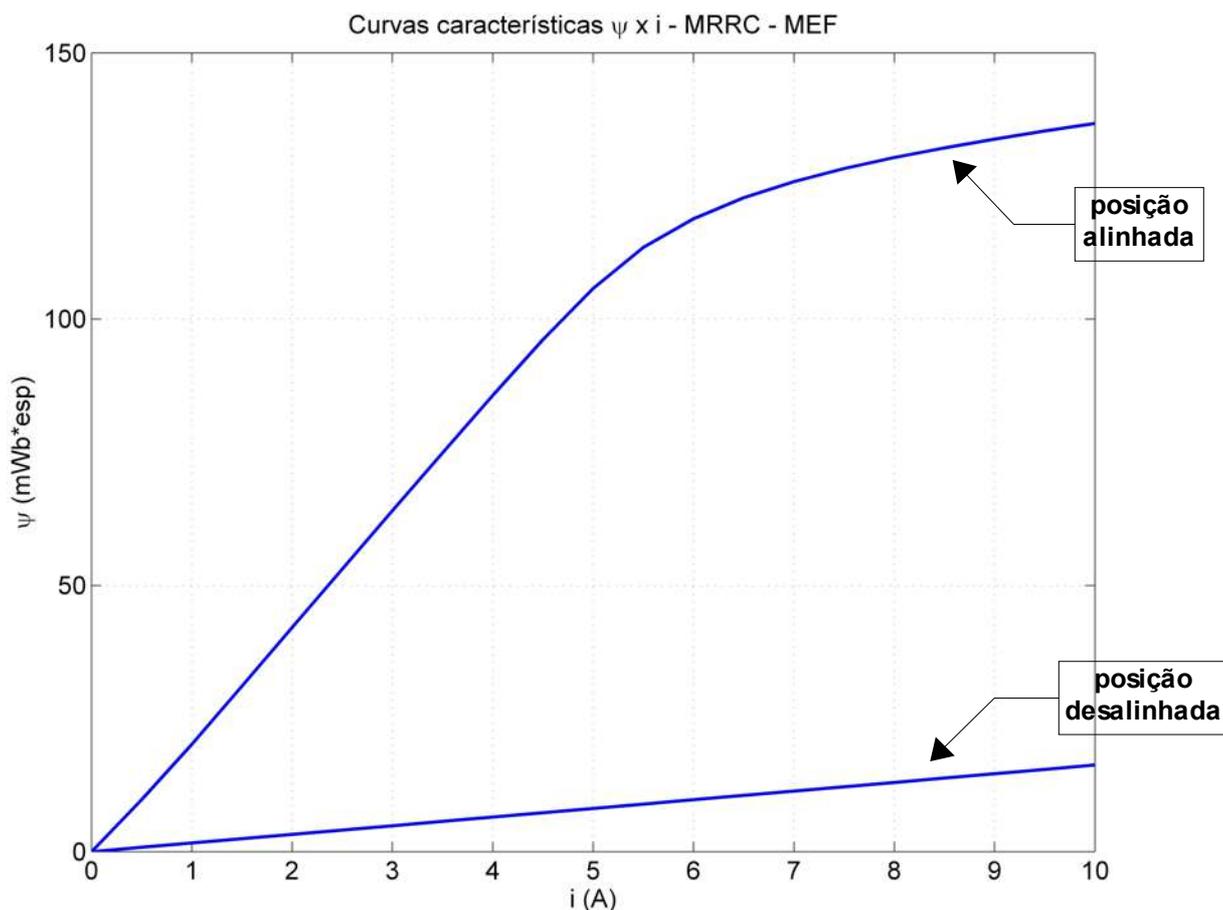


Figura 3.4 – Curvas características da MRRC, obtidas através de simulação pelo MEF.

Os valores críticos³ do gráfico da Figura 3.4, obtidos na simulação da MRRC através do MEF, são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através do MEF

Variável	Valor
ψ_S	101,8 mWb*esp
i_S	4,783 A
ψ_D	16,27 mWb*esp
i_{NOM}	10 A
ψ_A	136,76 mWb*esp

3.1.1.2. Máquina linear

A análise da máquina linear através do MEF é feita para suas 3 fases, já que sua geometria define linhas de fluxo magnético, na fase “interna”, com melhor

³ valores utilizados no cálculo do conjugado médio da MRRC, indicados na Figura 2.9.

acoplamento magnético do que as linhas de fluxo magnético das duas fases “externas”. Além disso, através da simulação pelo MEF é possível detectar esta diferença de fluxo magnético entre a fase interna e as duas fases externas, já que sua modelagem baseia-se nas geometrias da máquina e da região adjacente a ela.

Os parâmetros de simulação utilizados com o MEF, são mostrados nas Tabelas 3.3 a 3.5, e foram especificados de maneira similar ao apresentado no subitem 3.1.1.1.

Tabela 3.3 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase A)

Posição do translador (mm)	Número de nós	Número de elementos	Elemento finito	Precisão
0 (desalinhada)	4.043	8.037	triângulo	10^{-8}
6 (1/3 de alinhamento)	4.124	8.193	triângulo	10^{-8}
12 (2/3 de alinhamento)	4.056	8.064	triângulo	10^{-8}
18 (alinhada)	4.031	8.010	triângulo	10^{-8}

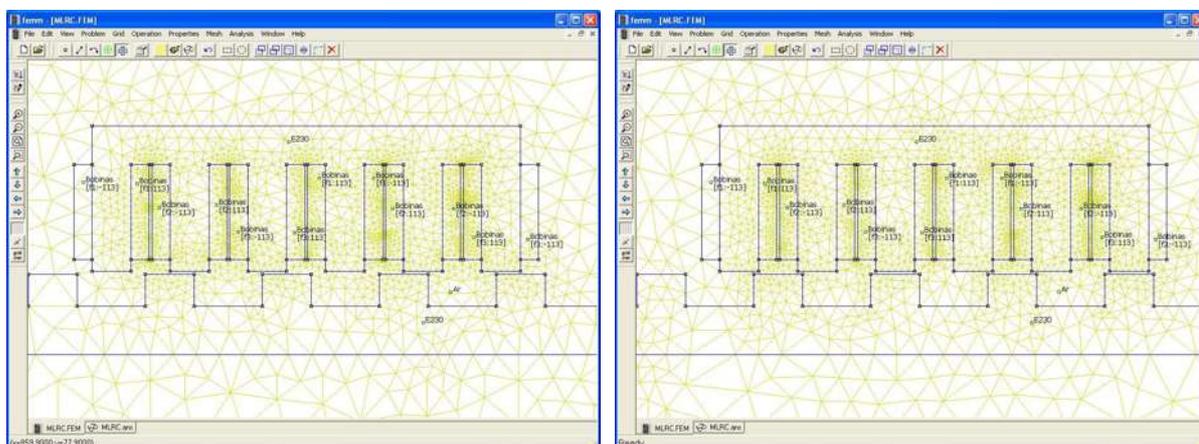
Tabela 3.4 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase B)

Posição do translador (mm)	Número de nós	Número de elementos	Elemento finito	Precisão
0 (desalinhada)	4.056	8.064	triângulo	10^{-8}
6 (1/3 de alinhamento)	4.031	8.010	triângulo	10^{-8}
12 (2/3 de alinhamento)	4.026	8.001	triângulo	10^{-8}
18 (alinhada)	4.029	8.370	triângulo	10^{-8}

Tabela 3.5 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MEF (Fase C)

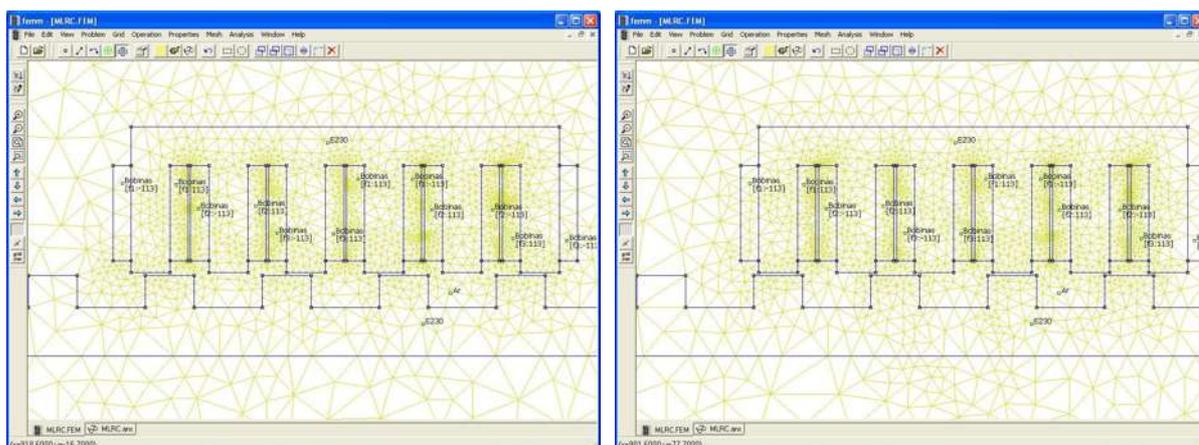
Posição do translador (mm)	Número de nós	Número de elementos	Elemento finito	Precisão
0 (desalinhada)	4.026	8.001	triângulo	10^{-8}
6 (1/3 de alinhamento)	4.029	8.370	triângulo	10^{-8}
12 (2/3 de alinhamento)	4.044	8.039	triângulo	10^{-8}
18 (alinhada)	4.226	8.401	triângulo	10^{-8}

Nas Figuras 3.5a a 3.7d são apresentadas as malhas geradas no FEMM, para a geometria da MLRC, para as fases A, B e C, utilizando os valores das Tabelas 1.6 e 1.7.



(a)

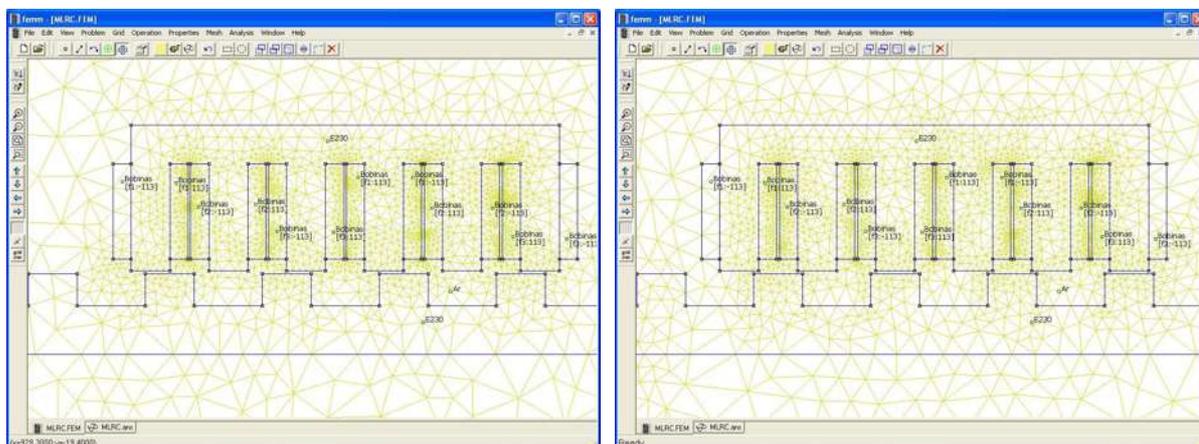
(b)



(c)

(d)

Figura 3.5 – Geração de malhas da geometria da fase A da MLRC para simulação através do MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.



(a)

(b)

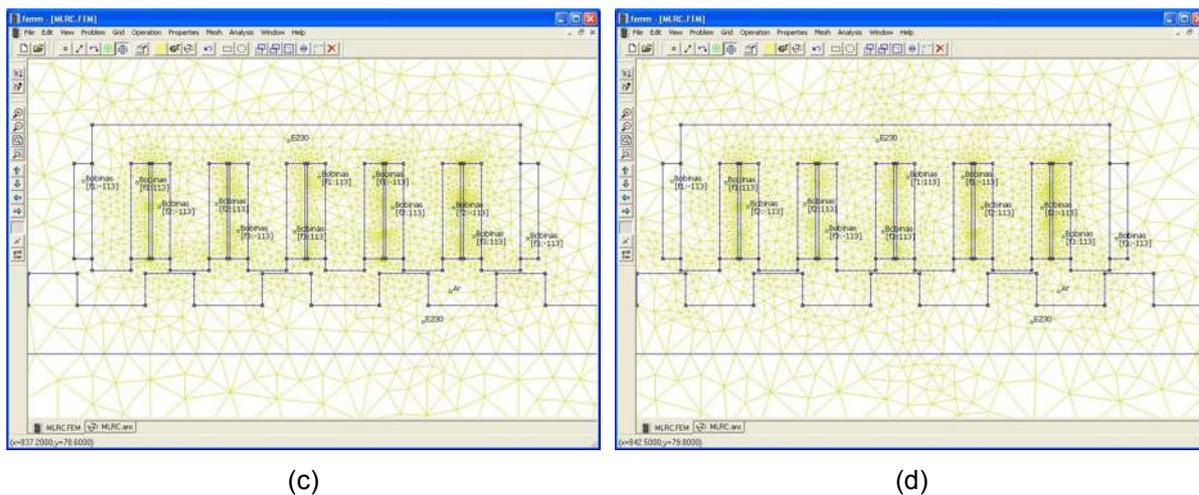


Figura 3.6 – Geração de malhas da geometria da fase B da MLRC para simulação através do MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.

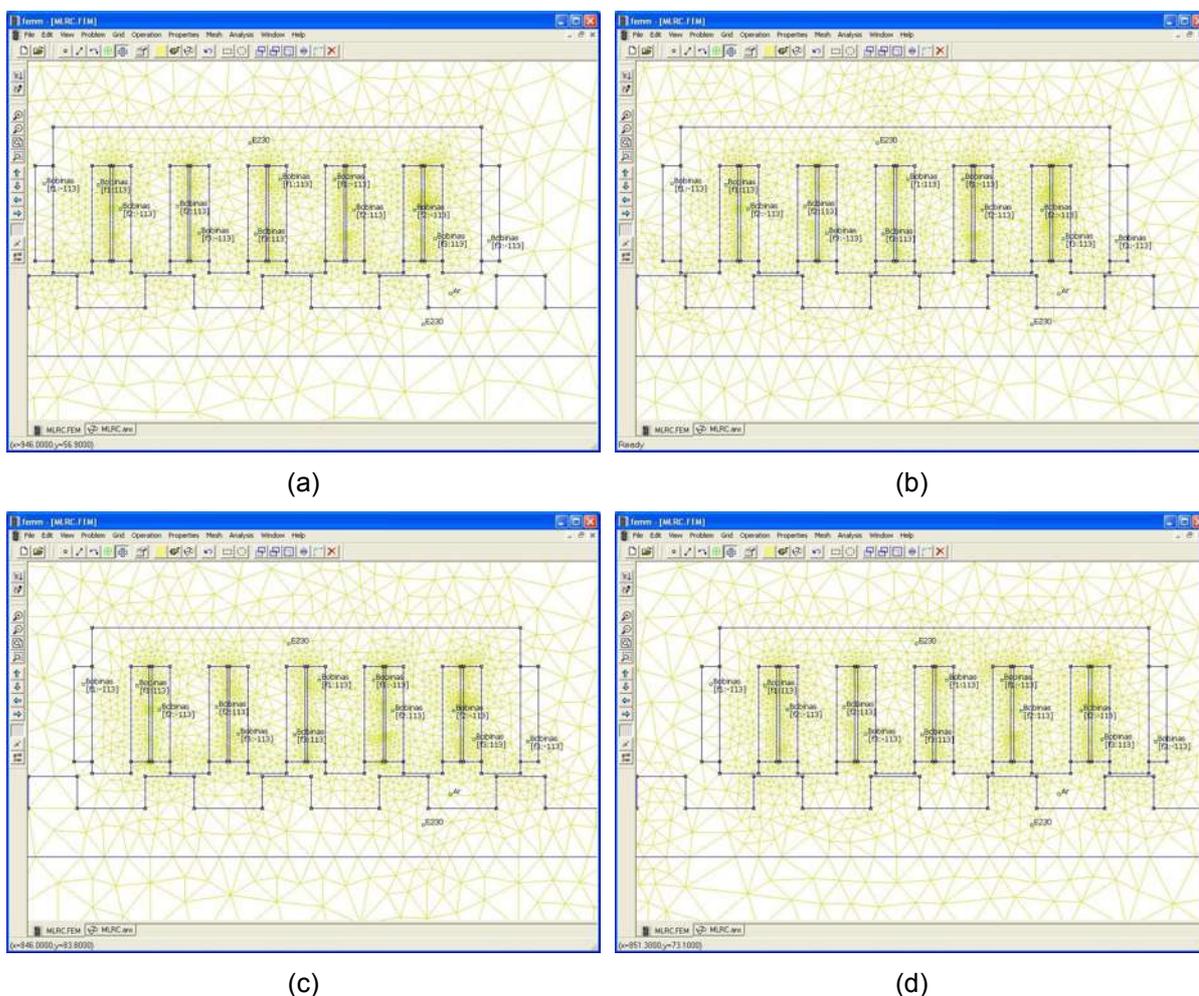
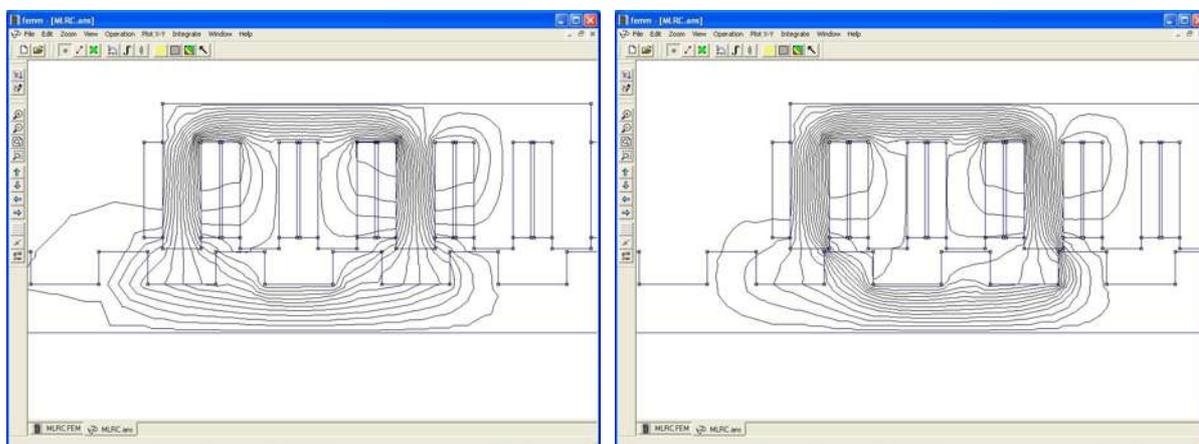


Figura 3.7 – Geração de malhas da geometria da fase C da MLRC para simulação através do MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.

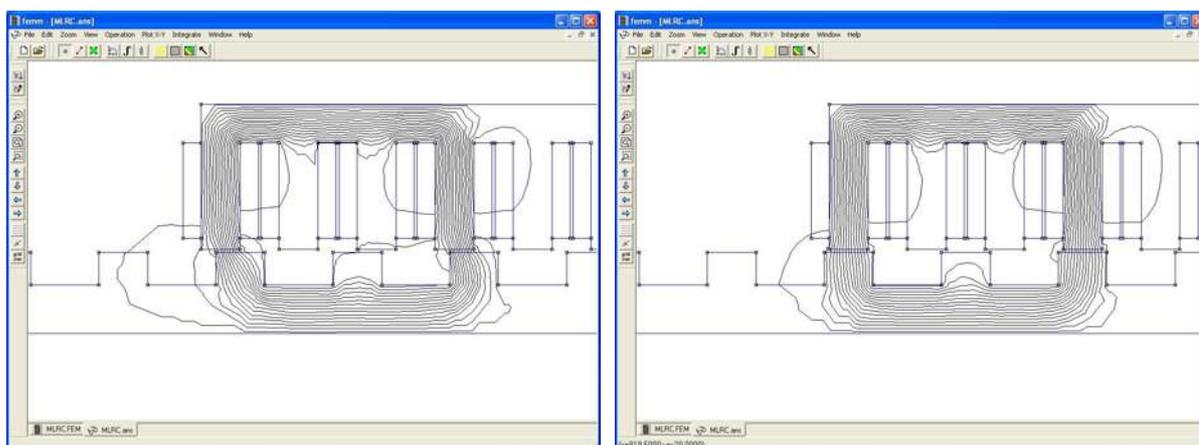
Nas Figuras 3.8a a 3.10d são apresentadas as linhas de fluxo magnético

resultantes da simulação pelo FEMM, para as fases A, B e C, nas 4 posições da máquina.



(a)

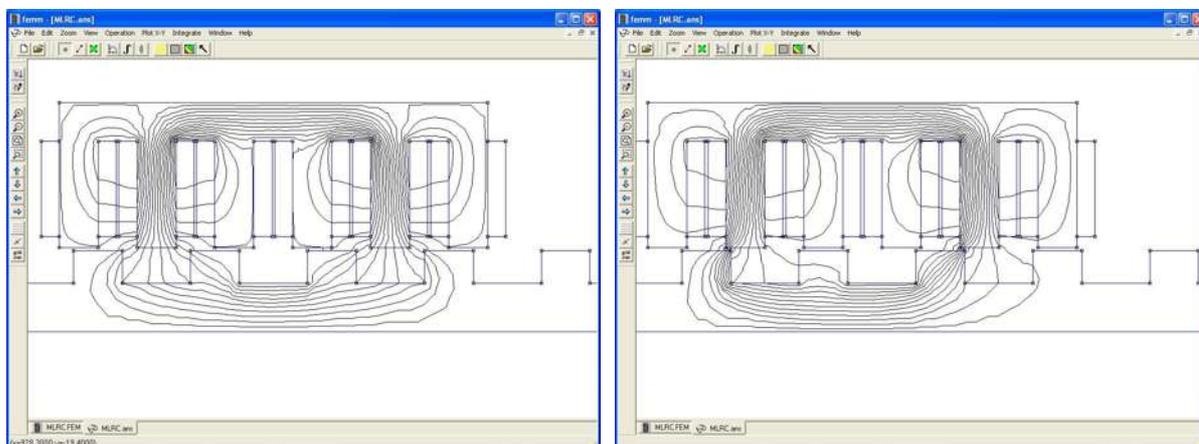
(b)



(c)

(d)

Figura 3.8 – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase A da MLRC pelo MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.



(a)

(b)

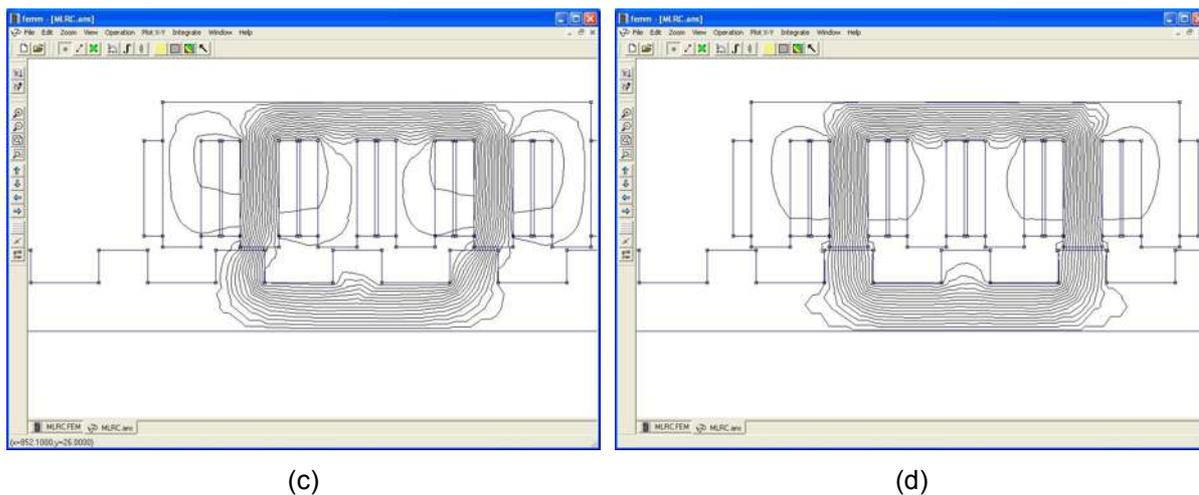


Figura 3.9 – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase B da MLRC pelo MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.

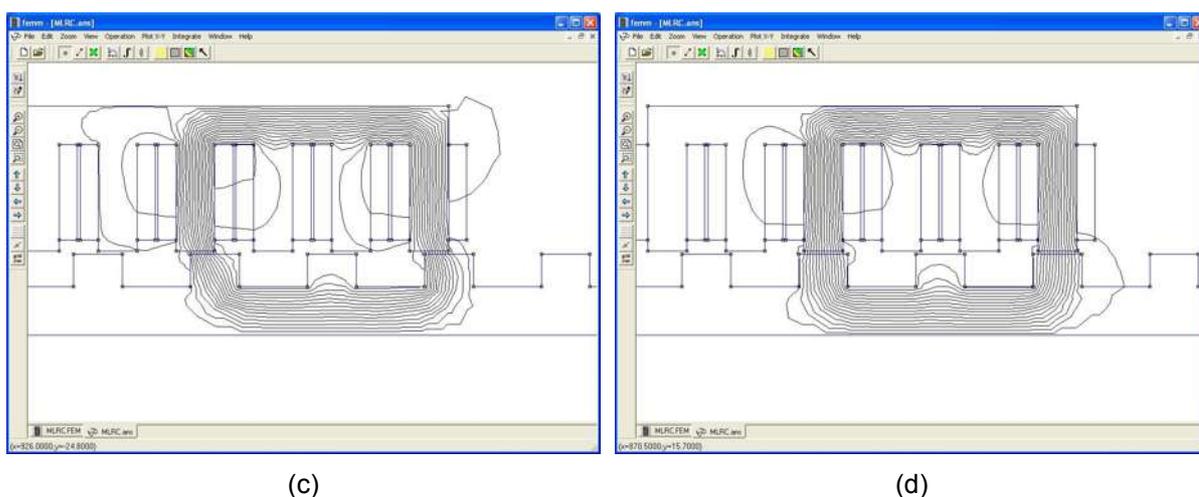
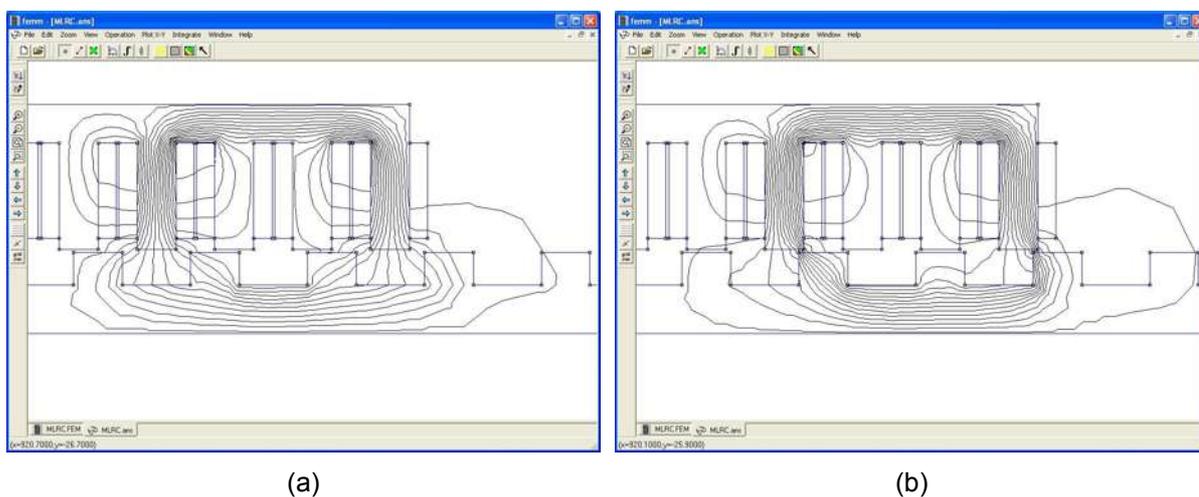


Figura 3.10 – Linhas de fluxo magnético resultantes da análise da fase C da MLRC pelo MEF, para as posições (a) alinhada, (b) de 2/3 de alinhamento, (c) de 1/3 de alinhamento e (d) desalinhada.

O procedimento de simulação através do MEF foi similar ao apresentado

no subitem 3.1.1.1, passos de (a) a (h), sendo a única diferença (além da geometria da própria máquina, que é linear), a corrente nominal de fase, que é de 8,5A para esta máquina linear.

Os gráficos das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do MEF, para as fases A, B e C, são mostrados nas Figuras 3.11 a 3.13.

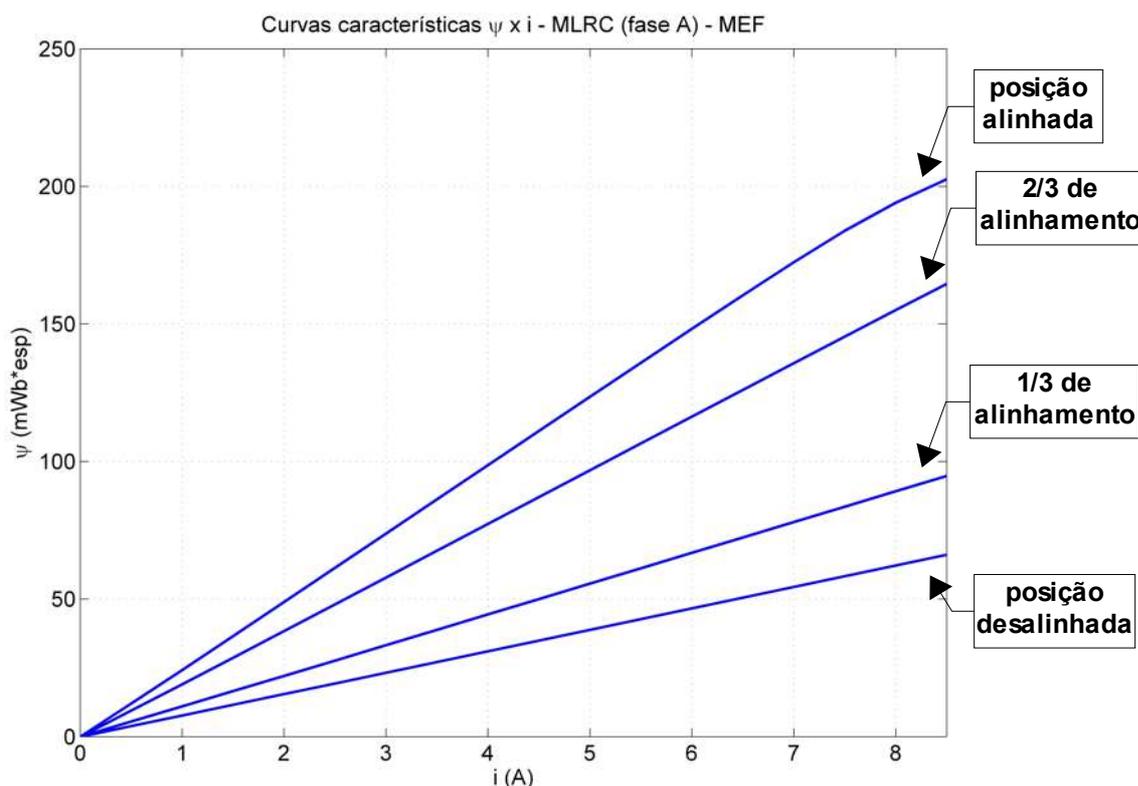


Figura 3.11 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF.

3.1.2. Método de análise do circuito magnético (MACM)

Nos subitens 3.1.2.1 e 3.1.2.2 são apresentados os resultados das simulações para a MRRC e a MLRC, através do método de análise do circuito magnético (MACM).

A modelagem matemática utilizada para implementar a simulação das máquinas rotativa e linear pelo MACM, está descrita no subitem 2.1.2.

3.1.2.1. Máquina rotativa

A implementação do MACM, aplicado para cálculo das características eletromagnéticas estáticas da MRRC, é limitada a apenas uma fase da máquina, pela mesma razão mencionada no subitem 3.1.1.1.

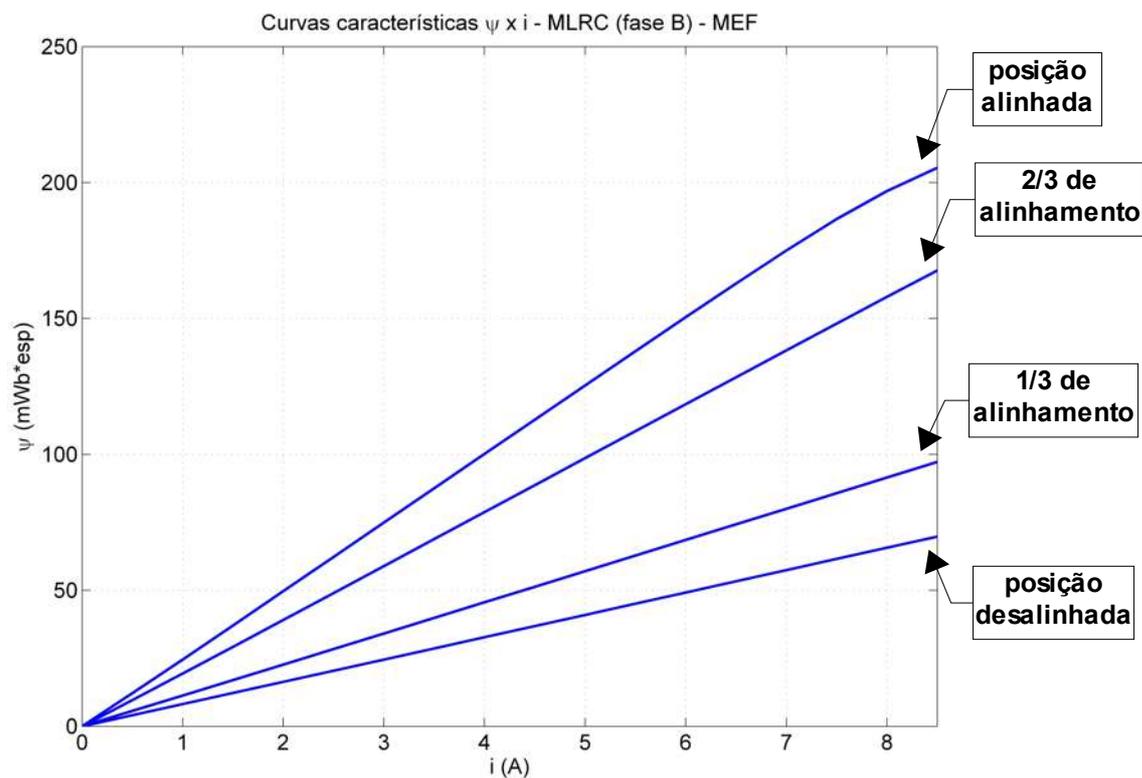


Figura 3.12 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF.

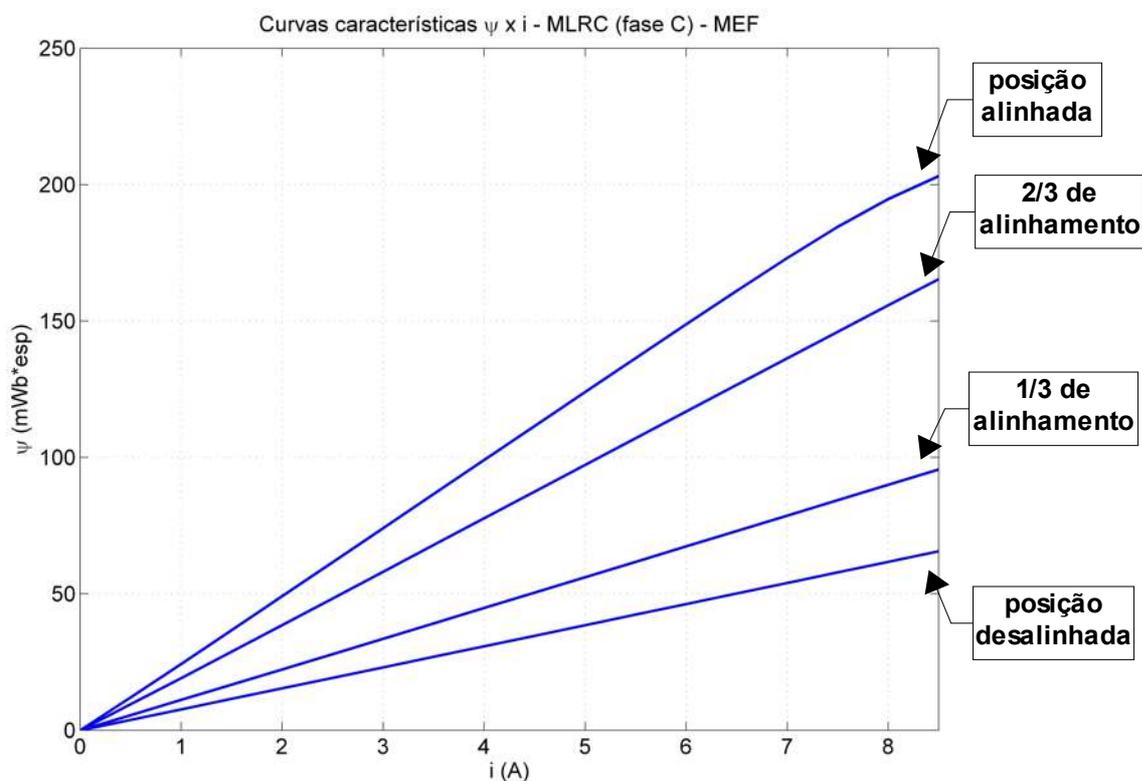


Figura 3.13 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de simulação pelo MEF.

Os parâmetros de simulação utilizados com o MACM, são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros de simulação da MRRC através do MACM

Posição do rotor (°)	Número de caminhos de fluxo magnético	$B_{MÁX}$ (T)	Precisão
0 (desalinhada)	7	1,8	10^{-2}
45 (alinhada)	2	1,8	10^{-2}

O procedimento adotado para simulação da MRRC pelo MACM foi o seguinte:

- (a) define-se as dimensões geométricas da máquina, além de suas características eletromagnéticas (permeabilidade do entreferro de ar e curva B versus H do aço que compõe o núcleo magnético da máquina);
- (b) define-se o vetor de correntes para os quais serão calculados o fluxo concatenado de fase. Neste caso, optou-se pela variação da corrente de fase em passos 0,5A até o valor nominal de corrente da máquina, de 10A;
- (c) executa-se a simulação, e obtém-se os resultados (fluxo concatenado e indutância de fase) para as posições que foram equacionadas e definidas no método iterativo.

O gráfico das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do MACM, para as posições alinhada e desalinhada da MRRC, é mostrado na Figura 3.14.

Os valores críticos do gráfico da Figura 3.14, obtidos na simulação da MRRC através do MACM, são mostrados na Tabela 3.7.

3.1.2.2. Máquina linear

A análise da máquina linear através do MACM é feita para apenas uma fase da máquina, já que na implementação da simulação por este método, para a máquina linear, foi desprezado o efeito de extremidade [57].

Os parâmetros da simulação pelo MACM, são mostrados na Tabela 3.8.

O gráfico das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do MACM, para as 4 posições da MLRC, é mostrado na Figura 3.15.

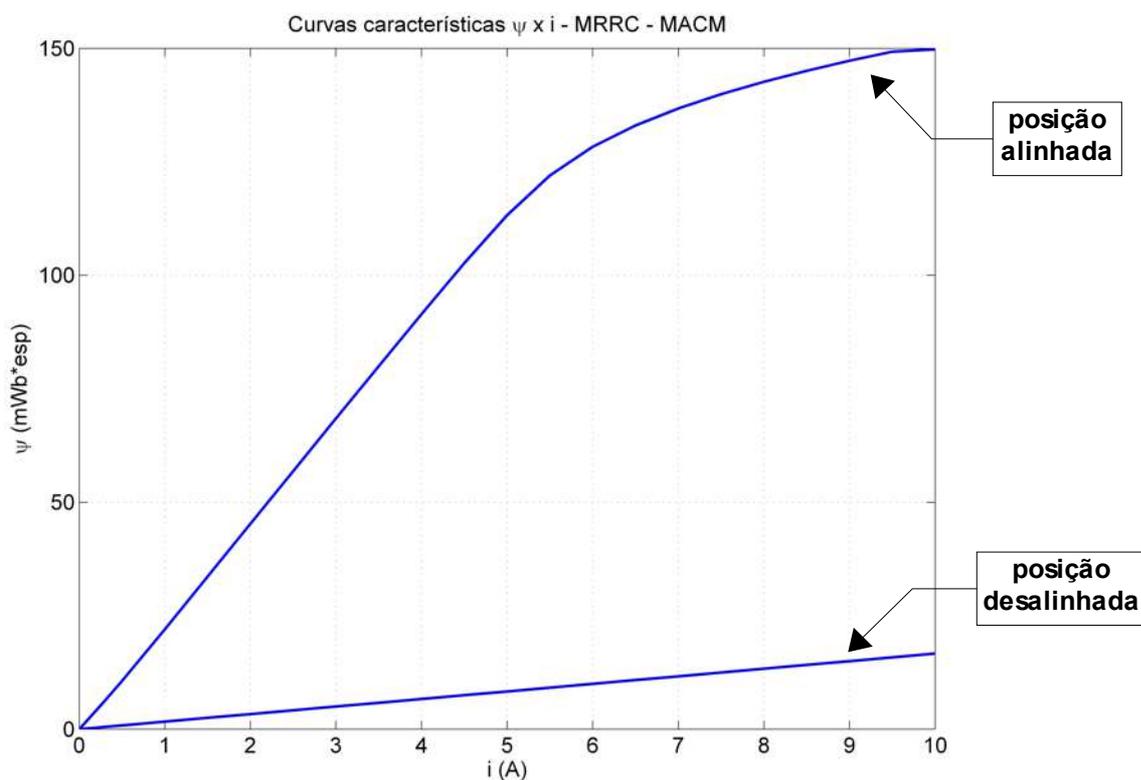


Figura 3.14 – Curvas características da MRRC, obtidas através de simulação pelo MACM.

Tabela 3.7 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através do MACM

Variável	Valor
ψ_S	102,3 mWb*esp
i_S	4,482 A
ψ_D	16,66 mWb*esp
i_{NOM}	10 A
ψ_A	149,75 mWb*esp

Tabela 3.8 – Parâmetros de simulação da MLRC através do MACM

Posição do translador (mm)	Número de caminhos de fluxo magnético	$B_{MÁX}$ (T)	Precisão
0 (desalinhada)	10	1,8	10^{-2}
6 (1/3 de alinhamento)	11	1,8	10^{-2}
12 (2/3 de alinhamento)	10	1,8	10^{-2}
18 (alinhada)	7	1,8	10^{-2}

3.2. Estimação das características mecânicas

Nos subitens 3.2.1 e 3.2.2 são apresentados os parâmetros utilizados e os resultados obtidos na estimação das características mecânicas da máquina rotativa, com base nos resultados das simulações mostrados no subitem 3.1.

3.2.1. Método dos elementos finitos (MEF)

Os resultados apresentados no subitem 3.2.1.1 estão baseados nas características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.1.1.

3.2.1.1. Máquina rotativa – estimação do conjugado médio

Os resultados da estimação do conjugado médio da máquina rotativa, baseado no MEF, através dos métodos trapezoidal e da parábola são apresentados nos subitens 3.2.1.1.1 e 3.2.1.1.2.

3.2.1.1.1. Método trapezoidal

Aplicando-se a modelagem descrita no subitem 2.2.1.1 para as características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.1.1, obteve-se os valores mostrados na Tabela 3.9.

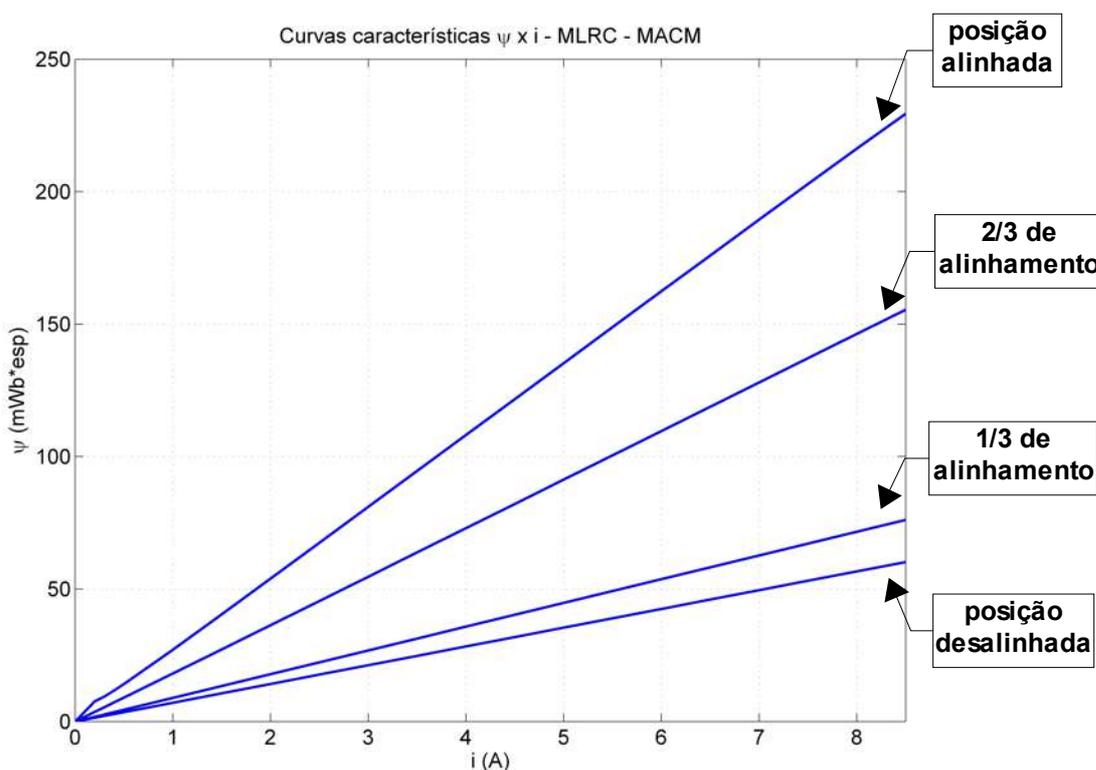


Figura 3.15 – Curvas características da MLRC, obtidas através de simulação pelo MACM.

3.2.1.1.2. Método da parábola

Aplicando-se a modelagem descrita no subitem 2.2.1.2 para as características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.1.1, foram obtidos os valores mostrados na Tabela 3.10.

3.2.2. Método da análise do circuito magnético (MACM)

Os resultados apresentados no subitem 3.2.2.1 estão baseados nas características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.2.1.

Tabela 3.9 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método trapezoidal com base no MEF

Variável	Valor
Energia magnética armazenada (W_E)	471,6 mJ
Coenergia (W_C)	814,6 mJ
Energia nominal total (W)	1.286,2 mJ
Percentual de conversão de energia (Q)	63,33 %
Conjugado médio ($C_{(MED)}$)	1,556 N*m

Tabela 3.10 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método da parábola com base no MEF

Variável	Valor
Energia magnética armazenada (W_E)	481 mJ
Coenergia (W_C)	805,2 mJ
Energia nominal total (W)	1.286,2 mJ
Percentual de conversão de energia (Q)	62,6 %
Conjugado médio ($C_{(MED)}$)	1,538 N*m

3.2.2.1. Máquina rotativa – estimação do conjugado médio

Os resultados da estimação do conjugado médio da máquina rotativa, baseado no MACM, através dos métodos trapezoidal e da parábola são apresentados nos subitens 3.2.2.1.1 e 3.2.2.1.2.

3.2.2.1.1. Método trapezoidal

Aplicando-se a modelagem descrita no subitem 2.2.1.1 para as características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.2.1, obteve-se os valores mostrados na Tabela 3.11. Para aplicação deste método, foram considerados 20

valores de corrente (de 0 a 10A), com incrementos de 0,5A.

3.2.2.1.2. Método da parábola

Aplicando-se a modelagem descrita no subitem 2.2.1.2 para as características eletromagnéticas obtidas no subitem 3.1.2.1, obteve-se os valores mostrados na Tabela 3.12.

Tabela 3.11 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método trapezoidal com base no MACM

Variável	Valor
Energia magnética armazenada (W_E)	515,5 mJ
Coenergia (W_C)	898,7 mJ
Energia nominal total (W)	1.414,2 mJ
Percentual de conversão de energia (Q)	63,55 %
Conjugado médio ($C_{(MED)}$)	1,716 N*m

Tabela 3.12 – Valores relacionados à estimação do conjugado médio da MRRC através do método da parábola com base no MACM

Variável	Valor
Energia magnética armazenada (W_E)	545,6 mJ
Coenergia (W_C)	868,6 mJ
Energia nominal total (W)	1.414,2 mJ
Percentual de conversão de energia (Q)	61,42 %
Conjugado médio ($C_{(MED)}$)	1,659 N*m

3.3. Comparação dos resultados das simulações das características estáticas

Neste item, é apresentada uma comparação dos resultados das características estáticas da MRRC e da MLRC, obtidos através dos métodos de simulação apresentados nos itens 3.1 e 3.2. Todas as comparações são feitas tomando como base os resultados obtidos através do MEF.

3.3.1. Características eletromagnéticas

Os resultados das características eletromagnéticas estáticas das duas máquinas – obtidos através de simulações computacionais – são apresentados nos subitens 3.3.1.1 e 3.3.1.2.

3.3.1.1. Máquina rotativa

As curvas das características eletromagnéticas estáticas da MRRC, obtidas pelo MEF e pelo MACM, são apresentadas na Figura 3.16. Na Tabela 3.13, são mostrados os erros percentuais entre os valores de fluxo concatenado obtidos pelos dois métodos de simulação utilizados, para três valores críticos de corrente (nas posições alinhada e desalinhada): um na região linear (3A), o segundo no joelho da curva característica (5,5A) e um terceiro ponto na região de saturação e que equivale à própria corrente nominal da MRRC (10A).

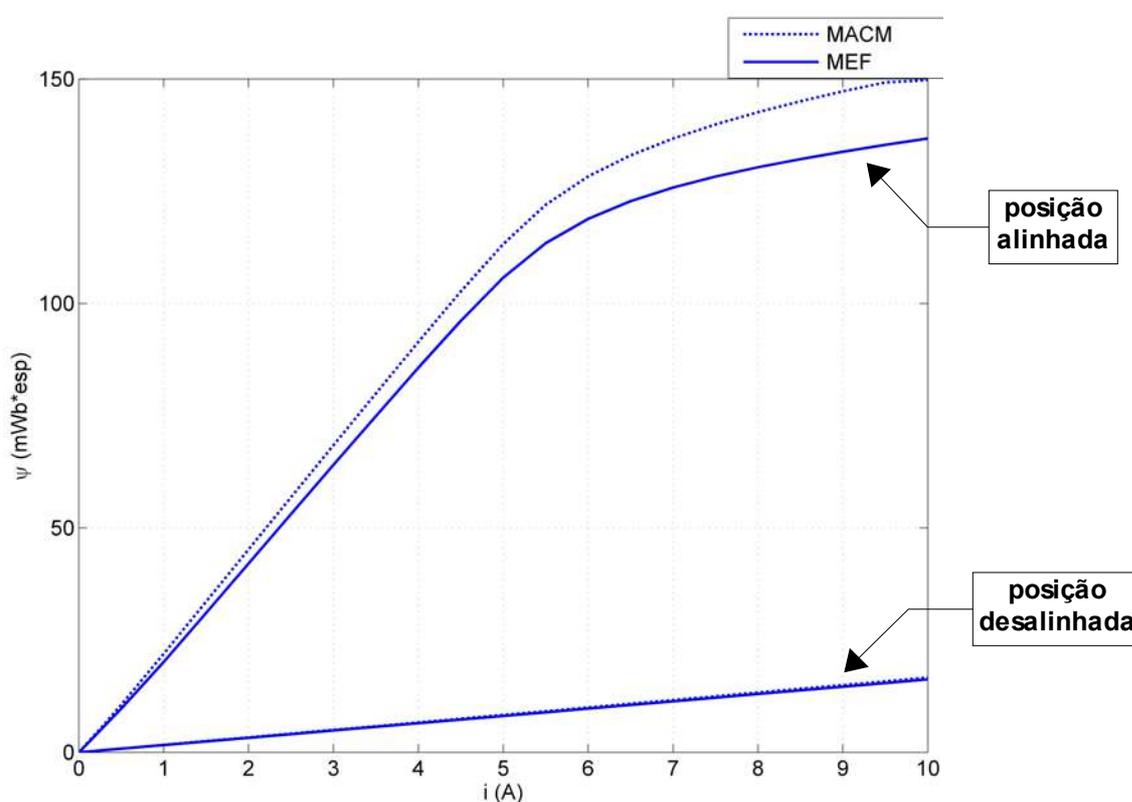


Figura 3.16 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo MACM.

Tabela 3.13 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através de simulações computacionais

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)		Diferença (%)
		MEF	MACM	
alinhada	3	64,04	68,43	6,86
	5,5	113,5	122	7,49
	10	136,8	149,8	9,5
desalinhada	3	4,87	4,99	2,46
	5,5	8,93	9,15	2,46
	10	16,27	16,66	2,4

Com base na Figura 3.16 e nos resultados da Tabela 3.13, verifica-se que a implementação do MACM fornece resultados bastante próximos do MEF, para a posição desalinhada. Esta posição corresponde ao intervalo de operação da máquina na região linear da curva de magnetização (*B versus H*) do aço, havendo, portanto, menor (ou praticamente nenhuma) influência do efeito de saturação do aço. Já quando o rotor encontra-se na posição alinhada, verifica-se que a diferença entre as curvas características obtidas pelo MEF e pelo MACM aumenta, como resultado da influência das não-linearidades eletromagnéticas existentes no intervalo de operação da MRRC na região de saturação da curva de magnetização do aço.

3.3.1.2. Máquina linear

As curvas das características eletromagnéticas estáticas da MLRC, obtidas pelo MEF (considerando as 3 fases) e pelo MACM, são apresentadas na Figura 3.17. Na Tabela 3.14, são mostrados os erros percentuais entre os valores de fluxo concatenado obtidos pelos dois métodos de simulação utilizados, para três valores críticos de corrente (nas posições alinhada, com 2/3 de alinhamento, 1/3 de alinhamento e desalinhada): um na região linear (3A), o segundo no joelho da curva característica (7,5A) e um terceiro ponto na região de saturação e que equivale à própria corrente nominal da MLRC (8,5A).

Com base na Figura 3.16 e nos resultados da Tabela 3.13, verifica-se um comportamento similar da MLRC ao que foi obtido para a MRRC: a diferença entre os valores obtidos pelo MACM, em relação ao MEF, é menor na região linear (valores baixos de corrente) e maior na região de operação de saturação (valores de corrente próximos ao nominal). Também é importante ressaltar, considerando apenas os resultados obtidos, para cada uma das 3 fases, através das simulações pelo MEF, os valores de fluxo concatenado maiores da fase B (fase “interna”), em relação às fases A e C (fases “externas”), que é uma consequência do efeito de extremidade [57]. Conforme mencionado no subitem 3.1.2.2, na implementação do MACM para a MLRC foi desprezado o efeito de extremidade, resultando no mesmo valor de fluxo concatenado para as 3 fases da MLRC.

3.3.2. Características mecânicas

Os resultados da característica mecânica estática da MRRC – obtidos através de simulações computacionais – são apresentados no subitem 3.3.2.1.

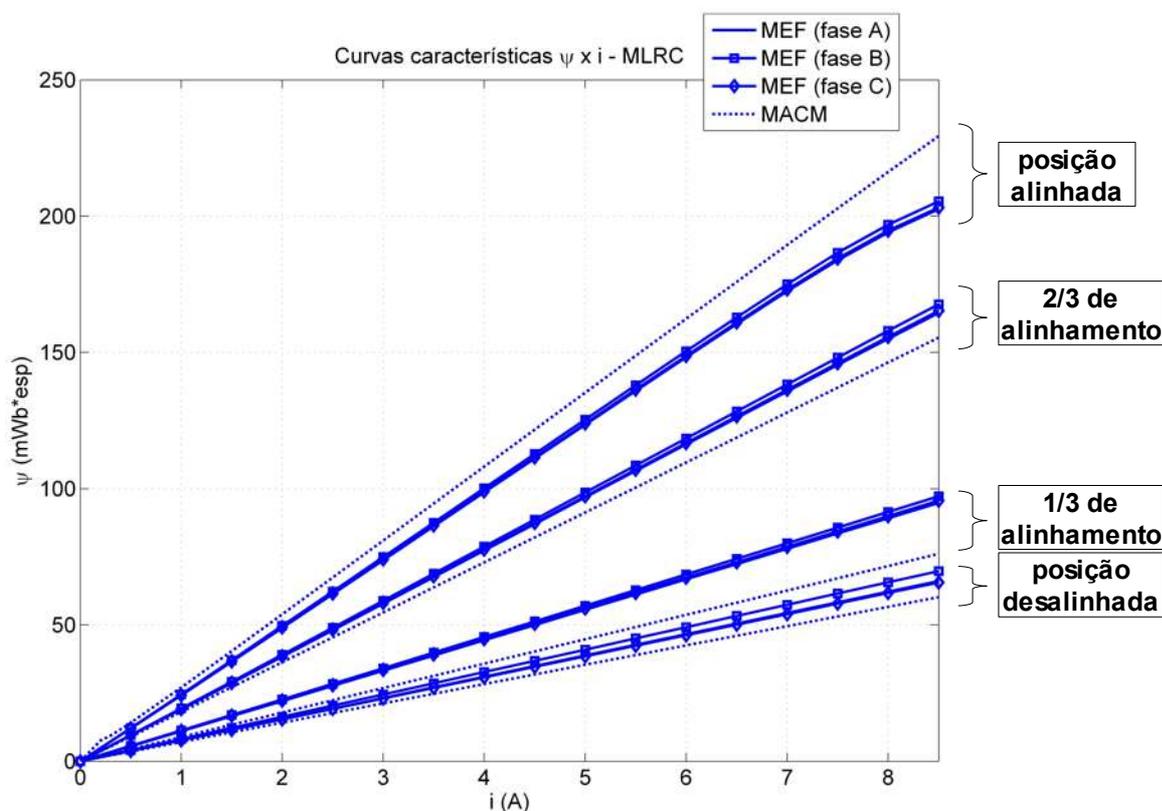


Figura 3.17 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF (considerando as 3 fases) e pelo MACM.

Tabela 3.14 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através de simulações computacionais

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)				Diferença (%)		
		MEF			MACM	Fase A	Fase B	Fase C
		Fase A	Fase B	Fase C				
alinhada	3	73,8	74,9	74,1	81	9,8	8,1	9,3
	7,5	183,8	186,6	184,5	202,9	10,4	8,7	10
	8,5	202,6	205,4	203,1	229,4	13,2	11,7	12,9
2/3 de alinhamento	3	57,8	58,9	58,1	54,6	5,5	7,3	6
	7,5	145,4	148,1	146,1	137,1	5,7	7,4	6,2
	8,5	164,6	167,6	165,3	155,5	5,5	7,2	5,9
1/3 de alinhamento	3	33,2	34,1	33,5	26,8	19,3	21,4	20
	7,5	83,6	85,7	84,3	67,2	19,6	21,6	20,3
	8,5	94,8	97,2	95,6	76,1	19,7	21,7	20,4
desalinhada	3	23,2	24,5	23,1	21,2	8,6	13,5	8,2
	7,5	58,3	61,5	57,9	53,1	8,9	13,7	8,3
	8,5	66,1	69,8	65,6	60,2	8,9	13,7	8,2

3.3.2.1. Máquina rotativa

Na Tabela 3.15 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para o conjugado médio da MRRC, com base nas simulações realizadas pelos métodos trapezoidal e da parábola (baseados nas curvas de magnetização obtidas pelo MEF

Tabela 3.15 – Comparação entre os valores do conjugado médio da MRRC obtidos por simulação computacional

Método de caracterização eletromagnética	Método de estimação do conjugado médio	Conjugado médio nominal (N*m)	Diferença (%)
MEF	trapezoidal	1,556	1,17
	parábola	1,538	
MACM	trapezoidal	1,716	3,44
	parábola	1,659	

e pelo MACM).

Com base nos dados da Tabela 3.15, observa-se que a diferença entre os método trapezoidal e da parábola apresentam resultados com erros inferiores a 4%, aplicados tanto ao MACM como ao MEF. Ou seja, a escolha pelo método trapezoidal ou da parábola, para cálculo do conjugado médio da MRRC, torna-se uma questão de conveniência entre os recursos computacionais e os dados (corrente e fluxo concatenado) disponíveis sobre a máquina estudada.

Capítulo 4

Medição das características eletromecânicas das máquinas de relutância chaveada

No presente capítulo são apresentados os métodos e os resultados de medição das características estáticas da MRC, e cujos resultados de simulação constam no capítulo 3.

Para captura e tratamento, em computador, dos sinais fornecidos pelos transdutores de grandezas elétricas e mecânicas, foram utilizadas, respectivamente, uma placa de aquisição de dados e as plataformas LabVIEW® e MATLAB®.

4.1. Características eletromagnéticas

Para medição das características eletromagnéticas – curvas características ψ versus i – foram utilizados 3 métodos, aplicáveis a ambas as máquinas:

- método do teste de carga RL alimentada por corrente alternada;
- método do tempo de subida da corrente de fase;
- método do tempo de extinção da corrente de fase.

Através de medição da corrente e tensão de fase, foram obtidas, utilizando cada um destes 3 métodos, curvas características ψ versus i , das máquinas rotativa e linear.

O sistema implementado, para medição das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear, está ilustrado nas Figura 4.1 e 4.2.

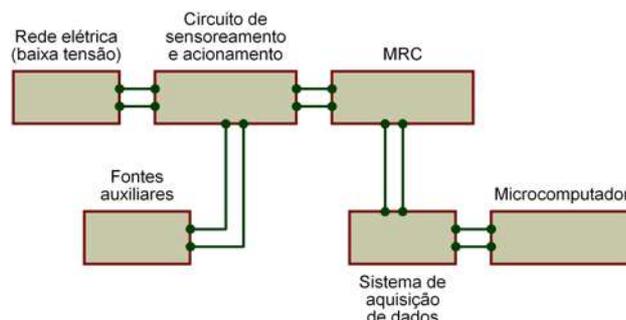


Figura 4.1 – Diagrama representativo do sistema de medição das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear.

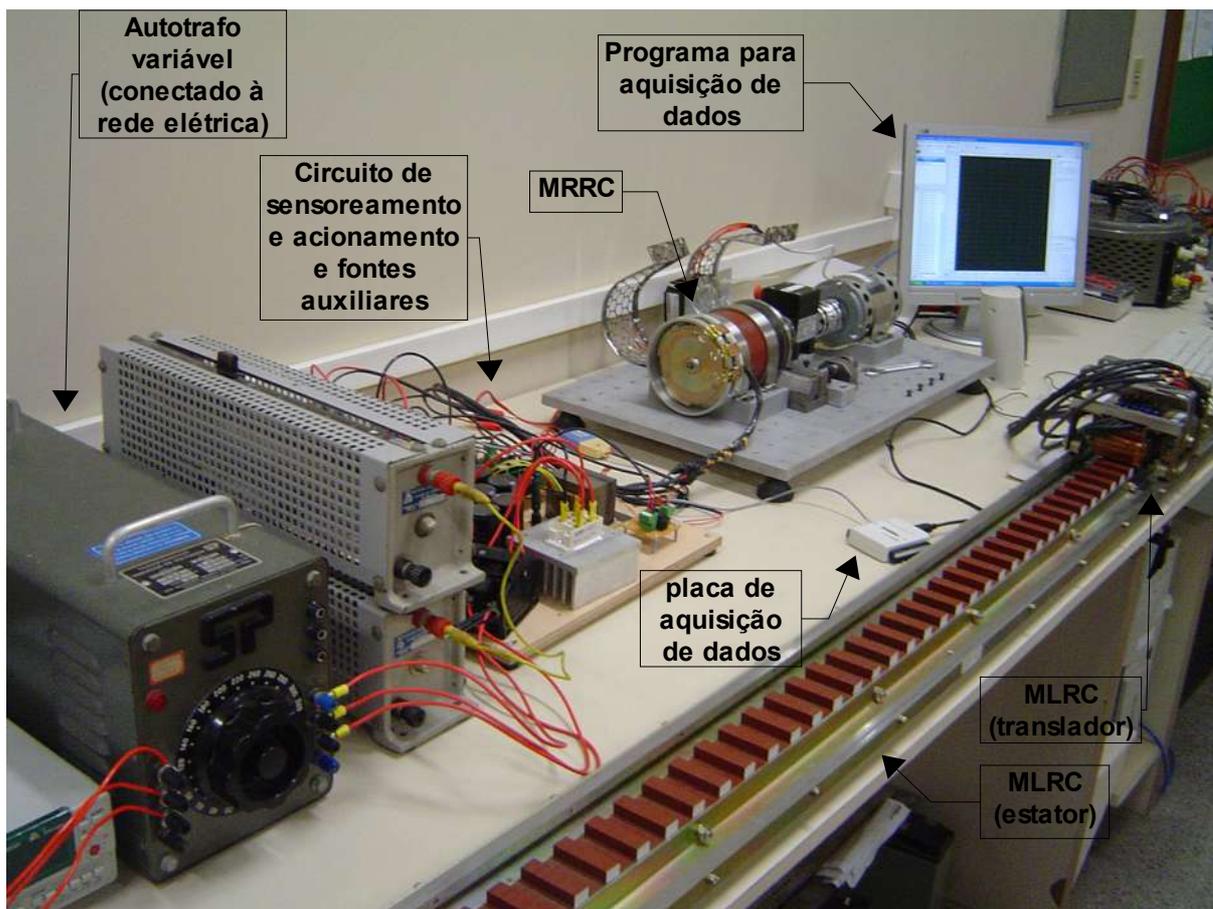


Figura 4.2 – Ilustração do sistema de medição das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear.

Conforme mostrado na Figura 4.1, o circuito de medição das características eletromagnéticas é alimentado a partir de um autotrafo variável, conectado à rede elétrica trifásica. A energia fornecida pelo autotrafo alimenta o circuito de sensoramento e acionamento, que é composto de uma placa de potência, de um sensor de tensão (LEM® LV-20P) e um sensor de corrente (LEM® LTS25-NP), utilizados para obter a tensão e a corrente na fase desejada.

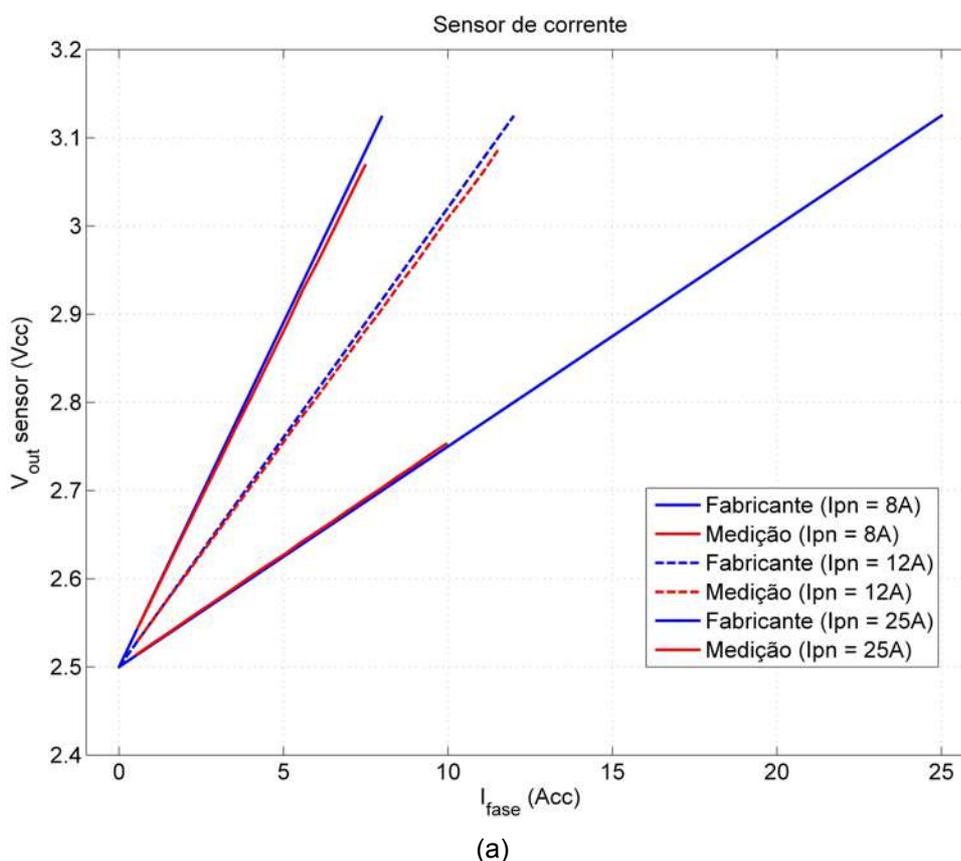
Para verificar a relação entre os sinais de entrada e saída, dos sensores de tensão e corrente, efetuou-se dois ensaios separados (um para cada sensor):

- um primeiro ensaio, no qual uma carga resistiva de 10Ω , alimentada por uma fonte de tensão variável, foi submetida a valores de corrente contínua, numa faixa de 0 a 11A, utilizando diferentes fundos de escala do sensor de corrente (8, 12 e 25A);
- um segundo ensaio, no qual a mesma carga resistiva de 10Ω , alimentada por uma fonte de tensão variável, foi submetida a valores

de tensão contínua, numa faixa de 0 a 160V.

Em ambos os ensaios, os valores obtidos nas saídas dos sensores foram registrados pela placa de aquisição utilizada, enquanto os valores de corrente e tensão ao qual estava submetida a carga era simultaneamente registrada por um multímetro digital *true RMS* (Mininpa® MDM-8146). Nas Figuras 4.3a e 4.3b são apresentados os resultados destes dois ensaios, através das quais pode-se verificar que o erro entre o valores fornecidos pelos sensores nos 2 ensaios e o valor mostrado na folha de dados do fabricante dos 2 sensores, é inferior a 0,35%.

Para aquisição dos dados fornecidos pelos sensores de corrente e tensão, utilizou-se uma placa modelo USB-6009 (fabricada pela National Instruments®), conforme mostrado na Figura 4.4. Apesar desta placa ser um modelo de baixo custo, ela fornece até 8 canais para conversão A/D, taxa de amostragem máxima de 48.000 amostras/s, resolução de 14 *bits* e conexão ao microcomputador por meio de porta USB, além de apresentar um tamanho compacto (8,51cm x 8,18cm x 2,31cm).



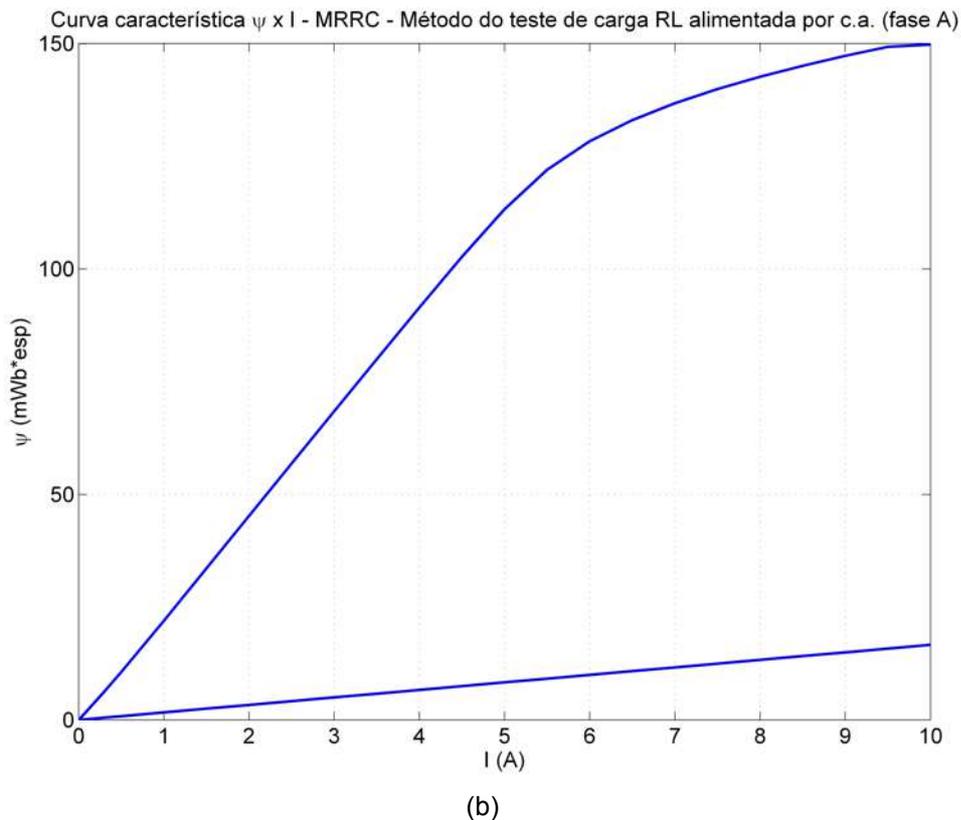


Figura 4.3 – Relação entre o valor de entrada e o valor da tensão de saída, obtidos a partir de ensaios experimentais, para os sensores de (a) corrente e de (b) tensão.

Para tratamento dos dados em microcomputador, utilizou-se os programas LabVIEW[®] e Signal Express[®], ambos do mesmo fabricante da placa de aquisição (National Instruments[®]).



Figura 4.4 – Placa de aquisição utilizada para captura e tratamento dos dados em microcomputador.

O sistema de travamento mecânico do rotor da máquina rotativa (mostrado na Figura 4.5) é composto de uma morsa (fixada na bancada da

máquina), utilizada para travar um disco de aço, acoplado ao eixo da máquina, com 72 furos em sua periferia, permitindo uma variação precisa, da posição do rotor em relação ao estator, de 5° mecânicos. Um pequeno pino de metal é utilizado para garantir o posicionamento adequado do rotor.

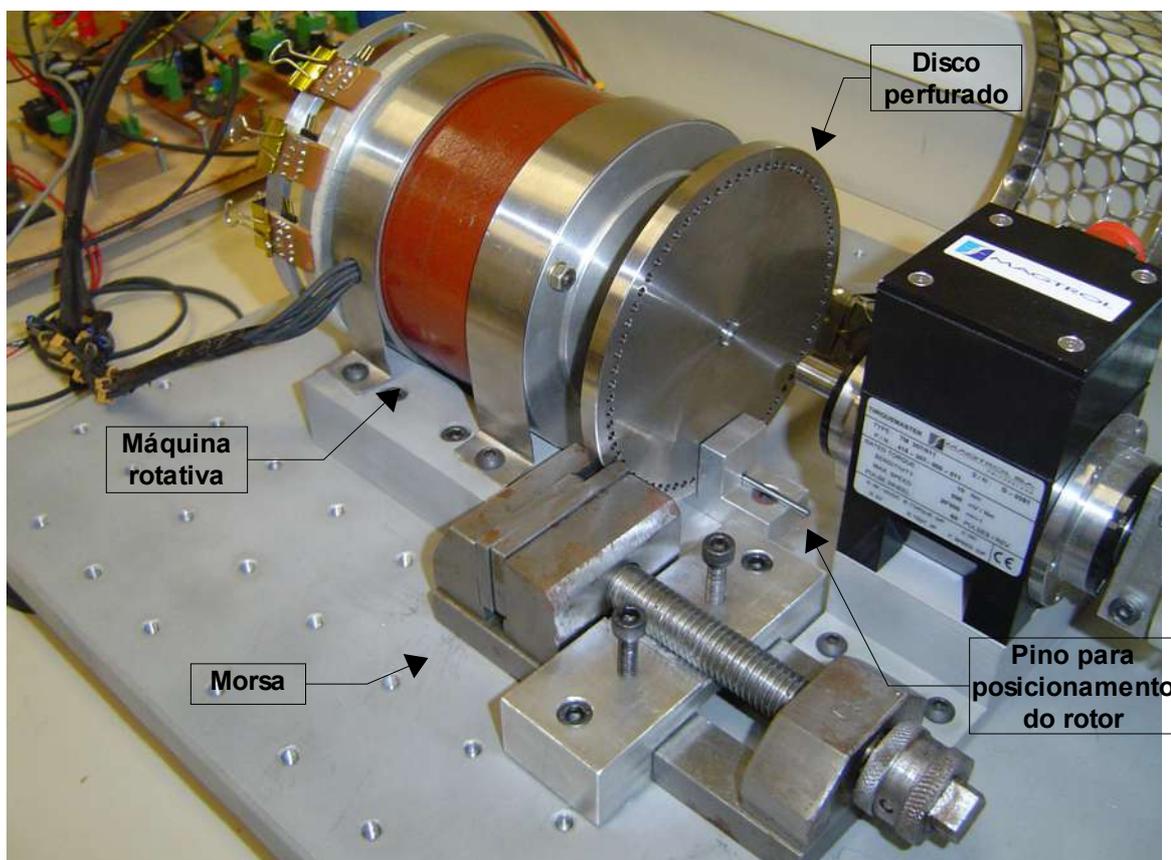


Figura 4.5 – Sistema de travamento mecânico do rotor da MRRC.

O sistema de travamento mecânico do translador da máquina linear (mostrado nas Figuras 4.6a a 4.6b) é composto de duas barras de alumínio (em formato de “U”), unidas por uma terceira barra reta de alumínio, permitindo uma fixação adequada do translador na posição desejada. A medição da distância relativa entre os pólos do estator e do translador é feita por meio de uma régua de 36mm (fixada no estator) e de um indicador do centro do pólo de cada fase (fixado no translador), posicionados de forma a se permitir a fixação do translador em diferentes posições relativas aos pólos do estator.

Outro importante aspecto sobre as medições das características estáticas da MLRC, diz respeito à variação do seu entreferro. Sempre que uma fase da MLRC é energizada, o campo magnético gera uma força normal de atração entre

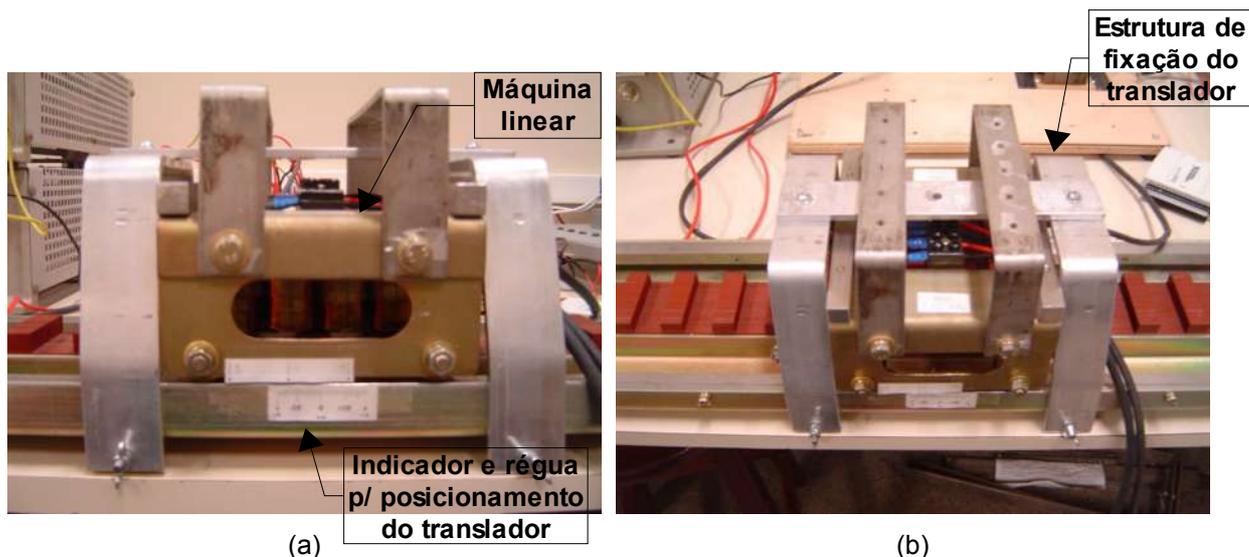


Figura 4.6 – Vistas (a) lateral e (b) frontal do sistema de travamento do translador da MLRC.

os pólos do estator e do translador, resultando em uma pequena flexão da estrutura do translador, podendo inclusive fazer com que os pólos do estator e do translador se toquem levemente, nos casos em que a corrente de fase é próxima do seu valor nominal (já que o comprimento do entreferro da máquina linear é de 1mm). Ou seja, a medida que se aumenta o valor da corrente de fase (mesmo para valores abaixo da corrente nominal), a força normal de atração entre o translador e o estator da máquina aumenta, resultando num valor de indutância – ou de fluxo concatenado de fase – maior do que o valor nominal, já que, nestas condições, o entreferro encontra-se com um comprimento inferior ao seu valor nominal (1mm). Para minimizar a influência deste tipo de erro nas medições, utilizou-se lâminas metálicas, com 1mm de espessura (feitas de aço inox 304 austenítico) e que foram posicionadas entre o translador e o estator da MLRC, conforme mostrado na Figura 4.7. Dessa forma, mesmo aumentando-se os valores de corrente de fase (até maiores que o valor nominal de 8,5A), garantiu-se o entreferro com comprimento de 1mm. É importante salientar que, na operação dinâmica da MLRC, seu entreferro sofrerá variações (devido aos próprios movimentos de aceleração e desaceleração da máquina, além de imperfeições no contato entre as rodas do translador e os trilhos laterais do estator) que poderão ser atenuadas através da implementação de uma estrutura mecânica adequada, que apresente rigidez necessária para suportar as forças normais de atração entre translador e estator, sem resultar em um aumento significativo no peso total do próprio do translador.

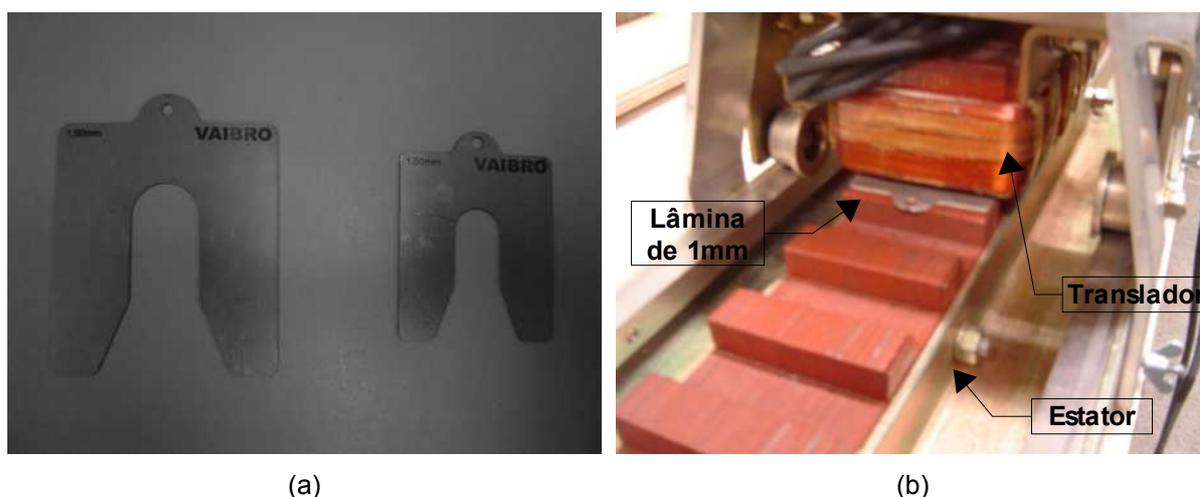


Figura 4.7 – (a) Lâminas de material não-magnético e (b) seu posicionamento entre os pólos do estator e do translador, para garantir o entreferro de 1mm nas medições das características estáticas da MLRC.

As medições com a MLRC foram feitas em cada uma de suas 3 fases, com o objetivo de se mensurar a influência do efeito de extremidade no valor do fluxo concatenado em cada uma das 3 fases [57].

As medições com a MRRC foram feitas em apenas uma de suas fases (fase A), já que a máquina rotativa não apresenta efeito de extremidade, devido à topologia inerente do seu circuito magnético, que forma um caminho fechado, concentrando todas as linhas de fluxo magnético no próprio núcleo magnético da máquina [42].

Nos subitens 4.1.1 a 4.1.3 são apresentados os resultados das medições das características eletromagnéticas estáticas para as máquinas rotativa e linear, aplicando-se os três métodos propostos. Juntamente com estes resultados, são apresentadas as configurações dos circuitos de alimentação, acionamento, sensoreamento e fontes auxiliares, conforme mostrado na Figura 4.1, que são distintas para cada método utilizado e a metodologia de ensaio experimental de cada um dos métodos.

4.1.1. Método do teste de carga RL alimentada por corrente alternada (c.a.)

Este método consiste da aplicação de tensão e corrente senoidais, na fase da MRC, para se obter os valores de indutância e de fluxo concatenado na fase analisada [37].

Neste método, considera-se a fase da MRC como sendo um circuito RL, alimentado por tensão e corrente senoidais, conforme a Figura 4.8.

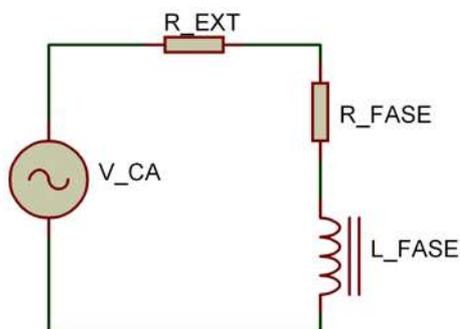


Figura 4.8 – Modelo elétrico para análise do método do teste de carga RL alimentada por c.a.

As potências aparente, ativa e reativa, envolvidas na alimentação do circuito RL, podem ser ilustradas com base no triângulo de potências, conforme a Figura 4.9.

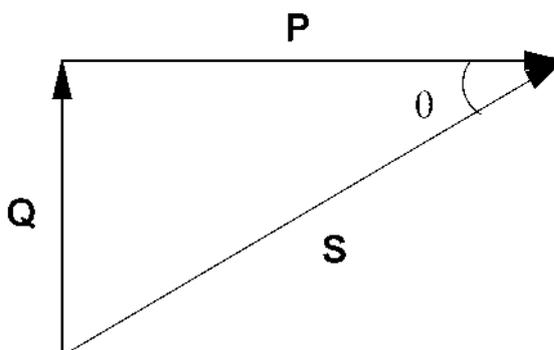


Figura 4.9 – Triângulo de potências.

A partir da Figura 4.9, obtém-se a relação entre a potência reativa e a potência aparente, expressada pela equação (4.1):

$$|Q| = |S| \cdot \text{sen } \theta \quad (4.1)$$

Como o circuito da Figura 4.8 está em série, a corrente fornecida pela fonte é a mesma que passa pelos resistores e pelo indutor, permitindo que a equação (4.1) seja reescrita em termos da reatância indutiva, obtendo-se a equação (4.2):

$$|X_L| \cdot |I_{(ef)}|^2 = |V_{(ef)}| \cdot |I_{(ef)}| \cdot \text{sen } \theta \quad (4.2)$$

Simplificando a equação (4.2), chega-se à equação (4.3):

$$|L| = \frac{|V_{(ef)}| \cdot \text{sen } \theta}{|I_{(ef)}| \cdot \omega} \quad (4.3)$$

Onde:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.4)$$

Com base na equação (4.3), é possível obter o valor da indutância de fase da MRC, medindo-se os valores eficazes da onda senoidal da tensão ($V_{(ef)}$) e da corrente de fase ($I_{(ef)}$), além da frequência (f) e do defasamento angular (θ) entre ambas. Neste trabalho, estas quatro grandezas foram obtidas a partir das formas de onda de tensão e corrente de fase da MRRC, adquiridas pela placa de aquisição de dados mostrada na Figura 4.4. De posse do valor da indutância e da respectiva corrente de fase, pode-se obter o valor do fluxo concatenado para cada posição e valor de corrente de fase medidos, conforme a equação (2.1).

O circuito para medição das características estáticas pelo método do teste de carga RL em c.a., bem como sua implementação, são mostrados nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

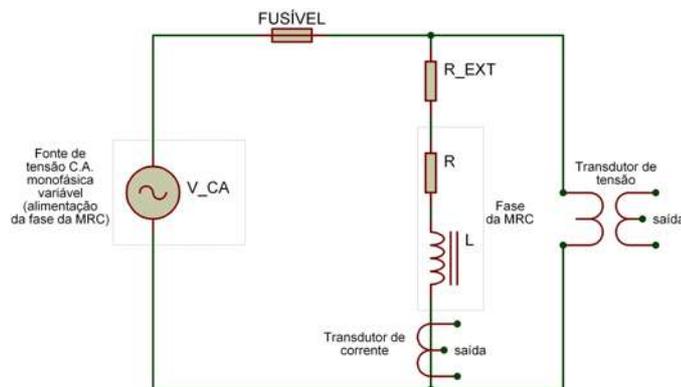


Figura 4.10 – Circuito para medição das características estáticas da MRC, pelo método do teste de carga RL em c.a.

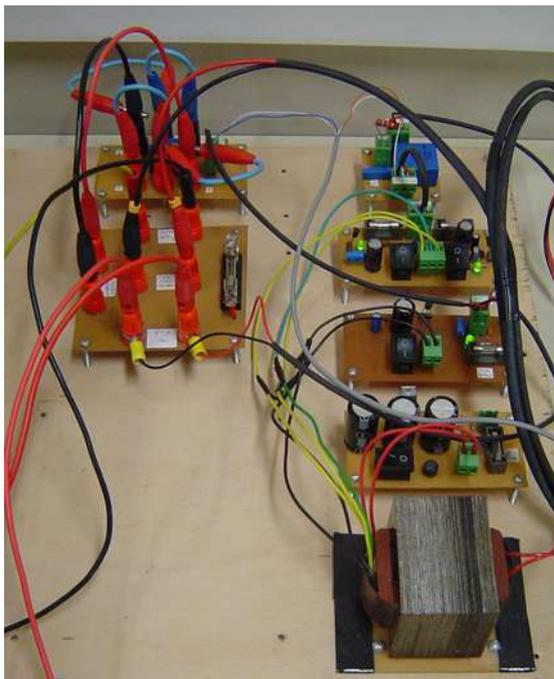


Figura 4.11 – Implementação do circuito da Figura 4.10.

Para captura e tratamento dos dados em microcomputador, foi desenvolvida uma interface em plataforma LabVIEW®, mostrada na Figura 4.12.

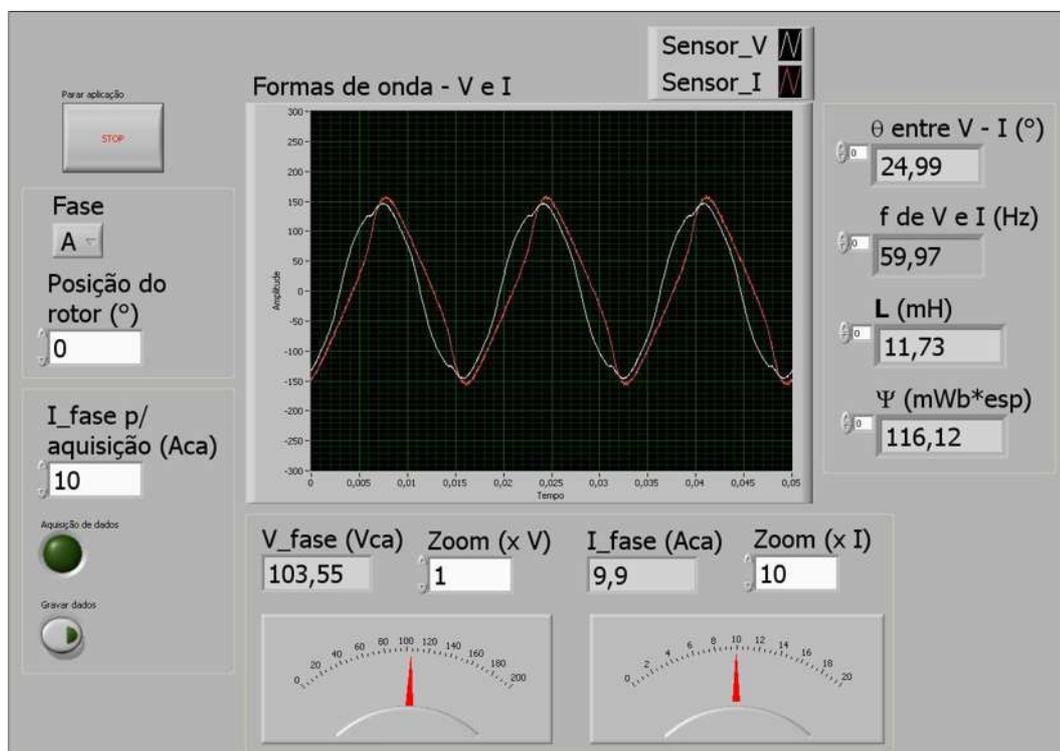


Figura 4.12 – Interface desenvolvida na plataforma LabVIEW®, para captura e tratamento dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do teste de carga RL em

c.a.

O procedimento adotado para medição das características eletromagnéticas da MRC, pelo presente método, foi o seguinte:

- (a) trava-se mecanicamente a parte móvel da MRC, na posição desejada;
- (b) mede-se o valor de R_{FASE} , e ajusta-se R_{EXT} de forma que a soma dos valores R_{FASE} e R_{EXT} seja compatível com o valor máximo de tensão capaz de ser fornecido pela fonte de alimentação. Neste caso, a soma das duas resistências foi definida em aproximadamente 10Ω ;
- (c) na interface desenvolvida, dentro da plataforma LabVIEW[®], ajuste-se o valor do campo “I_fase p/ aquisição (Aca)” com o valor eficaz de corrente que deseja-se medir;
- (d) ajusta-se a fonte de tensão, de forma que o valor do campo “I_fase (Aca)” (que representa o valor eficaz da corrente na fase da MRC) seja o mais próximo do valor definido para aquisição (conforme o item anterior);
- (e) repete-se os passos (c) e (d), até que sejam feitas as medições de todos os valores de corrente desejados, para a posição na qual foi fixada a parte móvel da MRC.

O resistor R_{EXT} (mostrado nas Figuras 4.8 e 4.10) possui um valor muito maior que o valor de R_{FASE} , e é utilizado com o objetivo de se minimizar os efeitos da variação da resistência de fase da MRC, devido ao aumento da temperatura com a passagem de corrente na fase [42].

4.1.1.1. Máquina rotativa

As condições nas quais foram realizadas as medições pelo presente método, para a MRRC, são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Condições das medições da MRRC através do método do teste de carga RL em c.a.

Grandeza	Valor
Fase medida	A
Valor de R_{FASE}	0,53 Ω
Valor de R_{EXT}	9,24 Ω
Temperatura média ambiente	23°C
Umidade relativa do ar	49%

O gráfico das curvas características ψ versus i , obtidas através do presente método, para as posições alinhada e desalinhada da MRRC, é mostrado na Figura 4.13.

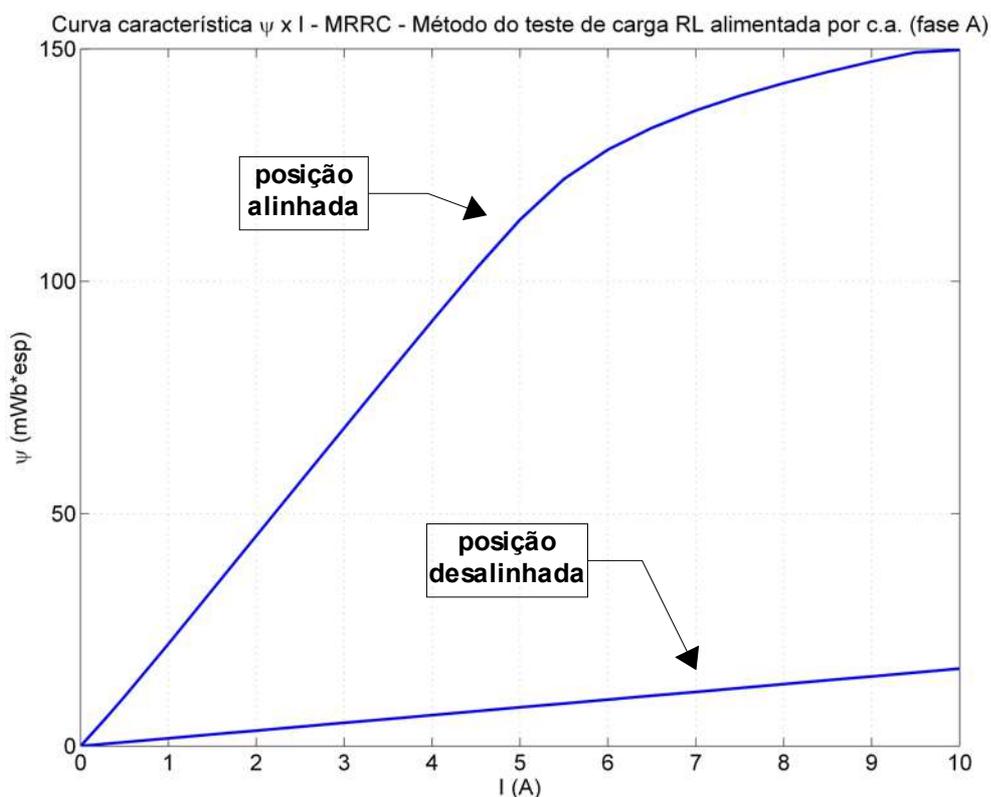


Figura 4.13 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.

Os valores críticos do gráfico da Figura 4.13, obtidos na medição da MRRC através do presente método, são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL com alimentação em c.a.

Variável	Valor
ψ_S	108,8 mWb*esp
i_S	4,783 A
ψ_D	16,66 mWb*esp
i_{NOM}	10 A
ψ_A	149,8 mWb*esp

4.1.1.2. Máquina linear

As condições sob as quais foram realizadas as medições pelo presente método, para as três fases da MLRC, são apresentadas nas Tabela 4.3 a 4.5.

Tabela 4.3 – Condições das medições da fase A da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,84 Ω
Valor de R_{EXT}	9,16 Ω
Temperatura média ambiente	23°C
Umidade relativa do ar	49%

Tabela 4.4 – Condições das medições da fase B da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,93 Ω
Valor de R_{EXT}	9,06 Ω
Temperatura média ambiente	23°C
Umidade relativa do ar	49%

Tabela 4.5 – Condições das medições da fase C da MLRC através do método do teste de carga RL em c.a.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,96 Ω
Valor de R_{EXT}	9,23 Ω
Temperatura média ambiente	23°C
Umidade relativa do ar	49%

Os gráficos das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do presente método, para as posições alinhada e desalinhada, de cada uma das fases da MLRC, são mostrados na Figuras 4.14 a 4.16.

4.1.2. Método do tempo de subida da corrente de fase

Este método consiste na aplicação de tensão e corrente contínuas, na fase da MRC, para se obter os valores de indutância e de fluxo concatenado na fase analisada [42 e 58].

Neste método, considera-se a fase da MRC como sendo um circuito RL, alimentado por tensão e corrente contínuas, conforme a Figura 4.17.

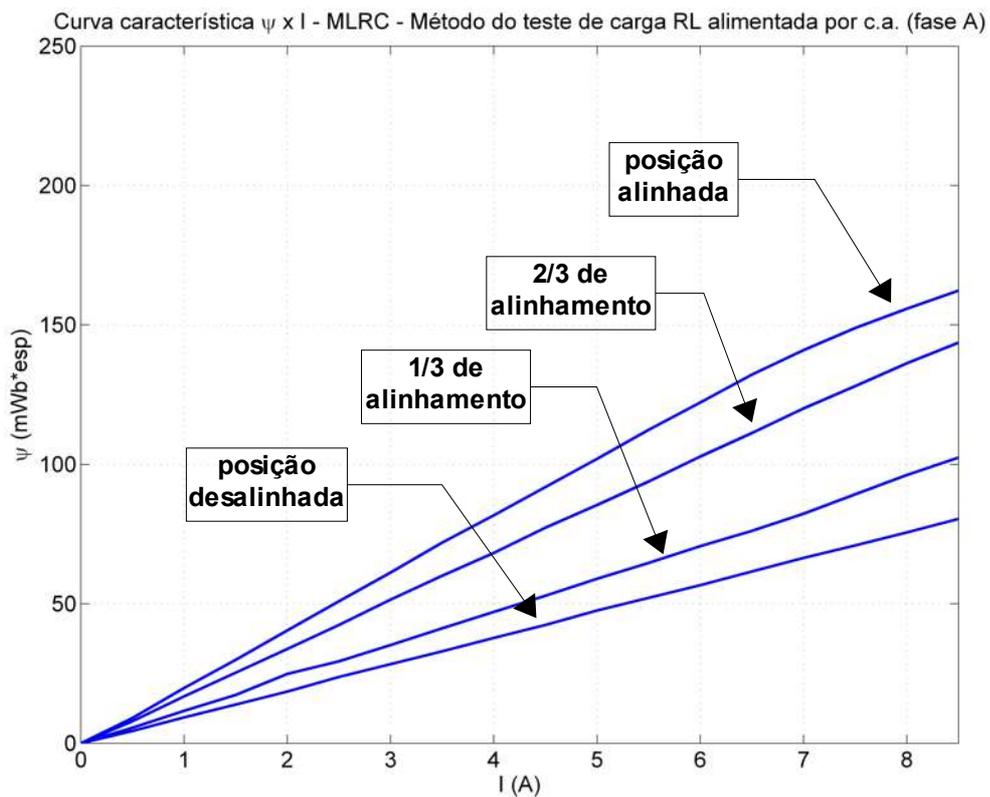


Figura 4.14 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.

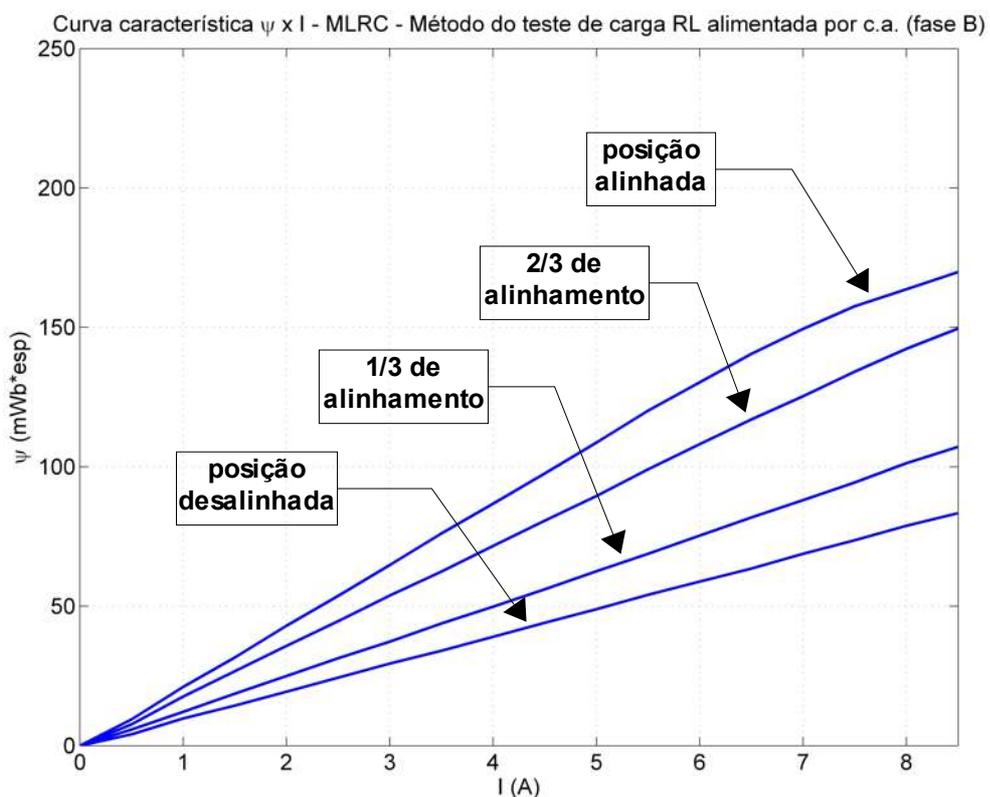


Figura 4.15 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.

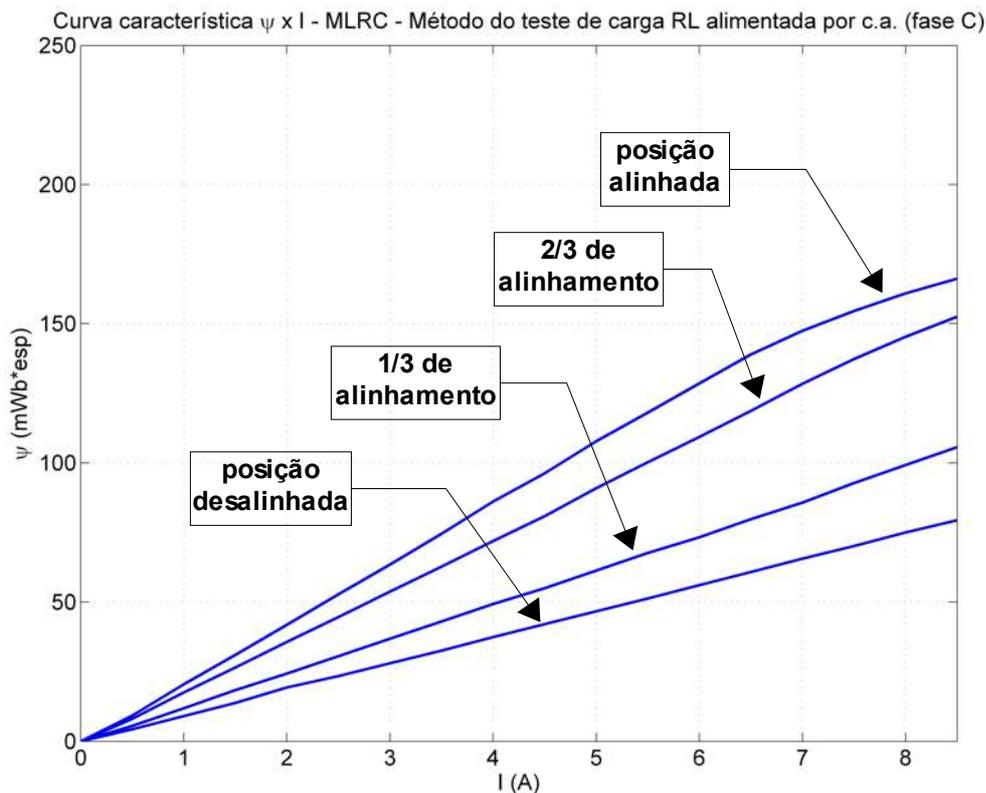


Figura 4.16 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de medição pelo método do teste de carga RL alimentada por c.a.

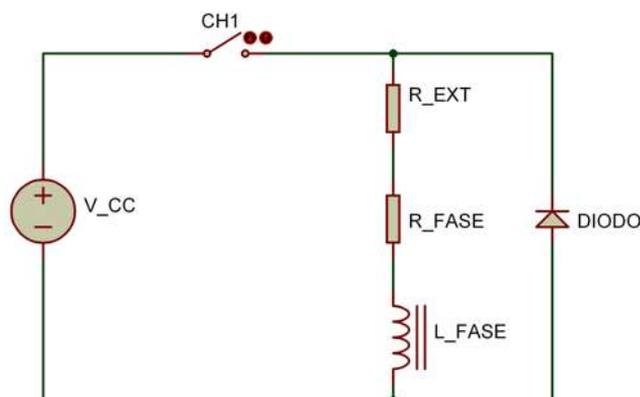


Figura 4.17 – Modelo elétrico para análise do método do tempo de subida da corrente de fase.

Inicialmente, o circuito da Figura 4.17 encontra-se desenergizado, ou seja, com a chave CH1 aberta. A fonte de tensão contínua encontra-se ajustada com um valor pré-definido de tensão positiva, capaz de fornecer o valor de corrente desejado, em regime permanente. Quando a chave CH1 é fechada, a indutância inerente à fase da MRC impede uma variação instantânea da corrente, fazendo com que haja um transitório inicial de subida da corrente que atravessa a fase da MRC. A duração deste transitório inicial é determinado pelo intervalo que começa no instante

do fechamento da chave CH1 e termina no instante de estabelecimento do valor de corrente desejado em regime permanente, conforme mostrado na Figura 4.18.

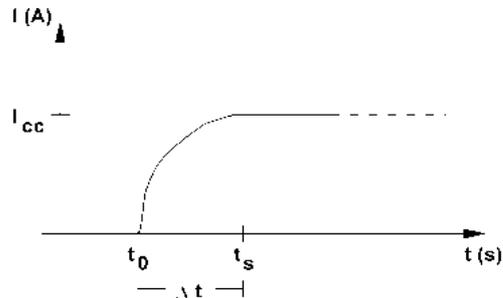


Figura 4.18 – Ilustração do transitório inicial de corrente em um circuito RL série, alimentado por corrente contínua.

A modelagem matemática do circuito mostrado na Figura 4.17 (correspondente à resposta ao degrau positivo de tensão) pode ser diretamente realizada aplicando-se a lei das tensões de Kirchhoff, sendo expressada pela equação (4.5):

$$R_{ext} \cdot I(t) + R_{fase} \cdot I(t) + L_{fase} \cdot \frac{dI(t)}{dt} = V(t) = V_{cc} \quad (4.5)$$

Reescrevendo a equação (4.5), obtém-se a equação diferencial de 1ª ordem (4.6):

$$\frac{dI(t)}{dt} + \left(\frac{R_{ext} + R_{fase}}{L_{fase}} \right) \cdot I(t) - \frac{V_{cc}}{L_{fase}} = 0 \quad (4.6)$$

As condições iniciais para este método são mostradas na equação (4.7):

$$\begin{aligned} I(t_0) &= 0 \\ I(t_s) &= I_{cc} \end{aligned} \quad (4.7)$$

A solução da equação (4.6) é expressada pela equação (4.8):

$$I(t) = \frac{V_{cc}}{R_{ext} + R_{fase}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R_{fase} + R_{ext}}{L_{fase}} \cdot t} \right) \quad (4.8)$$

Reescrevendo a equação (4.8) em função da corrente $I(t)$, e utilizando o as condições iniciais mostradas em (4.7), obtém-se a equação (4.9) para cálculo da indutância pelo método do tempo de subida da corrente de fase:

$$L_{fase} = \frac{t_s \cdot (R_{fase} + R_{ext})}{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{(R_{fase} + R_{ext}) \cdot I_{cc}}{V_{cc}}}\right)} \quad (4.9)$$

Com base na equação (4.9), é possível obter o valor da indutância de fase da MRC, a partir da aquisição das formas de onda da tensão (V_{cc}) e corrente de fase (I_{cc}), que permitem a obtenção do tempo de subida da corrente de fase (t_s). Os valores das resistências de fase (R_{fase}) e externa (R_{ext}) são medidos (utilizando o medidor *true rms* da Mininpa®, modelo MDM-8146) imediatamente antes das medições para uma determinada posição da parte móvel da máquina. O valor da resistência interna do MOSFET (quando encontra-se em condução) é desprezada, já que seu valor típico (270mΩ) é cerca de 35 vezes menor do que o somatório de R_{fase} e R_{ext} . De posse do valor da indutância e da respectiva corrente de fase, pode-se obter o valor do fluxo concatenado para cada posição e valor de corrente de fase medidos, conforme a equação (2.1).

O circuito para medição das características estáticas pelo método do tempo de subida da corrente de fase, bem como sua implementação, são mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

Para captura e tratamento dos dados em microcomputador, foi utilizado o módulo de aquisição de dados SignalExpress, integrante da plataforma LabVIEW®, mostrado na Figura 4.21.

O procedimento adotado para medição das características eletromagnéticas da MRC, pelo presente método, foi o seguinte:

- (a) trava-se mecanicamente a parte móvel da MRC, na posição desejada;
- (b) mede-se o valor de R_{FASE} , e ajusta-se R_{EXT} de forma que a soma dos valores R_{FASE} e R_{EXT} seja compatível com o valor máximo de tensão capaz de ser fornecido pela fonte de alimentação. Neste caso, a soma

das duas resistências foi definida em aproximadamente 10Ω ;

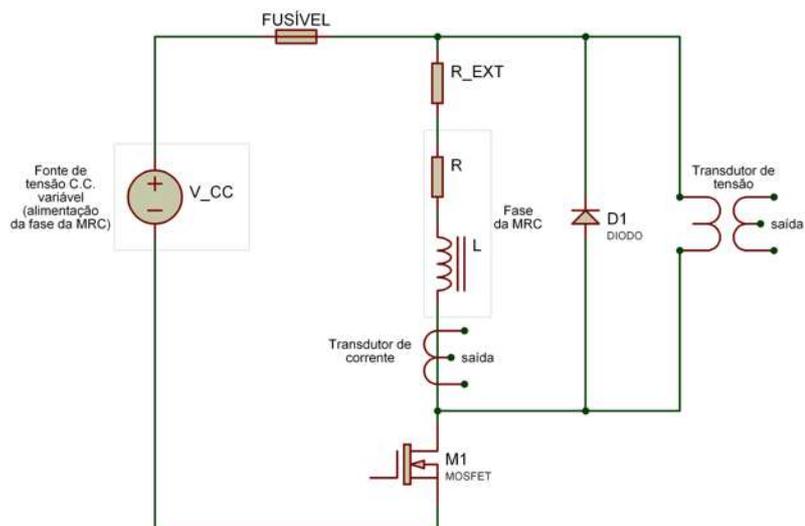


Figura 4.19 – Circuito para medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

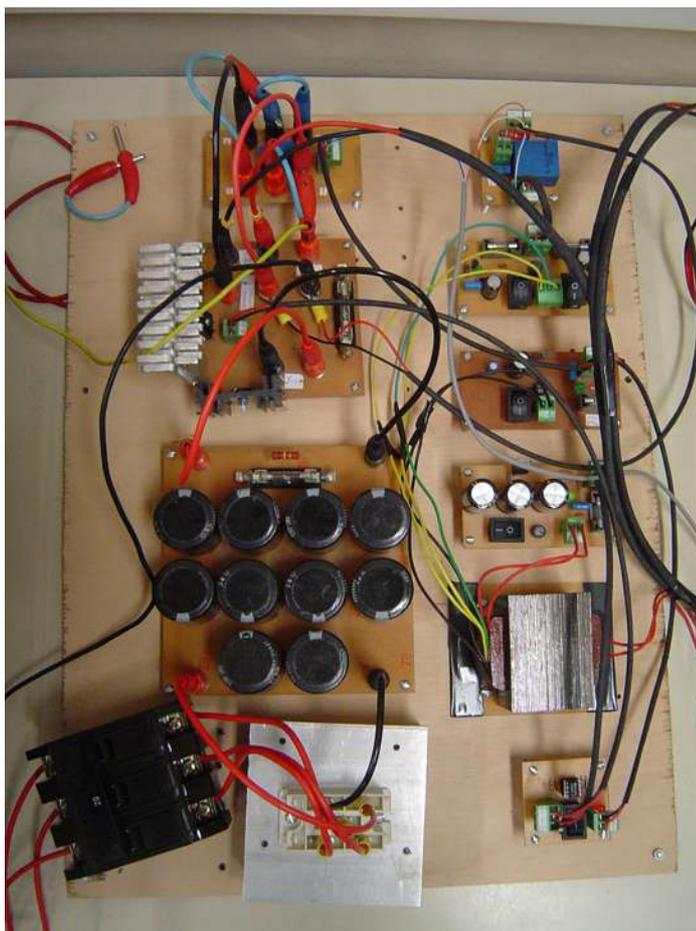


Figura 4.20 – Implementação do circuito da Figura 4.19.

- (c) ajusta-se a fonte de tensão, de forma que se obtenha, em regime permanente, o valor desejado da corrente de fase (I_{cc});
- (d) inicia-se a aquisição de dados com o módulo SignalExpress;
- (e) logo em seguida, aciona-se o transistor M1 (Figura 4.19) para que a corrente circule pela fase da MRC;
- (f) após a corrente de fase atingir o regime permanente, desliga-se o transistor M1 e a aquisição de dados é interrompida;
- (g) repete-se os passos (c) a (f), até que sejam feitas as medições de todos os valores de corrente desejados, para a posição na qual foi fixada a parte móvel da MRC.

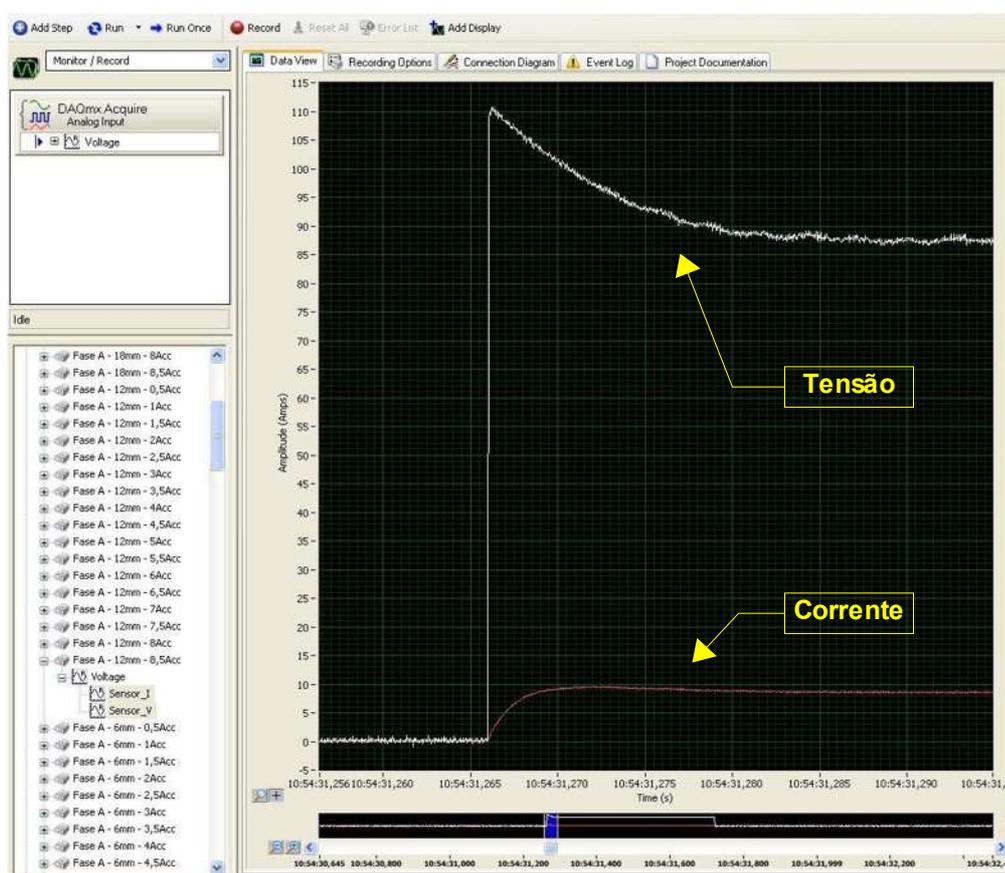


Figura 4.21 – Interface do módulo SignalExpress, utilizado para captura dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

O resistor R_{EXT} (mostrado nas Figuras 4.17 e 4.19) possui um valor muito maior que o valor de R_{FASE} , e é utilizado com o objetivo de se minimizar os efeitos da variação da resistência de fase da MRC, devido ao aumento da temperatura com a passagem de corrente na fase [42].

4.1.2.1. Máquina rotativa

As condições sob as quais foram realizadas as medições pelo presente método, para a MRRC, são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Condições das medições da MRRC através dos métodos dos tempos de subida e de extinção da corrente de fase

Grandeza	Valor
Fase medida	A
Valor de R_{fase}	0,53 Ω
Valor de R_{ext}	9,24 Ω
Temperatura média ambiente	23°C
Umidade relativa do ar	49%

O gráfico das curvas características ψ versus i , obtidas através do presente método, para as posições alinhada e desalinhada da MRRC, é mostrado na Figura 4.22.

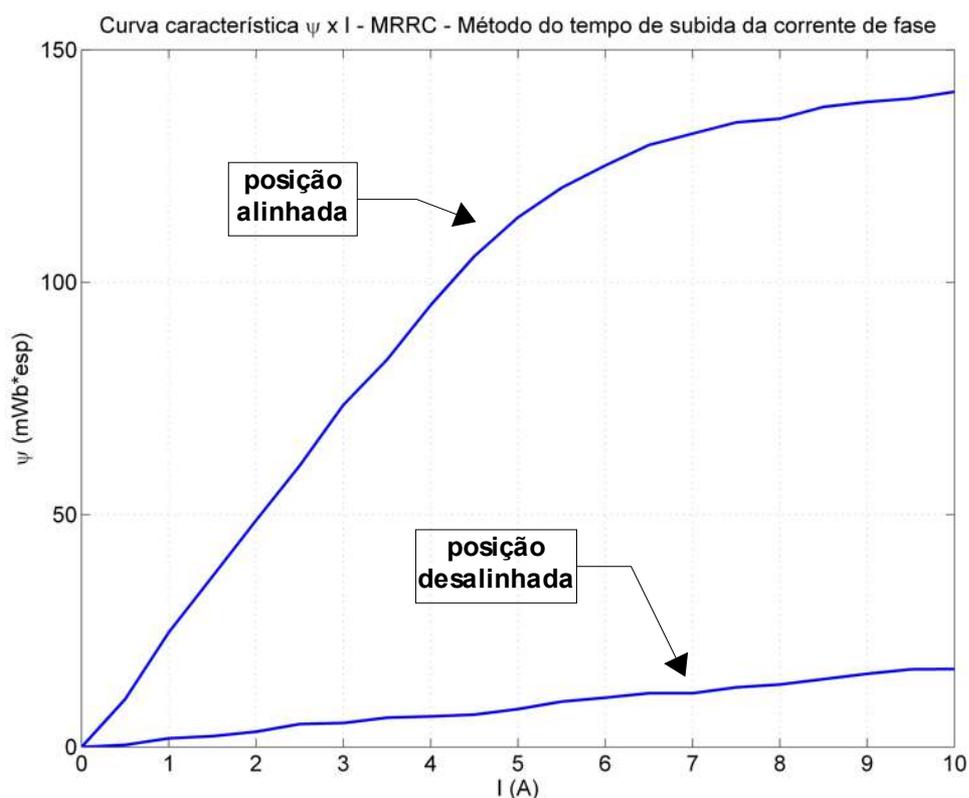


Figura 4.22 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

Os valores críticos do gráfico da Figura 4.22, obtidos na medição da MRRC através do presente método, são mostrados na Tabela 4.7.

4.1.2.2. Máquina linear

As condições no qual foram realizadas as medições pelo presente método, para as três fases da MLRC, são apresentadas nas Tabela 4.8 a 4.10.

Tabela 4.7 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

Variável	Valor
ψ_S	110,5 mWb*esp
i_S	4,783 A
ψ_D	16,79 mWb*esp
i_{NOM}	10 A
ψ_A	141 mWb*esp

Tabela 4.8 – Condições das medições da fase A da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,84 Ω
Valor de R_{EXT}	9,20 Ω
Temperatura média ambiente	20°C
Umidade relativa do ar	49%

Tabela 4.9 – Condições das medições da fase B da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,93 Ω
Valor de R_{EXT}	9,19 Ω
Temperatura média ambiente	19°C
Umidade relativa do ar	50%

Tabela 4.10 – Condições das medições da fase C da MLRC através do método do tempo de subida da corrente de fase.

Grandeza	Valor
Valor de R_{FASE}	0,96 Ω
Valor de R_{EXT}	9,08 Ω
Temperatura média ambiente	19°C
Umidade relativa do ar	50%

Os gráficos das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do presente método, para as posições alinhada e desalinhada, de cada uma das fases da MLRC, são mostrados na Figuras 4.23 a 4.25.

4.1.3. Método do tempo de extinção da corrente de fase

Este método, que apresenta uma sistemática similar ao método do tempo de subida da corrente de fase, consiste da redução da tensão e corrente contínuas na fase da MRC, para se obter os valores de indutância e de fluxo concatenado na fase analisada [42 e 58].

O modelo elétrico deste método é idêntico ao mostrado na Figura 4.17.

Inicialmente, o circuito da Figura 4.17 encontra-se energizado, ou seja, com a chave CH1 fechada. A fonte de tensão contínua encontra-se ajustada com um valor pré-definido de tensão positiva, fornecendo o valor de corrente desejado, em regime permanente. Quando a chave CH1 é aberta, a indutância inerente à fase da MRC impede uma variação instantânea da corrente, fazendo com que haja um transitório de extinção da corrente que atravessa a fase da MRC. A duração deste transitório da corrente é determinado pelo intervalo que começa no instante da abertura da chave CH1 e termina no instante da total extinção (i.e., anulação) da corrente de fase, conforme mostrado na Figura 4.26.

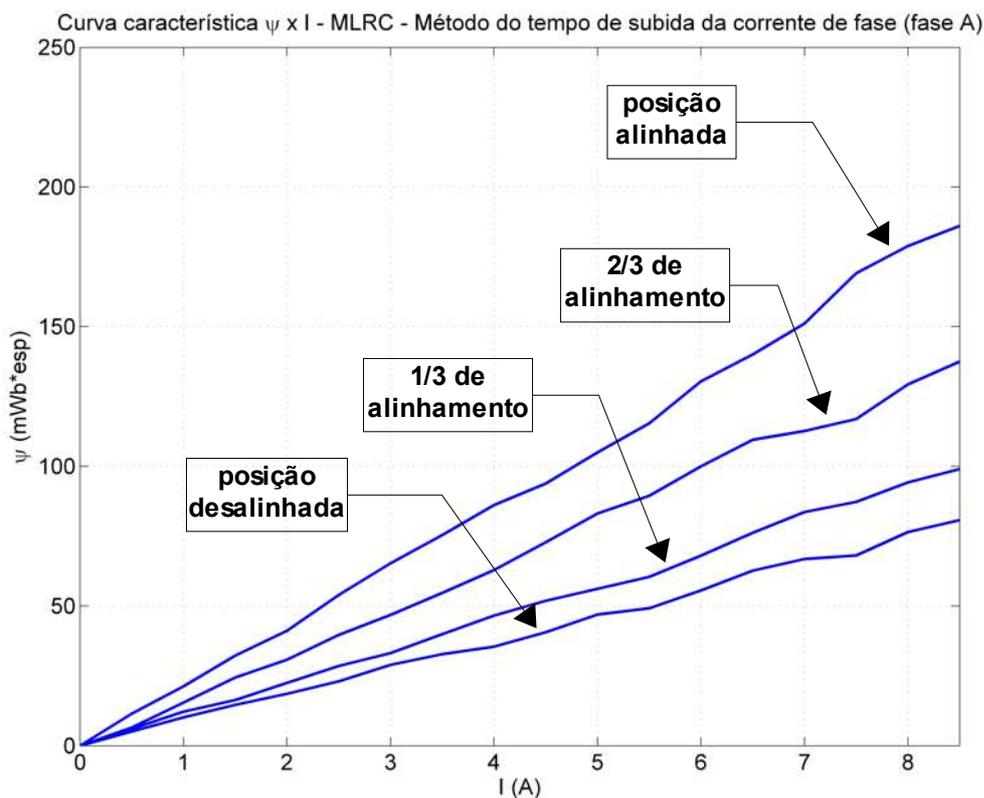


Figura 4.23 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

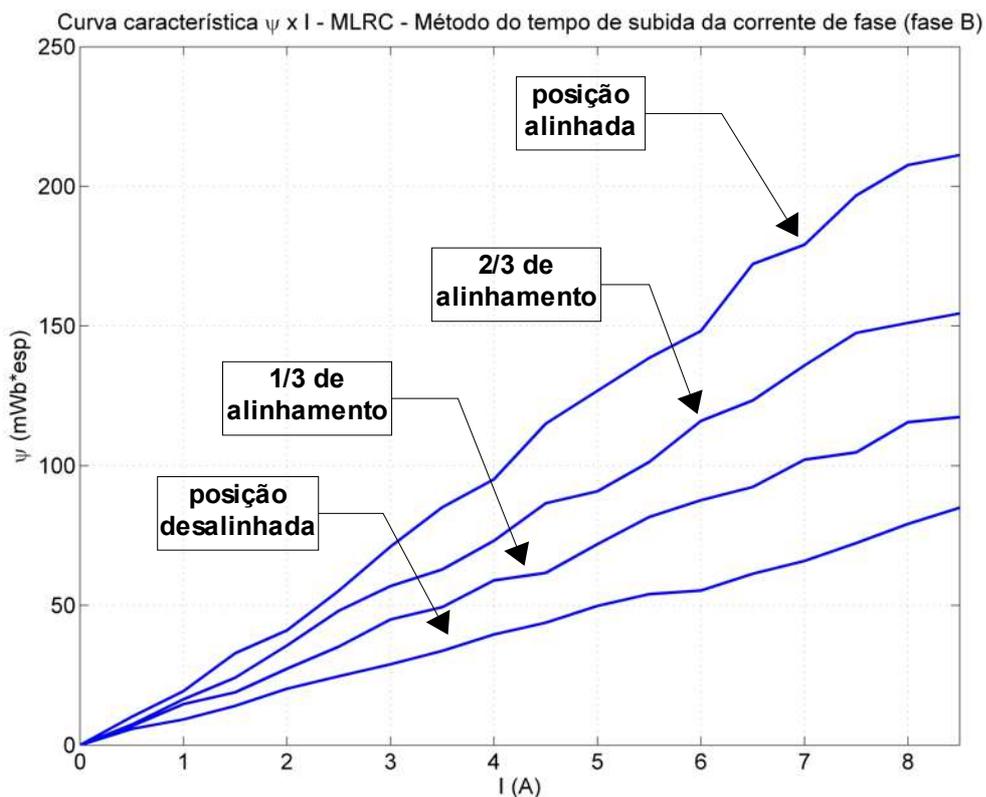


Figura 4.24 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

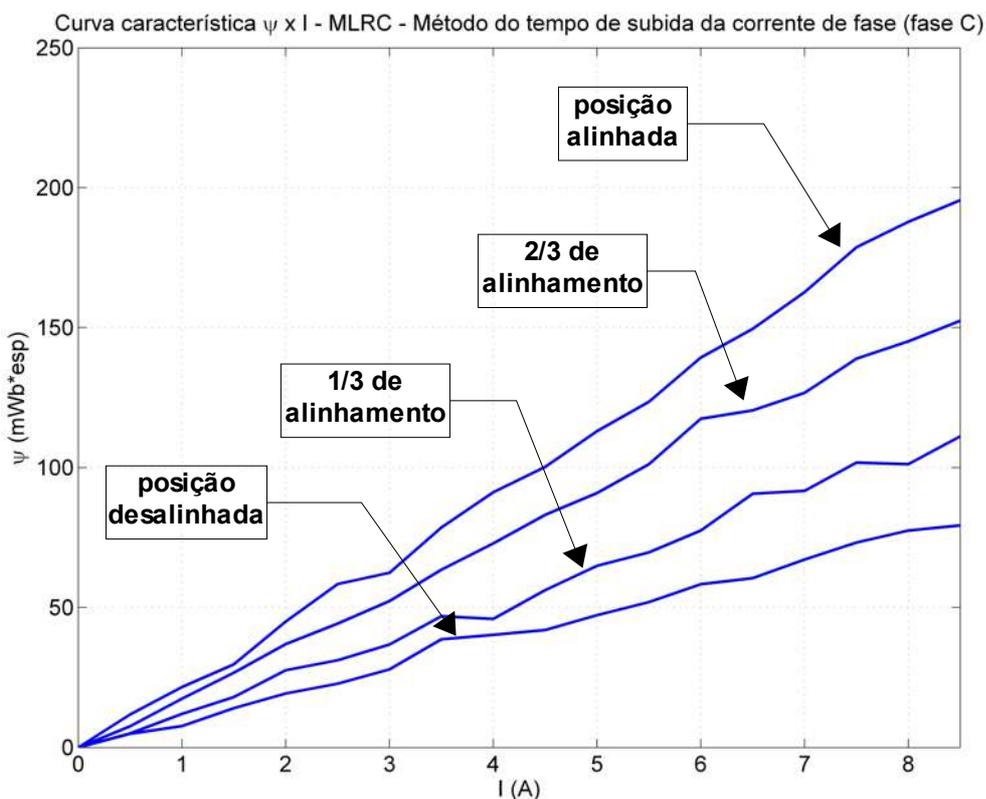


Figura 4.25 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de subida da corrente de fase.

A modelagem matemática do circuito mostrado na Figura 4.17 (correspondente à resposta ao degrau negativo de tensão) pode ser diretamente realizada aplicando-se a lei das tensões de Kirchhoff, sendo expressada pela equação (4.10):

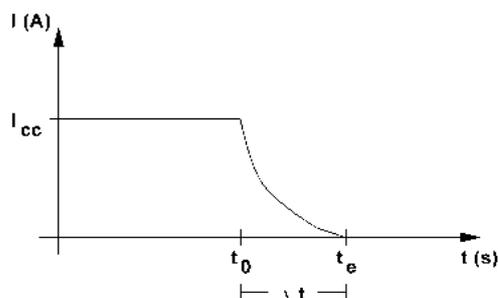


Figura 4.26 – Ilustração do transitório da extinção de corrente em um circuito RL série, alimentado por corrente contínua.

$$R_{ext} \cdot I(t) + R_{fase} \cdot I(t) + L_{fase} \cdot \frac{dI(t)}{dt} = V(t) = 0 \quad (4.10)$$

Reescrevendo a equação (4.10), obtém-se a equação diferencial de 1ª ordem (4.11):

$$\frac{dI(t)}{dt} + \left(\frac{R_{ext} + R_{fase}}{L_{fase}} \right) \cdot I(t) = 0 \quad (4.11)$$

As condições iniciais para este método são mostradas na equação (4.12):

$$I(t_0) = I_{cc} \quad \text{e} \quad I(t_e) \ll I_{cc} \quad (4.12)$$

A solução da equação (4.11) é expressada pela equação (4.13):

$$I(t) = \frac{V_{cc}}{R_{ext} + R_{fase}} \cdot \left(e^{-\frac{R_{fase} + R_{ext}}{L_{fase}} \cdot t} \right) \quad (4.13)$$

Reescrevendo a equação (4.13) em função da corrente $I(t)$, e utilizando o as condições iniciais mostradas em (4.12), obtém-se a equação (4.14) para cálculo

da indutância pelo método do tempo de extinção da corrente de fase:

$$L_{fase} = - \frac{t_e \cdot (R_{fase} + R_{ext})}{\ln \left(\frac{(R_{fase} + R_{ext}) \cdot I(t_e)}{V_{cc}} \right)} \quad (4.14)$$

Com base na equação (4.14), é possível obter o valor da indutância de fase da MRC, a partir da aquisição das formas de onda da tensão (V_{cc}) e corrente final de fase ($I(t_e)$), que permitem a obtenção do tempo de extinção da corrente de fase (t_e). Os valores das resistências de fase (R_{fase}) e externa (R_{ext}) são medidos imediatamente antes das medições para uma determinada posição da parte móvel da máquina. De posse do valor da indutância e da respectiva corrente de fase, pode-se obter o valor do fluxo concatenado para cada posição e valor de corrente de fase medidos, conforme a equação (2.1).

O circuito para medição das características estáticas pelo método do tempo da extinção da corrente de fase, bem como sua implementação, são idênticos aos mostrados nas Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

Para captura e tratamento dos dados em microcomputador, foi utilizado o módulo de aquisição de dados SignalExpress®, integrante da plataforma LabVIEW®, mostrado na Figura 4.27.

O procedimento adotado para medição das características eletromagnéticas da MRC, pelo presente método, foi o seguinte:

- (a) trava-se mecanicamente a parte móvel da MRC, na posição desejada;
- (b) mede-se o valor de R_{FASE} , e ajusta-se R_{EXT} de forma que a soma dos valores R_{FASE} e R_{EXT} seja compatível com o valor máximo de tensão capaz de ser fornecido pela fonte de alimentação. Neste caso, a soma das duas resistências foi definida em aproximadamente 10Ω ;
- (c) ajusta-se a fonte de tensão, de forma que se obtenha, em regime permanente, o valor desejado da corrente de fase (I_{cc});
- (d) aciona-se o transistor M1 (Figura 4.19) para que a corrente circule pela fase da MRC;
- (e) inicia-se a aquisição de dados com o módulo SignalExpress;
- (f) delisga-se o transistor M1, iniciando o decaimento da corrente pela fase da MRC e pelo diodo de roda livre;

- (g) quando a corrente se anula, a aquisição de dados é interrompida;
- (h) repete-se os passos (c) a (g), até que sejam feitas as medições de todos os valores de corrente desejados, para a posição na qual foi fixada a parte móvel da MRC.

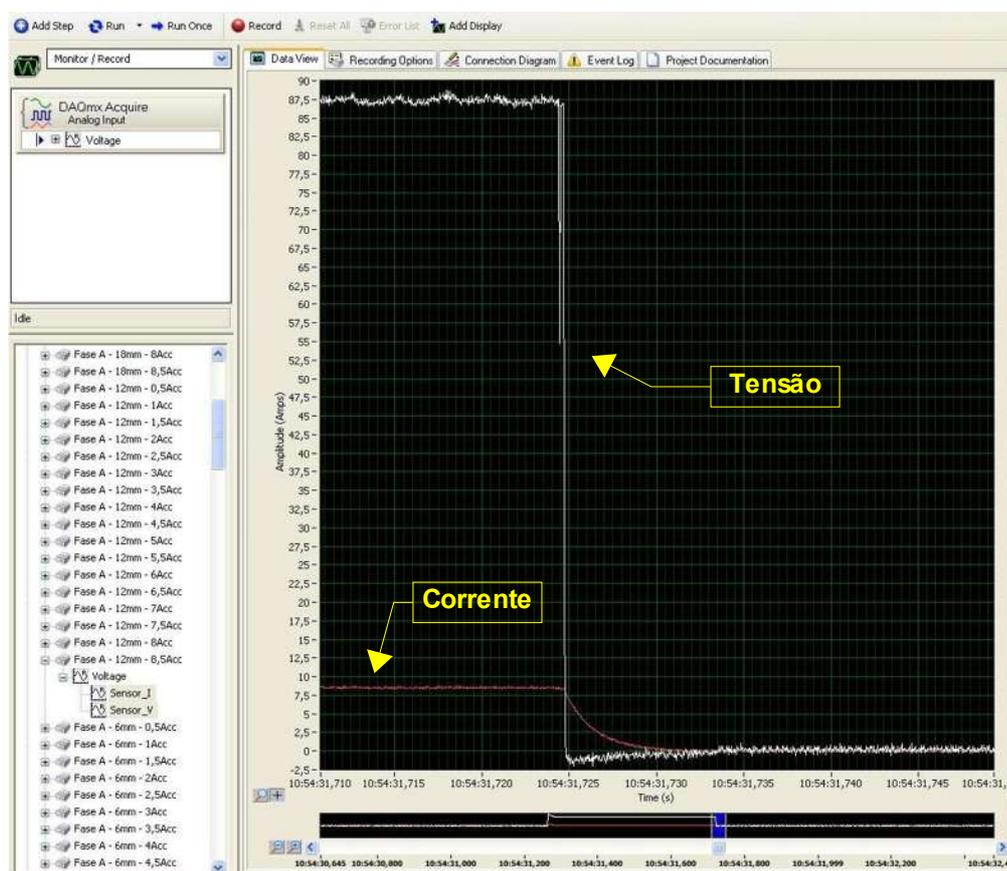


Figura 4.27 – Interface do módulo SignalExpress®, utilizado para captura dos dados obtidos durante medição das características estáticas da MRC, pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

O resistor R_{EXT} (mostrado nas Figuras 4.17 e 4.19) possui um valor muito maior que o valor de R_{FASE} , e é utilizado com o objetivo de se minimizar os efeitos da variação da resistência de fase da MRC, devido ao aumento da temperatura com a passagem de corrente na fase [42].

4.1.3.1. Máquina rotativa

As condições sob as quais foram realizadas as medições pelo presente método, para a MRRC, são apresentadas na Tabela 4.6.

O gráfico das curvas caracterísitcas ψ versus i , obtidas através do

presente método, para as posições alinhada e desalinhada da MRRC, é mostrado na Figura 4.28.

Os valores críticos do gráfico da Figura 4.28, obtidos na medição da MRRC através do presente método, são mostrados na Tabela 4.11.

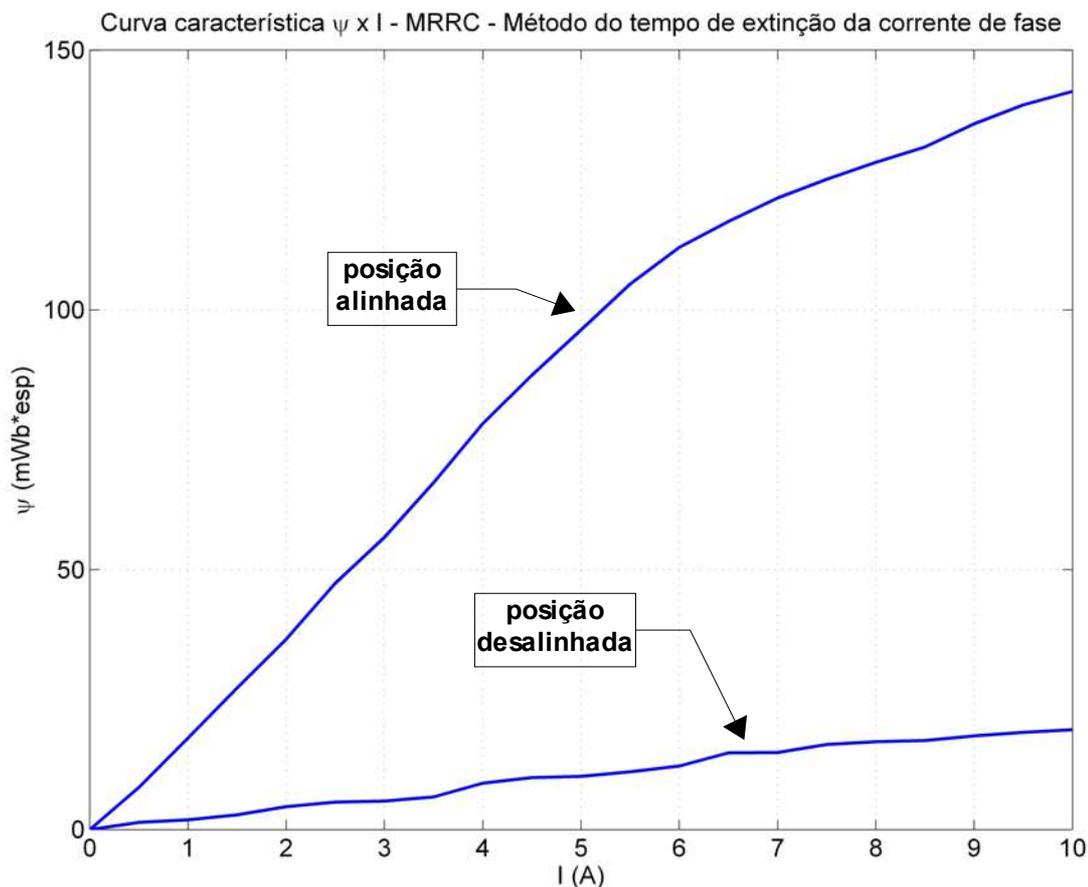


Figura 4.28 – Curvas características da MRRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

Tabela 4.11 – Valores críticos das características eletromagnéticas da MRRC obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

Variável	Valor
ψ_S	92,32 mWb*esp
i_S	4,783 A
ψ_D	19,21 mWb*esp
i_{NOM}	10 A
ψ_A	142 mWb*esp

4.1.3.2. Máquina linear

As condições nas quais foram realizadas as medições pelo presente método, para as três fases da MLRC, são apresentadas nas Tabela 4.8 a 4.10.

Os gráficos das curvas características ψ versus i , obtidas através do presente método, para as posições alinhada e desalinhada, de cada uma das fases da MLRC, são mostrados na Figuras 4.29 a 4.31.

4.2. Características mecânicas

A medição das características mecânicas consistiu da medição direta do conjugado médio da MRRC, tendo como carga uma máquina de corrente contínua (c.c.) convencional, com valores nominais de potência e tensão de 750W e 24V, respectivamente. As duas máquinas foram acopladas às duas extremidades (eixos) de um torquímetro, fabricado pela empresa Magtrol®, modelo TM307, e cuja saída de dados foi ligada a um *display* numérico (modelo 3410), capaz de indicar, em tempo real, os valores mecânicos de potência, conjugado e velocidade na ponta do eixo de cada uma das duas máquinas acopladas mecanicamente ao torquímetro.

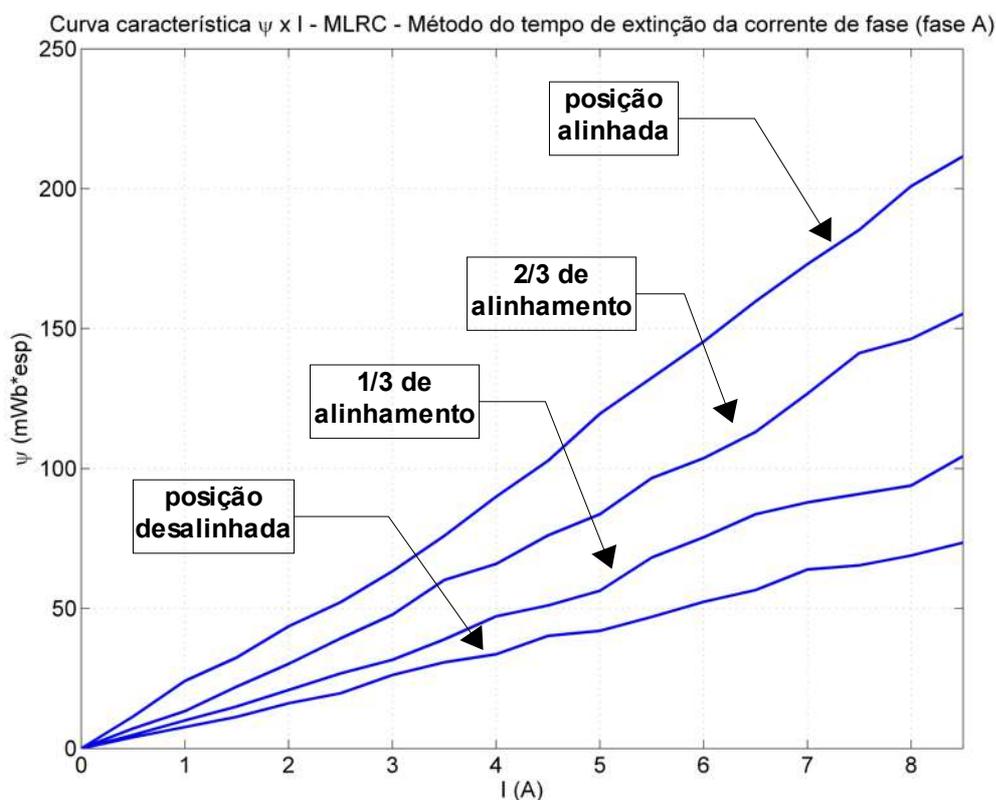


Figura 4.29 – Curvas características da fase A da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

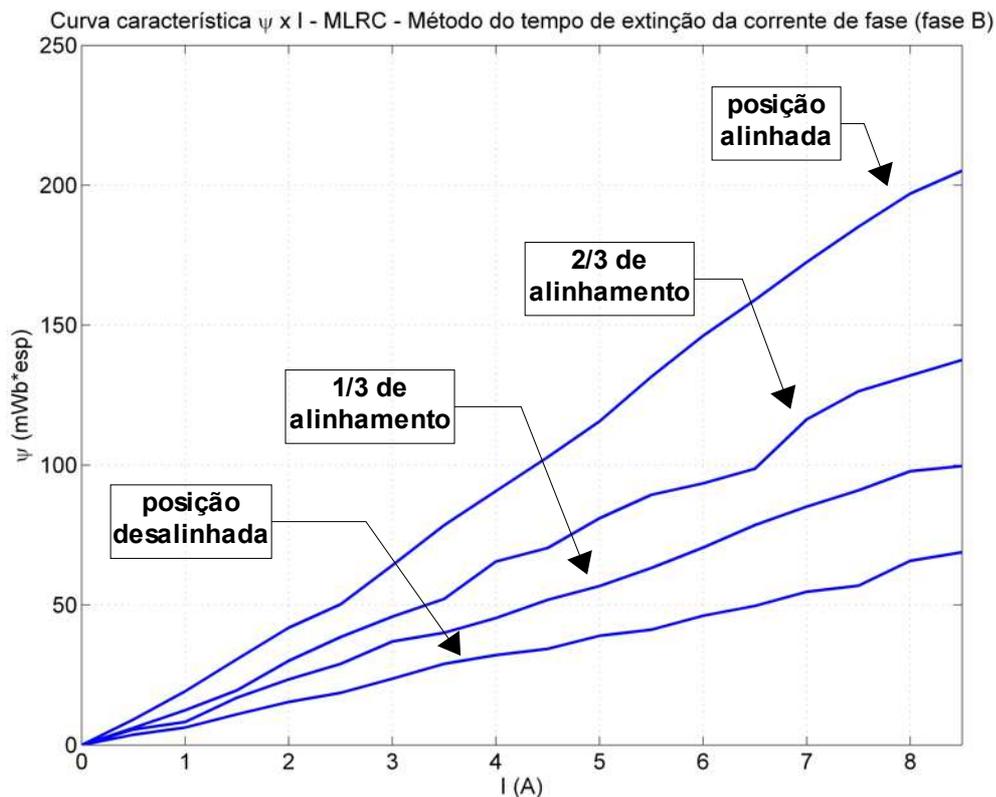


Figura 4.30 – Curvas características da fase B da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

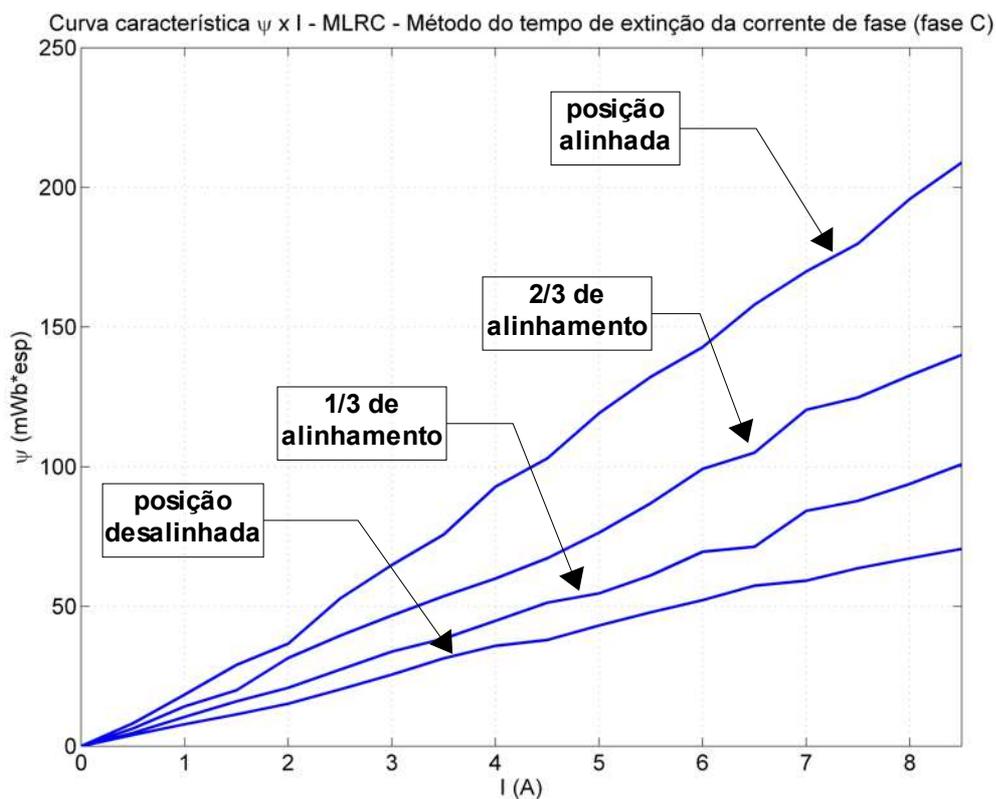


Figura 4.31 – Curvas características da fase C da MLRC, obtidas através de medição pelo método do tempo de extinção da corrente de fase.

Um diagrama ilustrativo da conexão mecânica do torquímetro com as duas máquinas é mostrado na Figura 4.32.

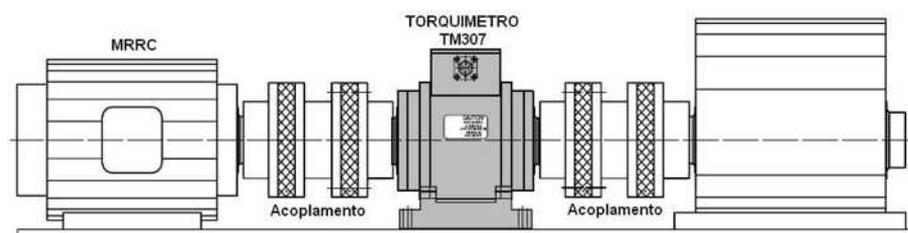


Figura 4.32 – Diagrama (vista lateral) da ligação mecânica do torquímetro com as duas máquinas.

A implementação da bancada de fixação das duas máquinas e do torquímetro é mostrada na Figura 4.33.

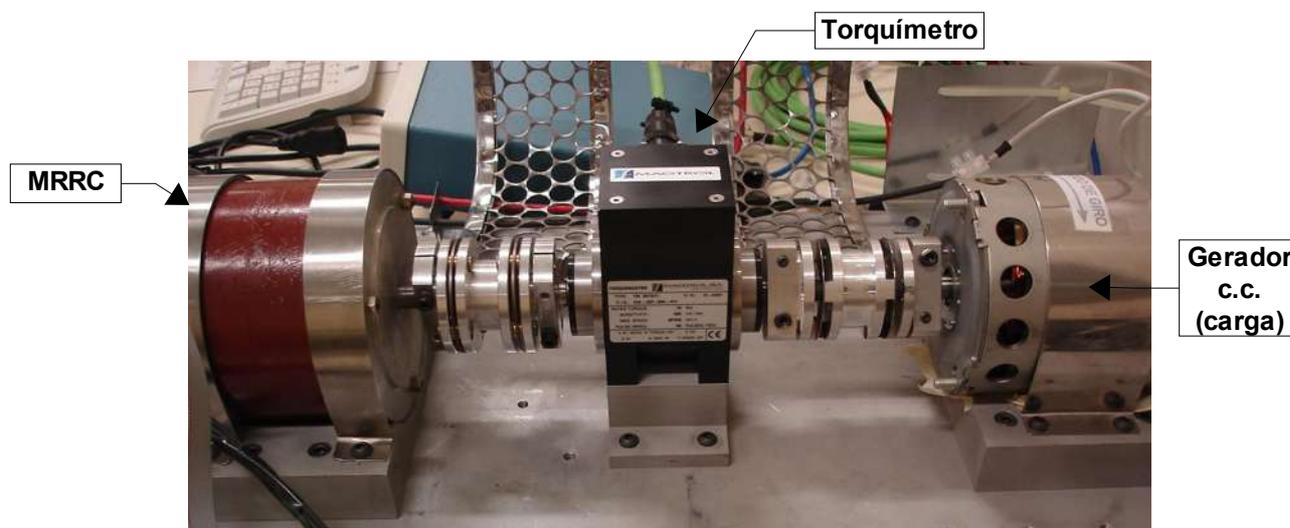


Figura 4.33 – Bancada de fixação mecânica das duas máquinas e do torquímetro.

4.2.1. Máquina rotativa – medição do conjugado

Nos ensaios realizados, a MRRC operou como motor, tracionando a máquina c.c., que funcionou como um gerador c.c., cujos terminais positivo e negativo foram conectados a um banco de resistores variáveis, com potência nominal de 3kW. Para alimentar a MRRC, foi implementado um sistema de acionamento e controle eletrônico, utilizando apenas o controle de corrente por histerese. A bancada completa de ensaios eletromecânicos da MRRC é mostrada na Figura 4.34.

Para medir o conjugado médio da MRRC, a máquina foi alimentada com tensão e corrente nominais (i.e., 120V e 10A, respectivamente). O aumento da carga elétrica foi feita diminuindo-se a resistência do banco de resistores, obrigando o

gerador c.c. a fornecer uma corrente maior, com a menor variação possível na sua tensão de saída. Os resultados deste ensaio são mostrados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Valores de conjugado médio fornecidos pela MRRC.

Corrente de fase (A)	ω_M (rpm)	$C_{(med)}$ (N*m)
5	750	1,2
10	1.000	1,6

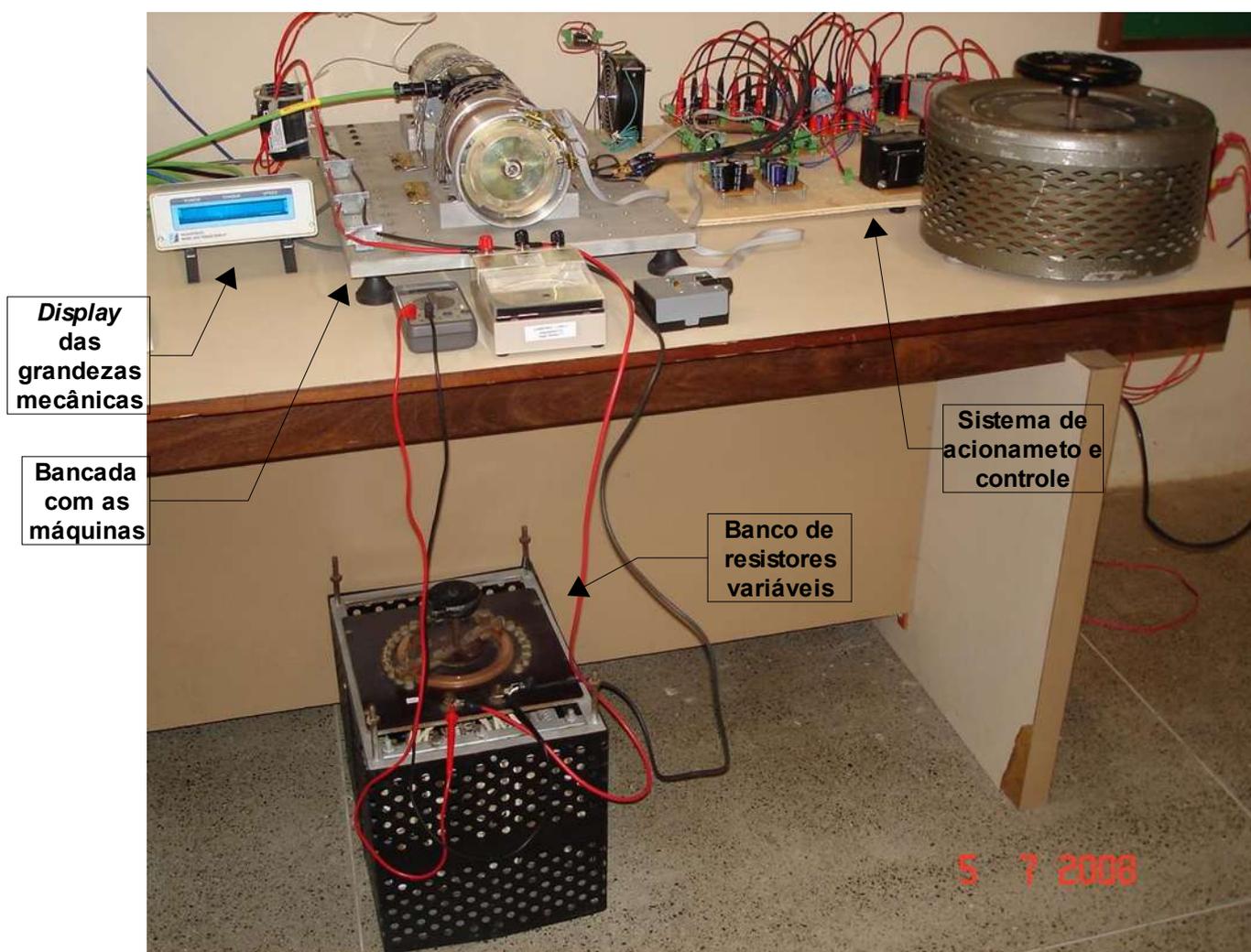


Figura 4.34 – Bancada de ensaios eletromecânicos da MRRC.

4.3. Comparação dos resultados das medições das características estáticas

Neste item, é apresentada uma comparação dos resultados das características estáticas da MRRC e da MLRC, obtidos através dos métodos de medição experimental, apresentados nos itens 4.1 e 4.2. Todas as comparações são feitas tomando como base os resultados obtidos através do MEF (capítulo 3).

4.3.1. Características eletromagnéticas

Os resultados das características eletromagnéticas estáticas das duas máquinas – obtidos através de simulações computacionais – são apresentados nos subitens 4.3.1.1 e 4.3.1.2.

4.3.1.1. Máquina rotativa

As curvas das características eletromagnéticas estáticas da MRRC, obtidas pelos 3 métodos de medição experimental, são comparadas em relação aos resultados obtidos pelo MEF (capítulo 3) e apresentadas nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37. Nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, são mostrados os erros percentuais entre os valores de fluxo concatenado obtidos pelos 3 métodos de medição utilizados, para três valores críticos de corrente (nas posições alinhada e desalinhada): um na região linear (3A), o segundo no joelho da curva característica (5,5A) e um terceiro ponto na região de saturação e que equivale à própria corrente nominal da MRRC (10A).

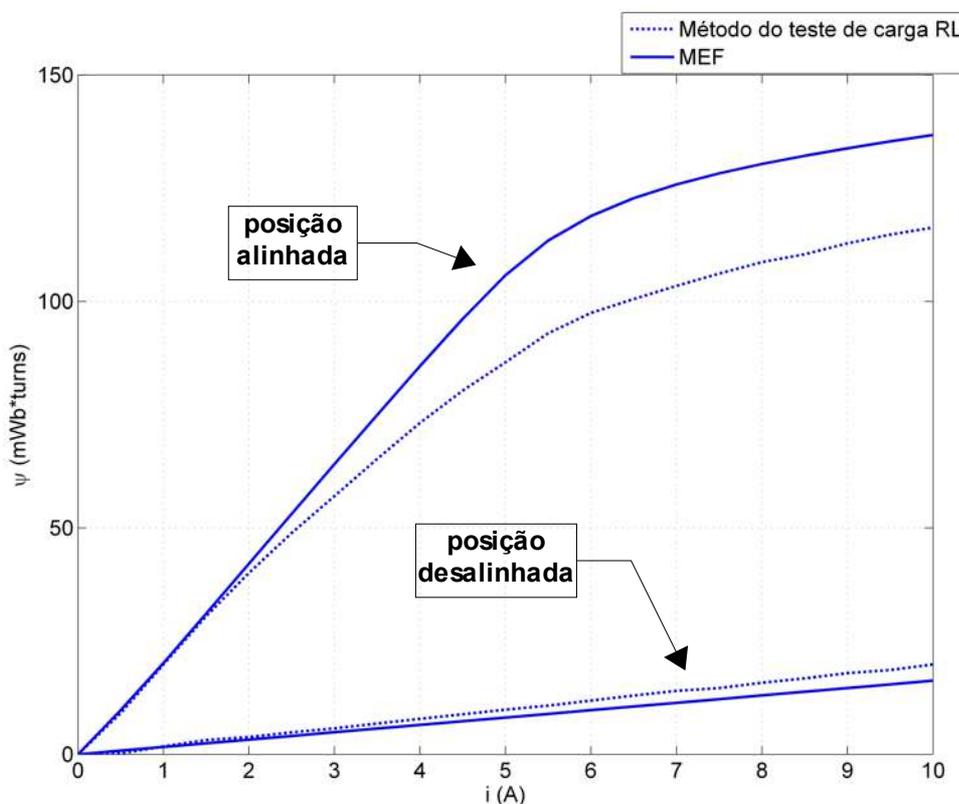


Figura 4.35 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do teste de carga RL.

Tabela 4.13 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do teste de carga RL

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)		Diferença (%)
		MEF	Método do teste de carga RL	
alinhada	3	64,04	57,01	10,98
	5,5	113,5	92,97	18,09
	10	136,8	116,3	14,99
desalinhada	3	4,87	5,72	17,45
	5,5	8,93	10,75	20,38
	10	16,27	19,83	21,88

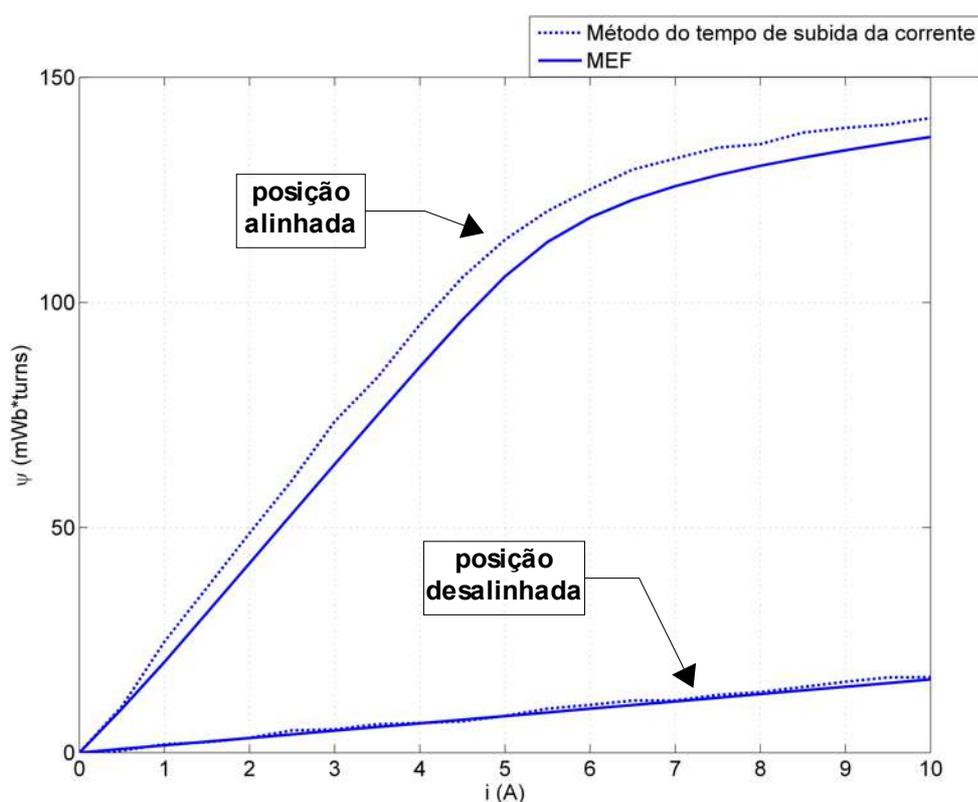


Figura 4.36 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de subida da corrente.

Com base nos resultados experimentais de medições das características estáticas da MRRC, mostrados nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37 e nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, e tendo como referência os resultados da simulação pelo MEF, verifica-se que os três métodos fornecem resultados com valores próximos entre si. De maneira análoga às simulações apresentadas no capítulo 3, verifica-se que estes os métodos experimentais fornecem resultados bastante próximos do MEF, para a posição desalinhada, com exceção do método do teste de carga RL, com erros

pouco superiores a 20%. Já quando o rotor encontra-se na posição alinhada, observa-se que a diferença entre as curvas características obtidas pelo método do teste de carga RL e pelo MEF aumenta, especificamente nas regiões do “joelho” e da região de saturação, que são as regiões da curva que sofrem maior influência das não-linearidades eletromagnéticas inerentes à operação dinâmica da MRRC na região de saturação da curva de magnetização do aço.

Tabela 4.14 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do tempo de subida da corrente

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)		Diferença (%)
		MEF	Método do tempo de subida da corrente	
alinhada	3	64,04	73,55	14,85
	5,5	113,5	120,3	5,99
	10	136,8	141	3,07
desalinhada	3	4,87	5,17	6,16
	5,5	8,93	9,78	9,52
	10	16,27	16,79	3,2

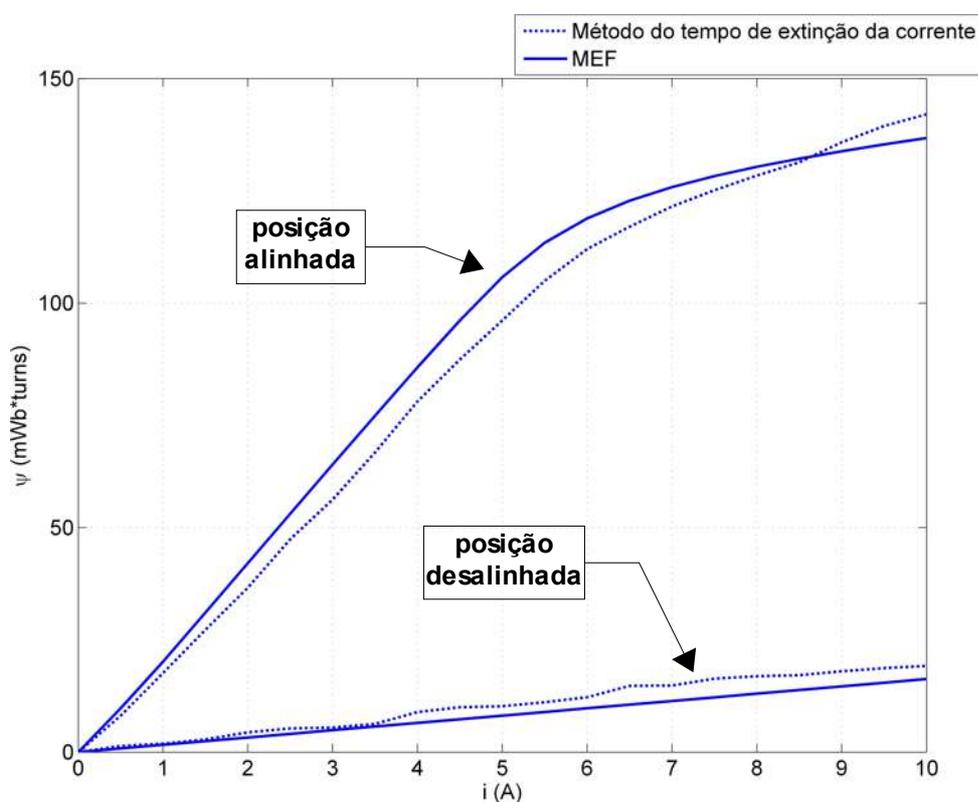


Figura 4.37 – Curvas características da MRRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de extinção da corrente.

Tabela 4.15 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MRRC, obtidos através do método do tempo de extinção da corrente

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)		Diferença (%)
		MEF	Método do tempo de extinção da corrente	
alinhada	3	64,04	56,24	12,18
	5,5	113,5	105	7,49
	10	136,8	142	3,8
desalinhada	3	4,87	5,47	12,32
	5,5	8,93	11,08	24,08
	10	16,27	19,21	18,07

O principal fator de imprecisão observado durante as medições das características estáticas da MRRC, foi o uso excessivo de cabos (interligando as placas do sistema de medição) resultando na geração de ruídos da ordem de 10% dos valores medidos.

Do ponto de vista dos métodos utilizados, as seguintes observações são feitas:

- o método do teste de carga RL perde confiabilidade nas medições para a posição alinhada da MRRC, devido à saturação do núcleo magnético da máquina, causando deformação do sinal senoidal que é injetado na fase da máquina;
- o método do tempo de subida da corrente de fase pode ser influenciado pelos transitórios de energização da fase da máquina, que apresenta maiores instabilidades do que no transitório de extinção da corrente de fase;
- o método do tempo de extinção da corrente de fase apresentam imprecisão para detecção da corrente nula, podendo ser aprimorado através da detecção de uma constante de tempo (ao invés da detecção da anulação da corrente).

4.3.1.2. Máquina linear

As curvas das características eletromagnéticas estáticas da MLRC, obtidas pelos 3 métodos de medição experimental, são comparadas em relação aos resultados obtidos pelo MEF (capítulo 3) e apresentadas nas Figuras 4.38, 4.39 e

4.40. Nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, são mostrados os erros percentuais entre os valores de fluxo concatenado obtidos pelos 3 métodos de medição utilizados, para três valores críticos de corrente (nas posições alinhada, com 2/3 de alinhamento, 1/3 de alinhamento e desalinhada): um na região linear (3A), o segundo no joelho da curva característica (7,5A) e um terceiro ponto na região de saturação e que equivale à própria corrente nominal da MLRC (8,5A).

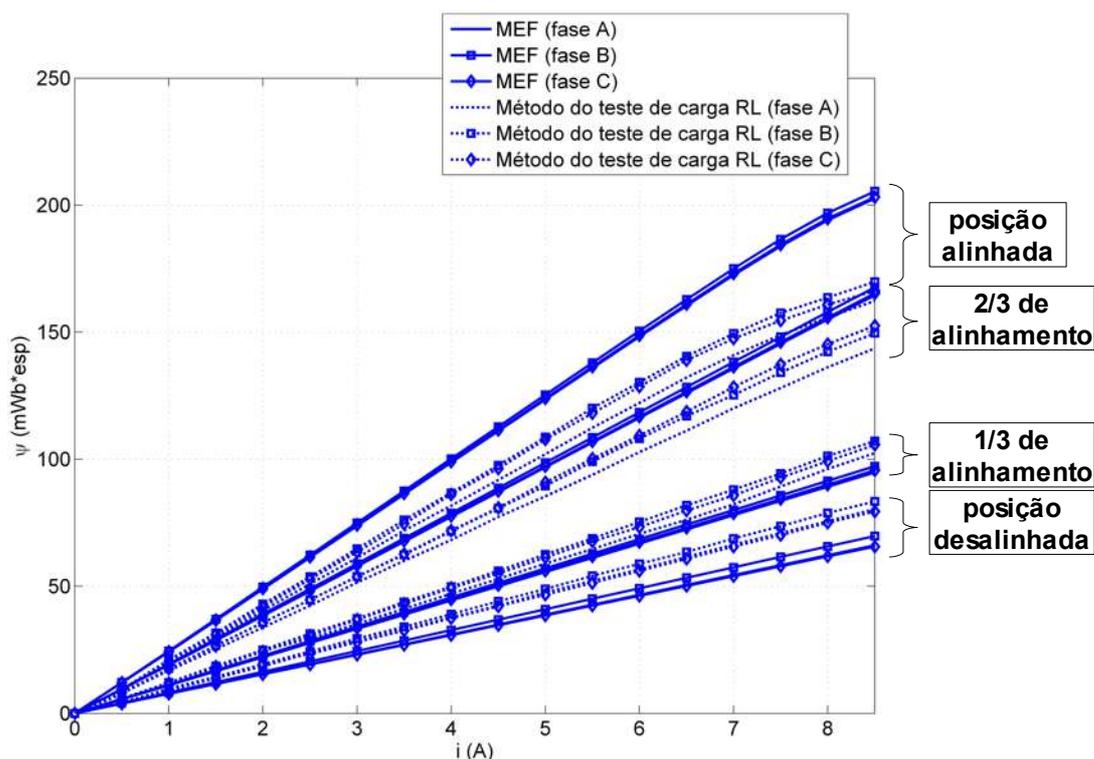


Figura 4.38 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do teste de carga RL.

Com base nas Figura 4.38, 4.39 e 4.40 e nos resultados mostrados nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, verifica-se um comportamento similar da MLRC ao que foi obtido para a MRRC: a diferença entre os valores obtidos pelo MACM, em relação ao MEF, é menor na região linear (valores baixos de corrente) e maior na região de operação de saturação (valores de corrente próximos ao nominal). Também é importante ressaltar, considerando apenas os resultados obtidos, para cada uma das 3 fases, através das simulações pelo MEF, os valores de fluxo concatenado maiores da fase B (fase “interna”), em relação às fases A e C (fases “externas”), que é uma consequência do efeito de extremidade [57]. Também é importante ressaltar que os maiores erros, nas medições pelos 3 métodos experimentais, verificam-se nas regiões de maior não-linearidade da máquina linear (i.e., nos

maiores valores de corrente da curva de magnetização medida para a MLRC).

Tabela 4.16 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do teste de carga RL

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)						Diferença (%)		
		MEF			Método do teste de carga RL			Fase A	Fase B	Fase C
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C			
alinhada	3	73,8	74,9	74,1	61,2	64,8	63,5	17,1	13,5	14,3
	7,5	183,8	186,6	184,5	148,8	157,6	154,5	19	15,5	16,3
	8,5	202,6	205,4	203,1	162,3	169,8	166,2	19,9	17,3	18,2
2/3 de alinhamento	3	57,8	58,9	58,1	51,5	53,9	53,8	10,9	8,5	7,4
	7,5	145,4	148,1	146,1	128,1	134,1	137,3	11,9	9,4	6
	8,5	164,6	167,6	165,3	143,6	149,6	152,5	12,8	10,7	7,7
1/3 de alinhamento	3	33,3	34,1	33,5	35,2	37,3	36,8	5,7	9,4	9,8
	7,5	83,6	85,8	84,3	89,3	94,4	92,3	6,8	10	9,5
	8,5	94,8	97,2	95,6	102,4	107,2	105,7	6,8	10,3	10,6
desalinhada	3	23,2	24,5	23,1	28,3	29,4	28	22	20	21,2
	7,5	58,3	61,5	57,9	70,9	73,7	70,2	21,6	19,8	21,2
	8,5	66,1	69,8	65,6	80,4	83,4	79,4	21,6	19,5	21

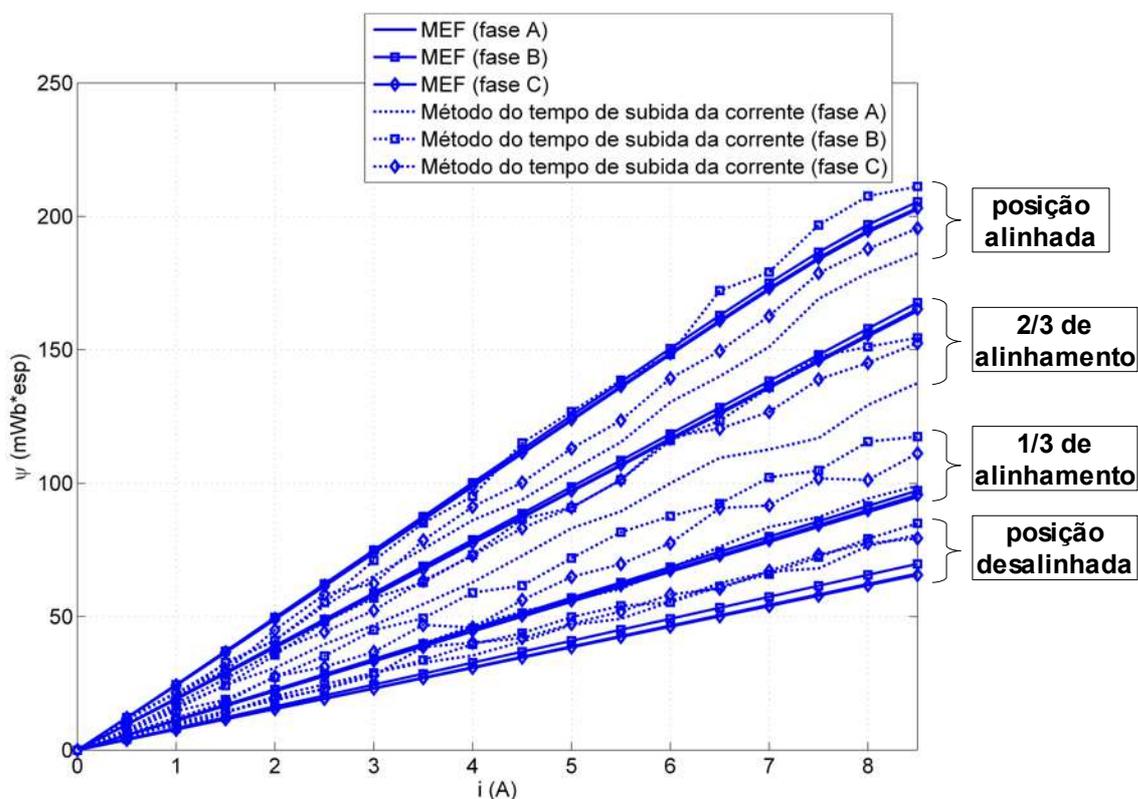


Figura 4.39 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de subida da corrente.

Tabela 4.17 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do tempo de subida da corrente

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)						Diferença (%)		
		MEF			Método do tempo de subida da corrente			Fase A	Fase B	Fase C
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C			
alinhada	3	73,8	74,9	74,1	65,3	71	62,4	11,5	5,2	15,8
	7,5	183,8	186,6	184,5	169,2	196,7	178,7	7,9	5,4	3,1
	8,5	202,6	205,4	203,1	186	211,2	195,5	8,2	2,8	3,7
2/3 de alinhamento	3	57,8	58,9	58,1	46,8	56,9	52,3	19	3,4	10
	7,5	145,4	148,1	146,1	116,9	147,5	138,9	19,6	0,4	4,9
	8,5	164,6	167,6	165,3	137,5	154,5	152,4	16,5	7,8	7,8
1/3 de alinhamento	3	33,3	34,1	33,5	33,1	45	36,8	0,6	31,9	9,8
	7,5	83,6	85,8	84,3	87,3	104,8	101,8	4,4	22,1	20,8
	8,5	94,8	97,2	95,6	99	117,4	111,1	4,4	20,8	16,2
desalinhada	3	23,2	24,5	23,1	28,9	28,9	27,9	24,6	18	20,8
	7,5	58,3	61,5	57,9	68,1	72,3	73,2	16,8	17,6	26,4
	8,5	66,1	69,8	65,6	80,8	85	79,3	22,2	21,8	20,9

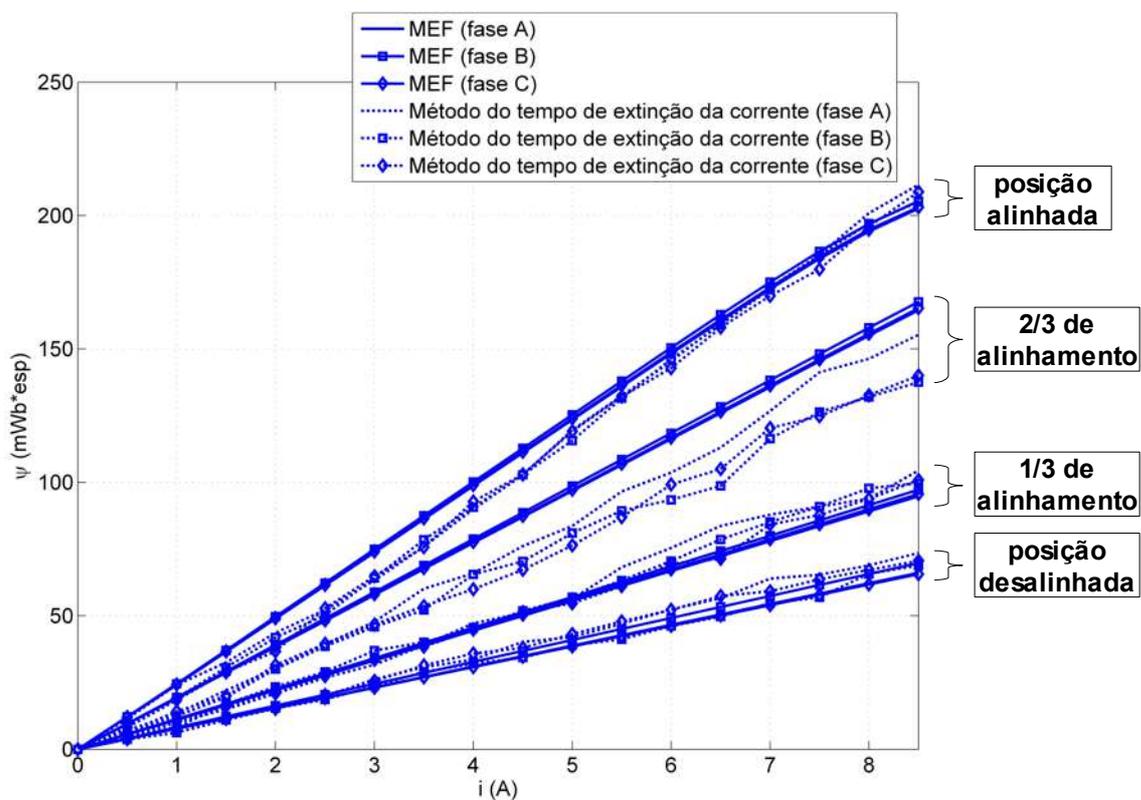


Figura 4.40 – Curvas características da MLRC obtidas pelo MEF e pelo método do tempo de extinção da corrente.

Tabela 4.18 – Comparação entre valores específicos de fluxo concatenado da MLRC, obtidos através do método do tempo de extinção da corrente

Posição	Corrente (A)	Fluxo concatenado (mWb*esp)						Diferença (%)		
		MEF			Método do tempo de extinção da corrente			Fase A	Fase B	Fase C
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C			
alinhada	3	73,8	74,9	74,1	63,3	64,2	64,8	14,2	14,3	12,5
	7,5	183,8	186,6	184,5	185,3	185,2	179,8	0,8	0,7	2,5
	8,5	202,6	205,4	203,1	211,5	205,1	208,9	4,4	0,1	2,9
2/3 de alinhamento	3	57,8	58,9	58,1	47,8	45,9	46,7	17,3	22,1	19,6
	7,5	145,4	148,1	146,1	141,3	126,4	124,8	2,8	14,6	13,5
	8,5	164,6	167,6	165,3	155,3	137,6	140	5,6	17,9	15,3
1/3 de alinhamento	3	33,3	34,1	33,5	31,7	37	33,9	4,8	8,5	1,19
	7,5	83,6	85,8	84,3	90,9	90,9	87,8	8,7	5,9	4,2
	8,5	94,8	97,2	95,6	104,5	99,6	100,9	10,2	2,5	5,5
desalinhada	3	23,2	24,5	23,1	26,2	23,7	25,6	12,9	3,3	10,8
	7,5	58,3	61,5	57,9	65,4	56,9	63,7	12,2	7,5	10
	8,5	66,1	69,8	65,6	73,5	68,9	70,6	11,2	1,3	7,6

Os fatores que afetaram a precisão das medições das características estáticas da MLRC foram as mesmas mencionadas para a MRRC (ao final do subitem 4.3.1.1), onde deve-se ressaltar os problemas de vibração ocorridos durante as medições através do método do teste de carga RL, especialmente nos valores de corrente mais próximos do nominal (entre 5 e 8,5A).

4.3.2. Características mecânicas

Os resultados da característica mecânica estática da MRRC – obtidos através de medição experimental – são apresentados no subitem 4.3.2.1.

4.3.2.1. Máquina rotativa

Na Tabela 4.19 é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para o conjugado médio da MRRC, com base nas simulações realizadas pelos métodos trapezoidal e da parábola (baseados nas curvas de magnetização obtidas pelo MEF e pelo MACM).

Com base nos dados da Tabela 4.19, observa-se que a diferença entre o valor médio do conjugado, calculado pelos métodos trapezoidal e da parábola apresentam resultados bastante próximos do valor obtido através da medição experimental, validando os métodos trapezoidal e da parábola para cálculo do

conjugado médio da MRRC, a partir de sua curva de magnetização.

Tabela 4.19 – Comparação entre os valores do conjugado médio da MRRC obtidos por simulação computacional

Método de caracterização eletromagnética	Método de estimação do conjugado médio	Conjugado médio nominal (N*m)	Medição experimental do conjugado (N*m)	Diferença (%)
MEF	trapezoidal	1,556	1,6	2,83
	parábola	1,538		4,03
MACM	trapezoidal	1,716		6,76
	parábola	1,659		3,56

Capítulo 5

Sistemas de acionamento e controle

No presente capítulo são apresentadas as simulações e implementações dos sistemas de acionamento das máquinas rotativa e linear, bem como os aspectos teóricos e a implementação dos sistemas de controle específicos de cada uma das duas máquinas.

Para facilitar o ensaio de ambas as máquinas em laboratório, optou-se pela implementação dos sistemas de acionamento e controle de forma modularizada. Ou seja, cada circuito foi montado em uma placa de circuito impresso distinta, sendo feita a conexão entre cada uma das placas através de cabos e fios isolados.

5.1. Sistema de acionamento

O sistema de acionamento básico de uma MRC é composto de:

- fonte de tensão contínua;
- conversor eletrônico de potência;
- circuito de acionamento dos transistores do conversor;
- sensor de posição (ou de comutação das fases) da parte móvel da máquina;
- sensores das correntes de fase;

Além destes 5 itens, deve-se mencionar também o sistema de controle, que é abordado no item 5.2.

5.1.1. Máquina rotativa

A fonte de tensão contínua escolhida para a máquina rotativa baseia-se numa ponte retificadora monofásica não-controlada, alimentada por um autotransformador monofásico, cuja entrada é conectada à rede elétrica (valor eficaz de tensão fixo em 220Vca) e cujo valor eficaz de saída é ajustável entre 0 de 220Vca. Na saída da ponte retificadora utilizou-se um filtro capacitivo, de forma a se reduzir a oscilação da tensão na entrada do conversor eletrônico de potência [59].

Também foi implementado um circuito de limitação da corrente de partida do filtro capacitivo da ponte retificadora, para proteger a ponte retificadora nas

situações em que a mesma fosse alimentada instantaneamente com valores de tensão capazes de carregar rapidamente os capacitores e gerar picos de corrente maiores do que os suportados pela ponte retificadora [59].

Os circuitos de limitação da corrente de partida da ponte retificadora, bem como o da própria ponte retificadora, são mostrados nas Figuras 5.1 e 5.2 respectivamente.

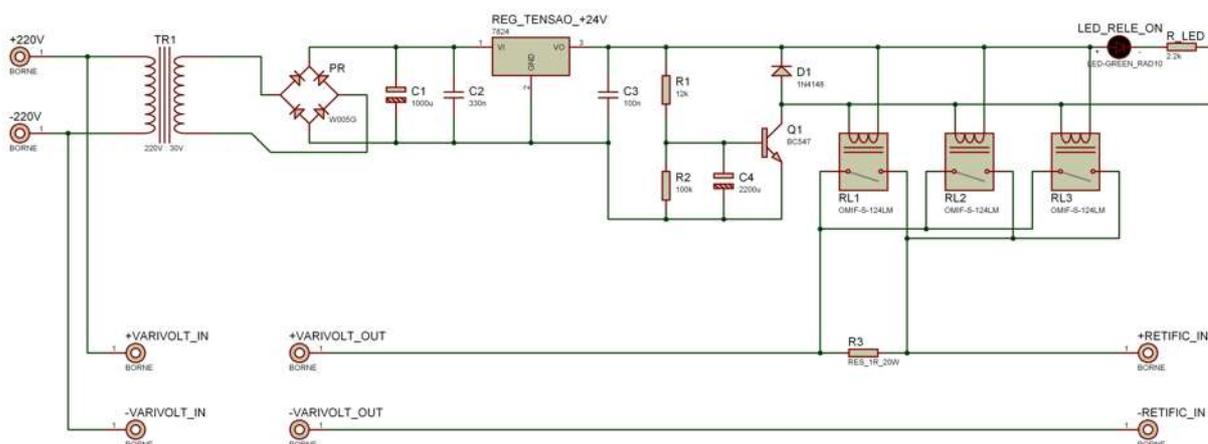


Figura 5.1 – Circuito de controle da corrente de partida da ponte retificadora.

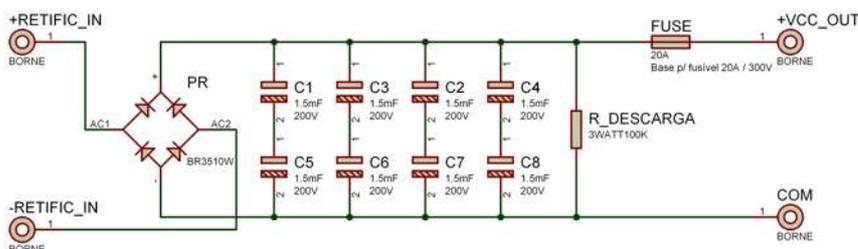


Figura 5.2 – Circuito da ponte retificadora com filtro capacitivo na saída.

O conversor eletrônico escolhido para alimentação da MRRC foi o conversor assimétrico [1 e 42], cuja configuração é mostrada na Figura 5.3.

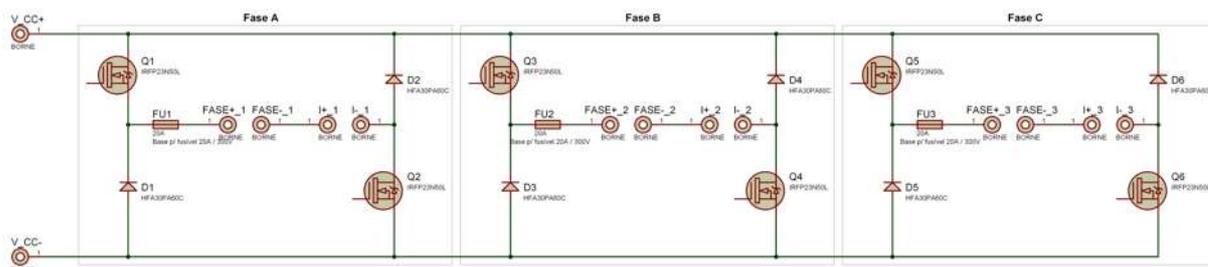


Figura 5.3 – Circuito do conversor eletrônico assimétrico.

O conversor assimétrico caracteriza-se por possuir 2 transistores e 2 diodos de roda livre por fase. Entretanto, a principal vantagem deste conversor, é a possibilidade de operação da MRC em 4 quadrantes, agregando a possibilidade de se utilizar regeneração de energia da máquina para a fonte como a aplicação de diferentes técnicas de controle do acionamento da máquina [1 e 52].

O método de comutação escolhido para o conversor assimétrico foi o tipo “*soft chopping*” (ou “chaveamento suave”), com regulação por PWM, cujas principais vantagens são a redução dos ruídos acústico e elétrico, bem como da oscilação da corrente de fase e da corrente drenada pelo filtro capacitivo na saída do retificador monofásico que alimenta o conversor [1].

Os modos de condução do conversor são detalhados com base na Figura 5.4 (para uma fase apenas) e na Tabela 5.1. A operação deste conversor inicia-se no estado I, no qual os transistores Q1 e Q2 estão conduzindo e a corrente flui da fonte para a carga. No estado II, o transistor Q1 é desligado, e o transistor Q2 permanece conduzindo (em modo contínuo ou através de PWM), fazendo com que a energia armazenada na indutância de fase descarregue-se parcialmente no transistor Q2 e no diodo D1. Finalmente, no estado III, a fase atual é “desligada” por meio da abertura (ou bloqueio) dos transistores Q1 e Q2, fazendo com que a energia armazenada na indutância de fase seja descarregada pelos diodos D1 e D2.

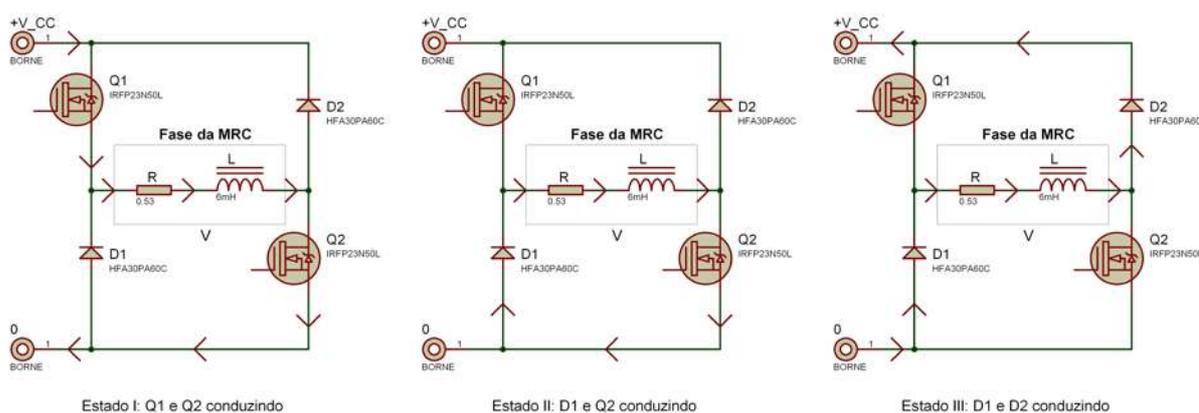


Figura 5.4 – Modos de condução do conversor assimétrico (apenas para uma fase do conversor).

Tabela 5.1 – Tabela verdade dos modos de condução do conversor assimétrico

Estado	Q1	Q2	D1	D2	V
I	1	1	0	0	+V _{cc}
II	0	1	1	0	0
III	0	0	1	1	-V _{cc}

Ainda é possível um quarto modo de condução, quando Q1 e D2 estão conduzindo, contudo, este modo é análogo ao estado II, sendo usado na prática apenas um, destes 2 modos de condução.

As formas de onda das correntes de fase no conversor assimétrico, obtidas por simulação estática, são mostradas na Figura 5.5.

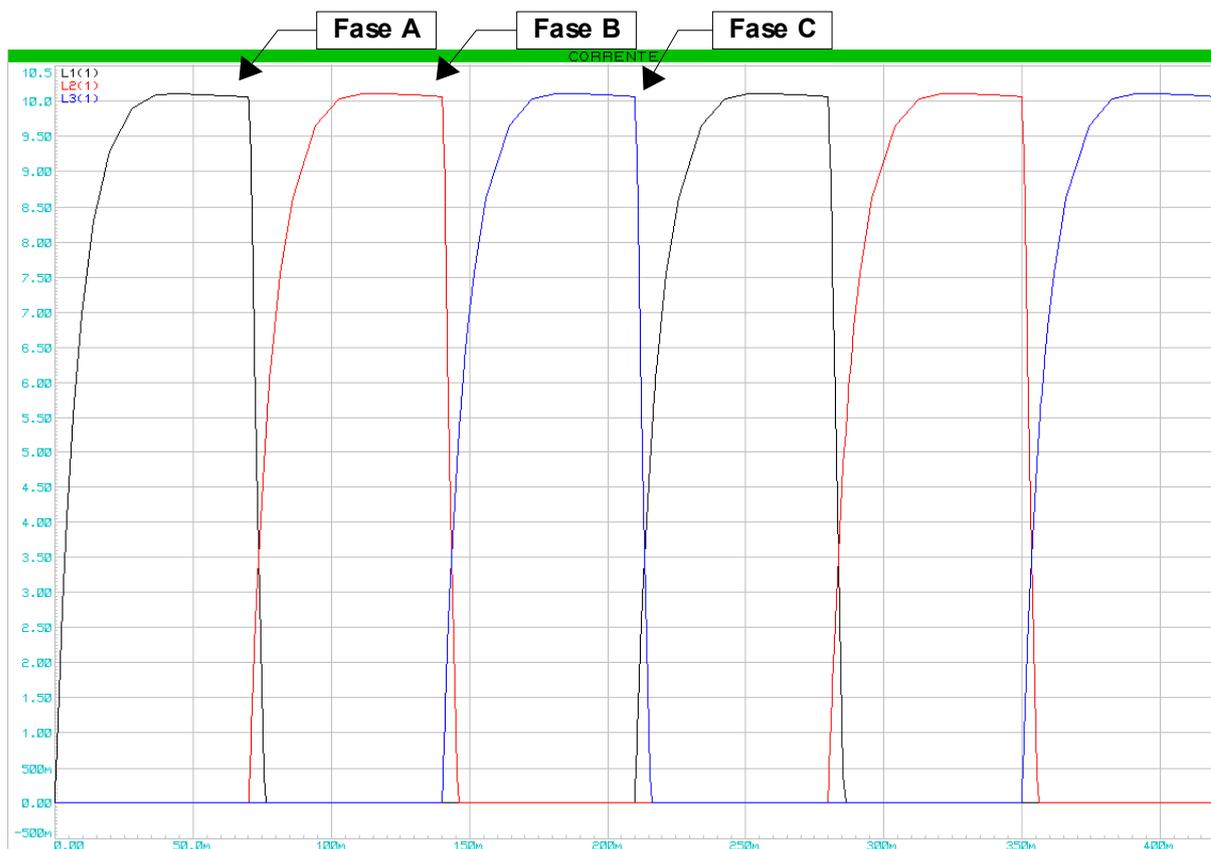


Figura 5.5 – Formas de onda das correntes de fase obtidas por simulação estática do conversor assimétrico da MRRC.

Na Figura 5.5, ficam evidentes os tempos de subida (durante o estado I) e de extinção (durante o estado III) da corrente de fase.

Para acionar os transistores superiores (ímpares) e inferiores (pares) do conversor de potência, foi implementado um circuito de acionamento não-isolado, baseado no circuito integrado (CI) IRS2181, que são específicos para o acionamento desta topologia de conversor, conforme mostrado na Figura 5.6.

Ao todo, são utilizados 3 CIs IRS2181 (um por fase) para o acionamento dos transistores do conversor de potência, juntamente com alguns componentes auxiliares (diodos, capacitores e resistores). O acionamento das chaves superiores é feito utilizando a técnica de *bootstrap*, que é um recurso do CI IRS2181 [60].

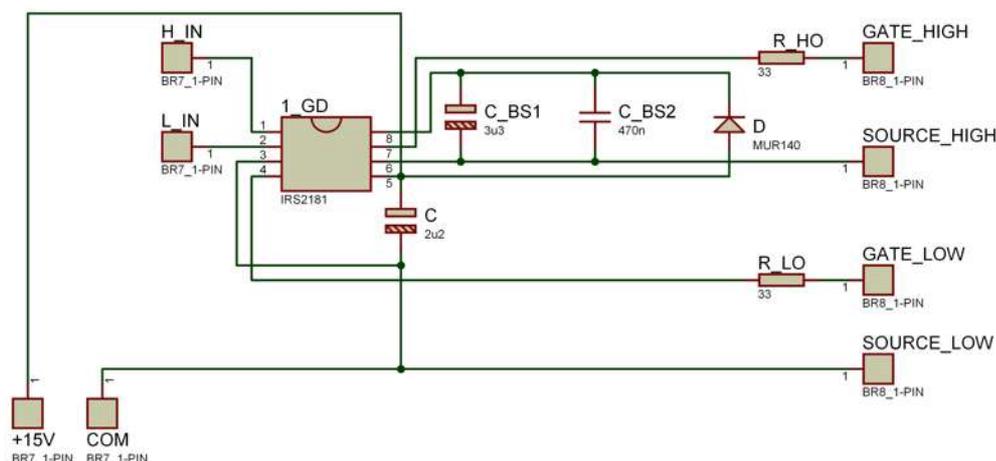


Figura 5.6 – Circuito de acionamento dos transistores do circuito de potência.

Uma das principais peculiaridades da MRC é a necessidade de detecção da posição relativa entre os pólos da parte móvel e do estator, de cada fase. É com base na detecção da parte móvel da máquina que o controle eletrônico efetua a comutação sequencial das fases, determinando, assim, as características operacionais da máquina (i.e., suas variáveis mecânicas de saída).

No caso da MRRC, a detecção da posição dos pólos do rotor foi feita utilizando-se 3 sensores ótico-transmissivos (um para cada fase), que apenas detectavam os instantes de acionamento e desligamento de cada fase, com o auxílio de dois discos ranhurados sobrepostos – fornecidos pelo fabricante da MRRC – acoplado à parte traseira do eixo da máquina, conforme mostrado na Fig. 5.7.

O ajuste dos discos para definição dos instantes de comutação das fases foi feito com base na equação do número de comutações por cada revolução completa do rotor [42], expressada pela equação (2.8).

Como a MRRC possui 6 pólos no estator e 4 no rotor, obtém-se, pela equação (2.8), um total de 12 comutações entre as fases do estator, para cada revolução completa do rotor da máquina. E pela equação (5.1) pode-se calcular o ângulo ($\Delta\theta_c$) que define o espaçamento entre cada ranhura dos discos sobrepostos, bem como entre cada um dos sensores de comutação, conforme mostrado na Figura 5.8. No caso da MRRC, $\Delta\theta_c$ vale 30° .

$$\Delta\theta_c = \frac{360^\circ}{N_c} \quad (5.1)$$

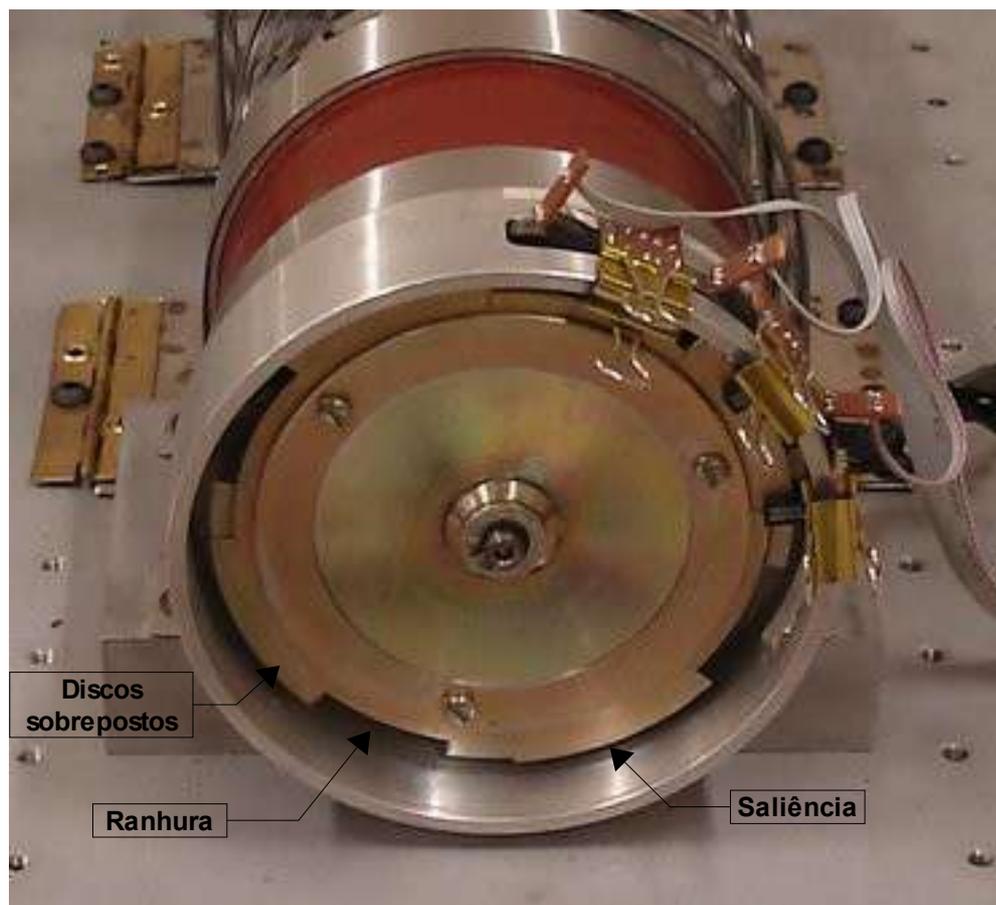


Figura 5.7 – Discos ranhurados sobrepostos, acoplados à parte traseira do eixo da MRRC.

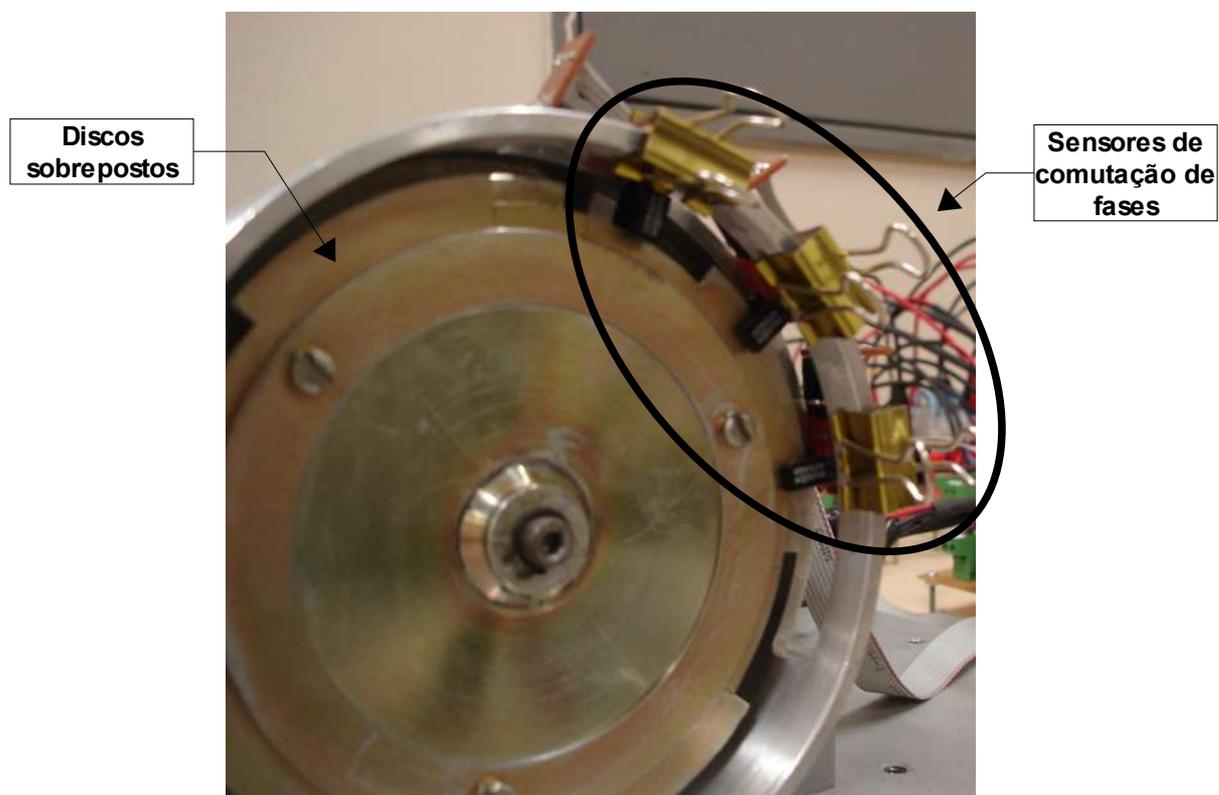


Figura 5.8 – Fixação dos sensores de posição na parte traseira do estator da MRRC.

Para este método de comutação de fases da MRRC, verifica-se que faz-se necessário um sensor de comutação para cada fase, conforme as Figuras 5.7 e 5.8, totalizando 3 sensores de comutação de fases.

Os sensores de corrente utilizados para controle da corrente de fase são o modelo LEM LTS25-NP, similar ao que foi utilizado nas medições das características eletromagnéticas das máquinas rotativa e linear, conforme mostrado no capítulo 4. Estes sensores funcionam através do princípio do efeito Hall e, apesar de possuírem uma faixa de tensão de saída estreita (2,5 a 3,125V), são componentes de funcionamento bastante simples, sendo alimentados com tensão de +5Vcc. Cada sensor de corrente foi conectado em série com sua respectiva fase da máquina, conforme mostrado na Figura 5.3.

A implementação do sistema de acionamento da MRRC pode ser visto na Figura 5.9.

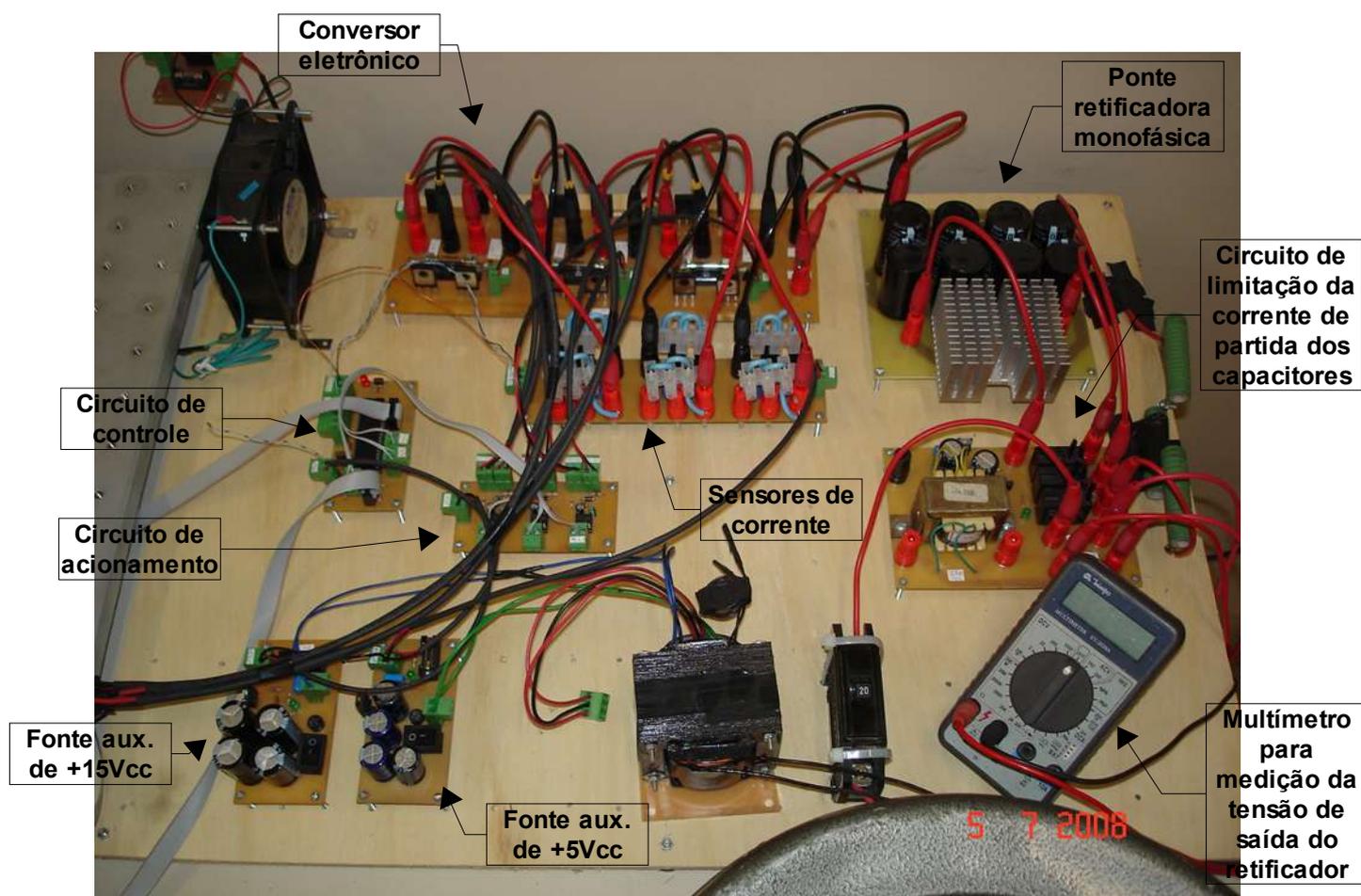


Figura 5.9 – Implementação do sistema de acionamento para a MRRC.

5.1.2. Máquina linear

A fonte de tensão contínua escolhida para a máquina linear baseia-se numa fonte regulada ajustável, alimentada por 2 transformadores monofásicos abaixadores, cujas entradas são conectadas à rede elétrica (valor eficaz de tensão fixo em 220Vca) e cujos valores eficazes de saída são de 24Vca, cada um. Na entrada da fonte regulada utilizou-se um filtro capacitivo, de forma a se reduzir a oscilação da tensão na entrada do conversor eletrônico de potência [59].

O circuito da fonte regulada ajustável é mostrado nas Figura 5.10, e baseia-se em 4 reguladores lineares LM338, conectados em paralelo, permitindo um ajuste da tensão de saída (através de um potenciômetro) entre 3,7Vcc e 30Vcc, com uma corrente que pode variar entre 0 e 20Acc (cada regulador capaz de fornecer até 5Acc).

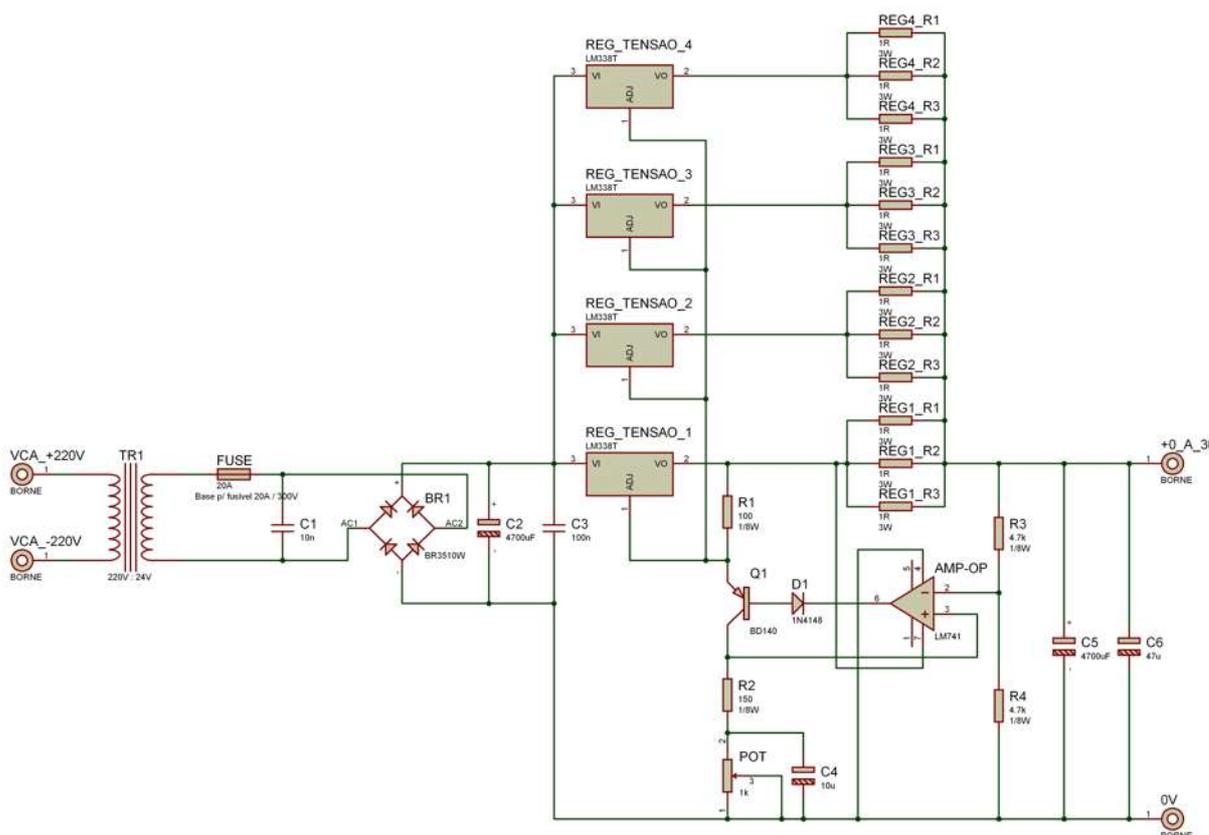


Figura 5.10 – Circuito da fonte regulada ajustável implementado para alimentar a MLRC.

Para permitir um funcionamento adequado da fonte regulada, além dos dissipadores em cada um dos 4 reguladores, foi utilizada ventilação forçada sobre os mesmos.

O conversor eletrônico escolhido para alimentação da MLRC é similar ao mostrado na Figura 5.3, o qual funciona com os mesmos modos de condução mostrados na Figura 5.4 e na Tabela 5.1.

As formas de onda das correntes de fase no conversor assimétrico, obtidas por simulação estática, são mostradas na Figura 5.11.

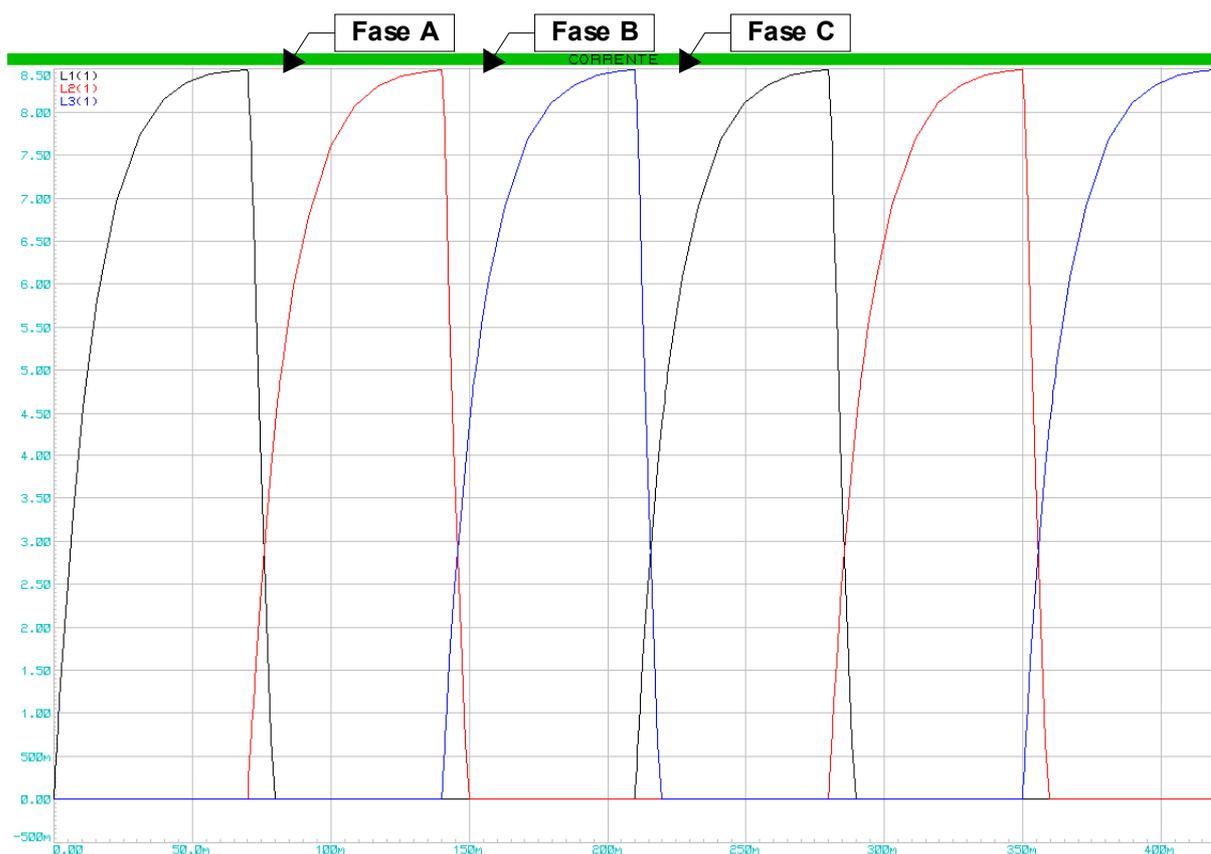


Figura 5.11 – Formas de onda das correntes de fase obtidas por simulação estática do conversor assimétrico da MLRC.

Na Figura 5.11 (analogamente à Figura 5.5), ficam evidentes os tempos de subida (durante o estado I) e de extinção (durante o estado III) da corrente de fase.

O circuito de acionamento da MLRC e seu funcionamento são similares ao circuito utilizado para o acionamento da MRRC, mostrado na Figura 5.6.

Para detecção da posição dos pólos do translador, foram utilizados 3 sensores ótico reflexivos (um para cada fase da MLRC), e que foram fixados a um suporte metálico – acoplado ao próprio translador – conforme mostrado na Figura 5.12.

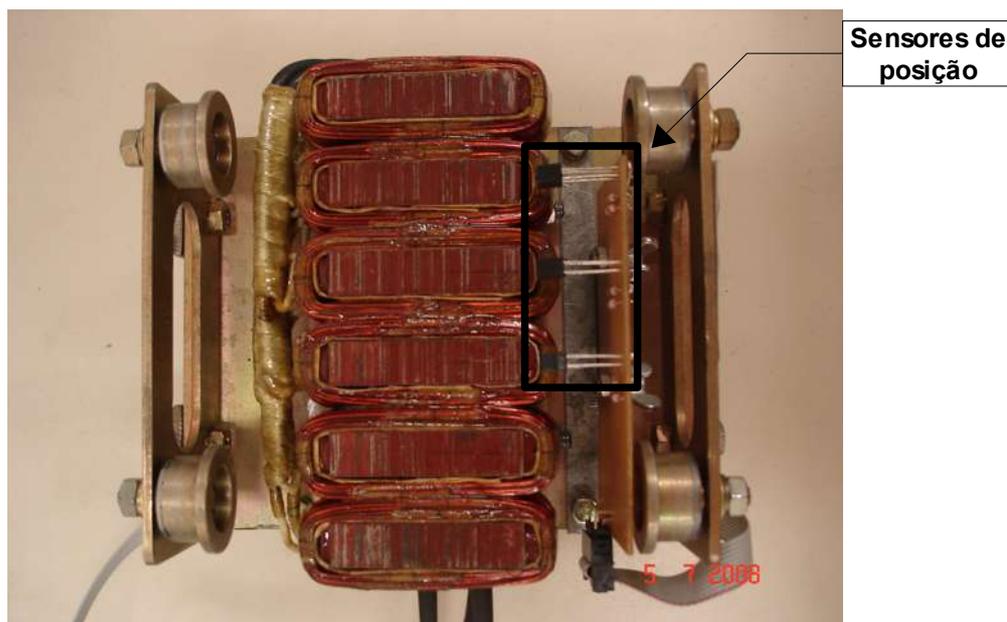


Figura 5.12 – Sensores utilizados para detecção da posição dos pólos do translador.

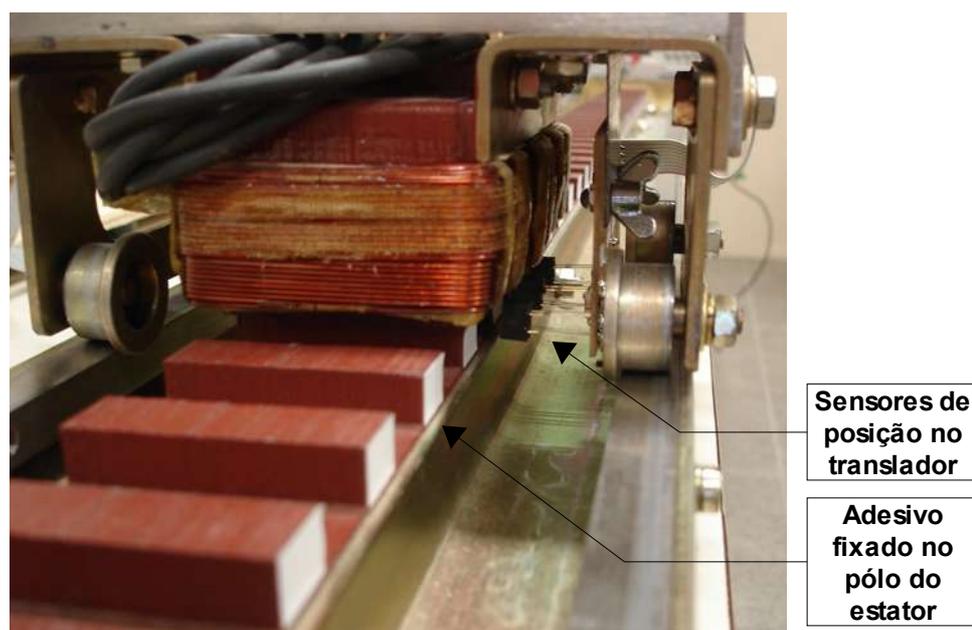


Figura 5.13 – Detalhe dos adesivos brancos fixados na face lateral de cada um dos pólos do estator, para minimizar a atenuação do sinal dos sensores de posição.

Para minimizar a atenuação no sinal emitido pelos sensores ótico reflexivos, e garantir uma ampla variação no sinal de saída dos mesmos, foram fixados diversos adesivos, de superfície branca, na lateral de cada um dos pólos do estator, conforme mostrado na Figura 5.13. Além disso, a distância entre os sensores de posição e os pólos do estator foi ajustada por tentativa e erro, obtendo-se uma redução satisfatória na atenuação do sinal dos sensores com uma distância

de, aproximadamente, 3mm.

Os sensores de corrente escolhidos para controle da corrente de fase são idênticos aos utilizados para a máquina rotativa.

A implementação do sistema de acionamento da MLRC pode ser visto na Figura 5.14.

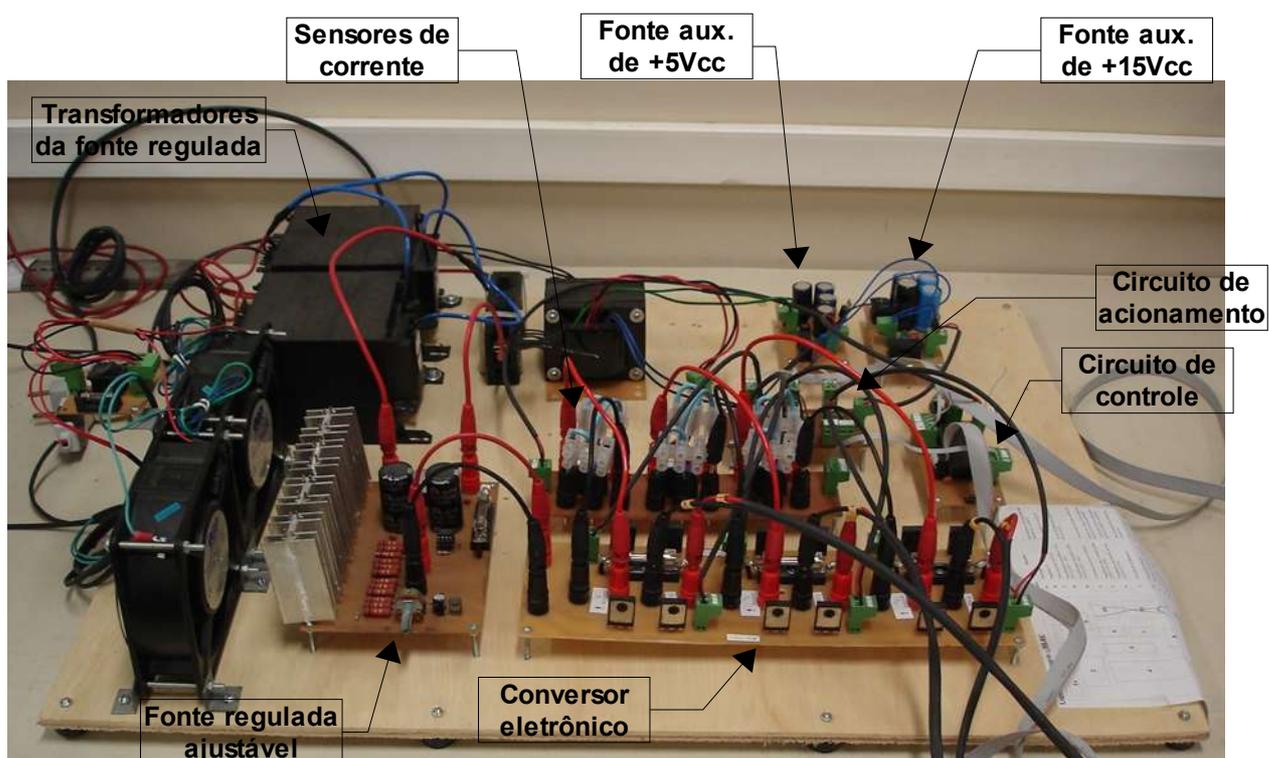


Figura 5.14 – Implementação do sistema de acionamento para a MLRC.

5.2. Sistema de controle

Uma importante característica da MRC é sua necessidade de um sistema de controle eletrônico para propiciar seu funcionamento. Ou seja, ao contrário das máquinas de indução ou máquina de corrente contínua convencional (com escovas), que podem funcionar normalmente quando conectadas a uma fonte com valor nominal de tensão adequado, a MRC requer um sistema de controle eletrônico capaz de efetuar, em geral, os controles de comutação sequencial das fases e do valor da corrente da fase que está acionada.

A comutação sequencial de fases foi ilustrada, por meio da simulação estática, conforme as Figuras 5.5 e 5.11. A dinâmica eletromagnética que determina a duração e a sequência de acionamento de cada fase é detalhada na Figura 5.15.

Observando a Figura 5.15, verifica-se que, para obter um conjugado de

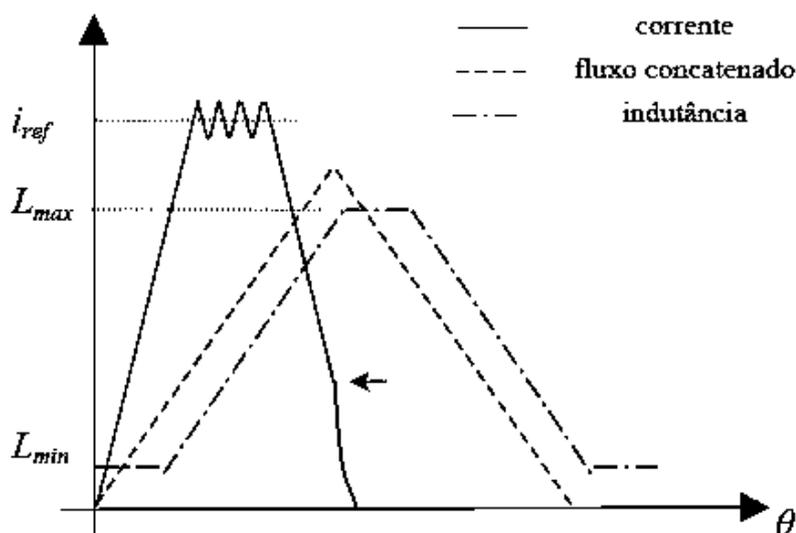


Figura 5.15 – Dinâmica eletromagnética que determina o controle de comutação das fases.

motorização da máquina, deve-se acionar a fase no intervalo de crescimento da indutância da fase atual (i.e., intervalo entre o início do alinhamento e o total alinhamento entre os pólos do estator e da parte móvel). Considerando ainda os transitórios de subida e extinção da corrente de fase, verifica-se também a necessidade de uma “antecipação” nos instantes de acionamento e de desligamento da fase energizada, de forma a garantir a extinção da corrente no intervalo de variação negativa (descida) da indutância (o que, caso ocorresse, resultaria num esforço indesejado de frenagem na parte móvel da máquina, causando perdas no seu funcionamento como motor).

A mudança na inclinação da forma de onda da corrente de fase, no intervalo de sua extinção (indicada pela seta, nas Figuras 5.15 e 5.16), ocorre no intervalo em que os dois transistores que alimentam a fase encontram-se abertos, fazendo com que haja inversão da polaridade na fase da máquina (considerando o conversor assimétrico, das Figuras 5.3 e 5.4). Isto faz com que a corrente de fase seja extinta mais rapidamente.

A estratégia de controle da corrente implementada para as máquinas rotativa e linear foi o controle de corrente por histerese, com regulação por PWM. Nesta estratégia de controle, o processador recebe os sinais de saída do sensor de corrente através do canal A/D correspondente, e compara este valor com a referência estabelecida. Se o valor lido pelo canal A/D for maior do que o valor de referência da corrente, aplica-se o ciclo de trabalho (ct) baixo no canal PWM correspondente à fase acionada, acarretando um decréscimo da corrente de fase.

Caso contrário, aplica-se o valor alto de ciclo de trabalho, fazendo com que a corrente volte a aumentar. Esta lógica de funcionamento é sintetizada pela equação (5.2), e ilustrada na Figura 5.16.

$$ct = \begin{cases} ct_{baixo}, & \text{se } i_{fase} > i_{ref} \\ ct_{alto}, & \text{se } i_{fase} \leq i_{ref} \end{cases} \quad (5.2)$$

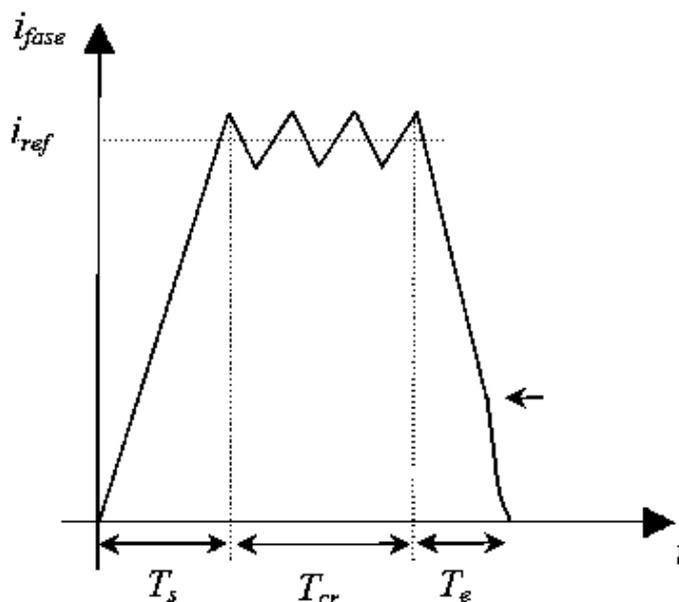


Figura 5.16 – Ilustração do controle de corrente por histerese.

Nos subitens 5.2.1 e 5.2.2, verifica-se que o princípio de funcionamento do sistema de controle das máquinas rotativa e linear é bastante similar, sendo a principal diferença a forma de implementação e funcionamento do controle da corrente de fase para cada uma das duas máquinas.

Para ambas as máquinas, o sistema de controle foi baseado no controlador digital de sinais dsPIC30F3011 (arquitetura TTL), operando com *clock* de 120MHz e capacidade de processamento de 30mips. Foram utilizados 3 canais PWM, cada um operando com frequência de chaveamento 25KHz, e valores de ciclo de trabalho baixo e alto de 10% e 90%, respectivamente. Utilizou-se ainda a configuração padrão para leitura dos canais A/D, com taxa de amostragem de 500.000 amostras por segundo.

5.2.1. Máquina rotativa

A implementação do sistema de controle da máquina rotativa consistiu de

um dispositivo para selecionar o sentido de rotação, e um potenciômetro para ajustar, durante a operação da máquina, a referência da corrente de fase.

O circuito de controle implementado para a MRRC é mostrado na Figura 5.17, enquanto o terminal de operação é mostrado nas Figuras 5.18 (circuito) e 5.19 (implementação).

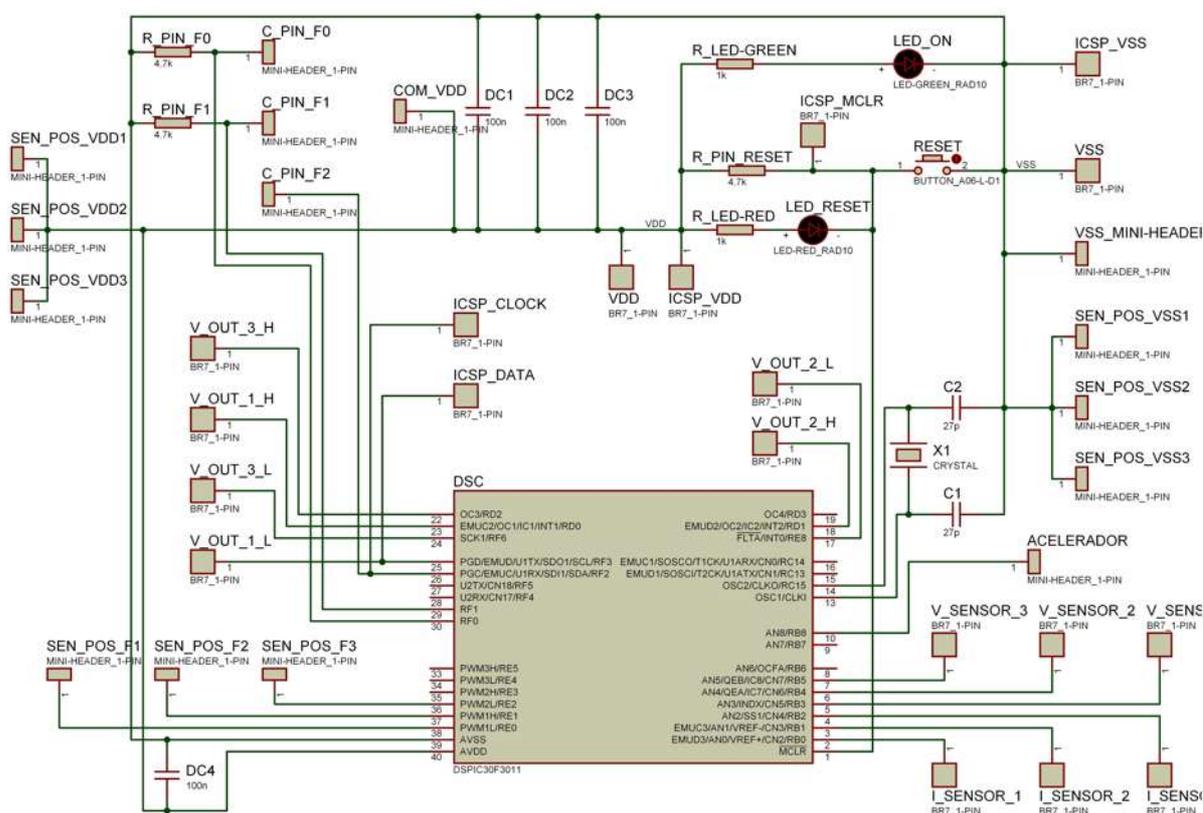


Figura 5.17 – Circuito do sistema de controle da MRRC.

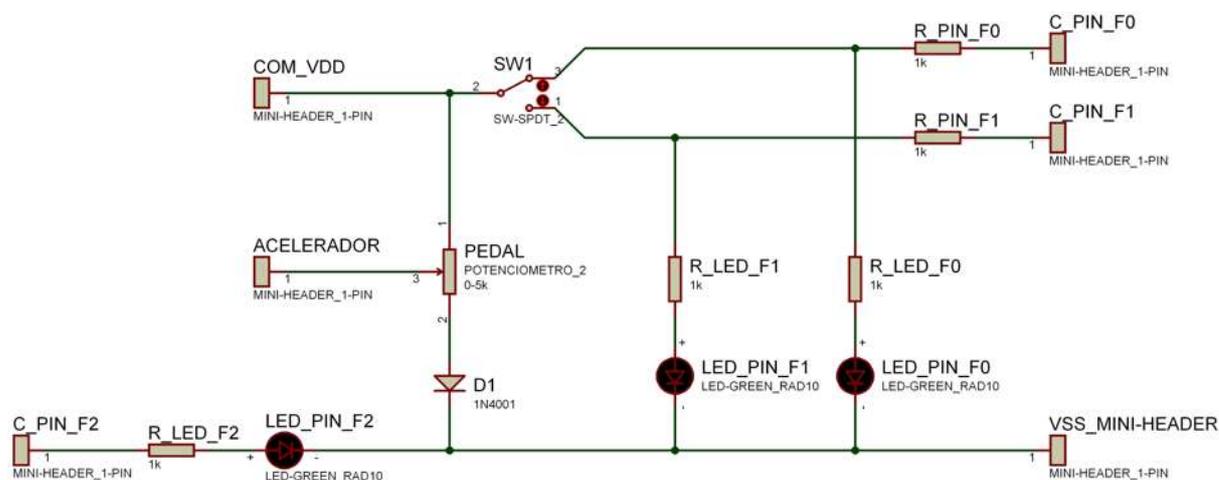


Figura 5.18 – Circuito do terminal de operação para seleção do sentido de rotação da máquina e ajuste do valor de referência da corrente de fase da MRRC.

5.2.2. Máquina linear

A implementação do sistema de controle da máquina linear consistiu de um dispositivo para selecionar o sentido de deslocamento, com um valor de referência de corrente de fase fixo no valor nominal da máquina, i.e., 8.5A.

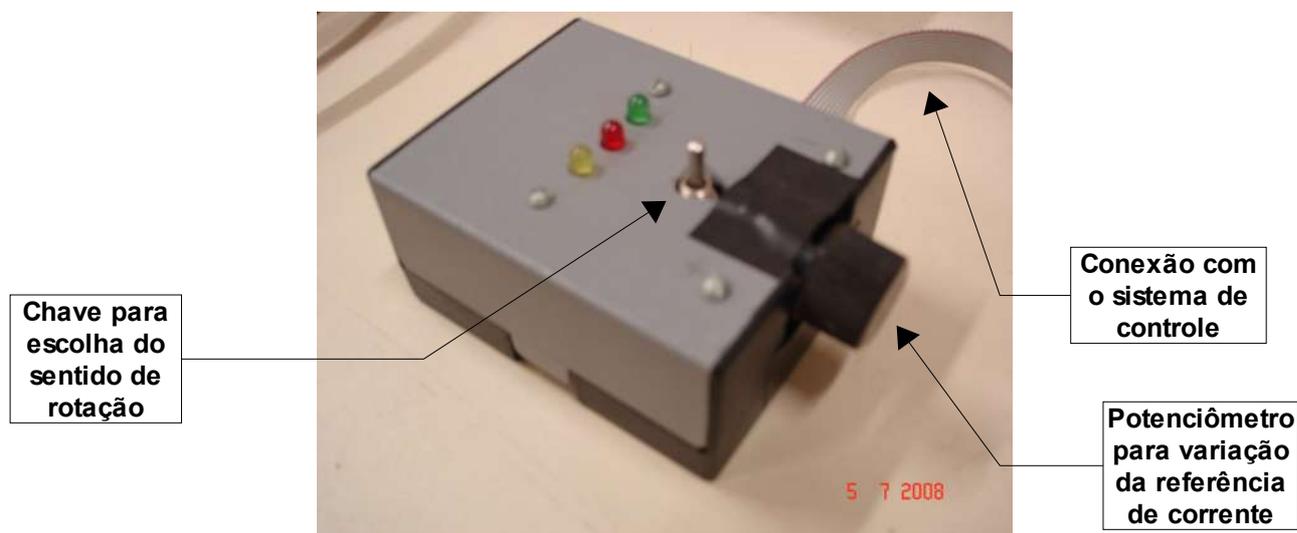


Figura 5.19 – Implementação do terminal de operação da MRRC.

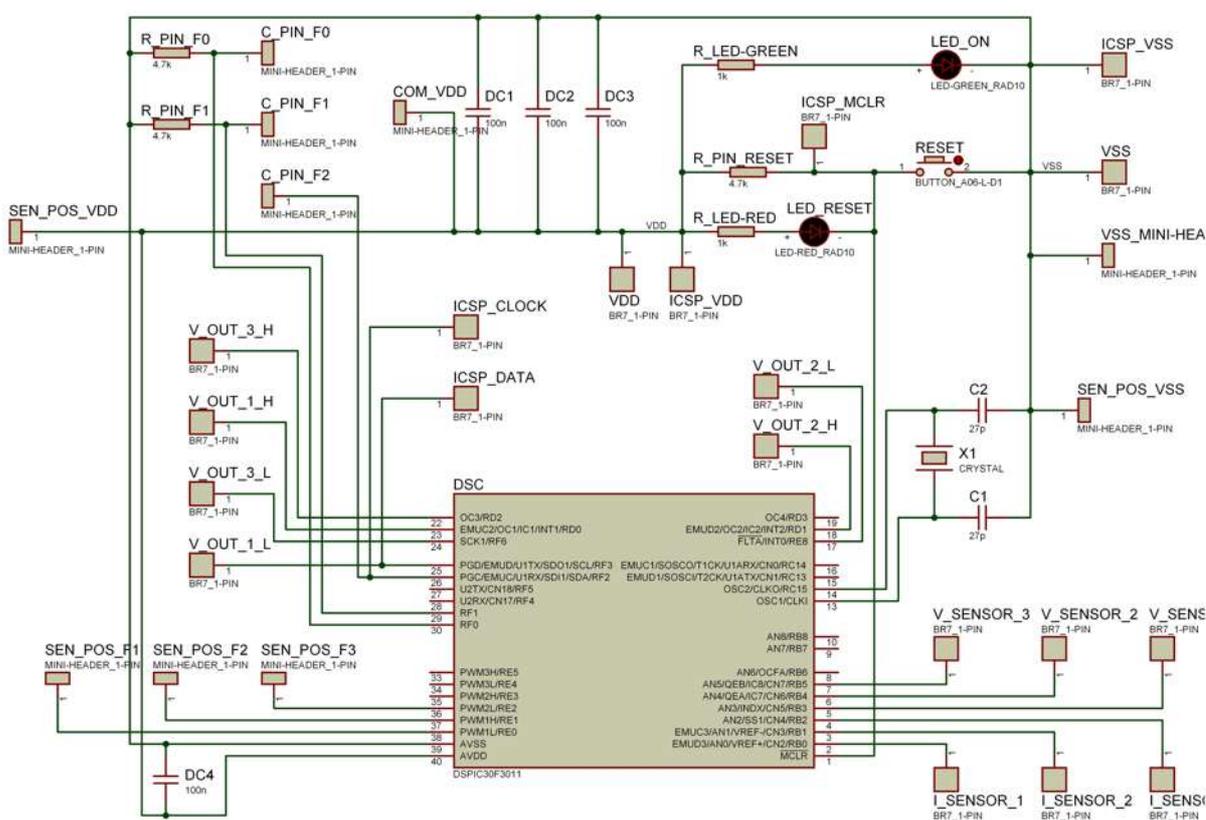


Figura 5.20 – Circuito do sistema de controle da MLRC.

O circuito de controle implementado para a MLRC é mostrado na Figura 5.20, enquanto o terminal de operação é mostrado nas Figuras 5.21 (circuito) e 5.22 (implementação).

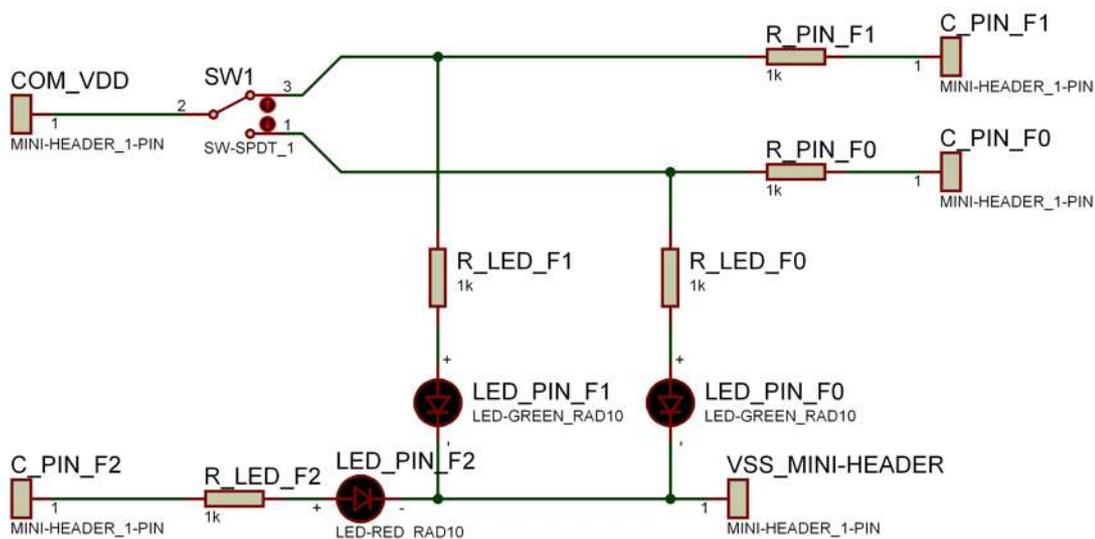


Figura 5.21 – Circuito do terminal de operação para seleção do sentido de deslocamento da MLRC.

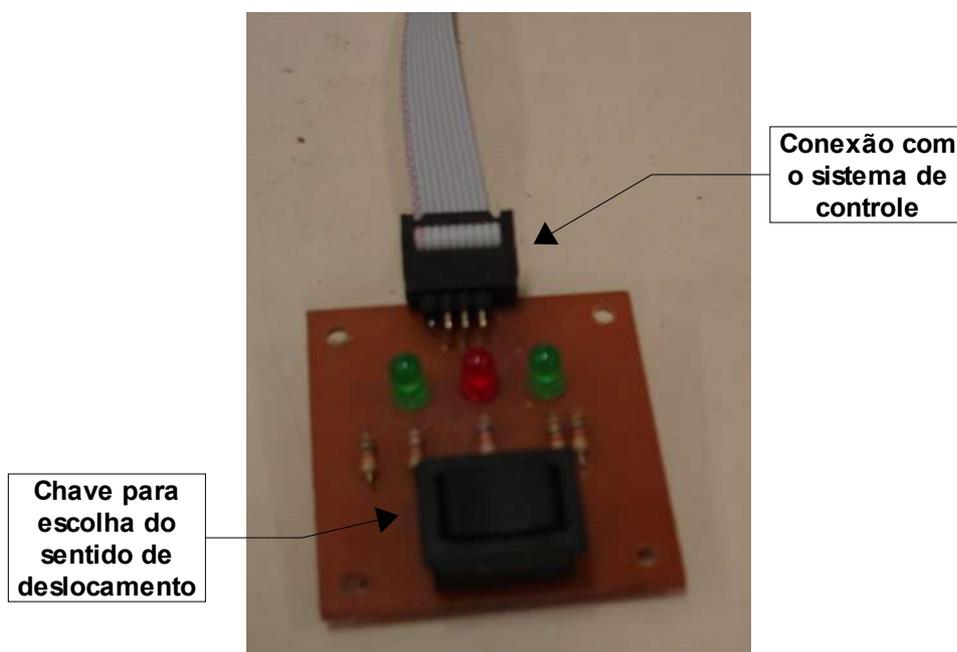


Figura 5.22 – Implementação do terminal de operação da MLRC.

Capítulo 6

Ensaio experimentais dinâmicos e análise do desempenho das máquinas rotativa e linear

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais realizados com as máquinas rotativa e linear, visando avaliar seu desempenho prático através da medição de grandezas mecânicas de saída destas máquinas.

6.1. Máquina rotativa

Os ensaios realizados para a máquina rotativa foram os seguintes:

- Ensaio sem carga, com 50% da corrente nominal;
- Ensaio sem carga, com corrente nominal;
- Ensaio com 50% de carga e 50% de corrente nominal;
- Ensaio com 50% de carga e com corrente nominal;
- Ensaio com carga nominal e 50% da corrente nominal;
- Ensaio com carga e corrente nominais;
- Ensaio de falta de 1 fase, a vazio;
- Ensaio de falta de 1 fase, com 50% de carga;
- Ensaio de falta de 1 fase, com carga nominal;
- Ensaio de falta de 2 fases, a vazio;
- Ensaio de falta de 2 fases, com 50% de carga;
- Ensaio de falta de 2 fases, com carga nominal.

Para cada um dos ensaios acima, as grandezas medidas foram:

- tensão e corrente na alimentação da MRRC;
- Potência mecânica, conjugado e velocidade na ponta do eixo da MRRC;
- Tensão e corrente gerados pela máquina c.c.

A tensão de alimentação de cada fase da MRRC, em todos os ensaios, foi de 120Vcc.

No diagrama da Figura 6.1 é ilustrada a estrutura dos ensaios realizados,

enquanto na Figura 6.2 é mostrada a implementação da bancada de ensaios experimentais da MRRC.

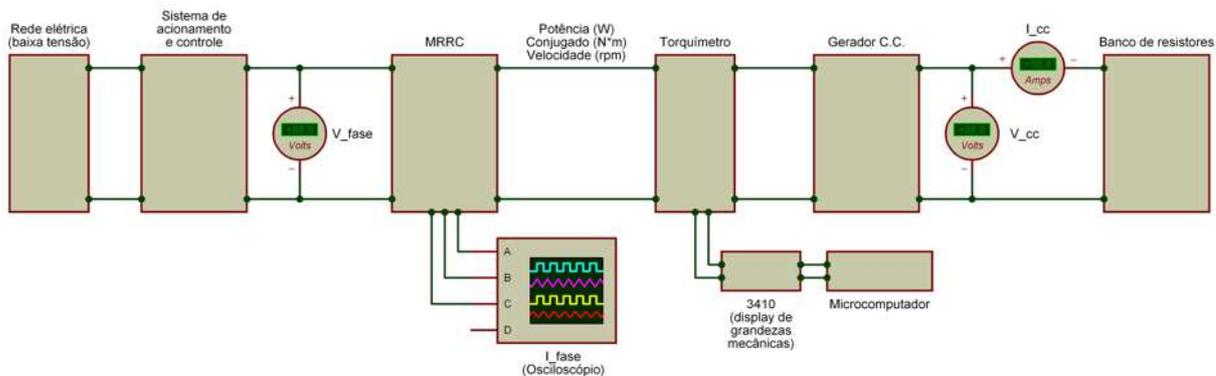


Figura 6.1 – Diagrama representando a estrutura dos ensaios experimentais realizados com a MRRC.

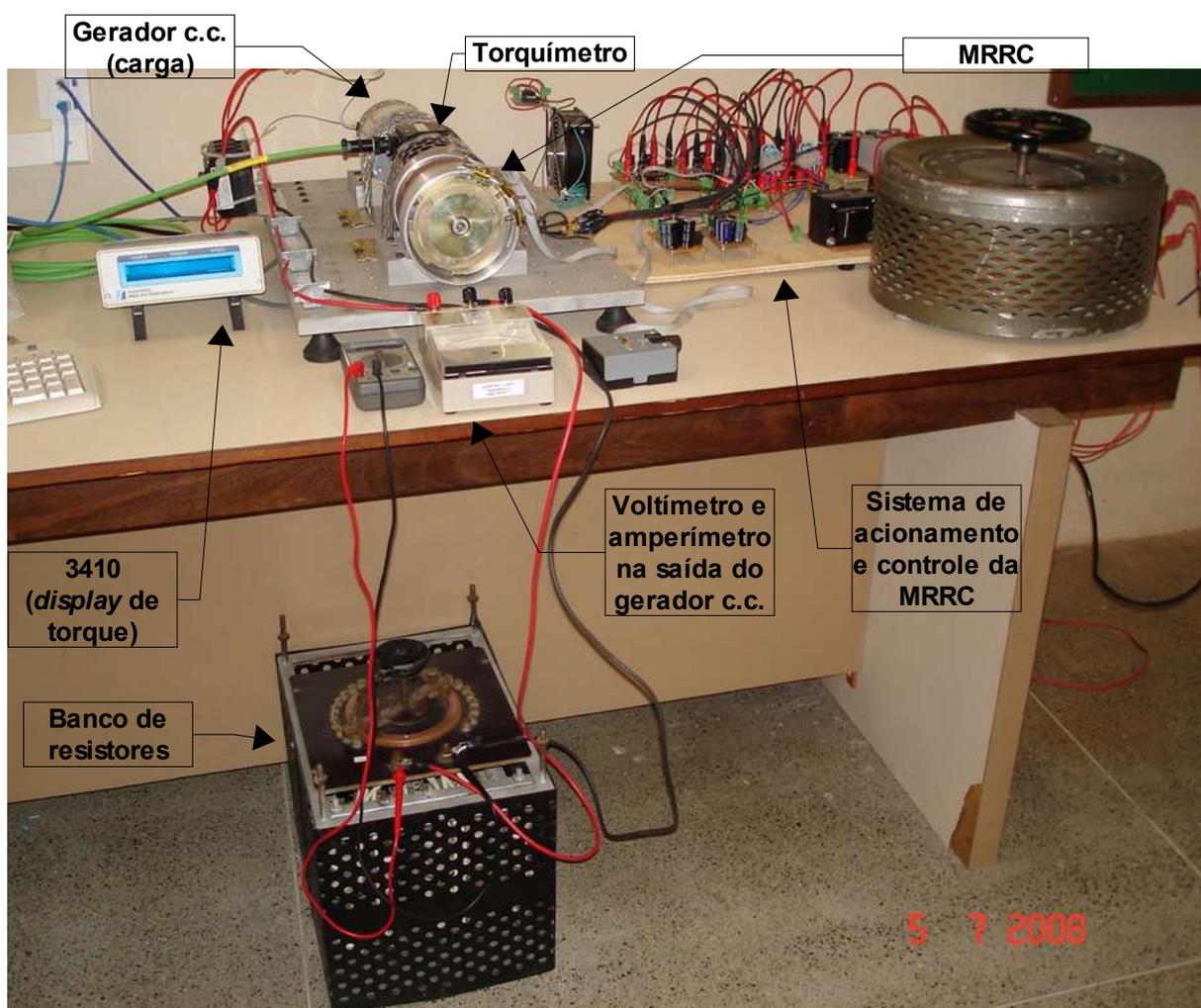


Figura 6.2 – Ilustração da bancada de ensaios experimentais da MRRC.

Nas Figuras 6.3 e 6.4 são apresentadas as formas de onda para os ensaios a vazio.

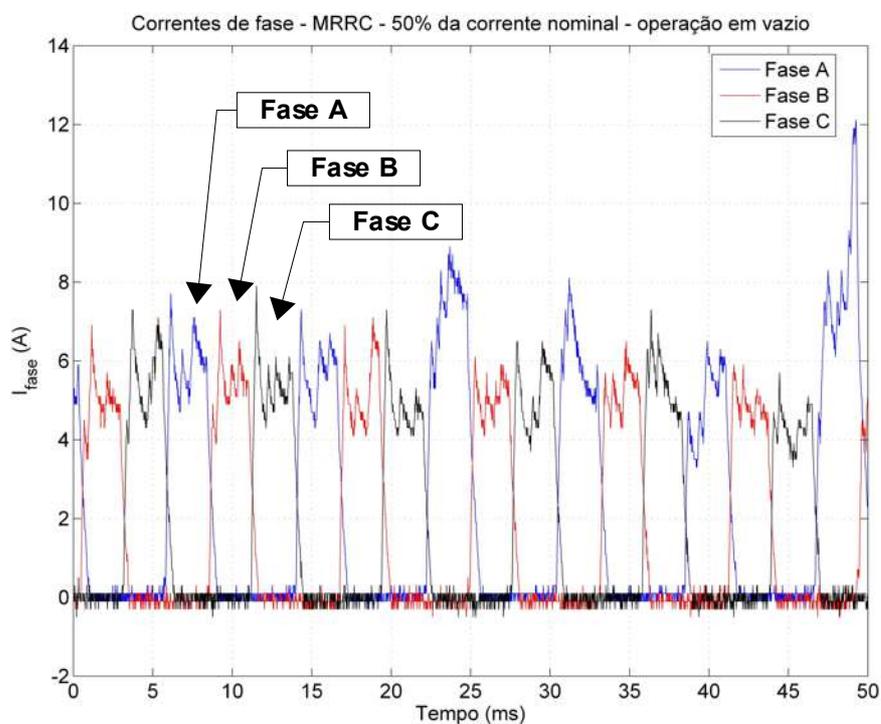


Figura 6.3 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando sem carga, com 50% da corrente nominal.

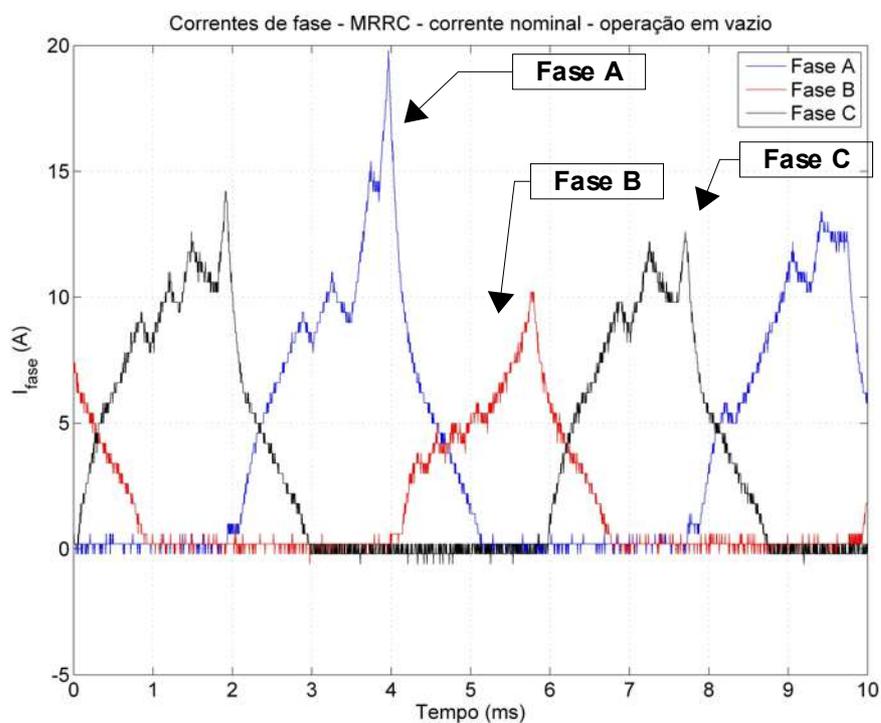


Figura 6.4 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando sem carga, com corrente nominal.

Nas Figuras 6.5 e 6.6 são apresentadas as formas de onda para os ensaios com 50% de carga nominal.

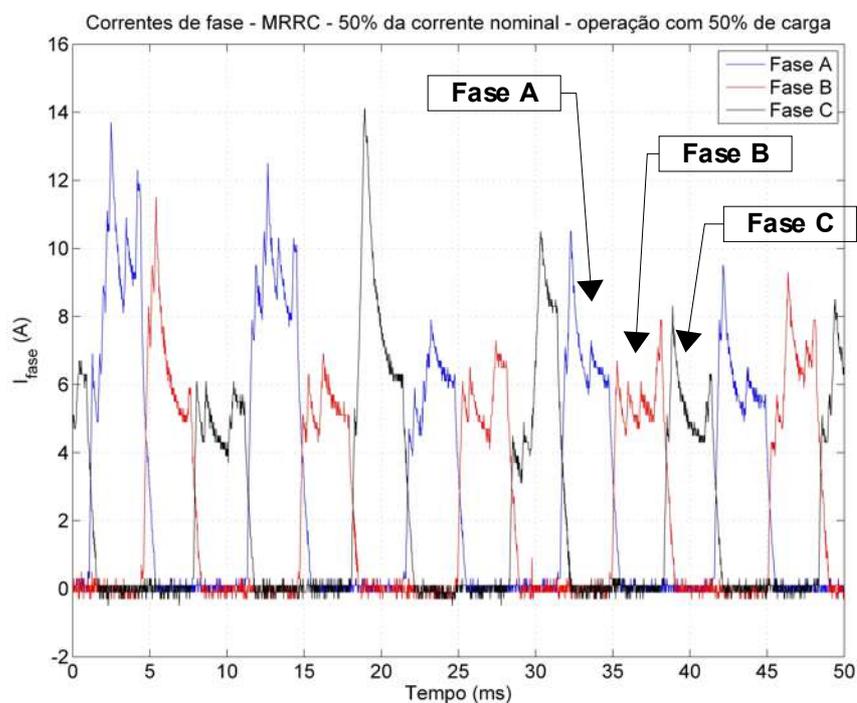


Figura 6.5 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com 50% de carga nominal e 50% da corrente nominal.

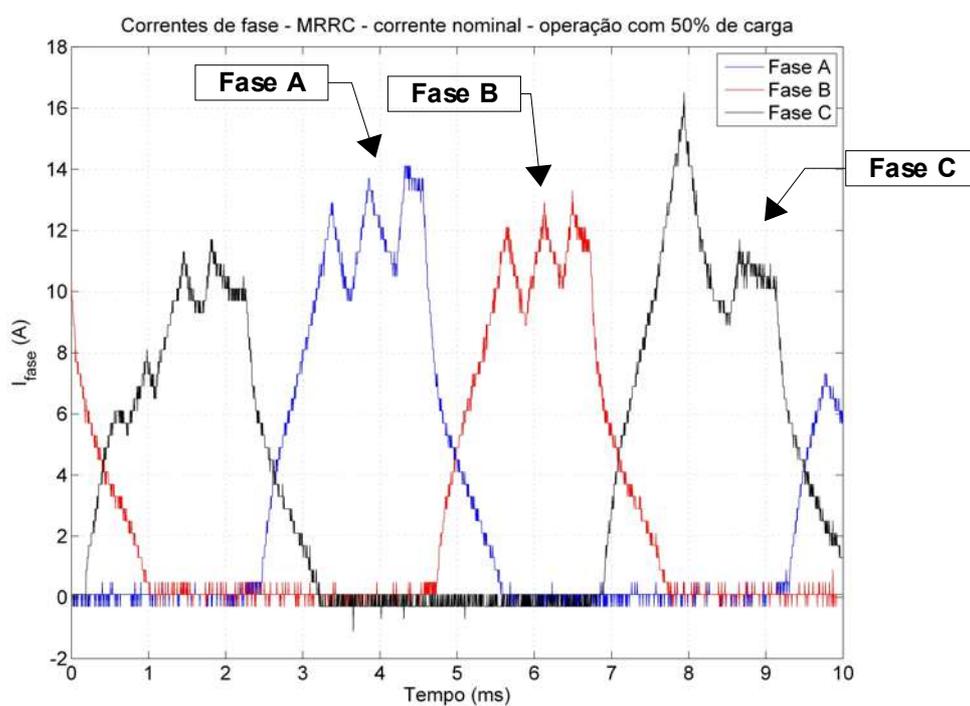


Figura 6.6 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com 50% de carga nominal e corrente nominal.

Nas Figuras 6.7 e 6.8 são apresentadas as formas de onda para os ensaios com carga nominal.

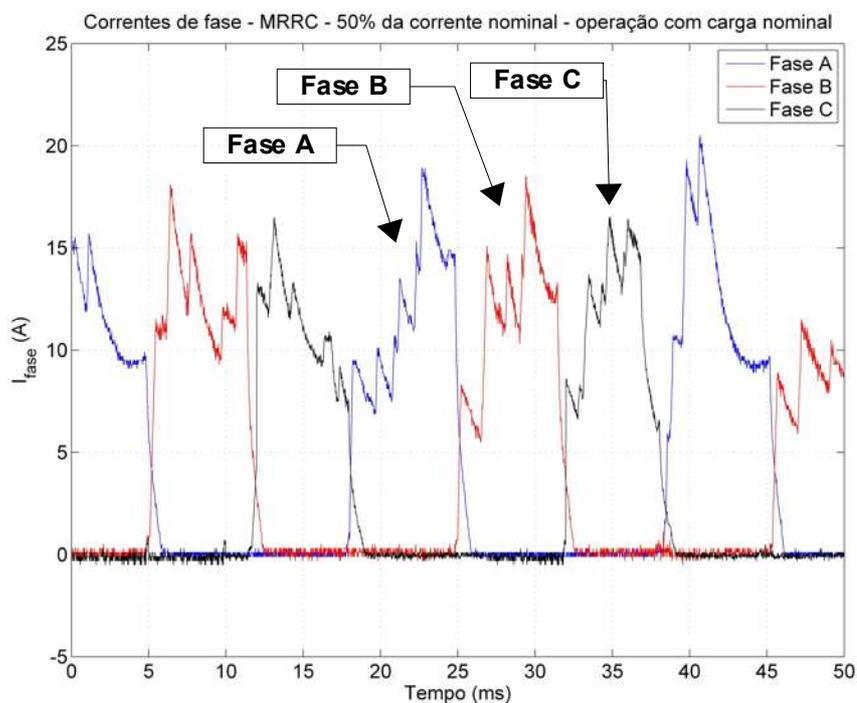


Figura 6.7 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com carga nominal e 50% da corrente nominal.

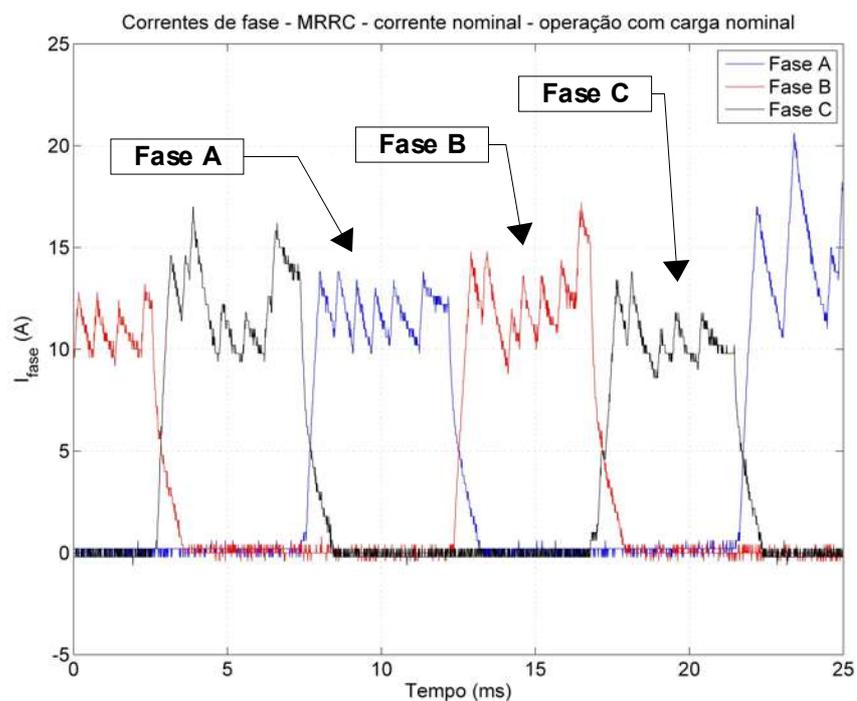


Figura 6.8 – Formas de onda das correntes de fase da MRRC, operando com carga e corrente nominais.

Nas Figuras 6.9 e 6.10, são mostrados os gráficos de potência, conjugado e velocidade na ponta do eixo da MRRC, relativos às condições de operação sem carga, 50% e 100% de carga nominal, para os casos de alimentação com 50% e 100% da corrente nominal de fase.

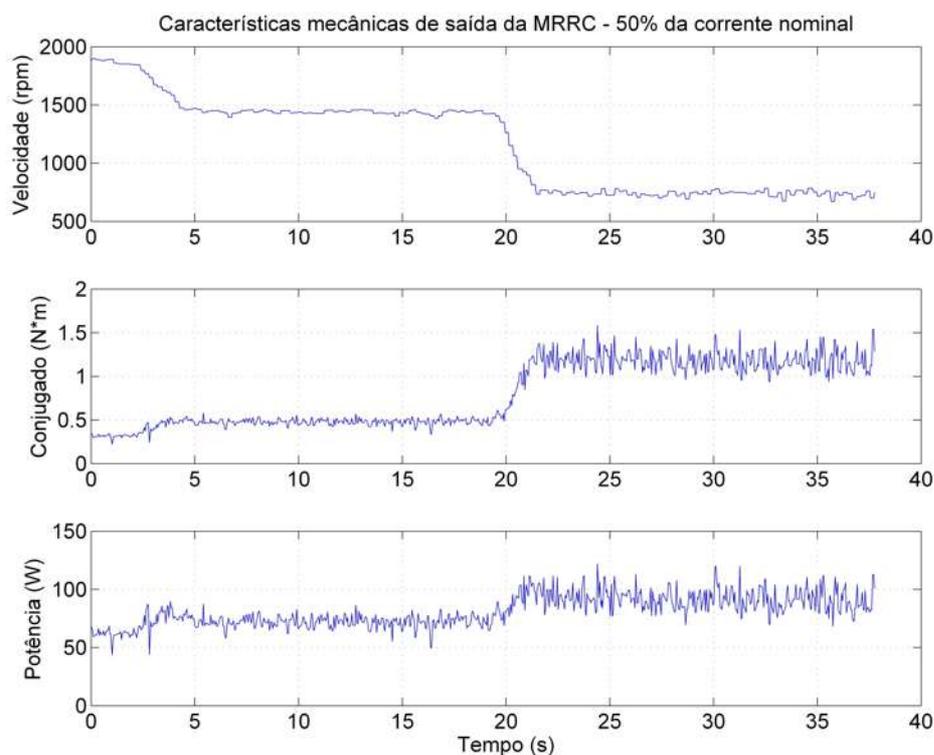


Figura 6.9 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com 50% de sua corrente nominal.

É importante destacar a instabilidade que ocorre no controle da corrente, na qual verificam-se picos esporádicos de corrente, com amplitude até 3 vezes maior do que o valor de referência de corrente, especialmente com o aumento do conjugado (i.e., aumento da referência de corrente). Esta variação abrupta da corrente de fase é resultado, principalmente, da pequena faixa de variação do sinal de saída do sensor de corrente (o que dificulta a detecção do valor de corrente, em alguns ciclos de captura do canal A/D) e da utilização de um sistema de acionamento não-isolado (tornando a aquisição do sistema de controle, pelo canal A/D, mais suscetível à interferência por ruídos através do condutor de referência do circuito).

Os resultados dos ensaios para verificar a tolerância da MRRC a falhas, operando com 1 e com 2 fases, são mostrados nas Figuras 6.11 a 6.14.

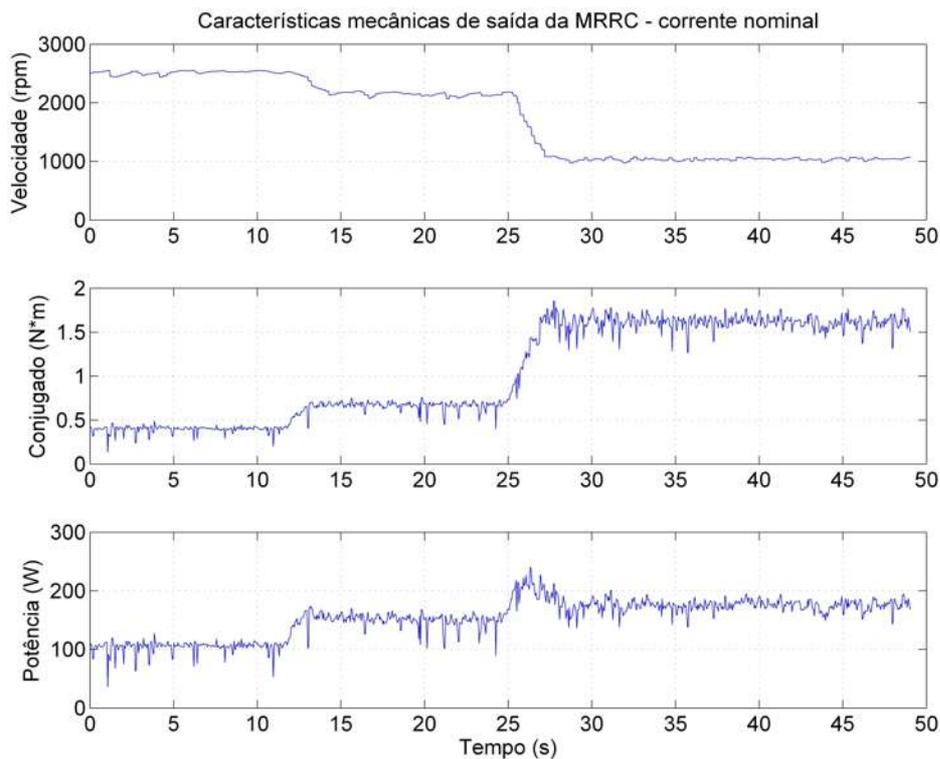


Figura 6.10 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com sua corrente nominal.

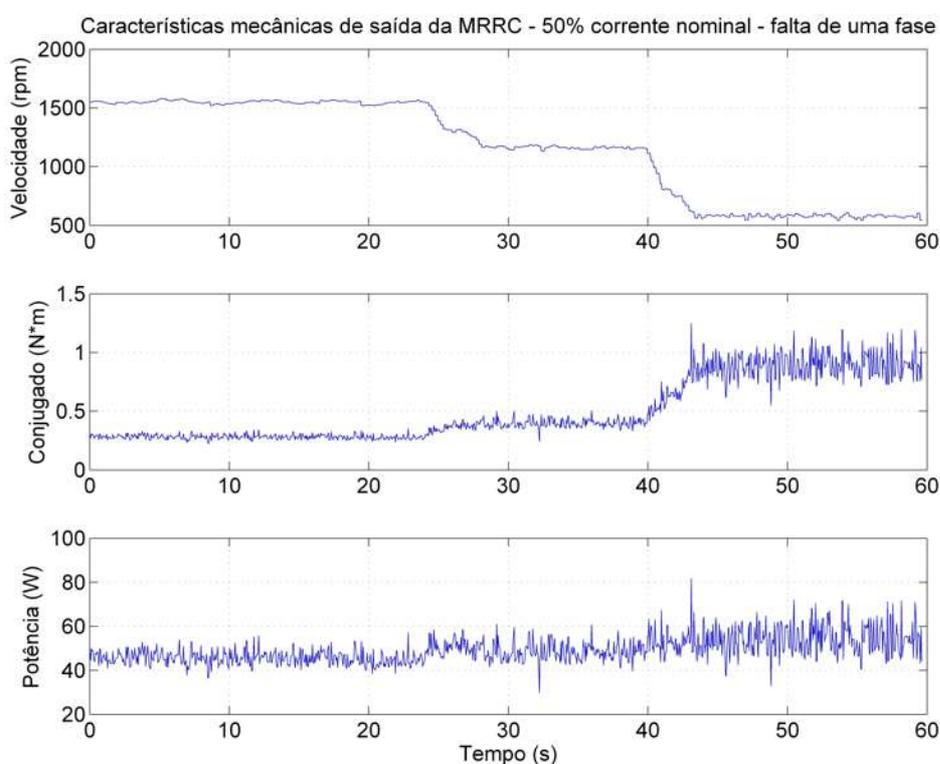


Figura 6.11 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com falta de 1 fase, e 50% da corrente nominal.

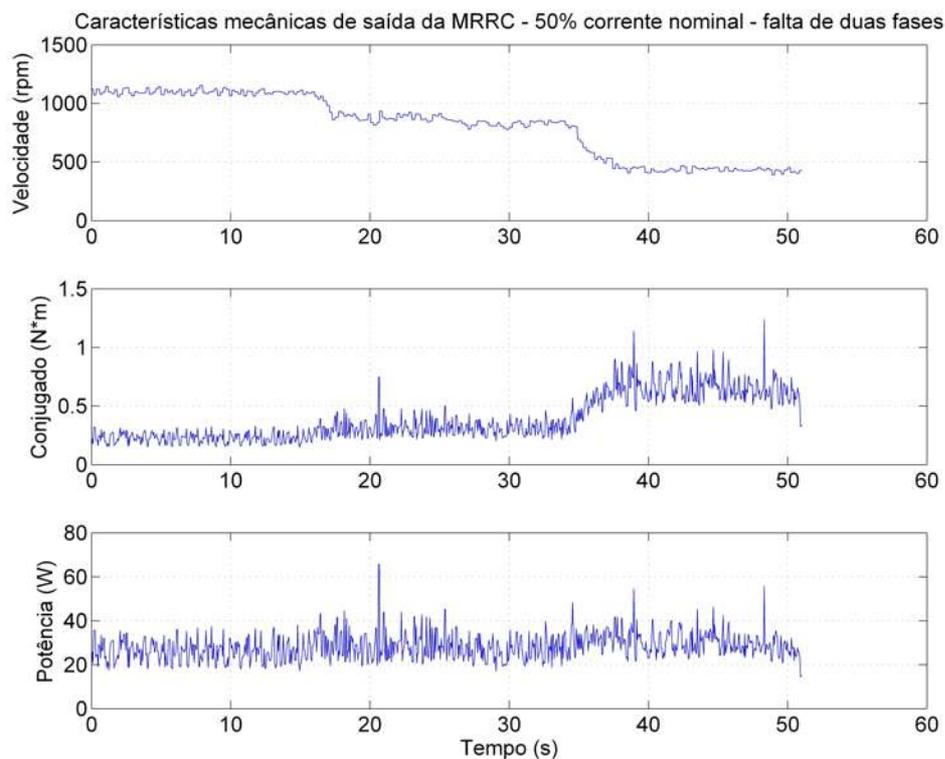


Figura 6.12 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição operação da MRRC com falta de 2 fases, e 50% da corrente nominal.

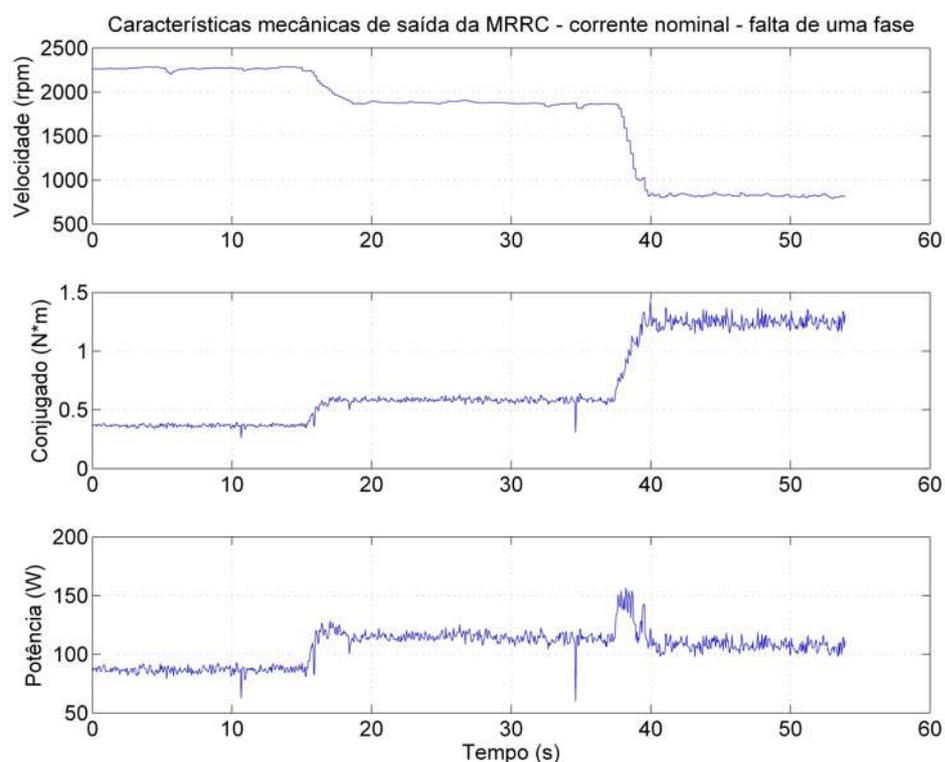


Figura 6.13 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição de operação da MRRC com falta de 1 fase, e corrente nominal.

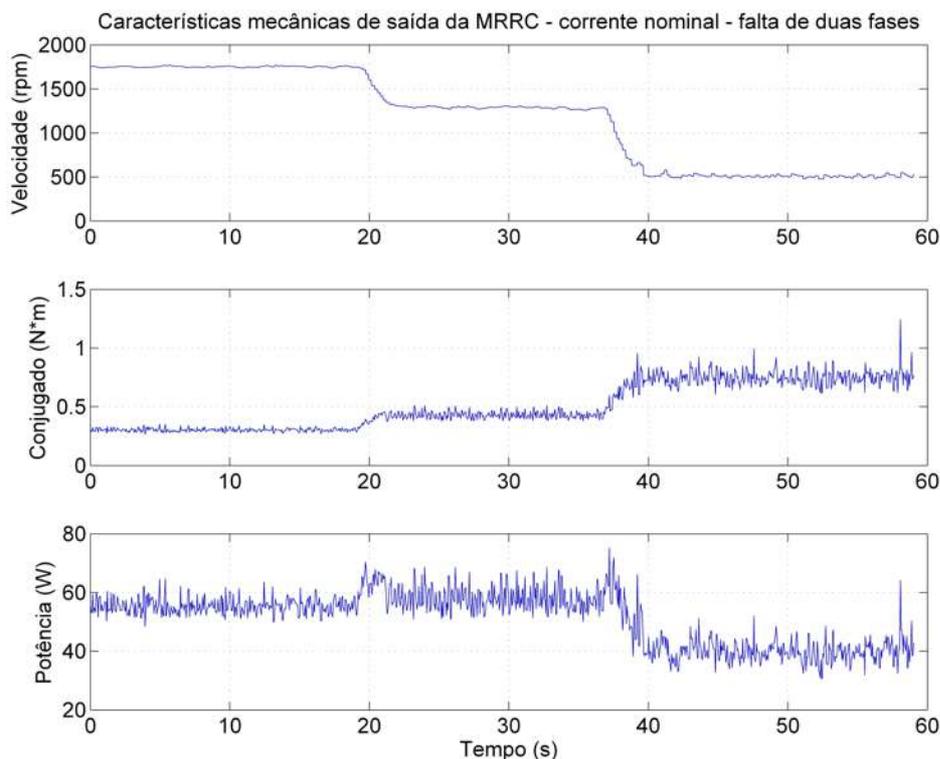


Figura 6.14 – Variação das grandezas mecânicas (velocidade, conjugado e potência), na saída da MRRC, em função da variação da carga, na condição operação da MRRC com falta de 2 fases, e corrente nominal.

Verifica-se que, mesmo em situações de falta de uma das fases, a MRRC pode continuar a operar, com queda no conjugado proporcional ao número de fases em falta.

6.2. Máquina linear

Os ensaios realizados para a máquina linear foram os seguintes:

- Ensaio sem carga, com corrente nominal;
- Ensaio com carga e corrente nominal;
- Ensaio de falta de 1 fase, sem carga;
- Ensaio de falta de 1 fase, com carga;
- Ensaio de falta de 2 fases, sem carga;
- Ensaio de falta de 2 fases, com carga.

Para cada um dos ensaios acima, as grandezas medidas foram:

- tensão e corrente na alimentação da MLRC;
- velocidade média da MLRC.

A tensão de alimentação de cada fase da MLRC, em todos os ensaios, foi de 11,6Vcc. Nos ensaios com carga, foi utilizada uma carga maciça (com massa total de 5,85kg) colocada sobre o translador.

No diagrama da Figura 6.15 é ilustrada a estrutura dos ensaios realizados, enquanto na Figura 6.16 é mostrada a implementação da bancada de ensaios experimentais da MLRC.

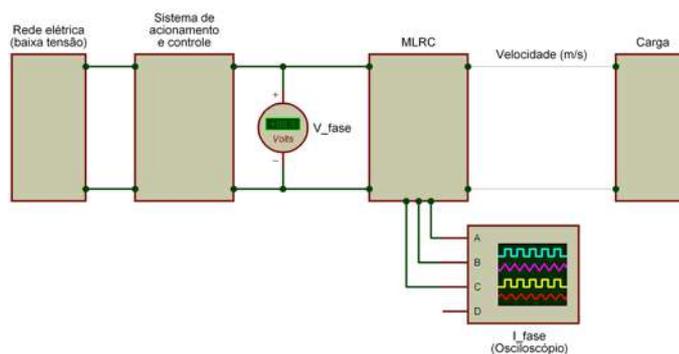


Figura 6.15 – Diagrama representando a estrutura dos ensaios experimentais realizados com a MLRC.

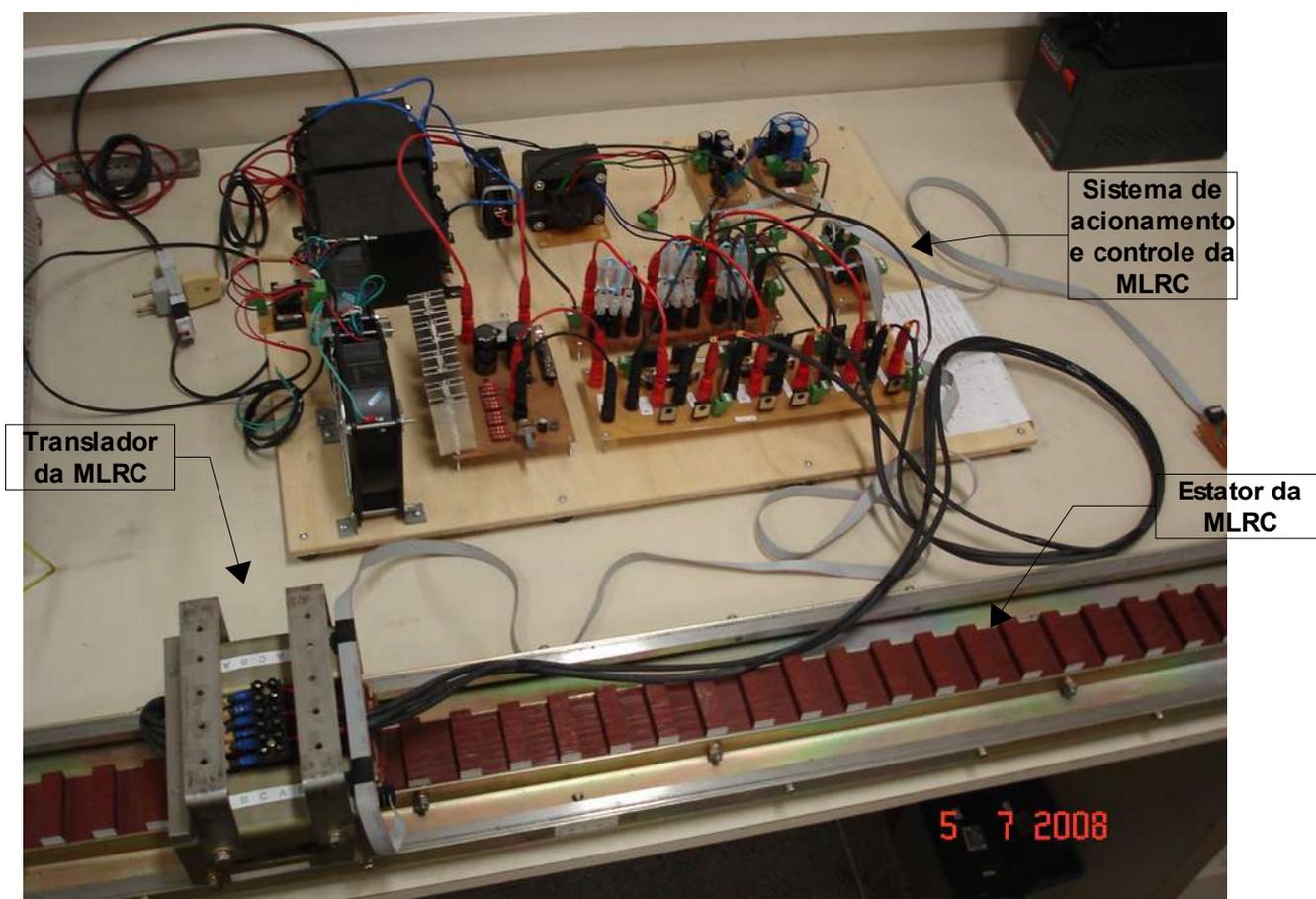


Figura 6.16 – Ilustração da bancada de ensaios experimentais da MLRC.

Na Figura 6.17 são apresentadas as formas de onda para o ensaio a vazio. As formas de onda desta figura foram adquiridas no intervalo de aceleração da MLRC, corroborada pelos pulsos iniciais mais longos e de maior amplitude (maior corrente solicitada pela máquina para vencer a inércia inicial) e pela redução gradual no período dos pulsos de corrente (quando a MLRC opera em regime permanente).

Na Figura 6.18 são apresentadas as formas de onda para o ensaio com carga nominal.

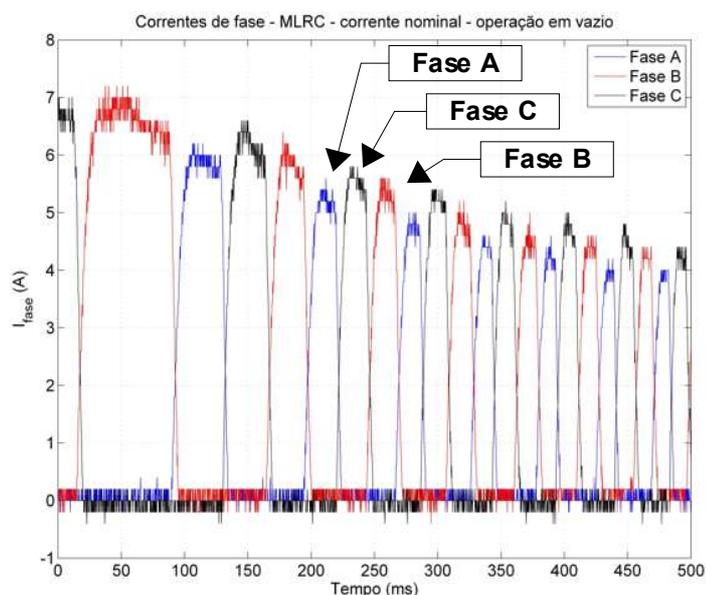


Figura 6.17 – Formas de onda das correntes de fase da MLRC, operando em vazio, com corrente nominal.

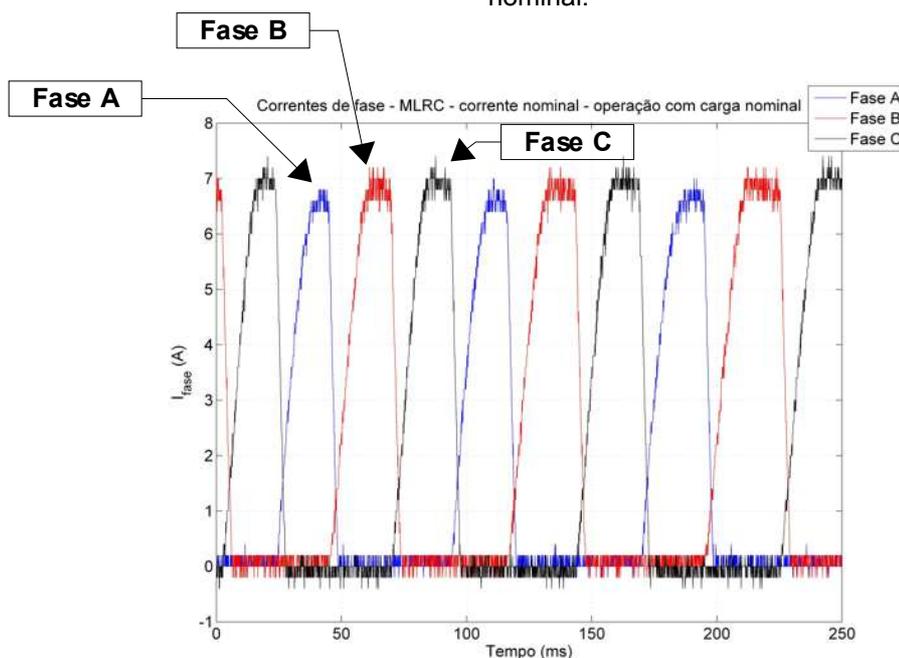


Figura 6.18 – Formas de onda das correntes de fase da MLRC, operando com carga e corrente nominais.

A velocidade média da MLRC foi medida de forma indireta, a partir da aquisição da forma de onda fornecida pelo sensor de posição de uma das fases do translador, durante o intervalo de operação em regime permanente da MLRC.

Conforme mostrado na Figura 5.12, cada sensor de posição do translador encontra-se alinhado com uma das fases do translador. Durante seu funcionamento, o sensor de posição fica emitindo constantemente um sinal eletromagnético de baixa amplitude. Sempre que o sensor passa próximo de uma superfície clara, o próprio sensor detecta o sinal da onda que é refletido por esta superfície, fornecendo um nível lógico alto em sua saída. Quando não há nenhuma superfície clara próxima do sensor, o sinal se atenua, resultando num nível lógico baixo na saída do sensor. Dessa forma, à medida que o translador se desloca, o sensor fica alternando entre estados de nível lógico alto (i.e., alinhamento dos pólos da máquina) e baixo (i.e., desalinhamento dos pólos da máquina). Portanto, conhecendo-se a distância entre 2 pólos do estator e a forma de onda do sinal de um dos sensores de posição, em regime permanente, pode-se calcular o valor da velocidade média (i.e., velocidade em regime permanente) do translador da MLRC, conforme mostrado na Figura 6.19 e na equação (6.1).

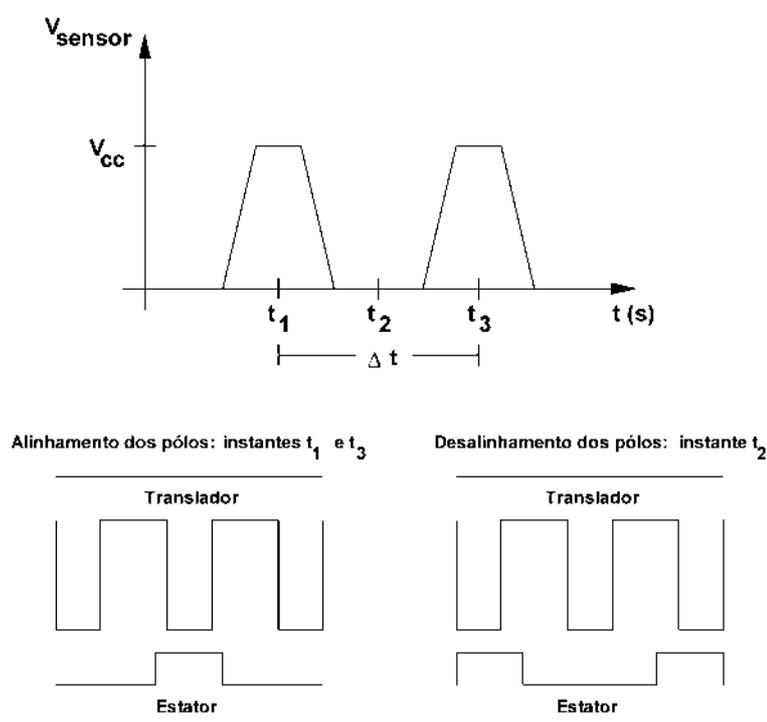


Figura 6.19 – Variação da forma de onda do sensor de posição (sensor óptico reflexivo) em função da variação da posição do translador em relação ao estator.

$$v_{med} = \frac{W_{PE} + W_{RE}}{\Delta t} \quad (6.1)$$

No caso da MLRC, a largura do pólo e da ranhura do estator são de 15mm e 21mm, respectivamente, totalizando 36mm percorridos entre dois picos consecutivos do sensor de posição. O intervalo de tempo gasto para percorrer esta distância é obtido no próprio osciloscópio utilizado para aquisição dos dados.

As formas de onda obtidas do sensor de posição da fase A, para os ensaios sem carga e com carga da MLRC são mostradas nas Figuras 6.20 e 6.21, respectivamente (considerando corrente nominal em ambos os casos). Os resultados das medições de velocidade média para estes 2 casos são mostrados na Tabela 6.1.

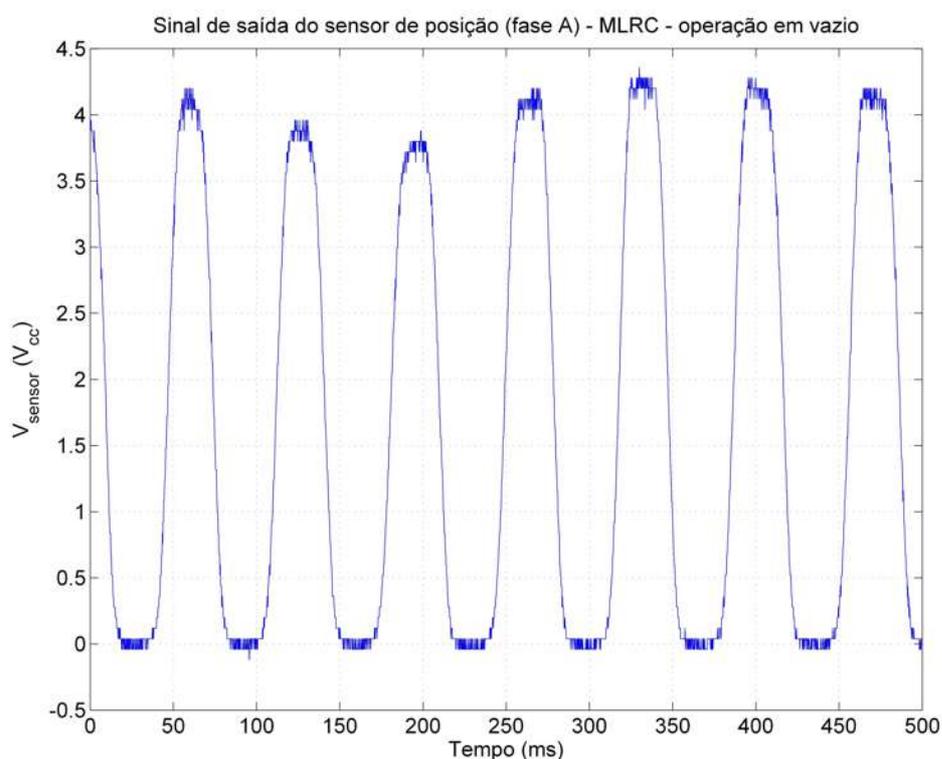


Figura 6.20 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando sem carga, com corrente nominal.

Tabela 6.1 – Valores obtidos para a velocidade média da MLRC em regime permanente.

Condição	Δt (ms)	v_{med} (m/s)
Operação sem carga	70	0,51
Operação com carga	100	0,36

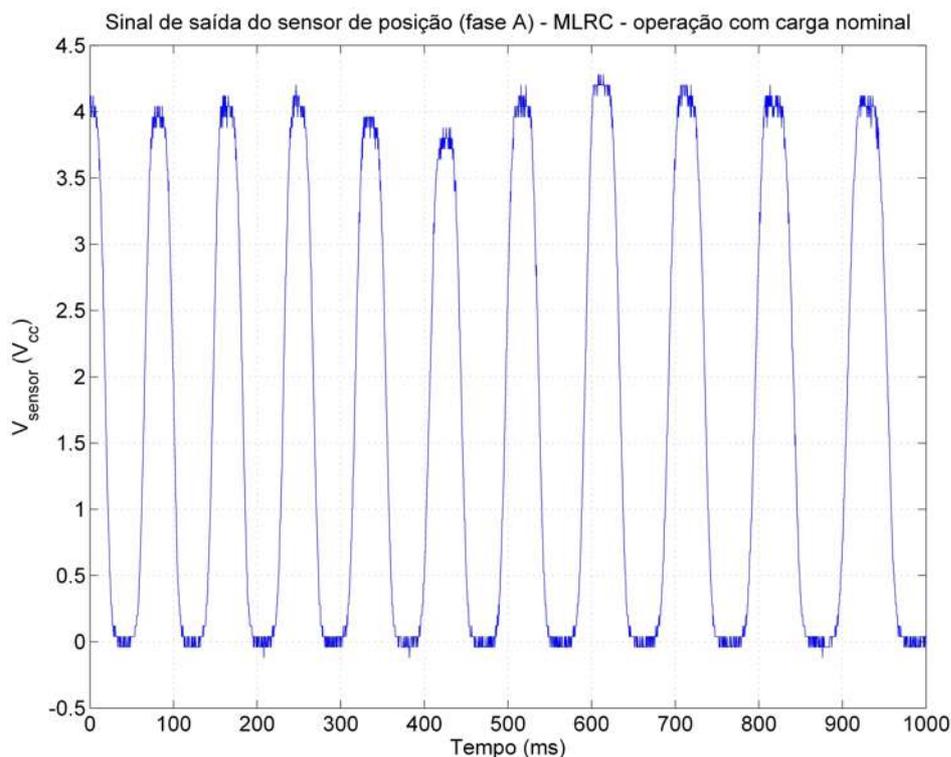


Figura 6.21 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando com carga e corrente nominal.

Para verificar a tolerância da MLRC a falhas, efetuou-se a medição indireta da velocidade média da máquina, operando com 1 e com 2 fases. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 6.22 a 6.24 e na Tabela 6.2.

No caso da operação da máquina com carga e falta de duas fases, a mesma não apresentou força suficiente para entrar em regime permanente.

Tabela 6.2 – Valores obtidos para a velocidade média da MLRC em regime permanente, considerando falta em uma ou duas fases.

Condição	Número de fases em falta	Δt (ms)	v_{med} (m/s)
Operação sem carga	1	114	0,32
	2	297	0,12
Operação com carga	1	142	0,25
	2	∞	0

Verifica-se que, mesmo em situações de falta de uma das fases, a MLRC pode continuar a operar, com queda na sua velocidade, proporcional ao número de fases em falta.

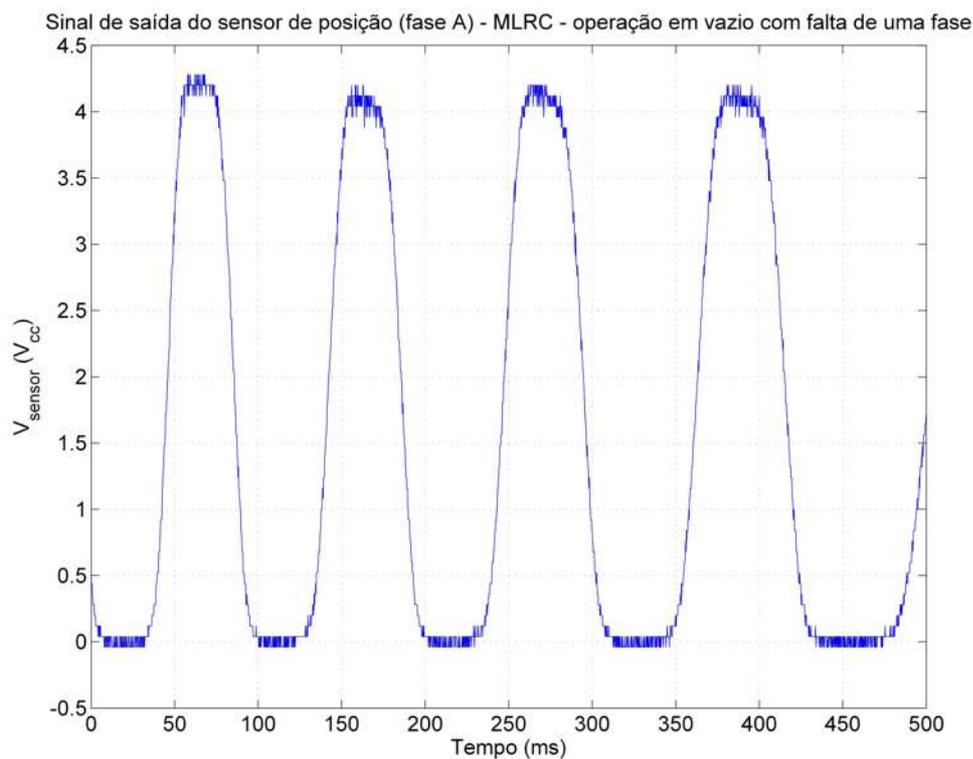


Figura 6.22 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando sem carga, com corrente nominal e falta de uma fase.

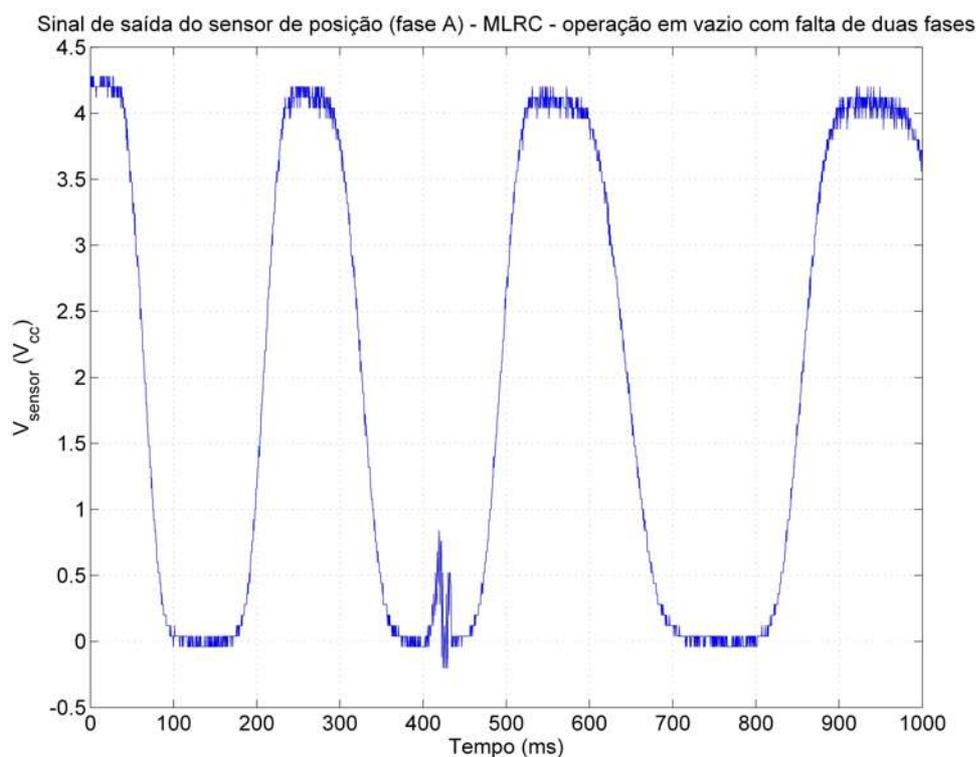


Figura 6.23 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando sem carga, com corrente nominal e falta de duas fases.

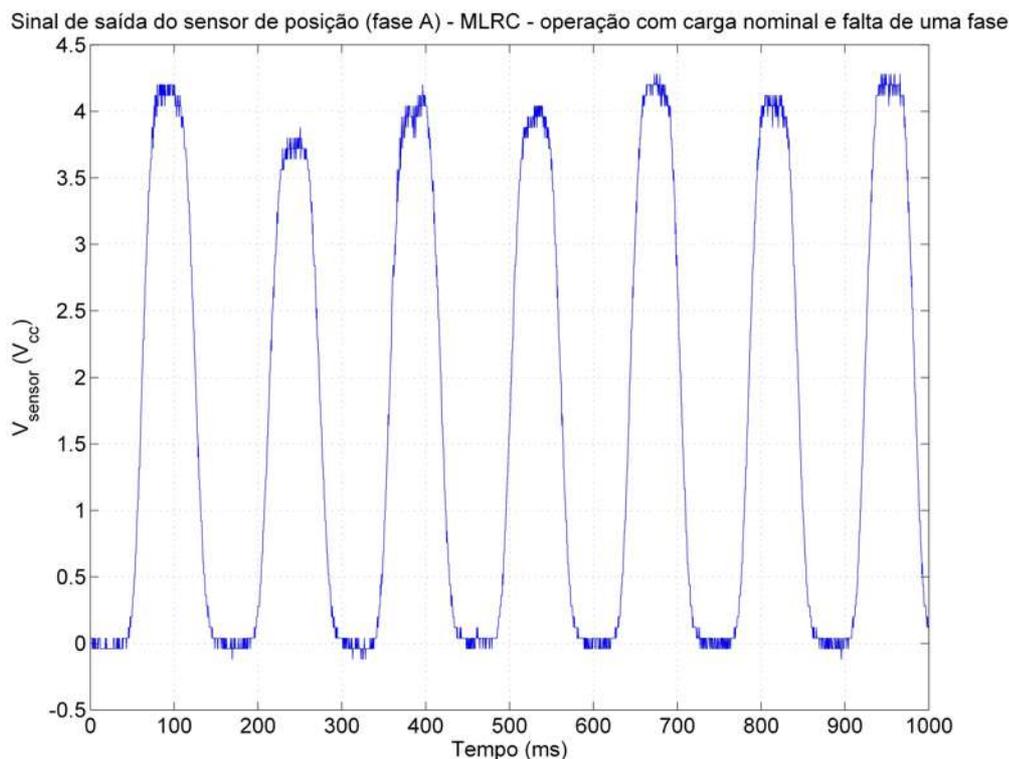


Figura 6.24 – Forma de onda do sensor de posição da fase A da MLRC, operando com carga, corrente nominal e falta de uma fase.

6.3. Comentários sobre os resultados obtidos

Com base nos resultados experimentais apresentados neste capítulo, verificou-se que a máquina rotativa apresentou, periodicamente, instabilidade no sinal da corrente de fase, resultando em picos indesejados de corrente, oscilação do conugado mecânico e variações na velocidade da máquina. Estes efeitos indesejados foram influenciados, em boa parte, pela pequena faixa do sinal de saída dos sensores de corrente, pelo não-isolamento do sistema de controle do sistema de acionamento. Já a máquina linear, apresentou um comportamento mais estável, com valores de velocidade média e corrente de fase próximos do esperado, e com oscilações bem reduzidas, nestes mesmos sinais. Outro importante fator que tem influência direta no comportamento dinâmico das duas máquinas estudadas, diz respeito às incertezas inerentes à metodologia de projeto empregada para as duas máquinas, que baseia-se em algumas considerações empíricas e faixas de valores, cujos resultados teóricos podem divergir dos resultados obtidos na prática.

Capítulo 7

Conclusão e propostas de trabalhos futuros

De uma forma geral, o interesse pelo estudo e aplicação da MRC tem crescido em diversas áreas, principalmente devido a suas qualidades construtivas e operacionais, em relação a outras máquinas usadas atualmente. Este fato também é consequência dos inúmeros avanços na indústria eletrônica, proporcionando a utilização de componentes eletrônicos cada vez mais rápidos, menores e a um custo cada vez mais baixo para implementar o sistema de controle da MRC.

No estudo da modelagem da MRC, verificou-se a precisão e consistência dos resultados obtidos a partir da simulação estática da MRC pelo MEF, que é um método de análise com bastante eficácia e flexibilidade para análise de problemas que envolvam campos eletromagnéticos com predominância do efeito de saturação magnético (que é o caso da MRC). Já o MACM, apesar de apresentar resultados (curva ψ versus i) próximos dos resultados do MEF – requer um aprimoramento na sua formulação, já que sua aplicabilidade não é tão imediata como o MEF, além de ser um método restrito a geometrias mais elementares do núcleo magnético da MRC.

Através das medições experimentais das características eletromagnéticas estáticas das máquinas rotativa e linear, verificou-se que os 3 métodos utilizados apresentaram resultados bastante próximos entre si, tanto para a MRRC quanto para a MLRC. A maior diferença entre as curvas características experimentais e as obtidas pelo MEF, foi observada somente nas regiões do “joelho” e de saturação da curva para a posição alinhada, obtida pelo método do teste de carga RL. Este método experimental, também foi o que propiciou maiores dificuldades para medição do fluxo concatenado para valores próximos da corrente nominal da MRRC (referentes às regiões do joelho e de saturação da curva característica da máquina), devido à deformação do sinal senoidal que foi injetado na fase da máquina, decorrente da saturação do núcleo magnético para valores de corrente próximos do valor nominal de 10A. A partir dos resultados de simulação e medição, também verificou-se um maior índice de saturação da MRRC em relação à MLRC (i.e., uma maior taxa de conversão eletromecânica), que é uma consequência do maior acoplamento do circuito magnético da MRRC em relação ao circuito

magnético da MLRC.

O sistema de acionamento e controle implementado para cada uma das duas máquinas foi modularizado (i.e., cada circuito montado em uma placa de circuito impresso distinta), visando permitir uma substituição mais rápida e prática de cada circuito do sistema, nos casos em que se desejar efetuar alterações ou testes de novas versões de cada um dos circuitos isolados. Contudo, o uso de cabos para conectar os diversos circuitos do sistema de acionamento e controle, deve ser reduzido ao máximo, para se minimizar o ruído elétrico e as interferências presentes neste sistema.

Com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais para medição das grandezas elétricas e mecânicas de saída, das máquinas rotativa e linear, foram constatadas faixas de valores de corrente de fase para melhor aplicação de cada um dos 3 métodos de simulação e medição destas grandezas, mesmo considerando as diferenças nos resultados obtidos por cada um destes métodos. Os métodos do tempo de subida e de extinção da corrente de fase, apresentaram resultados mais próximos aos valores obtidos pelo MEF, para as máquinas rotativa e linear, pois ambos os métodos baseiam-se em condições bastante próximas das observadas na operação dinâmica prática da MRC, referente aos intervalos de subida e de extinção da corrente de fase da máquina decorrentes da passagem de uma sinal de corrente contínua. Contudo, nos 3 métodos experimentais, observou-se uma tendência de redução do erro na região linear da curvas de magnetização das máquinas rotativa e linear (i.e., região de baixas correntes) e um aumento deste mesmo erro, na região de saturação das respectivas curvas de magnetização (i.e., região de valores de corrente próximos ou igual ao nominal de cada máquina). Estas variações do erro entre o MEF e os 3 métodos de medição experimental das características estáticas das máquinas sugerem a necessidade de um aprofundamento na forma de implementação dos sistemas de medição de tais características estáticas.

No caso das características dinâmicas, vale ressaltar a validação do valor calculado para o conjugado médio, a partir das medições experimentais do comportamento dinâmico da máquina rotativa, observando-se diferenças inferiores a 5% entre os 4 métodos de estimação do conjugado e a medição experimental (com corrente e carga nominais). Contudo, também faz-se necessário o aprimoramento das medições das características dinâmicas da máquina rotativa, com foco na

análise mais detalhada do sistema de acionamento e controle da máquina. Já a máquina linear apresentou um valor de velocidade média bastante próximo ao seu valor nominal.

Neste sentido, é fundamental a realização de estudos e análises mais detalhadas, no sentido de se aprofundar as contribuições apresentadas neste trabalho, visando consolidar o conhecimento de todo o ciclo de projeto, dimensionamento e implementação da máquina de relutância e do seu sistema eletrônico de controle e acionamento.

Como propostas de trabalhos futuros, são mencionados, inicialmente, os principais aspectos a serem estudados para melhoria da modelagem da MRC:

- estudo e aplicação de análise por elementos finitos em 3-D para análise do modelo eletromagnético estático da MRC;
- estudo e aplicação de análise por elementos finitos para análise do modelo mecânico vibracional e acústico da MRC;
- desenvolvimento de um modelo computacional de simulação dinâmica de MRCs rotativas e lineares.

Com relação ao sistema de medição das características eletromecânicas das máquinas de relutância (linear e rotativa), a continuidade deste trabalho pode-se dar através dos seguintes estudos:

- escolha e utilização de sensores de corrente e tensão com uma maior faixa de escala e maior precisão;
- desenvolvimento de um sistema de medição automatizado das características eletromagnéticas da MRC;
- estudo para minimizar os ruídos elétricos no circuito de medição das características eletromagnéticas;
- utilização de uma placa de aquisição de dados com maior taxa de amostragem;
- desenvolvimento de bancada exclusiva para medição das características mecânicas da MRRC (conjugado, velocidade e potência na ponta do eixo);
- desenvolvimento de bancada exclusiva para medição das características mecânicas da MLRC (forças normal e de propulsão);
- aplicação de outros métodos de medição das características

eletromagnéticas.

Como propostas de trabalhos futuros, visando a melhoria do funcionamento de ambas as máquinas de relutância (linear e rotativa), pode-se citar:

- isolamento do circuito de controle (incluindo os sensores de corrente) dos circuitos de acionamento e do conversor eletrônico, utilizando optoacopladores, de forma a se reduzir a interferência entre os circuitos de potência e controle, isolando a referência de tensão de cada um destes dois circuitos;
- redução do ruído elétrico nas fontes auxiliares;
- desenvolvimento de conversores *buck* ou *forward* para substituir os transformadores que alimentam os circuitos de potência de cada máquina;
- implementação de sensores de tensão de fase, para implementação de estratégias de controle lineares e não-lineares, além de métodos *sensorless* para estimação da posição da parte móvel da máquina;
- implementação de estratégias de controle de velocidade e de conjugado/força, para as máquinas rotativa/linear.
- estudo das perdas operacionais dinâmicas das máquinas (perdas no núcleo magnético, por atrito, térmicas e vibracionais).

Referências bibliográficas

- [1] Miller, T. J. E., “Electronic Control of Switched Reluctance Machines”, Newnes Power Engineering Series, 2001.
- [2] Sturgeon, W., “Improved Electro Magnetic Apparatus”, Trans. Soc. Arts, Manufacturers & Commerce, Vol. XLIII, 1825, pp. 37–52, plates 3 & 4.
- [3] “Sturgeon”, [<http://chem.ch.huji.ac.il/history/sturgeon.html>], acessado em 20/04/2008.
- [4] “Morse-Vail-Henry Telegraph”, [http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture5/elec_mag_tel/morse_tel.html], acessado em 20/04/2008.
- [5] Ritchie, W., “Experimental Researches in Electro-Magnetism and Magneto-Electricity”, Phil. Trans., 1833 [2]: 313-321.
- [6] Hopkinson, J., “Dynamo Electric Machinery”, Phil. Trans. Royal Soc., Part 1, 1886.
- [7] Hopkinson, J., “Collected Papers”, Cambridge University Press, 190, Vol. 1, pp. 84-121.
- [8] Kern, E., “Der kommutatorlose Einphasen-Lokomotivmotor für 40 bis 60 Hertz”, Elektrische Bahnen, 1931, Vol. 7, pp. 313-321.
- [9] Willis, C. H., “The Thyatron Commutator Motor”, General Electric Review, Feb. 1933, p. 76.
- [10] Alexanderson, E. F. W., Mittag, A. H., “Thyatron Motors”, Electrical Engineering, No. 53, Nov. 1934, p. 1517.
- [11] Beiler, A. H., “The Thyatron Motor at the Logan Plant”, AIEE Trans., Vol. 57, Jan. 1938, pp. 19-24.
- [12] Moghbelli, H., Adams, G. E., Hoft, R. G., “Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 21, NO. 3, MAY-JUNE 1991, pp. 531-538.
- [13] Krishnan, R., Bharadwaj, A. S., “A comparative study of various motor drive systems for aircraft applications”, 1991, IEEE, pp. 252-258

- [14] van der Broeck, H., Gerling, D., Bolte, E., "SWITCHED RELUCTANCE DRIVE AND PWM INDUCTION MOTOR DRIVE COMPARED FOR LOW COST APPLICATIONS", 1993 The European Power Electronics Association, pp. 71-76
- [15] Chang, L., "Comparison of AC Drives for Electric Vehicles – A Report on Experts' Opinion Survey", IEEE AES Systems Magazine, August 1994, pp. 7-11.
- [16] Jack, A. G., Mecrow, B. C., Haylock, J., "A COMPARATIVE STUDY OF PERMANENT MAGNET AND SWITCHED RELUCTANCE MOTORS FOR HIGH PERFORMANCE FAULT TOLERANT APPLICATIONS", 1995 IEEE, pp. 734-740.
- [17] Alan G. Jack, Barrie C. Mecrow, and James A. Haylock, "A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motors for High-Performance Fault-Tolerant Applications", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 32, NO. 4, JULY/AUGUST 1996, pp. 889-895.
- [18] H C Lovatt, M L McClelland, and J M Stephenson, "COMPARATIVE PERFORMANCE OF SINGLY SALIENT RELUCTANCE, SWITCHED RELUCTANCE, AND INDUCTION MOTORS", EMD97 1-3 September 1997 Conference Publication No. 444 0 IEE 1997, pp. 361-365.
- [19] Michael J. Turner, Peter Y. P. Wung, Richard S. Wallace, "Comparing European 132 Frame Switched Reluctance and Induction Motor Drives", 1997, pp. 403-408.
- [20] John M. Miller, Patrick J. McCleer, Jeffrey H. Lang, Allan R. Gale, Franco Leonardi, "Starter-Alternator for Hybrid Electric Vehicle: Comparison of Induction and Variable Reluctance Machines and Drives.", 1998 IEEE, pp. 513-523.
- [21] Alan G. Jack, Barrie C. Mecrow, Christian Weiner, "Switched Reluctance and Permanent Magnet Motors Suitable for Vehicle Drives – a Comparison", 1999 IEEE, pp. 505-507
- [22] Jacek F. Gieras, "Comparison of High-Power High-speed Machines: Cage Induction versus Switched Reluctance Motors", 1999 IEEE, pp. 675-678.
- [23] Binder, A., "Switched Reluctance Drive and inverter-fed Induction Machine – a comparison of design parameters and drive performance", Electrical Engineering 82, 2000, pp. 239-248.

- [24] Alan Jack, Banie Mecrow, Christian Weiner, "Switched Reluctance and Permanent Magnet Motors Suitable for Vehicle Drives – a Comparison", 2000, IEE.
- [25] Sharma, V. K., Khan, M.A., Singh, B., Murthy S. S., "Comparison of Power Quality Aspects of Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor", 2000, IEEE.
- [26] Bianchi, N., Bolognani, S., Corda, J., "Tubular linear motors: a comparison of brushless PM and SR motors", Power Electronics, Machines and Drives, 16-18 April 2002, Conference Publication No. 487, IEE 2002, pp. 626-631.
- [27] Ji Young LEE, Geun Ho LEE, Jung Pyo Hong, Jin Hu, "A Comparative Study of Line Start Permanent Magnet, Skeleton Type Brushless DC and Snail-cam Type Switched Reluctance Motor for a Fan", 2003, pp. 183-186.
- [28] J D Ferreira Rodriguez, A C Renfrew, "MODELLING AND COMPARISON OF TWO DRIVES FOR A POSITION-CONTROLLED AUTOMATE ELECTRIC VEHICLE", 2004, IEE, pp. 350-355.
- [29] Bian Dunxin, Jia Mingquan, Sun Jiming, "A Comparison of Temperature Rise at Low Speed between Switched Reluctance Motor and Inverter-fed Induction Motor", 2005, pp. 585-587.
- [30] M. Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", 2005 IEEE, pp. 280-287.
- [31] Avoki M. Omekanda, Bruno Lequesne, Harald Klode, Suresh Gopalakrishnan, Iqbal Husain, "Switched reluctance and permanent magnet brushless motors in highly dynamic situations: A comparison in the context of electric brakes", 2006 IEEE, pp. 1570-1577.
- [32] Mounir Zeraoulia, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Demba Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 55, NO. 6, NOVEMBER 2006, pp. 1756-1764.
- [33] Rinaldi, V., "Estudo de um motor linear tubular de relutância chaveado de fluxo transversal", dissertação de mestrado, UFRGS, 2004.
- [34] Lima, R. S. G., "AUTOSINTONIA DE CONTROLADORES PI PARA MALHA DE CORRENTE DE UMA MÁQUINA À RELUTÂNCIA VARIÁVEL", dissertação de mestrado, UFC, 2006.

- [35] Almeida, R. N. C., “Estratégias de controle de corrente para uma máquina à relutância variável”, dissertação de mestrado, UFC, 2007.
- [36] Teixeira, V. S. C., “PROJETO DE MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DA MÁQUINA”, dissertação de mestrado, UFC, 2008.
- [37] Borges, T. T., “MOTOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO COM CONTROLE FUZZY E DETECÇÃO INDIRETA DE POSIÇÃO”, tese de doutorado, UFU, 2002.
- [38] Serafim, E. S., “INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO COMPORTAMENTO VIBRACIONAL E ACÚSTICO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO”, tese de doutorado, UFSC, 2002.
- [39] Domingos, J. L., “PROJETO, CONSTRUÇÃO E PROPOSTA DE ACIONAMENTO DE UM MOTOR LINEAR A RELUTÂNCIA CHAVEADO”, UFU, 2003.
- [40] Oliveira, A. C., “Acionamento de Máquinas a Relutância Variável”, tese de doutorado, UFCG, 2003.
- [41] Henriques, L. O. A. P., “Implementação de estratégia de minimização de oscilações de torque e remoção de sensor de posição para um acionamento de relutância variável utilizando técnica *neuro-fuzzy*”
- [42] Krishnan, R., “Switched Reluctance Motor Drives – Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications”, CRC Press, 2001.
- [43] Lawrenson, P.J. et al., “Variable-speed Switched Reluctance Motors”, IEE proc., part. B, vol. 127, no. 4, pp. 253-265, July 1980.
- [44] Fitzgerald A. E., Kingsley Jr., C., Umans, S. D., “Electric Machinery”, 6th edition, McGraw-Hill, 2003.
- [45] S. I. Nabeta, I. E. Chabu, L. Lebensztajn, J. R. Cardoso, D. A. P. Corrêa, W. M. da Silva, M. C. Costa, K. Hameyer, “Kriging Models and Torque Improvements of a Special Switched Reluctance Motor”, IEMDC’07, Turkey, 3-5 May 2007.
- [46] Fonseca, D. S. B., Cabrita, C. P., Calado, M. R. A., “A Control Characterization of a New Linear Switched Reluctance Motor”, IEMDC’07, Turkey, 3-5 May 2007.

- [47] “IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração – Estatísticas – Panorama Mineral Brasileiro – Ferro”, [http://www.ibram.org.br/sites/700/784/00001361.pdf], acessado em 21/04/2008.
- [48] “IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração – Estatísticas – Panorama Mineral Brasileiro – Cobre”, [http://www.ibram.org.br/sites/700/784/00001362.pdf], acessado em 21/04/2008.
- [49] Silvester, P. P., Chari, M. V. K., “Finite Elements Solution for Saturable Magnetic Fields Problems”, 1970, IEEE Trans. Power, USA.
- [50] Bastos, J. P. A., “Eletromagnetismo e Cálculo de Campos”, 3a. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1996, 452 p.
- [51] Bastos, J. P. A., Sadowski, N., “Electromagnetic modeling by finite element methods”, Marcel Dekker, 2003.
- [52] Arumugam, R., Lowther, D. A., Krishnan, R., Lindsay, J. F., “Magnetic field analysis of a switched reluctance motor using a two dimensional finite element model”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. MAG-21, NO. 5, SEPTEMBER 1985
- [53] A. Benhama, A.C. Williamson, A.B.J. Reece, “Force and torque computation from 2-D and 3-D finite element field solutions”, IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 1. January 1999.
- [54] Cundev, M., Petkovska, L., “Transient Analysis of a Switched Reluctance Motor Based on 3D Finite Element Method”, pp. 765-768, 2003.
- [55] Krishnan, R., Bharadwaj, A. S., Materu, P. N., “Computer-Aided Design of Electrical Machines for Variable Speed Applications”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 35, NO. 4, NOVEMBER 1988.
- [56] Miller, T. J. E., McGilp, M., “Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design”, IEE PROCEEDINGS, Vol. 137, Pt. B, No. 6, NOVEMBER 1990.
- [57] Gieras, J. F., Piechh, Z. J., “Linear Synchronous Motors – Transportation and Automation Systems”, CRC Press, 2000, USA
- [58] R. Gobbi, N. C. Sahoo and R. Vejian Rajandran, “Rising and Falling Current Methods for Measurement of Flux-Linkage Characteristics of

Switched Reluctance Motors: A Comparative Study”, Proceedings of the First International Power and Energy Conference (PECon) 2006, pp. 383-387, November 28-29, 2006, Putrajaya, Malaysia.

- [59] Barbi, I., “Projeto de Fontes Chaveadas”, edição do autor, Florianópolis, UFSC, 2001.
- [60] Adams, J., “Bootstrap Component Selection For Control IC’s”, Design Tip (DT) 98-2a, International Rectifier Application Notes, 2001.

Apêndice

Listagem dos programas de simulação pelo MACM

A seguir, são apresentados as listagens dos programas utilizados nas simulações computacionais pelo MACM, cujos resultados foram apresentados no capítulo 3.

1. Máquina rotativa

A listagem do programa principal do MACM, para a MRRC, é mostrada a seguir.

```

clc
clear all
close all

maquina = '../maquinas/MRRC.txt';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Lê os parâmetros da MRRC

fid = fopen(maquina, 'r');
textscan(fid, '%*s %*s %*s %*s %*s %*s\n');

P_s = textscan(fid, '%*s%f32\n');
P_r = textscan(fid, '%*s%f32\n');
Beta_s_graus = textscan(fid, '%*s%f32\n');
Beta_r_graus = textscan(fid, '%*s%f32\n');
b_sy = textscan(fid, '%*s%f32\n');
h_s = textscan(fid, '%*s%f32\n');
l_g = textscan(fid, '%*s%f32\n');
h_r = textscan(fid, '%*s%f32\n');
b_ry = textscan(fid, '%*s%f32\n');
D_sh = textscan(fid, '%*s%f32\n');
L = textscan(fid, '%*s%f32\n');
T_ph = textscan(fid, '%*s%f32\n');
material_magnetico = textscan(fid, '%*s%s\n');
i_ph = textscan(fid, '%*s%f32\n');
P_e = textscan(fid, '%*s%f32\n');
w_m = textscan(fid, '%*s%f32\n');
R_s = textscan(fid, '%*s%f32\n');
V_dc = textscan(fid, '%*s%f32\n');

P_s = P_s{1};
P_r = P_r{1};
Beta_s_graus = Beta_s_graus{1};
Beta_r_graus = Beta_r_graus{1};
b_sy = b_sy{1};
h_s = h_s{1};
l_g = l_g{1};
h_r = h_r{1};

```

```

b_ry = b_ry{1};
D_sh = D_sh{1};
L = L{1};
T_ph = T_ph{1};
material_magnetico = cell2mat(material_magnetico{1});
i_ph = i_ph{1};
P_e = P_e{1};
w_m = w_m{1};
R_s = R_s{1};
V_dc = V_dc{1};

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Parâmetros auxiliares

Beta_s = Beta_s_graus*(pi/180);
Beta_r = Beta_r_graus*(pi/180);
teta_sp = (2*pi)/P_s;
teta_rp = (2*pi)/P_r;

% Permuta nos valores de algumas variáveis, caso Beta_s >= Beta_r
if Beta_r_graus <= Beta_s_graus
    Beta_temp = Beta_r;
    Beta_r = Beta_s;
    Beta_s = Beta_temp;

    teta_p_temp = teta_rp;
    teta_rp = teta_sp;
    teta_sp = teta_p_temp;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Parâmetros dos gráficos

estilo_grafico = {'-b', '-r', '-k', '-g'};
estilo_grafico_interp = {'-b', '-r', '-k', '-g'};

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Lê os parâmetros p/ iteracoes do programa

fid = fopen('parametros.txt','r');
erro_max = textscan(fid, '%s %f32\n');
num_elementos_i_ph = textscan(fid, '%*s %f32\n');
fclose(fid);

erro_max = erro_max{1}; % erro relativo máximo (valor calculado / valor
nominal)
num_elementos_i_ph = num_elementos_i_ph{1}; % no. de elementos do vetor de
corrente de fase

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Lê o valor de B_max definido p/ o material magnético escolhido

material = cat(2, './materiais/', material_magnetico, '.txt');
fid = fopen(material, 'r');
textscan(fid, '%s %s %s\n');
dados = textscan(fid, '%f32%f32%f32');
fclose(fid);

```

```

B_exata = dados{2};
B_max = B_exata(find(isnan(dados{3}) == 0));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Constantes físicas

u_0 = 4*pi*1e-7;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Vetor da corrente de fase
if (num_elementos_i_ph > 1)
    delta_i_ph = i_ph/(num_elementos_i_ph-1);
    i_ph_nom = i_ph;
    i_ph_0 = [1e-1 2e-1 3e-1 4e-1];
    i_ph = [i_ph_0 [(5e-1):delta_i_ph:i_ph]]';
    if max(i_ph) < i_ph_nom
        i_ph = [i_ph;i_ph_nom];
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição desalinhada

L_u = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição alinhada

L_a = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Início do processo iterativo

for i = 1:1:size(i_ph,1)

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    % Indutância p/ a posição desalinhada

    % % Caminho 1

    % % % Pólo do estator
    l_sp_u1 = h_s;
    A_sp_u1 = (1/4)*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*Beta_s*L;

    % % % Gap
    l_g_u1 = h_r+l_g;
    A_g_u1 = (A_sp_u1+(((D_sh/2)+b_ry)*(teta_rp-Beta_r)*L))/2;

    % % % Culatra do rotor
    l_ry_u1 = pi*((D_sh/2)+(b_ry/2));
    A_ry_u1 = b_ry*L;

    % % % Culatra do estator
    l_sy_u1 = pi*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g+h_s+(b_sy/2));
    A_sy_u1 = b_sy*L;

```

```

%% % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u1 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u1 = B_sp_u1*A_sp_u1;
    B_g_u1 = flux_u1/A_g_u1;
    B_ry_u1 = (flux_u1/2)/A_ry_u1;
    B_sy_u1 = (flux_u1/2)/A_sy_u1;

    H_sp_u1 = curva_BH(B_sp_u1,material_magnetico,0);
    H_g_u1 = B_g_u1/u_0;
    H_ry_u1 = curva_BH(B_ry_u1,material_magnetico,0);
    H_sy_u1 = curva_BH(B_sy_u1,material_magnetico,0);

    Fmm_u1_aprox =
(2*((H_sp_u1*l_sp_u1)+(H_g_u1*l_g_u1)))+(1/2)*((H_ry_u1*l_ry_u1)+(H_sy_u1*
l_sy_u1));

    [B_sp_u1,erro] = calculo_erro(B_sp_u1,Fmm_u1,Fmm_u1_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u1 > B_max
        B_sp_u1 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,1) = (T_ph*flux_u1)/i_ph(i)

%% % Caminho 2

%% % Parâmetros auxiliares do caminho
OB = (D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g;
teta_3 = Beta_s/4;
x_B = OB*sin(teta_3);
y_B = OB*cos(teta_3);
OC = (D_sh/2)+b_ry+(h_r/4);
OD = OC;
CD = ((D_sh/2)+b_ry+h_r)*(Beta_r/2);
teta_4 = CD/OD;
teta_5 = (teta_rp/2)-teta_4;
x_C = OD*sin(teta_5);
y_C = OD*cos(teta_5);
BC = sqrt(((x_C-x_B)^2)+((y_C-y_B)^2));

%% % Pólo do estator
l_sp_u2 = l_sp_u1;
A_sp_u2 = (1/8)*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*Beta_s*L;

```

```

% % % Pólo do rotor
l_rp_u2 = h_r/4;
A_rp_u2 = (h_r/4)*L;

% % % Gap
l_g_u2 = BC*(pi/3);
A_g_u2 = (A_sp_u2+A_rp_u2)/2;

% % % Culatra do rotor
l_ry_u2 = l_ry_u1;
A_ry_u2 = A_ry_u1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u2 = l_sy_u1;
A_sy_u2 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u2 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u2 = B_sp_u2*A_sp_u2;
    B_rp_u2 = (flux_u2/2)/A_rp_u2;
    B_g_u2 = (flux_u2/2)/A_g_u2;
    B_ry_u2 = (flux_u2/2)/A_ry_u2;
    B_sy_u2 = (flux_u2/2)/A_sy_u2;

    H_sp_u2 = curva_BH(B_sp_u2,material_magnetico,0);
    H_rp_u2 = curva_BH(B_rp_u2,material_magnetico,0);
    H_g_u2 = B_g_u2/u_0;
    H_ry_u2 = curva_BH(B_ry_u2,material_magnetico,0);
    H_sy_u2 = curva_BH(B_sy_u2,material_magnetico,0);

    Fmm_u2_aprox =
(2*((H_sp_u2*l_sp_u2)+(H_rp_u2*l_rp_u2)+(H_g_u2*l_g_u2)))+((1/2)*((H_ry_u2*
l_ry_u2)+(H_sy_u2*l_sy_u2)));

    [B_sp_u2,erro] = calculo_erro(B_sp_u2,Fmm_u2,Fmm_u2_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u2 > B_max
        B_sp_u2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,2) = (T_ph*flux_u2)/i_ph(i)

% % Caminho 3

```

```

% % % Parâmetros auxiliares
OB = (D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g;
teta_1 = (27/64)*Beta_s;
x_B = OB*sin(teta_1);
y_B = OB*cos(teta_1);
OD = (D_sh/2)+b_ry+((3/4)*h_r);
OC = OD;
CD = ((D_sh/2)+b_ry+h_r)*(Beta_r/2);
teta_6 = CD/OD;
teta_7 = teta_rp-teta_6;
x_C = OC*sin(teta_7);
y_C = OC*cos(teta_7);
BC = sqrt(((x_C-x_B)^2)+((y_C-y_B)^2));

% % % Pólo do estator
l_sp_u3 = l_sp_u1;
A_sp_u3 = (3/32)*Beta_s*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*L;

% % % Pólo do rotor
l_rp_u3 = (3/4)*h_r;
A_rp_u3 = A_rp_u2;

% % % Gap
l_g_u3 = BC*(pi/3);
A_g_u3 = (A_sp_u3+A_rp_u3)/2;

% % % Culatra do rotor
l_ry_u3 = l_ry_u1;
A_ry_u3 = A_ry_u1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u3 = l_sy_u1;
A_sy_u3 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u3 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u3 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u3 = B_sp_u3*A_sp_u3;
    B_rp_u3 = flux_u3/A_rp_u3;
    B_g_u3 = flux_u3/A_g_u3;
    B_ry_u3 = flux_u3/A_ry_u3;
    B_sy_u3 = flux_u3/A_sy_u3;

    H_sp_u3 = curva_BH(B_sp_u3,material_magnetico,0);
    H_rp_u3 = curva_BH(B_rp_u3,material_magnetico,0);
    H_g_u3 = B_g_u3/u_0;
    H_ry_u3 = curva_BH(B_ry_u3,material_magnetico,0);
    H_sy_u3 = curva_BH(B_sy_u3,material_magnetico,0);

    Fmm_u3_aprox =
(2*((H_sp_u3*l_sp_u3)+(H_rp_u3*l_rp_u3)+(H_g_u3*l_g_u3)))+(1/2)*((H_ry_u3*
l_ry_u3)+(H_sy_u3*l_sy_u3));

    [B_sp_u3,erro] = calculo_erro(B_sp_u3,Fmm_u3,Fmm_u3_aprox);

```

```

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u3 > B_max
        B_sp_u3 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,3) = (T_ph*flux_u3)/i_ph(i)

% % Caminho 4

% % % Parâmetros auxiliares do caminho
OB = (D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g;
teta_1 = Beta_s/2;
x_B = OB*sin(teta_1);
y_B = OB*cos(teta_1);
OC = (D_sh/2)+b_ry+((7/8)*h_r);
OD = OC;
teta_8 = CD/OD;
teta_9 = (teta_rp/2)-teta_8;

x_C = OC*sin(teta_9);
y_C = OC*cos(teta_9);
BC = sqrt(((x_C-x_B)^2)+((y_C-y_B)^2));

% % % Pólo do estator
l_sp_u4 = l_sp_u1;
A_sp_u4 = ((3/32)*Beta_s*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*L)+((1/8)*h_s*L);

% % % Pólo do rotor
l_rp_u4 = (7/8)*h_r;
A_rp_u4 = A_rp_u3;

% % % Gap
l_g_u4 = BC;
A_g_u4 = (A_sp_u4+A_rp_u4)/2;

% % % Culatra do rotor
l_ry_u4 = l_ry_u1;
A_ry_u4 = A_ry_u1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u4 = l_sy_u1;
A_sy_u4 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u4 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u4 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;
end

```

```

flux_u4 = B_sp_u4*A_sp_u4;
B_rp_u4 = (flux_u4/2)/A_rp_u4;
B_g_u4 = (flux_u4/2)/A_g_u4;
B_ry_u4 = (flux_u4/2)/A_ry_u4;
B_sy_u4 = (flux_u4/2)/A_sy_u4;

H_sp_u4 = curva_BH(B_sp_u4,material_magnetico,0);
H_rp_u4 = curva_BH(B_rp_u4,material_magnetico,0);
H_g_u4 = B_g_u4/u_0;
H_ry_u4 = curva_BH(B_ry_u4,material_magnetico,0);
H_sy_u4 = curva_BH(B_sy_u4,material_magnetico,0);

Fmm_u4_aprox =
(2*((H_sp_u4*l_sp_u4)+(H_rp_u4*l_rp_u4)+(H_g_u4*l_g_u4)))+(1/2)*((H_ry_u4*
l_ry_u4)+(H_sy_u4*l_sy_u4));

[B_sp_u4,erro] = calculo_erro(B_sp_u4,Fmm_u4,Fmm_u4_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u4 > B_max
    B_sp_u4 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_u(i,4) = (T_ph*flux_u4)/i_ph(i)

%% Caminho 5

%% % Parâmetros auxiliares do caminho
x_B = ((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*sin(Beta_s/2);
y_B = (((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*cos(Beta_s/2))+((5/32)*h_s);
OC = (D_sh/2)+b_ry+h_r;
teta_2 = (teta_rp/2)-((7/16)*Beta_r);
x_C = OC*sin(teta_2);
y_C = OC*cos(teta_2);
x_D = 0;
y_D = (D_sh/2)+b_ry;
DC = sqrt(((x_D-x_C)^2)+((y_D-y_C)^2));
DB = sqrt(((x_D-x_B)^2)+((y_D-y_B)^2));
teta_1 = atan(x_B/(y_B-((D_sh/2)+b_ry)));
teta_3 = atan((y_C-y_D)/x_C);
teta_4 = (pi/2)-teta_3-teta_1;

%% % Pólo do estator
l_sp_u5 = l_sp_u1;
A_sp_u5 = (3/16)*h_s*L;

%% % Pólo do rotor
l_rp_u5 = h_r;
A_rp_u5 = ((D_sh/2)+b_ry+h_r)*(Beta_r/8)*L;

%% % Gap

```

```

l_g_u5 = ((DB+DC)/2)*teta_4;
A_g_u5 = (A_sp_u5+A_rp_u5)/2;

% % % Culatra do rotor
l_ry_u5 = l_ry_u1;
A_ry_u5 = A_ry_u1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u5 = l_sy_u1;
A_sy_u5 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u5 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u5 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u5 = B_sp_u5*A_sp_u5;
    B_rp_u5 = (flux_u5/2)/A_rp_u5;
    B_g_u5 = (flux_u5/2)/A_g_u5;
    B_ry_u5 = (flux_u5/2)/A_ry_u5;
    B_sy_u5 = (flux_u5/2)/A_sy_u5;

    H_sp_u5 = curva_BH(B_sp_u5,material_magnetico,0);
    H_rp_u5 = curva_BH(B_rp_u5,material_magnetico,0);
    H_g_u5 = B_g_u5/u_0;
    H_ry_u5 = curva_BH(B_ry_u5,material_magnetico,0);
    H_sy_u5 = curva_BH(B_sy_u5,material_magnetico,0);

    Fmm_u5_aprox =
(2*((H_sp_u5*l_sp_u5)+(H_rp_u5*l_rp_u5)+(H_g_u5*l_g_u5)))+(1/2)*((H_ry_u5*
l_ry_u5)+(H_sy_u5*l_sy_u5));

    [B_sp_u5,erro] = calculo_erro(B_sp_u5,Fmm_u5,Fmm_u5_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u5 > B_max
        B_sp_u5 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,5) = (T_ph*flux_u5)/i_ph(i)

% % Caminho 6

% % % Parâmetros auxiliares do caminho
x_C = ((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*sin(Beta_s/2);
y_C = (((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*cos(Beta_s/2))+((3/8)*h_s);
OC = sqrt((x_C^2)+(y_C^2));
teta_1 = asin(x_C/OC);

```

```

teta_2 = teta_sp-(2*teta_1);

% % % Pólo do estator
l_sp_u6 = (5/8)*h_s;
A_sp_u6 = (h_s/4)*L;

% % % Gap
l_g_u6 = OC*teta_2;
A_g_u6 = A_sp_u6;

% % % Culatra do estator
l_sy_u6 = ((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g+h_s+(b_sy/4))*teta_2;
A_sy_u6 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u6 = (3/8)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u6 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u6 = B_sp_u6*A_sp_u6;
    B_g_u6 = flux_u6/A_g_u6;
    B_sy_u6 = flux_u6/A_sy_u6;

    H_sp_u6 = curva_BH(B_sp_u6,material_magnetico,0);
    H_g_u6 = B_g_u6/u_0;
    H_sy_u6 = curva_BH(B_sy_u6,material_magnetico,0);

    Fmm_u6_aprox =
(2*(H_sp_u6*l_sp_u6))+(H_g_u6*l_g_u6)+(H_sy_u6*l_sy_u6);

    [B_sp_u6,erro] = calculo_erro(B_sp_u6,Fmm_u6,Fmm_u6_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u6 > B_max
        B_sp_u6 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,6) = 4*((3/8)*T_ph*flux_u6)/i_ph(i)

% % Caminho 7

% % % Pólo do estator
l_sp_u7 = (h_s/4)+(b_sy/4);
A_sp_u7 = (h_s/2)*L;

% % % Gap
l_g_u7 = (h_s/4)*(pi/2);
A_g_u7 = A_sp_u7;

```

```

% % % Culatra do estator
l_sy_u7 = h_s/4;
A_sy_u7 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u7 = (1/4)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u7 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u7 = B_sp_u7*A_sp_u7;
    B_g_u7 = flux_u7/A_g_u7;
    B_sy_u7 = flux_u7/A_sy_u7;

    H_sp_u7 = curva_BH(B_sp_u7,material_magnetico,0);
    H_g_u7 = B_g_u7/u_0;
    H_sy_u7 = curva_BH(B_sy_u7,material_magnetico,0);

    Fmm_u7_aprox = (H_sp_u7*l_sp_u7)+(H_g_u7*l_g_u7)+(H_sy_u7*l_sy_u7);

    [B_sp_u7,erro] = calculo_erro(B_sp_u7,Fmm_u7,Fmm_u7_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
    do material magnético
    if B_sp_u7 > B_max
        B_sp_u7 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,7) = 4*((1/4)*T_ph*flux_u7)/i_ph(i)

L_u_total(i,1) = sum(L_u(i,:))

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Indutância p/ a posição alinhada

% % Caminho 1

% % % Pólo do estator
l_sp_a1 = l_sp_u1;
A_sp_a1 = ((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*Beta_s*L;

% % % Pólo do rotor
l_rp_a1 = h_r;
A_rp_a1 = ((D_sh/2)+b_ry+h_r)*Beta_r*L;

% % % Gap
l_g_a1 = l_g;
A_g_a1 =

```

```

((Beta_s*((D_sh/2)+b_ry+h_r+l_g)*L)+(Beta_r*((D_sh/2)+b_ry+h_r)*L))/2;

% % % Culatra do rotor
l_ry_a1 = l_ry_u1;
A_ry_a1 = A_ry_u1;

% % % Culatra do estator
l_sy_a1 = l_sy_u1;
A_sy_a1 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a1 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_a1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a1 = B_sp_a1*A_sp_a1;
    B_rp_a1 = flux_a1/A_rp_a1;
    B_g_a1 = flux_a1/A_g_a1;
    B_ry_a1 = (flux_a1/2)/A_ry_a1;
    B_sy_a1 = (flux_a1/2)/A_sy_a1;

    H_sp_a1 = curva_BH(B_sp_a1,material_magnetico,0);
    H_rp_a1 = curva_BH(B_rp_a1,material_magnetico,0);
    H_g_a1 = B_g_a1/u_0;
    H_ry_a1 = curva_BH(B_ry_a1,material_magnetico,0);
    H_sy_a1 = curva_BH(B_sy_a1,material_magnetico,0);

    Fmm_a1_aprox =
(2*((H_sp_a1*l_sp_a1)+(H_rp_a1*l_rp_a1)+(H_g_a1*l_g_a1)))+(1/2)*((H_ry_a1*
l_ry_a1)+(H_sy_a1*l_sy_a1));

    [B_sp_a1,erro] = calculo_erro(B_sp_a1,Fmm_a1,Fmm_a1_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a1 > B_max
        B_sp_a1 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,1) = (T_ph*flux_a1)/i_ph(i)

% % Caminho 2

% % % Pólo do estator
l_sp_a2 = ((3/8)*h_s)+(b_sy/2);
A_sp_a2 = (3/8)*h_s*L;

% % % Gap
l_g_a2 = (3/4)*h_s*(pi/2);

```

```

A_g_a2 = 2*A_sp_a2;

% % % Culatra do estator
l_sy_a2 = l_sp_a2;
A_sy_a2 = A_sy_u1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a2 = (3/4)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_a2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a2 = B_sp_a2*A_sp_a2;
    B_g_a2 = flux_a2/A_g_a2;
    B_sy_a2 = flux_a2/A_sy_a2;

    H_sp_a2 = curva_BH(B_sp_a2,material_magnetico,0);
    H_g_a2 = B_g_a2/u_0;
    H_sy_a2 = curva_BH(B_sy_a2,material_magnetico,0);

    Fmm_a2_aprox = (H_sp_a2*l_sp_a2)+(H_g_a2*l_g_a2)+(H_sy_a2*l_sy_a2);
    [B_sp_a2,erro] = calculo_erro(B_sp_a2,Fmm_a2,Fmm_a2_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a2 > B_max
        B_sp_a2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,2) = 4*(((3/4)*T_ph*flux_a2)/i_ph(i))

L_a_total(i,1) = sum(L_a(i,:))

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% % Limite angulares

teta(1) = (1/2)*(((2*pi)/P_r)-(Beta_s+Beta_r));
teta(2) = teta(1)+Beta_s;
teta(3) = teta(2)+(Beta_r-Beta_s);
teta(4) = teta(3)+Beta_s;
teta(5) = teta(4)+teta(1);
teta_fase = [0 teta];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% % Indutâncias p/ corrente máxima (conforme o valor máximo do vetor de
correntes de fase

```

```

sprintf('L_u (i_ph_max): %0.3f mH',L_u_total(size(i_ph,1),1)*1e3)
sprintf('L_a (i_ph_max): %0.3f mH',L_a_total(size(i_ph,1),1)*1e3)

%% Indutância de fase

L_fase = [L_u_total L_u_total L_a_total L_a_total L_u_total L_u_total];

%% Gráfico

figure(1)
plot(teta_fase.*(180/pi),L_fase.*1e3);
title('Indutância de fase da MRRC');
xlabel('posição angular do rotor - \theta (°)');
ylabel('Indutância de fase - L (mH)');
grid on;
for i = 1:1:num_elementos_i_ph
    legenda{i,1} = cat(2,num2str(i_ph(i,1)), ' A');
end
legend(legenda);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Conjugado médio (T_med)

if (num_elementos_i_ph > 1) % só calcula o conjugado médio se houver mais
de 1 ponto no vetor de corrente de fase (i_ph)

    %% Vetor de fluxo concatenado p/ a posição desalinhada

    fc_u = L_u_total(:,1).*i_ph;

    %% Vetor de fluxo concatenado p/ a posição alinhada

    fc_a = L_a_total(:,1).*i_ph;

    %% Energia armazenada na posição desalinhada

    W_u =
(1/2)*(i_ph(num_elementos_i_ph,1)^2)*L_u_total(num_elementos_i_ph,1);

    %% Energia armazenada na posição desalinhada

    W_a = delta_i_ph.*(sum(fc_a(1:(num_elementos_i_ph-
1),1))+(fc_a(num_elementos_i_ph,1)/2));

    %% Energia convertida p/ deslocar a máquina da posição desalinhada
p/ a posição alinhada

    W = W_a-W_u;

    T_med = (W*P_s*P_r)/(4*pi);
    sprintf('Torque médio: %0.3f N*m',T_med)

    %% Curva característica (baseado no conjugado médio)

figure(2)
plot([0;i_ph],[0;fc_u].*1000,'-b',...
[0;i_ph],[0;fc_a].*1000,'-b')
title('Curvas características \psi x i - MRRC - MACM');
xlabel('corrente de fase - I_p_h (A)');

```

```

        ylabel('Fluxo concatenado - \psi (Wb*esp)');
        grid on;
end

```

2. Máquina linear

A listagem do programa principal do MACM, para a MLRC, é mostrada a seguir.

```

clc
clear all
close all

maquina = '../maquinas/MLRC.txt';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Lê os parâmetros da MLRC

fid = fopen(maquina,'r');
textscan(fid,'%s %s %s %s %s %s %s\n');

P_s = textscan(fid,'%s%f32\n');
P_t = textscan(fid,'%s%f32\n');
w_sp = textscan(fid,'%s%f32\n');
w_tp = textscan(fid,'%s%f32\n');
w_ss = textscan(fid,'%s%f32\n');
w_ts = textscan(fid,'%s%f32\n');
b_sy = textscan(fid,'%s%f32\n');
h_s = textscan(fid,'%s%f32\n');
l_g = textscan(fid,'%s%f32\n');
h_t = textscan(fid,'%s%f32\n');
b_ty = textscan(fid,'%s%f32\n');
L = textscan(fid,'%s%f32\n');
T_ph = textscan(fid,'%s%f32\n');
material_magnetico = textscan(fid,'%s%s\n');
i_ph = textscan(fid,'%s%f32\n');
P_e = textscan(fid,'%s%f32\n');
v_m = textscan(fid,'%s%f32\n');
R_s = textscan(fid,'%s%f32\n');
V_dc = textscan(fid,'%s%f32\n');

P_s = P_s{1};
P_t = P_t{1};
w_ss = w_ss{1};
w_ts = w_ts{1};
w_sp = w_sp{1};
w_tp = w_tp{1};
b_sy = b_sy{1};
h_s = h_s{1};
l_g = l_g{1};
h_t = h_t{1};
b_ty = b_ty{1};
L = L{1};
T_ph = T_ph{1};
material_magnetico = cell2mat(material_magnetico{1});

```



```

% Constantes físicas

u_0 = 4*pi*1e-7;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Vetor da corrente de fase
if (num_elementos_i_ph > 1)
    delta_i_ph = i_ph/(num_elementos_i_ph-1);
    i_ph_nom = i_ph;
    i_ph_0 = [2e-1 3e-1 4e-1];
    i_ph = [i_ph_0 [(5e-1):delta_i_ph:i_ph]]';
    if max(i_ph) < i_ph_nom
        i_ph = [i_ph;i_ph_nom];
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição totalmente alinhada

L_a = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição intermediária 1 (1/3 de
desalinhamento)

L_i1 = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição intermediária 2 (2/3 de
desalinhamento)

L_i2 = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definição do vetor das indutâncias da posição totalmente desalinhada

L_u = [];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Início do processo iterativo
for i = 1:1:size(i_ph,1)

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    % Indutância p/ a posição totalmente alinhada

    % % Parâmetros auxiliares da posição
    t_0 = h_s/12;
    f_0 = (w_tp-w_sp)/2;

    % % Caminho 1

    % % % Pólo do estator

```

```

l_sp_a_1 = h_s+(b_sy/2);
A_sp_a_1 = L*w_sp;

% % % Pólo do translador
l_tp_a_1 = h_t+(b_ty/2);
A_tp_a_1 = L*w_tp;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_a_1 = l_g;
P_g_a_1 = u_0*L*((w_sp+w_tp)/(2*l_g));

% % % Culatra do translador
l_ty_a_1 = w_tp+w_ts;
A_ty_a_1 = L*b_ty;

% % % Culatra do estator
l_sy_a_1 = 1.5*(w_sp+w_ss);
A_sy_a_1 = L*b_sy;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_1 = w_sp;
z_a_1 = l_g;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_1 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_a_1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_1 = B_sp_a_1*A_sp_a_1;
    B_tp_a_1 = flux_a_1/A_tp_a_1;
    B_ty_a_1 = flux_a_1/A_ty_a_1;
    B_sy_a_1 = flux_a_1/A_sy_a_1;
    B_g_a_1 = (flux_a_1/P_g_a_1)*(u_0/l_g_a_1);

    H_sp_a_1 = curva_BH(B_sp_a_1,material_magnetico,0);
    H_tp_a_1 = curva_BH(B_tp_a_1,material_magnetico,0);
    H_ty_a_1 = curva_BH(B_ty_a_1,material_magnetico,0);
    H_sy_a_1 = curva_BH(B_sy_a_1,material_magnetico,0);

    Fmm_a_1_aprox =
(2*((H_sp_a_1*l_sp_a_1)+(H_tp_a_1*l_tp_a_1)+(flux_a_1/P_g_a_1)))+((H_ty_a_1
*l_ty_a_1)+(H_sy_a_1*l_sy_a_1));

    [B_sp_a_1,erro] = calculo_erro(B_sp_a_1,Fmm_a_1,Fmm_a_1_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a_1 > B_max
        B_sp_a_1 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

```

```

end

it
L_a(i,1) = (Fmm_a_1*flux_a_1)/(i_ph(i)^2)
f_x_a(i,1) = ((B_g_a_1^2)/(2*u_0))*L*z_a_1;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,1) = -((B_g_a_1^2)/(2*u_0))*x_a_1*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 2

% % % Pólo do estator
l_sp_a_2 = l_sp_a_1;
A_sp_a_2 = A_sp_a_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_a_2 = l_tp_a_1;
A_tp_a_2 = A_tp_a_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_a_2 = 1.211*l_g;
P_g_a_2 = 0.268*u_0*L;

% % % Culatra do translador
l_ty_a_2 = l_ty_a_1;
A_ty_a_2 = A_ty_a_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_a_2 = l_sy_a_1;
A_sy_a_2 = A_sy_a_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_2 = l_g/2;
z_a_2 = f_0+(l_g/2);

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_2 = Fmm_a_1;
B_sp_a_2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_2 = B_sp_a_2*A_sp_a_2;
    B_tp_a_2 = flux_a_2/A_tp_a_2;
    B_ty_a_2 = flux_a_2/A_ty_a_2;
    B_sy_a_2 = flux_a_2/A_sy_a_2;
    B_g_a_2 = (flux_a_2/P_g_a_2)*(u_0/l_g_a_2);

    H_sp_a_2 = curva_BH(B_sp_a_2,material_magnetico,0);
    H_tp_a_2 = curva_BH(B_tp_a_2,material_magnetico,0);
    H_ty_a_2 = curva_BH(B_ty_a_2,material_magnetico,0);
    H_sy_a_2 = curva_BH(B_sy_a_2,material_magnetico,0);

    Fmm_a_2_aprox =
    (2*((H_sp_a_2*l_sp_a_2)+(H_tp_a_2*l_tp_a_2)+((1/2)*(flux_a_2/P_g_a_2)))+(
    H_ty_a_2*l_ty_a_2)+(H_sy_a_2*l_sy_a_2));

    [B_sp_a_2,erro] = calculo_erro(B_sp_a_2,Fmm_a_2,Fmm_a_2_aprox);

```

```

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a_2 > B_max
        B_sp_a_2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,2) = (Fmm_a_2*flux_a_2)/(i_ph(i)^2)
f_x_a(i,2) = ((B_g_a_2^2)/(2*u_0))*L*z_a_2;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,2) = -((B_g_a_2^2)/(2*u_0))*x_a_2*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 3

%%% Pólo do estator
l_sp_a_3 = h_s-(t_0/2)+(b_sy/2);
A_sp_a_3 = A_sp_a_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_a_3 = h_t-(t_0/2)+(b_ty/2);
A_tp_a_3 = A_tp_a_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g1_a_3 = f_0;
l_g2_a_3 = (1.13*l_g)/pi;
l_g_a_3 = l_g1_a_3+l_g2_a_3;
P_g_a_31 = 0.318*u_0*L*log(1+((2*t_0)/l_g));
P_g_a_32 = u_0*L*(t_0/f_0);
P_g_a_3 = (P_g_a_31*P_g_a_32)/(P_g_a_31+P_g_a_32);    % permeância
equivalente do caminho 3

%%% Culatra do translador
l_ty_a_3 = l_ty_a_1;
A_ty_a_3 = A_ty_a_1;

%%% Culatra do estator
l_sy_a_3 = l_sy_a_1;
A_sy_a_3 = A_sy_a_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_3 = t_0;
z_a_3 = x_a_3;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_3 = ((h_s-(t_0/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_a_3 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;
end

```

```

flux_a_3 = B_sp_a_3*A_sp_a_3;
B_tp_a_3 = flux_a_3/A_tp_a_3;
B_ty_a_3 = flux_a_3/A_ty_a_3;
B_sy_a_3 = flux_a_3/A_sy_a_3;
B_g_a_3 = (flux_a_3/P_g_a_3)*(u_0/l_g_a_3);

H_sp_a_3 = curva_BH(B_sp_a_3,material_magnetico,0);
H_tp_a_3 = curva_BH(B_tp_a_3,material_magnetico,0);
H_ty_a_3 = curva_BH(B_ty_a_3,material_magnetico,0);
H_sy_a_3 = curva_BH(B_sy_a_3,material_magnetico,0);

Fmm_a_3_aprox =
(2*((H_sp_a_3*l_sp_a_3)+(H_tp_a_3*l_tp_a_3)+((1/2)*(flux_a_3/P_g_a_3)))+((
H_ty_a_3*l_ty_a_3)+(H_sy_a_3*l_sy_a_3)));

[B_sp_a_3,erro] = calculo_erro(B_sp_a_3,Fmm_a_3,Fmm_a_3_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_a_3 > B_max
    B_sp_a_3 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_a(i,3) = (Fmm_a_3*flux_a_3)/(i_ph(i)^2)
f_x_a(i,3) = ((B_g_a_3^2)/(2*u_0))*L*z_a_3; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,3) = -((B_g_a_3^2)/(2*u_0))*x_a_3*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 4

%% Pólo do estator
l_sp_a_4 = l_sp_a_1;
A_sp_a_4 = A_sp_a_1;

%% Pólo do translador
l_tp_a_4 = l_tp_a_1;
A_tp_a_4 = A_tp_a_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_a_4 = 1.211*l_g;
P_g_a_4 = 0.134*u_0*(w_sp+w_tp);

%% Culatra do translador
l_ty_a_4 = l_ty_a_1;
A_ty_a_4 = A_ty_a_1;

%% Culatra do estator
l_sy_a_4 = l_sy_a_1;
A_sy_a_4 = A_sy_a_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e

```

```

normal
x_a_4 = 0;
z_a_4 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_4 = Fmm_a_1;
B_sp_a_4 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_4 = B_sp_a_4*A_sp_a_4;
    B_tp_a_4 = flux_a_4/A_tp_a_4;
    B_ty_a_4 = flux_a_4/A_ty_a_4;
    B_sy_a_4 = flux_a_4/A_sy_a_4;
    B_g_a_4 = (flux_a_4/P_g_a_4)*(u_0/l_g_a_4);

    H_sp_a_4 = curva_BH(B_sp_a_4,material_magnetico,0);
    H_tp_a_4 = curva_BH(B_tp_a_4,material_magnetico,0);
    H_ty_a_4 = curva_BH(B_ty_a_4,material_magnetico,0);
    H_sy_a_4 = curva_BH(B_sy_a_4,material_magnetico,0);

    Fmm_a_4_aprox =
(2*((H_sp_a_4*l_sp_a_4)+(H_tp_a_4*l_tp_a_4)+((1/2)*(flux_a_4/P_g_a_4))))+((
H_ty_a_4*l_ty_a_4)+(H_sy_a_4*l_sy_a_4));

    [B_sp_a_4,erro] = calculo_erro(B_sp_a_4,Fmm_a_4,Fmm_a_4_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a_4 > B_max
        B_sp_a_4 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,4) = (Fmm_a_4*flux_a_4)/(i_ph(i)^4)
f_x_a(i,4) = ((B_g_a_4^2)/(2*u_0))*L*z_a_4; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,4) = -((B_g_a_4^2)/(2*u_0))*x_a_4*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 5

% % % Pólo do estator
l_sp_a_5 = l_sp_a_3;
A_sp_a_5 = A_sp_a_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_a_5 = l_tp_a_3;
A_tp_a_5 = A_tp_a_1;

% % % Gap (permeância magnética)

```

```

l_g_a_5 = pi*(l_g+(t_0/2));
if l_g >= (3*t_0)
    P_g_a_5 = 0.637*u_0*((t_0*((w_sp+w_tp)/2))/(l_g+t_0));
else
    P_g_a_5 = 0.318*u_0*((w_sp+w_tp)/2)*log(1+((2*t_0)/l_g));
end

% % % Culatra do translador
l_ty_a_5 = l_ty_a_1;
A_ty_a_5 = A_ty_a_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_a_5 = l_sy_a_1;
A_sy_a_5 = A_sy_a_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_5 = w_sp;
z_a_5 = t_0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_5 = Fmm_a_3;
B_sp_a_5 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_5 = B_sp_a_5*A_sp_a_5;
    B_tp_a_5 = flux_a_5/A_tp_a_5;
    B_ty_a_5 = flux_a_5/A_ty_a_5;
    B_sy_a_5 = flux_a_5/A_sy_a_5;
    B_g_a_5 = (flux_a_5/P_g_a_5)*(u_0/l_g_a_5);

    H_sp_a_5 = curva_BH(B_sp_a_5,material_magnetico,0);
    H_tp_a_5 = curva_BH(B_tp_a_5,material_magnetico,0);
    H_ty_a_5 = curva_BH(B_ty_a_5,material_magnetico,0);
    H_sy_a_5 = curva_BH(B_sy_a_5,material_magnetico,0);

    Fmm_a_5_aprox =
(2*((H_sp_a_5*l_sp_a_5)+(H_tp_a_5*l_tp_a_5)+((1/2)*(flux_a_5/P_g_a_5))))+((
H_ty_a_5*l_ty_a_5)+(H_sy_a_5*l_sy_a_5));

    [B_sp_a_5,erro] = calculo_erro(B_sp_a_5,Fmm_a_5,Fmm_a_5_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a_5 > B_max
        B_sp_a_5 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,5) = (Fmm_a_5*flux_a_5)/(i_ph(i)^2)

```

```

f_x_a(i,5) = ((B_g_a_5^2)/(2*u_0))*L*z_a_5; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,5) = -((B_g_a_5^2)/(2*u_0))*x_a_5*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 6

%%% Pólo do estator
l_sp_a_6 = l_sp_a_1;
A_sp_a_6 = A_sp_a_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_a_6 = l_tp_a_1;
A_tp_a_6 = A_tp_a_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_a_6 = 1.13*l_g;
P_g_a_6 = 0.076*u_0*l_g;

%%% Cuiatra do translador
l_ty_a_6 = l_ty_a_1;
A_ty_a_6 = A_ty_a_1;

%%% Cuiatra do estator
l_sy_a_6 = l_sy_a_1;
A_sy_a_6 = A_sy_a_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_6 = 0;
z_a_6 = 0;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_6 = Fmm_a_1;
B_sp_a_6 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_6 = B_sp_a_6*A_sp_a_6;
    B_tp_a_6 = flux_a_6/A_tp_a_6;
    B_ty_a_6 = flux_a_6/A_ty_a_6;
    B_sy_a_6 = flux_a_6/A_sy_a_6;
    B_g_a_6 = (flux_a_6/P_g_a_6)*(u_0/l_g_a_6);

    H_sp_a_6 = curva_BH(B_sp_a_6,material_magnetico,0);
    H_tp_a_6 = curva_BH(B_tp_a_6,material_magnetico,0);
    H_ty_a_6 = curva_BH(B_ty_a_6,material_magnetico,0);
    H_sy_a_6 = curva_BH(B_sy_a_6,material_magnetico,0);

    Fmm_a_6_aprox =
    (2*((H_sp_a_6*l_sp_a_6)+(H_tp_a_6*l_tp_a_6)+((1/4)*(flux_a_6/P_g_a_6)))+(
    H_ty_a_6*l_ty_a_6)+(H_sy_a_6*l_sy_a_6));

    [B_sp_a_6,erro] = calculo_erro(B_sp_a_6,Fmm_a_6,Fmm_a_6_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_a_6 > B_max

```

```

        B_sp_a_6 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_a(i,6) = (Fmm_a_6*flux_a_6)/(i_ph(i)^2)
f_x_a(i,6) = ((B_g_a_6^2)/(2*u_0))*L*z_a_6;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,6) = -((B_g_a_6^2)/(2*u_0))*x_a_6*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 7

%%% Pólo do estator
l_sp_a_7 = l_sp_a_3;
A_sp_a_7 = A_sp_a_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_a_7 = l_tp_a_3;
A_tp_a_7 = A_tp_a_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_a_7 = pi*((l_g+t_0)/2);
P_g_a_7 = 0.25*u_0*t_0;

%%% Culatra do translador
l_ty_a_7 = l_ty_a_1;
A_ty_a_7 = A_ty_a_1;

%%% Culatra do estator
l_sy_a_7 = l_sy_a_1;
A_sy_a_7 = A_sy_a_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_a_7 = 0;
z_a_7 = 0;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_a_7 = Fmm_a_3;
B_sp_a_7 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_a_7 = B_sp_a_7*A_sp_a_7;
    B_tp_a_7 = flux_a_7/A_tp_a_7;
    B_ty_a_7 = flux_a_7/A_ty_a_7;
    B_sy_a_7 = flux_a_7/A_sy_a_7;
    B_g_a_7 = (flux_a_7/P_g_a_7)*(u_0/l_g_a_7);

    H_sp_a_7 = curva_BH(B_sp_a_7,material_magnetico,0);
    H_tp_a_7 = curva_BH(B_tp_a_7,material_magnetico,0);

```

```

H_ty_a_7 = curva_BH(B_ty_a_7,material_magnetico,0);
H_sy_a_7 = curva_BH(B_sy_a_7,material_magnetico,0);

Fmm_a_7_aprox =
(2*((H_sp_a_7*l_sp_a_7)+(H_tp_a_7*l_tp_a_7)+((1/4)*(flux_a_7/P_g_a_7))))+((
H_ty_a_7*l_ty_a_7)+(H_sy_a_7*l_sy_a_7));

[B_sp_a_7,erro] = calculo_erro(B_sp_a_7,Fmm_a_7,Fmm_a_7_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_a_7 > B_max
    B_sp_a_7 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_a(i,7) = (Fmm_a_7*flux_a_7)/(i_ph(i)^2)
f_x_a(i,7) = ((B_g_a_7^2)/(2*u_0))*L*z_a_7; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_a(i,7) = -((B_g_a_7^2)/(2*u_0))*x_a_7*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

L_a_total(i,1) = L_a(i,1)+(2*(sum(L_a(i,2:5))))+(4*(sum(L_a(i,6:7))))
f_x_a_total(i,1) = 0;
f_x_a_total(i,1) = 2*f_x_a_total(i,1)
f_z_a_total(i,1) = f_z_a(i,1);
f_z_a_total(i,1) = 2*f_z_a_total(i,1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Indutância p/ a posição intermediária 1 (1/3 de desalinhamento)

% % Parâmetros auxiliares da posição
d_1 = ((1/3)*((5*w_tp-w_ts)/2))-f_0;
d_2 = w_sp-d_1;
d_3 = w_tp-d_1;
t_1 = d_2-l_g;
t_2 = d_3-l_g;

% % Caminho 1

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_1 = h_s+(b_sy/2);
A_sp_13d_1 = L*w_sp;

% % % Pólo do translador
l_tp_13d_1 = h_t+(b_ty/2);
A_tp_13d_1 = L*w_tp;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_1 = l_g;
P_g_13d_1 = u_0*L*(d_1/l_g);

% % % Pontas dos pólos

```

```

l_pt_13d_1 = t_1/2;
A_pt_13d_1 = L*d_1;

% % % Culatra do translador
l_ty_13d_1 = w_tp+w_ts;
A_ty_13d_1 = L*b_ty;

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_1 = 1.5*(w_sp+w_ss);
A_sy_13d_1 = L*b_sy;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_1 = d_1;
z_13d_1 = l_g;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_1 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_1 = B_sp_13d_1*A_sp_13d_1;
    B_tp_13d_1 = flux_13d_1/A_tp_13d_1;
    B_pt_13d_1 = flux_13d_1/A_pt_13d_1;
    B_ty_13d_1 = flux_13d_1/A_ty_13d_1;
    B_sy_13d_1 = flux_13d_1/A_sy_13d_1;
    B_g_13d_1 = (flux_13d_1/P_g_13d_1)*(u_0/l_g_13d_1);

    H_sp_13d_1 = curva_BH(B_sp_13d_1,material_magnetico,0);
    H_tp_13d_1 = curva_BH(B_tp_13d_1,material_magnetico,0);
    H_pt_13d_1 = curva_BH(B_pt_13d_1,material_magnetico,0);
    H_ty_13d_1 = curva_BH(B_ty_13d_1,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_1 = curva_BH(B_sy_13d_1,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_1_aprox =
(2*((H_sp_13d_1*l_sp_13d_1)+(H_tp_13d_1*l_tp_13d_1)+(H_pt_13d_1*l_pt_13d_1)
+(flux_13d_1/P_g_13d_1)))+(H_ty_13d_1*l_ty_13d_1)+(H_sy_13d_1*l_sy_13d_1)
;

    [B_sp_13d_1,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_1,Fmm_13d_1,Fmm_13d_1_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_1 > B_max
        B_sp_13d_1 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_13d(i,1) = (Fmm_13d_1*flux_13d_1)/(i_ph(i)^2)

```

```

f_x_13d(i,1) = ((B_g_13d_1^2)/(2*u_0))*L*z_13d_1; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,1) = -((B_g_13d_1^2)/(2*u_0))*x_13d_1*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 2

%%% Pólo do estator
l_sp_13d_2 = l_sp_13d_1;
A_sp_13d_2 = A_sp_13d_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_13d_2 = l_tp_13d_1;
A_tp_13d_2 = A_tp_13d_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_13d_2 = (pi/2)*(l_g/2);
P_g_13d_2 = 0.5356*u_0*L;

%%% Pontas dos pólos
l_pt_13d_2 = l_pt_13d_1;
A_pt_13d_2 = A_pt_13d_1;

%%% Culatra do translador
l_ty_13d_2 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_2 = A_ty_13d_1;

%%% Culatra do estator
l_sy_13d_2 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_2 = A_sy_13d_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_2 = l_g/2;
z_13d_2 = l_g/2;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_2 = Fmm_13d_1;
B_sp_13d_2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_2 = B_sp_13d_2*A_sp_13d_2;
    B_tp_13d_2 = flux_13d_2/A_tp_13d_2;
    B_pt_13d_2 = flux_13d_2/A_pt_13d_2;
    B_ty_13d_2 = flux_13d_2/A_ty_13d_2;
    B_sy_13d_2 = flux_13d_2/A_sy_13d_2;
    B_g_13d_2 = (flux_13d_2/P_g_13d_2)*(u_0/l_g_13d_2);

    H_sp_13d_2 = curva_BH(B_sp_13d_2,material_magnetico,0);
    H_tp_13d_2 = curva_BH(B_tp_13d_2,material_magnetico,0);
    H_pt_13d_2 = curva_BH(B_pt_13d_2,material_magnetico,0);
    H_ty_13d_2 = curva_BH(B_ty_13d_2,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_2 = curva_BH(B_sy_13d_2,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_2_aprox =
(2*((H_sp_13d_2*l_sp_13d_2)+(H_tp_13d_2*l_tp_13d_2)+(H_pt_13d_2*l_pt_13d_2)
+(flux_13d_2/P_g_13d_2)))+(H_ty_13d_2*l_ty_13d_2)+(H_sy_13d_2*l_sy_13d_2))

```

```

;

    [B_sp_13d_2,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_2,Fmm_13d_2,Fmm_13d_2_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_2 > B_max
        B_sp_13d_2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_13d(i,2) = (Fmm_13d_2*flux_13d_2)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,2) = ((B_g_13d_2^2)/(2*u_0))*L*z_13d_2; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,2) = -((B_g_13d_2^2)/(2*u_0))*x_13d_2*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 3

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_3 = l_sp_13d_1;
A_sp_13d_3 = A_sp_13d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_13d_3 = h_t-(t_1/2)+(b_ty/2);
A_tp_13d_3 = A_tp_13d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_3 = (pi/2)*(d_2/2);
P_g_13d_3 = 0.637*u_0*L*log(1+(t_1/l_g));

% % % Culatra do translador
l_ty_13d_3 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_3 = A_ty_13d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_3 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_3 = A_sy_13d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_3 = d_2;
z_13d_3 = t_1;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_3 = Fmm_13d_1;
B_sp_13d_3 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

```

```

flux_13d_3 = B_sp_13d_3*A_sp_13d_3;
B_tp_13d_3 = flux_13d_3/A_tp_13d_3;
B_ty_13d_3 = flux_13d_3/A_ty_13d_3;
B_sy_13d_3 = flux_13d_3/A_sy_13d_3;
B_g_13d_3 = (flux_13d_3/P_g_13d_3)*(u_0/l_g_13d_3);

H_sp_13d_3 = curva_BH(B_sp_13d_3,material_magnetico,0);
H_tp_13d_3 = curva_BH(B_tp_13d_3,material_magnetico,0);
H_ty_13d_3 = curva_BH(B_ty_13d_3,material_magnetico,0);
H_sy_13d_3 = curva_BH(B_sy_13d_3,material_magnetico,0);

Fmm_13d_3_aprox =
(2*((H_sp_13d_3*l_sp_13d_3)+(H_tp_13d_3*l_tp_13d_3)+(flux_13d_3/P_g_13d_3))
)+((H_ty_13d_3*l_ty_13d_3)+(H_sy_13d_3*l_sy_13d_3));

[B_sp_13d_3,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_3,Fmm_13d_3,Fmm_13d_3_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_13d_3 > B_max
    B_sp_13d_3 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_13d(i,3) = (Fmm_13d_3*flux_13d_3)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,3) = ((B_g_13d_3^2)/(2*u_0))*L*z_13d_3; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,3) = -((B_g_13d_3^2)/(2*u_0))*x_13d_3*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 4

%% Pólo do estator
l_sp_13d_4 = h_s-(t_2/2)+(b_sy/2);
A_sp_13d_4 = A_sp_13d_1;

%% Pólo do translador
l_tp_13d_4 = l_tp_13d_1;
A_tp_13d_4 = A_tp_13d_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_13d_4 = (pi/2)*(d_3/2);
P_g_13d_4 = 0.637*u_0*L*log(1+(t_2/l_g));

%% Culatra do translador
l_ty_13d_4 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_4 = A_ty_13d_1;

%% Culatra do estator
l_sy_13d_4 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_4 = A_sy_13d_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e

```

```

normal
x_13d_4 = d_3;
z_13d_4 = t_2;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_4 = ((h_s-(t_2/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_4 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_4 = B_sp_13d_4*A_sp_13d_4;
    B_tp_13d_4 = flux_13d_4/A_tp_13d_4;
    B_ty_13d_4 = flux_13d_4/A_ty_13d_4;
    B_sy_13d_4 = flux_13d_4/A_sy_13d_4;
    B_g_13d_4 = (flux_13d_4/P_g_13d_4)*(u_0/l_g_13d_4);

    H_sp_13d_4 = curva_BH(B_sp_13d_4,material_magnetico,0);
    H_tp_13d_4 = curva_BH(B_tp_13d_4,material_magnetico,0);
    H_ty_13d_4 = curva_BH(B_ty_13d_4,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_4 = curva_BH(B_sy_13d_4,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_4_aprox =
(2*((H_sp_13d_4*l_sp_13d_4)+(H_tp_13d_4*l_tp_13d_4)+(flux_13d_4/P_g_13d_4))
)+((H_ty_13d_4*l_ty_13d_4)+(H_sy_13d_4*l_sy_13d_4));

    [B_sp_13d_4,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_4,Fmm_13d_4,Fmm_13d_4_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_4 > B_max
        B_sp_13d_4 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_13d(i,4) = (Fmm_13d_4*flux_13d_4)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,4) = ((B_g_13d_4^2)/(2*u_0))*L*z_13d_4; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,4) = -((B_g_13d_4^2)/(2*u_0))*x_13d_4*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 5

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_5 = 2*(((h_s-d_2)/2)+(b_sy/2));
A_sp_13d_5 = A_sp_13d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_5 = w_ss;
P_g_13d_5 = u_0*L*((h_s-d_2)/w_ss);

```

```

%% % Culattra do estator
l_sy_13d_5 = w_sp+w_ss;
A_sy_13d_5 = A_sy_13d_1;

%% % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_5 = w_ss;
z_13d_5 = h_s-d_2;

%% % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_5 = ((h_s-d_2)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_5 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_5 = B_sp_13d_5*A_sp_13d_5;
    B_sy_13d_5 = flux_13d_5/A_sy_13d_5;
    B_g_13d_5 = (flux_13d_5/P_g_13d_5)*(u_0/l_g_13d_5);

    H_sp_13d_5 = curva_BH(B_sp_13d_5,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_5 = curva_BH(B_sy_13d_5,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_5_aprox =
(H_sp_13d_5*l_sp_13d_5)+(flux_13d_5/P_g_13d_5)+(H_sy_13d_5*l_sy_13d_5);

    [B_sp_13d_5,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_5,Fmm_13d_5,Fmm_13d_5_aprox);

    %% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_5 > B_max
        B_sp_13d_5 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_13d(i,5) = 2*((Fmm_13d_5*flux_13d_5)/(i_ph(i)^2))
f_x_13d(i,5) = ((B_g_13d_5^2)/(2*u_0))*L*z_13d_5; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,5) = -((B_g_13d_5^2)/(2*u_0))*x_13d_5*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% % Caminho 6

%% % Pólo do estator
l_sp_13d_6 = 2*(((h_s-t_2)/2)+(b_sy/2));
A_sp_13d_6 = A_sp_13d_1;

%% % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_6 = w_ss;
P_g_13d_6 = u_0*L*((h_s-t_2)/w_ss);

```

```

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_6 = l_sy_13d_5;
A_sy_13d_6 = A_sy_13d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_6 = w_ss;
z_13d_6 = h_s-t_2;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_6 = ((h_s-t_2)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_6 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_6 = B_sp_13d_6*A_sp_13d_6;
    B_sy_13d_6 = flux_13d_6/A_sy_13d_6;
    B_g_13d_6 = (flux_13d_6/P_g_13d_6)*(u_0/l_g_13d_6);

    H_sp_13d_6 = curva_BH(B_sp_13d_6,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_6 = curva_BH(B_sy_13d_6,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_6_aprox =
(H_sp_13d_6*l_sp_13d_6)+(flux_13d_6/P_g_13d_6)+(H_sy_13d_6*l_sy_13d_6);

    [B_sp_13d_6,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_6,Fmm_13d_6,Fmm_13d_6_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_6 > B_max
        B_sp_13d_6 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_13d(i,6) = 2*((Fmm_13d_6*flux_13d_6)/(i_ph(i)^2))
f_x_13d(i,6) = ((B_g_13d_6^2)/(2*u_0))*L*z_13d_6; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,6) = -((B_g_13d_6^2)/(2*u_0))*x_13d_6*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 7

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_7 = l_sp_13d_1;
A_sp_13d_7 = A_sp_13d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_13d_7 = l_tp_13d_1;
A_tp_13d_7 = A_tp_13d_1;

```

```

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_7 = 1.211*l_g;
P_g_13d_7 = 0.268*u_0*d_1;

% % % Pontas dos pólos
l_pt_13d_7 = l_pt_13d_1;
A_pt_13d_7 = A_pt_13d_1;

% % % Culatra do translador
l_ty_13d_7 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_7 = A_ty_13d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_7 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_7 = A_sy_13d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_7 = 0;
z_13d_7 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_7 = Fmm_13d_1;
B_sp_13d_7 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_7 = B_sp_13d_7*A_sp_13d_7;
    B_tp_13d_7 = flux_13d_7/A_tp_13d_7;
    B_pt_13d_7 = flux_13d_7/A_pt_13d_7;
    B_ty_13d_7 = flux_13d_7/A_ty_13d_7;
    B_sy_13d_7 = flux_13d_7/A_sy_13d_7;
    B_g_13d_7 = (flux_13d_7/P_g_13d_7)*(u_0/l_g_13d_7);

    H_sp_13d_7 = curva_BH(B_sp_13d_7,material_magnetico,0);
    H_tp_13d_7 = curva_BH(B_tp_13d_7,material_magnetico,0);
    H_pt_13d_7 = curva_BH(B_pt_13d_7,material_magnetico,0);
    H_ty_13d_7 = curva_BH(B_ty_13d_7,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_7 = curva_BH(B_sy_13d_7,material_magnetico,0);

    Fmm_13d_7_aprox =
(2*((H_sp_13d_7*l_sp_13d_7)+(H_tp_13d_7*l_tp_13d_7)+(H_pt_13d_7*l_pt_13d_7)
+((1/2)*(flux_13d_7/P_g_13d_7))))+((H_ty_13d_7*l_ty_13d_7)+(H_sy_13d_7*l_sy
_13d_7));

    [B_sp_13d_7,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_7,Fmm_13d_7,Fmm_13d_7_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_13d_7 > B_max
        B_sp_13d_7 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;

```

```

end
end

it
L_13d(i,7) = (Fmm_13d_7*flux_13d_7)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,7) = ((B_g_13d_7^2)/(2*u_0))*L*z_13d_7; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,7) = -((B_g_13d_7^2)/(2*u_0))*x_13d_7*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 8

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_8 = h_s-((t_1+t_2)/4)+(b_sy/2);
A_sp_13d_8 = A_sp_13d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_13d_8 = h_t-((t_1+t_2)/4)+(b_ty/2);
A_tp_13d_8 = A_tp_13d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_8 = pi*((l_g+t_1+t_2)/2);
if l_g >= (3*t_0)
    P_g_13d_8 = (u_0*d_1*(t_1+t_2))/l_g_13d_8;
else
    P_g_13d_8 = 0.318*u_0*d_1*log(1+((2*(t_1+t_2))/l_g));
end

% % % Culatra do translador
l_ty_13d_8 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_8 = A_ty_13d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_8 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_8 = A_sy_13d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_8 = d_1;
z_13d_8 = t_2;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_8 = ((h_s-((t_1+t_2)/4))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_8 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_13d_8 = B_sp_13d_8*A_sp_13d_8;
    B_tp_13d_8 = flux_13d_8/A_tp_13d_8;
    B_ty_13d_8 = flux_13d_8/A_ty_13d_8;
    B_sy_13d_8 = flux_13d_8/A_sy_13d_8;
    B_g_13d_8 = (flux_13d_8/P_g_13d_8)*(u_0/l_g_13d_8);

    H_sp_13d_8 = curva_BH(B_sp_13d_8,material_magnetico,0);
    H_tp_13d_8 = curva_BH(B_tp_13d_8,material_magnetico,0);
    H_ty_13d_8 = curva_BH(B_ty_13d_8,material_magnetico,0);
    H_sy_13d_8 = curva_BH(B_sy_13d_8,material_magnetico,0);

```

```

Fmm_13d_8_aprox =
(2*((H_sp_13d_8*l_sp_13d_8)+(H_tp_13d_8*l_tp_13d_8)+((1/2)*(flux_13d_8/P_g_
13d_8))))+(H_ty_13d_8*l_ty_13d_8)+(H_sy_13d_8*l_sy_13d_8));

[B_sp_13d_8,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_8,Fmm_13d_8,Fmm_13d_8_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_13d_8 > B_max
    B_sp_13d_8 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_13d(i,8) = (Fmm_13d_8*flux_13d_8)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,8) = ((B_g_13d_8^2)/(2*u_0))*L*z_13d_8; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,8) = -((B_g_13d_8^2)/(2*u_0))*x_13d_8*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 9

% % % Pólo do estator
l_sp_13d_9 = h_s-d_2+(b_sy/2);
A_sp_13d_9 = A_sp_13d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_13d_9 = l_tp_13d_3;
A_tp_13d_9 = A_tp_13d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_13d_9 = 1.13*l_g;
P_g_13d_9 = 0.152*u_0*d_2;

% % % Culatra do translador
l_ty_13d_9 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_9 = A_ty_13d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_13d_9 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_9 = A_sy_13d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_13d_9 = 0;
z_13d_9 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_13d_9 = ((h_s-(d_2/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_13d_9 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)

```

```

it = it + 1;

flux_13d_9 = B_sp_13d_9*A_sp_13d_9;
B_tp_13d_9 = flux_13d_9/A_tp_13d_9;
B_ty_13d_9 = flux_13d_9/A_ty_13d_9;
B_sy_13d_9 = flux_13d_9/A_sy_13d_9;
B_g_13d_9 = (flux_13d_9/P_g_13d_9)*(u_0/l_g_13d_9);

H_sp_13d_9 = curva_BH(B_sp_13d_9,material_magnetico,0);
H_tp_13d_9 = curva_BH(B_tp_13d_9,material_magnetico,0);
H_ty_13d_9 = curva_BH(B_ty_13d_9,material_magnetico,0);
H_sy_13d_9 = curva_BH(B_sy_13d_9,material_magnetico,0);

Fmm_13d_9_aprox =
(2*((H_sp_13d_9*l_sp_13d_9)+(H_tp_13d_9*l_tp_13d_9)+((1/4)*(flux_13d_9/P_g_
13d_9))))+((H_ty_13d_9*l_ty_13d_9)+(H_sy_13d_9*l_sy_13d_9));

[B_sp_13d_9,erro] =
calculo_erro(B_sp_13d_9,Fmm_13d_9,Fmm_13d_9_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_13d_9 > B_max
    B_sp_13d_9 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_13d(i,9) = (Fmm_13d_9*flux_13d_9)/(i_ph(i)^2)
f_x_13d(i,9) = ((B_g_13d_9^2)/(2*u_0))*L*z_13d_9; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_13d(i,9) = -((B_g_13d_9^2)/(2*u_0))*x_13d_9*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 10

%% Pólo do estator
l_sp_13d_10 = l_sp_13d_4;
A_sp_13d_10 = A_sp_13d_1;

%% Pólo do translador
l_tp_13d_10 = h_t-(d_3/2)+(b_ty/2);
A_tp_13d_10 = A_tp_13d_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_13d_10 = 1.13*l_g;
P_g_13d_10 = 0.152*u_0*d_3;

%% Culatra do translador
l_ty_13d_10 = l_ty_13d_1;
A_ty_13d_10 = A_ty_13d_1;

%% Culatra do estator
l_sy_13d_10 = l_sy_13d_1;
A_sy_13d_10 = A_sy_13d_1;

```



```

% Indutância p/ a posição intermediária 2 (2/3 de desalinhamento)

% % Parâmetros auxiliares da posição
d_4 = ((2/3)*w_tp)-((1/3)*w_ts)-f_0;
d_5 = (2/pi)*(h_t+l_g);
d_6 = (2/pi)*w_ss;
t_3 = d_5-l_g;
t_4 = d_6-l_g;

% % Caminho 1

% % % Pólo do estator
l_sp_23d_1 = h_s+(b_sy/2);
A_sp_23d_1 = L*w_sp;

% % % Pólo do translador
l_tp_23d_1 = h_t+(b_ty/2);
A_tp_23d_1 = L*w_tp;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_23d_1 = l_g;
P_g_23d_1 = u_0*L*(d_4/l_g);

% % % Pontas dos pólos
l_pt_23d_1 = d_4;
A_pt_23d_1 = L*d_5;

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_1 = w_tp+w_ts;
A_ty_23d_1 = L*b_ty;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_1 = 1.5*(w_sp+w_ss);
A_sy_23d_1 = L*b_sy;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_1 = d_4;
z_23d_1 = l_g;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_1 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_1 = B_sp_23d_1*A_sp_23d_1;
    B_tp_23d_1 = flux_23d_1/A_tp_23d_1;
    B_pt_23d_1 = flux_23d_1/A_pt_23d_1;
    B_ty_23d_1 = flux_23d_1/A_ty_23d_1;
    B_sy_23d_1 = flux_23d_1/A_sy_23d_1;
    B_g_23d_1 = (flux_23d_1/P_g_23d_1)*(u_0/l_g_23d_1);

    H_sp_23d_1 = curva_BH(B_sp_23d_1,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_1 = curva_BH(B_tp_23d_1,material_magnetico,0);
    H_pt_23d_1 = curva_BH(B_pt_23d_1,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_1 = curva_BH(B_ty_23d_1,material_magnetico,0);

```

```

H_sy_23d_1 = curva_BH(B_sy_23d_1,material_magnetico,0);

Fmm_23d_1_aprox =
(2*((H_sp_23d_1*l_sp_23d_1)+(H_tp_23d_1*l_tp_23d_1)+(H_pt_23d_1*l_pt_23d_1)
+(flux_23d_1/P_g_23d_1)))+(H_ty_23d_1*l_ty_23d_1)+(H_sy_23d_1*l_sy_23d_1))
;

[B_sp_23d_1,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_1,Fmm_23d_1,Fmm_23d_1_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_23d_1 > B_max
    B_sp_23d_1 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_23d(i,1) = (Fmm_23d_1*flux_23d_1)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,1) = ((B_g_23d_1^2)/(2*u_0))*L*z_23d_1; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,1) = -((B_g_23d_1^2)/(2*u_0))*x_23d_1*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 2

% % % Pólo do estator
l_sp_23d_2 = l_sp_23d_1;
A_sp_23d_2 = A_sp_23d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_23d_2 = l_tp_23d_1;
A_tp_23d_2 = A_tp_23d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_23d_2 = (pi/2)*(l_g/2);
P_g_23d_2 = 0.5356*u_0*L;

% % % Pontas dos pólos
l_pt_23d_2 = l_pt_23d_1;
A_pt_23d_2 = A_pt_23d_1;

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_2 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_2 = A_ty_23d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_2 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_2 = A_sy_23d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_2 = l_g/2;
z_23d_2 = l_g/2;

```

```

%% % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_2 = Fmm_23d_1;
B_sp_23d_2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_2 = B_sp_23d_2*A_sp_23d_2;
    B_tp_23d_2 = flux_23d_2/A_tp_23d_2;
    B_pt_23d_2 = flux_23d_2/A_pt_23d_2;
    B_ty_23d_2 = flux_23d_2/A_ty_23d_2;
    B_sy_23d_2 = flux_23d_2/A_sy_23d_2;
    B_g_23d_2 = (flux_23d_2/P_g_23d_2)*(u_0/l_g_23d_2);

    H_sp_23d_2 = curva_BH(B_sp_23d_2,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_2 = curva_BH(B_tp_23d_2,material_magnetico,0);
    H_pt_23d_2 = curva_BH(B_pt_23d_2,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_2 = curva_BH(B_ty_23d_2,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_2 = curva_BH(B_sy_23d_2,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_2_aprox =
    (2*((H_sp_23d_2*l_sp_23d_2)+(H_tp_23d_2*l_tp_23d_2)+(H_pt_23d_2*l_pt_23d_2)
    +(flux_23d_2/P_g_23d_2)))+(H_ty_23d_2*l_ty_23d_2)+(H_sy_23d_2*l_sy_23d_2)
    ;

    [B_sp_23d_2,erro] =
    calculo_erro(B_sp_23d_2,Fmm_23d_2,Fmm_23d_2_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
    do material magnético
    if B_sp_23d_2 > B_max
        B_sp_23d_2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,2) = (Fmm_23d_2*flux_23d_2)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,2) = ((B_g_23d_2^2)/(2*u_0))*L*z_23d_2; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,2) = -((B_g_23d_2^2)/(2*u_0))*x_23d_2*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% % Caminho 3

%% % Pólo do estator
l_sp_23d_3 = l_sp_23d_1;
A_sp_23d_3 = A_sp_23d_1;

%% % Pólo do translador
l_tp_23d_3 = h_t-(t_3/2)+(b_ty/2);
A_tp_23d_3 = A_tp_23d_1;

%% % Gap (permeância magnética)

```

```

l_g_23d_3 = (pi/2)*(d_5/2);
P_g_23d_3 = 0.637*u_0*L*log(1+(t_3/l_g));

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_3 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_3 = A_ty_23d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_3 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_3 = A_sy_23d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_3 = d_5;
z_23d_3 = t_3;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_3 = Fmm_23d_1;
B_sp_23d_3 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_3 = B_sp_23d_3*A_sp_23d_3;
    B_tp_23d_3 = flux_23d_3/A_tp_23d_3;
    B_ty_23d_3 = flux_23d_3/A_ty_23d_3;
    B_sy_23d_3 = flux_23d_3/A_sy_23d_3;
    B_g_23d_3 = (flux_23d_3/P_g_23d_3)*(u_0/l_g_23d_3);

    H_sp_23d_3 = curva_BH(B_sp_23d_3,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_3 = curva_BH(B_tp_23d_3,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_3 = curva_BH(B_ty_23d_3,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_3 = curva_BH(B_sy_23d_3,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_3_aprox =
    (2*((H_sp_23d_3*l_sp_23d_3)+(H_tp_23d_3*l_tp_23d_3)+(flux_23d_3/P_g_23d_3))
    )+((H_ty_23d_3*l_ty_23d_3)+(H_sy_23d_3*l_sy_23d_3));

    [B_sp_23d_3,erro] =
    calculo_erro(B_sp_23d_3,Fmm_23d_3,Fmm_23d_3_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_3 > B_max
        B_sp_23d_3 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,3) = (Fmm_23d_3*flux_23d_3)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,3) = ((B_g_23d_3^2)/(2*u_0))*L*z_23d_3;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,3) = -((B_g_23d_3^2)/(2*u_0))*x_23d_3*L;    % [N]: força

```

normal devido à excitação de um único pólo

```

%% Caminho 4

%%% Pólo do estator
l_sp_23d_4 = h_s-(t_4/2)+(b_sy/2);
A_sp_23d_4 = A_sp_23d_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_23d_4 = l_tp_23d_1;
A_tp_23d_4 = A_tp_23d_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_23d_4 = (pi/2)*(d_6/2);
P_g_23d_4 = 0.637*u_0*L*log(1+(t_4/l_g));

%%% Culatras do translador
l_ty_23d_4 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_4 = A_ty_23d_1;

%%% Culatras do estator
l_sy_23d_4 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_4 = A_sy_23d_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_4 = d_6;
z_23d_4 = t_4;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_4 = ((h_s-(t_4/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_4 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_4 = B_sp_23d_4*A_sp_23d_4;
    B_tp_23d_4 = flux_23d_4/A_tp_23d_4;
    B_ty_23d_4 = flux_23d_4/A_ty_23d_4;
    B_sy_23d_4 = flux_23d_4/A_sy_23d_4;
    B_g_23d_4 = (flux_23d_4/P_g_23d_4)*(u_0/l_g_23d_4);

    H_sp_23d_4 = curva_BH(B_sp_23d_4,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_4 = curva_BH(B_tp_23d_4,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_4 = curva_BH(B_ty_23d_4,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_4 = curva_BH(B_sy_23d_4,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_4_aprox =
    (2*((H_sp_23d_4*l_sp_23d_4)+(H_tp_23d_4*l_tp_23d_4)+(flux_23d_4/P_g_23d_4))
    )+((H_ty_23d_4*l_ty_23d_4)+(H_sy_23d_4*l_sy_23d_4));

    [B_sp_23d_4,erro] =
    calculo_erro(B_sp_23d_4,Fmm_23d_4,Fmm_23d_4_aprox);

    %% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_4 > B_max
        B_sp_23d_4 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;

```

```

        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,4) = (Fmm_23d_4*flux_23d_4)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,4) = ((B_g_23d_4^2)/(2*u_0))*L*z_23d_4;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,4) = -((B_g_23d_4^2)/(2*u_0))*x_23d_4*L;    % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 5

%% Pólo do estator
l_sp_23d_5 = 2*((h_s-d_5)/2)+(b_sy/2);
A_sp_23d_5 = A_sp_23d_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_23d_5 = w_ss;
P_g_23d_5 = u_0*L*((h_s-d_5)/w_ss);

%% Culatra do estator
l_sy_23d_5 = w_sp+w_ss;
A_sy_23d_5 = A_sy_23d_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_5 = w_ss;
z_23d_5 = h_s-d_5;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_5 = ((h_s-d_5)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_5 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_5 = B_sp_23d_5*A_sp_23d_5;
    B_sy_23d_5 = flux_23d_5/A_sy_23d_5;
    B_g_23d_5 = (flux_23d_5/P_g_23d_5)*(u_0/l_g_23d_5);

    H_sp_23d_5 = curva_BH(B_sp_23d_5,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_5 = curva_BH(B_sy_23d_5,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_5_aprox =
(H_sp_23d_5*l_sp_23d_5)+(flux_23d_5/P_g_23d_5)+(H_sy_23d_5*l_sy_23d_5);

    [B_sp_23d_5,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_5,Fmm_23d_5,Fmm_23d_5_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_5 > B_max
        B_sp_23d_5 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    end
end

```

```

        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,5) = 2*((Fmm_23d_5*flux_23d_5)/(i_ph(i)^2))
f_x_23d(i,5) = ((B_g_23d_5^2)/(2*u_0))*L*z_23d_5;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,5) = -((B_g_23d_5^2)/(2*u_0))*x_23d_5*L;    % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 6

%% Pólo do estator
l_sp_23d_6 = 2*(((h_s-t_4)/2)+(b_sy/2));
A_sp_23d_6 = A_sp_23d_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_23d_6 = w_ss;
P_g_23d_6 = u_0*L*((h_s-t_4)/w_ss);

%% Culatra do estator
l_sy_23d_6 = l_sy_23d_5;
A_sy_23d_6 = A_sy_23d_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_6 = w_ss;
z_23d_6 = h_s-t_4;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_6 = ((h_s-t_4)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_6 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_6 = B_sp_23d_6*A_sp_23d_6;
    B_sy_23d_6 = flux_23d_6/A_sy_23d_6;
    B_g_23d_6 = (flux_23d_6/P_g_23d_6)*(u_0/l_g_23d_6);

    H_sp_23d_6 = curva_BH(B_sp_23d_6,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_6 = curva_BH(B_sy_23d_6,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_6_aprox =
    (H_sp_23d_6*l_sp_23d_6)+(flux_23d_6/P_g_23d_6)+(H_sy_23d_6*l_sy_23d_6);

    [B_sp_23d_6,erro] =
    calculo_erro(B_sp_23d_6,Fmm_23d_6,Fmm_23d_6_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_6 > B_max
        B_sp_23d_6 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    end
end

```

```

        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,6) = 2*((Fmm_23d_6*flux_23d_6)/(i_ph(i)^2))
f_x_23d(i,6) = ((B_g_23d_6^2)/(2*u_0))*L*z_23d_6;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,6) = -((B_g_23d_6^2)/(2*u_0))*x_23d_6*L;    % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 7

%%% Pólo do estator
l_sp_23d_7 = l_sp_23d_1;
A_sp_23d_7 = A_sp_23d_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_23d_7 = b_ty/2;
A_tp_23d_7 = A_tp_23d_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_23d_7 = h_t+l_g;
P_g_23d_7 = u_0*L*((abs(w_sp-d_4-d_5))/(l_g+h_t));

%%% Culatra do translador
l_ty_23d_7 = 1.5*(w_tp+w_ts);
A_ty_23d_7 = A_ty_23d_1;

%%% Culatra do estator
l_sy_23d_7 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_7 = A_sy_23d_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_7 = w_sp-d_5-d_4;
z_23d_7 = h_t+l_g;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_7 = Fmm_23d_1;
B_sp_23d_7 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_7 = B_sp_23d_7*A_sp_23d_7;
    B_tp_23d_7 = flux_23d_7/A_tp_23d_7;
    B_ty_23d_7 = flux_23d_7/A_ty_23d_7;
    B_sy_23d_7 = flux_23d_7/A_sy_23d_7;
    B_g_23d_7 = (flux_23d_7/P_g_23d_7)*(u_0/l_g_23d_7);

    H_sp_23d_7 = curva_BH(B_sp_23d_7,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_7 = curva_BH(B_tp_23d_7,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_7 = curva_BH(B_ty_23d_7,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_7 = curva_BH(B_sy_23d_7,material_magnetico,0);

```

```

Fmm_23d_7_aprox =
(2*((H_sp_23d_7*l_sp_23d_7)+(H_tp_23d_7*l_tp_23d_7)+(flux_23d_7/P_g_23d_7))
)+((H_ty_23d_7*l_ty_23d_7)+(H_sy_23d_7*l_sy_23d_7));

[B_sp_23d_7,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_7,Fmm_23d_7,Fmm_23d_7_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_23d_7 > B_max
    B_sp_23d_7 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_23d(i,7) = (Fmm_23d_7*flux_23d_7)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,7) = ((B_g_23d_7^2)/(2*u_0))*L*z_23d_7; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,7) = -((B_g_23d_7^2)/(2*u_0))*x_23d_7*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 8

% % % Pólo do estator
l_sp_23d_8 = l_sp_23d_1;
A_sp_23d_8 = A_sp_23d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_23d_8 = l_tp_23d_1;
A_tp_23d_8 = A_tp_23d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_23d_8 = 1.211*l_g;
P_g_23d_8 = 0.268*u_0*d_4;

% % % Pontas dos pólos
l_pt_23d_8 = l_pt_23d_1;
A_pt_23d_8 = A_pt_23d_1;

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_8 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_8 = A_ty_23d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_8 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_8 = A_sy_23d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_8 = 0;
z_23d_8 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_8 = Fmm_23d_1;

```

```

B_sp_23d_8 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_8 = B_sp_23d_8*A_sp_23d_8;
    B_tp_23d_8 = flux_23d_8/A_tp_23d_8;
    B_pt_23d_8 = flux_23d_8/A_pt_23d_8;
    B_ty_23d_8 = flux_23d_8/A_ty_23d_8;
    B_sy_23d_8 = flux_23d_8/A_sy_23d_8;
    B_g_23d_8 = (flux_23d_8/P_g_23d_8)*(u_0/l_g_23d_8);

    H_sp_23d_8 = curva_BH(B_sp_23d_8,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_8 = curva_BH(B_tp_23d_8,material_magnetico,0);
    H_pt_23d_8 = curva_BH(B_pt_23d_8,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_8 = curva_BH(B_ty_23d_8,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_8 = curva_BH(B_sy_23d_8,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_8_aprox =
(2*((H_sp_23d_8*l_sp_23d_8)+(H_tp_23d_8*l_tp_23d_8)+(H_pt_23d_8*l_pt_23d_8)
+((1/2)*(flux_23d_8/P_g_23d_8))))+((H_ty_23d_8*l_ty_23d_8)+(H_sy_23d_8*l_sy
_23d_8));

    [B_sp_23d_8,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_8,Fmm_23d_8,Fmm_23d_8_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_8 > B_max
        B_sp_23d_8 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,8) = (Fmm_23d_8*flux_23d_8)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,8) = ((B_g_23d_8^2)/(2*u_0))*L*z_23d_8;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,8) = -((B_g_23d_8^2)/(2*u_0))*x_23d_8*L;    % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 9

%% % Pólo do estator
l_sp_23d_9 = h_s-((t_3+t_4)/4)+(b_sy/2);
A_sp_23d_9 = A_sp_23d_1;

%% % Pólo do translador
l_tp_23d_9 = h_t-((t_3+t_4)/4)+(b_ty/2);
A_tp_23d_9 = A_tp_23d_1;

%% % Gap (permeância magnética)
l_g_23d_9 = pi*((l_g+t_3+t_4)/2);
if l_g >= (3*t_0)

```

```

    P_g_23d_9 = (u_0*d_4*(t_3+t_3))/l_g_23d_9;
else
    P_g_23d_9 = 0.318*u_0*d_4*log(1+((2*(t_3+t_4))/l_g));
end

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_9 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_9 = A_ty_23d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_9 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_9 = A_sy_23d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_9 = d_4;
z_23d_9 = t_0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_9 = ((h_s-((t_3+t_4)/4))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_9 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_9 = B_sp_23d_9*A_sp_23d_9;
    B_tp_23d_9 = flux_23d_9/A_tp_23d_9;
    B_ty_23d_9 = flux_23d_9/A_ty_23d_9;
    B_sy_23d_9 = flux_23d_9/A_sy_23d_9;
    B_g_23d_9 = (flux_23d_9/P_g_23d_9)*(u_0/l_g_23d_9);

    H_sp_23d_9 = curva_BH(B_sp_23d_9,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_9 = curva_BH(B_tp_23d_9,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_9 = curva_BH(B_ty_23d_9,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_9 = curva_BH(B_sy_23d_9,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_9_aprox =
    (2*((H_sp_23d_9*l_sp_23d_9)+(H_tp_23d_9*l_tp_23d_9)+((1/2)*(flux_23d_9/P_g_
    23d_9))))+((H_ty_23d_9*l_ty_23d_9)+(H_sy_23d_9*l_sy_23d_9));

    [B_sp_23d_9,erro] =
    calculo_erro(B_sp_23d_9,Fmm_23d_9,Fmm_23d_9_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_23d_9 > B_max
        B_sp_23d_9 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,9) = (Fmm_23d_9*flux_23d_9)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,9) = ((B_g_23d_9^2)/(2*u_0))*L*z_23d_9;    % [N]: força de

```

```

propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,9) = -((B_g_23d_9^2)/(2*u_0))*x_23d_9*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 10

% % % Pólo do estator
l_sp_23d_10 = h_s-d_5+(b_sy/2);
A_sp_23d_10 = A_sp_23d_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_23d_10 = l_tp_23d_3;
A_tp_23d_10 = A_tp_23d_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_23d_10 = 1.13*l_g;
P_g_23d_10 = 0.152*u_0*d_5;

% % % Culatra do translador
l_ty_23d_10 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_10 = A_ty_23d_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_23d_10 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_10 = A_sy_23d_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_10 = 0;
z_23d_10 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_10 = ((abs(h_s-(d_5/2)))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_23d_10 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_10 = B_sp_23d_10*A_sp_23d_10;
    B_tp_23d_10 = flux_23d_10/A_tp_23d_10;
    B_ty_23d_10 = flux_23d_10/A_ty_23d_10;
    B_sy_23d_10 = flux_23d_10/A_sy_23d_10;
    B_g_23d_10 = (flux_23d_10/P_g_23d_10)*(u_0/l_g_23d_10);

    H_sp_23d_10 = curva_BH(B_sp_23d_10,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_10 = curva_BH(B_tp_23d_10,material_magnetico,0);
    H_ty_23d_10 = curva_BH(B_ty_23d_10,material_magnetico,0);
    H_sy_23d_10 = curva_BH(B_sy_23d_10,material_magnetico,0);

    Fmm_23d_10_aprox =
(2*((H_sp_23d_10*l_sp_23d_10)+(H_tp_23d_10*l_tp_23d_10)+((1/4)*(flux_23d_10
/P_g_23d_10))))+((H_ty_23d_10*l_ty_23d_10)+(H_sy_23d_10*l_sy_23d_10));

    [B_sp_23d_10,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_10,Fmm_23d_10,Fmm_23d_10_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_23d_10 > B_max

```

```

        B_sp_23d_10 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_23d(i,10) = (Fmm_23d_10*flux_23d_10)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,10) = ((B_g_23d_10^2)/(2*u_0))*L*z_23d_10;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,10) = -((B_g_23d_10^2)/(2*u_0))*x_23d_10*L;    % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 11

%% Pólo do estator
l_sp_23d_11 = l_sp_23d_4;
A_sp_23d_11 = A_sp_23d_1;

%% Pólo do translador
l_tp_23d_11 = h_t-(d_6/2)+(b_ty/2);
A_tp_23d_11 = A_tp_23d_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_23d_11 = 1.13*l_g;
P_g_23d_11 = 0.152*u_0*d_6;

%% Culatra do translador
l_ty_23d_11 = l_ty_23d_1;
A_ty_23d_11 = A_ty_23d_1;

%% Culatra do estator
l_sy_23d_11 = l_sy_23d_1;
A_sy_23d_11 = A_sy_23d_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_23d_11 = 0;
z_23d_11 = 0;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_23d_11 = Fmm_23d_4;
B_sp_23d_11 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_23d_11 = B_sp_23d_11*A_sp_23d_11;
    B_tp_23d_11 = flux_23d_11/A_tp_23d_11;
    B_ty_23d_11 = flux_23d_11/A_ty_23d_11;
    B_sy_23d_11 = flux_23d_11/A_sy_23d_11;
    B_g_23d_11 = (flux_23d_11/P_g_23d_11)*(u_0/l_g_23d_11);

    H_sp_23d_11 = curva_BH(B_sp_23d_11,material_magnetico,0);
    H_tp_23d_11 = curva_BH(B_tp_23d_11,material_magnetico,0);

```

```

H_ty_23d_11 = curva_BH(B_ty_23d_11,material_magnetico,0);
H_sy_23d_11 = curva_BH(B_sy_23d_11,material_magnetico,0);

Fmm_23d_11_aprox =
(2*((H_sp_23d_11*l_sp_23d_11)+(H_tp_23d_11*l_tp_23d_11)+((1/4)*(flux_23d_11
/P_g_23d_11))))+(H_ty_23d_11*l_ty_23d_11)+(H_sy_23d_11*l_sy_23d_11));

[B_sp_23d_11,erro] =
calculo_erro(B_sp_23d_11,Fmm_23d_11,Fmm_23d_11_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_23d_11 > B_max
    B_sp_23d_11 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_23d(i,11) = (Fmm_23d_11*flux_23d_11)/(i_ph(i)^2)
f_x_23d(i,11) = ((B_g_23d_11^2)/(2*u_0))*L*z_23d_11; % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_23d(i,11) = -((B_g_23d_11^2)/(2*u_0))*x_23d_11*L; % [N]: força
normal devido à excitação de um único pólo

L_23d_total(i,1) =
L_23d(i,1)+(2*L_23d(i,2))+sum(L_23d(i,3:4))+L_23d(i,7)+(2*sum(L_23d(i,8:11)
))
f_x_23d_total(i,1) = f_x_23d(i,1);
f_x_23d_total(i,1) = 2*f_x_23d_total(i,1)
f_z_23d_total(i,1) = f_z_23d(i,1);
f_z_23d_total(i,1) = 2*f_z_23d_total(i,1)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Indutância p/ a posição totalmente desalinhada

% % Parâmetros auxiliares da posição
d_7 = (w_ts-w_sp)/2;
d_8 = ((2/pi)*w_ss)-d_7;
d_9 = ((2/pi)*(h_t+l_g))-d_7;
t_5 = d_7-l_g;

% % Caminho 1

% % % Pólo do estator
l_sp_u_1 = h_s-(t_5/2)+(b_sy/2);
A_sp_u_1 = L*w_sp;

% % % Pólo do translador
l_tp_u_1 = h_t-(t_5/2)+(b_ty/2);
A_tp_u_1 = L*w_tp;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_u_1 = sqrt(((t_5)^2)+((d_7)^2));
P_g_u_1 = u_0*L*(t_5/(2*d_7));

```

```

% % % Culatra do translador
l_ty_u_1 = 1.5*(w_tp+w_ts);
A_ty_u_1 = L*b_ty;

% % % Culatra do estator
l_sy_u_1 = 1.5*(w_sp+w_ss);
A_sy_u_1 = L*b_sy;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_1 = d_7;
z_u_1 = t_5;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_1 = ((h_s-(t_5/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u_1 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_1 = B_sp_u_1*A_sp_u_1;
    B_tp_u_1 = flux_u_1/A_tp_u_1;
    B_ty_u_1 = flux_u_1/A_ty_u_1;
    B_sy_u_1 = flux_u_1/A_sy_u_1;
    B_g_u_1 = (flux_u_1/P_g_u_1)*(u_0/l_g_u_1);

    H_sp_u_1 = curva_BH(B_sp_u_1,material_magnetico,0);
    H_tp_u_1 = curva_BH(B_tp_u_1,material_magnetico,0);
    H_ty_u_1 = curva_BH(B_ty_u_1,material_magnetico,0);
    H_sy_u_1 = curva_BH(B_sy_u_1,material_magnetico,0);

    Fmm_u_1_aprox =
(2*((H_sp_u_1*l_sp_u_1)+((1/2)*((H_tp_u_1*l_tp_u_1)+(flux_u_1/P_g_u_1))))+
((H_ty_u_1*l_ty_u_1)+(H_sy_u_1*l_sy_u_1));

    [B_sp_u_1,erro] = calculo_erro(B_sp_u_1,Fmm_u_1,Fmm_u_1_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u_1 > B_max
        B_sp_u_1 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,1) = (Fmm_u_1*flux_u_1)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,1) = ((B_g_u_1^2)/(2*u_0))*L*z_u_1; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,1) = -((B_g_u_1^2)/(2*u_0))*x_u_1*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 2

```

```

% % % Pólo do estator
l_sp_u_2 = h_s-t_5+(b_sy/2);
A_sp_u_2 = A_sp_u_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_u_2 = h_t+(b_ty/2);
A_tp_u_2 = A_tp_u_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_u_2 = ((pi/2)*d_7)+l_g_u_1)/2;
P_g_u_2 = 0.134*u_0*L;

% % % Culatra do translador
l_ty_u_2 = l_ty_u_1;
A_ty_u_2 = A_ty_u_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u_2 = l_sy_u_1;
A_sy_u_2 = A_sy_u_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_2 = 0;
z_u_2 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_2 = ((h_s-t_5)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u_2 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_2 = B_sp_u_2*A_sp_u_2;
    B_tp_u_2 = flux_u_2/A_tp_u_2;
    B_ty_u_2 = flux_u_2/A_ty_u_2;
    B_sy_u_2 = flux_u_2/A_sy_u_2;
    B_g_u_2 = (flux_u_2/P_g_u_2)*(u_0/l_g_u_2);

    H_sp_u_2 = curva_BH(B_sp_u_2,material_magnetico,0);
    H_tp_u_2 = curva_BH(B_tp_u_2,material_magnetico,0);
    H_ty_u_2 = curva_BH(B_ty_u_2,material_magnetico,0);
    H_sy_u_2 = curva_BH(B_sy_u_2,material_magnetico,0);

    Fmm_u_2_aprox =
(2*((H_sp_u_2*l_sp_u_2)+((1/2)*(H_tp_u_2*l_tp_u_2)+(flux_u_2/P_g_u_2))))+((
H_ty_u_2*l_ty_u_2)+(H_sy_u_2*l_sy_u_2));

    [B_sp_u_2,erro] = calculo_erro(B_sp_u_2,Fmm_u_2,Fmm_u_2_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u_2 > B_max
        B_sp_u_2 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else

```

```

        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,2) = (Fmm_u_2*flux_u_2)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,2) = ((B_g_u_2^2)/(2*u_0))*L*z_u_2;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,2) = -((B_g_u_2^2)/(2*u_0))*x_u_2*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 3

%%% Pólo do estator
l_sp_u_3 = h_s-t_5-(d_8/2)+(b_sy/2);
A_sp_u_3 = A_sp_u_1;

%%% Pólo do translador
l_tp_u_3 = l_tp_u_2;
A_tp_u_3 = A_tp_u_1;

%%% Gap (permeância magnética)
l_g_u_3 = ((2*d_7)+d_8)*(pi/4);
P_g_u_3 = 0.637*u_0*L*log(1+(d_8/d_7));

%%% Culatra do translador
l_ty_u_3 = l_ty_u_1;
A_ty_u_3 = A_ty_u_1;

%%% Culatra do estator
l_sy_u_3 = l_sy_u_1;
A_sy_u_3 = A_sy_u_1;

%%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_3 = d_8;
z_u_3 = x_u_3;

%%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_3 = ((h_s-t_5-(d_8/2))/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u_3 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_3 = B_sp_u_3*A_sp_u_3;
    B_tp_u_3 = flux_u_3/A_tp_u_3;
    B_ty_u_3 = flux_u_3/A_ty_u_3;
    B_sy_u_3 = flux_u_3/A_sy_u_3;
    B_g_u_3 = (flux_u_3/P_g_u_3)*(u_0/l_g_u_3);

    H_sp_u_3 = curva_BH(B_sp_u_3,material_magnetico,0);
    H_tp_u_3 = curva_BH(B_tp_u_3,material_magnetico,0);
    H_ty_u_3 = curva_BH(B_ty_u_3,material_magnetico,0);
    H_sy_u_3 = curva_BH(B_sy_u_3,material_magnetico,0);

    Fmm_u_3_aprox =
(2*((H_sp_u_3*l_sp_u_3)+((1/2)*(H_tp_u_3*l_tp_u_3)+(flux_u_3/P_g_u_3))))+((
H_ty_u_3*l_ty_u_3)+(H_sy_u_3*l_sy_u_3));

```

```

[B_sp_u_3,erro] = calculo_erro(B_sp_u_3,Fmm_u_3,Fmm_u_3_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u_3 > B_max
    B_sp_u_3 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_u(i,3) = (Fmm_u_3*flux_u_3)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,3) = ((B_g_u_3^2)/(2*u_0))*L*z_u_3; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,3) = -((B_g_u_3^2)/(2*u_0))*x_u_3*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 4

%% Pólo do estator
l_sp_u_4 = h_s+(b_sy/2);
A_sp_u_4 = A_sp_u_1;

%% Pólo do translador
l_tp_u_4 = h_t-t_5-(d_9/2)+(b_ty/2);
A_tp_u_4 = A_tp_u_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_u_4 = ((2*d_7)+d_9)*(pi/4);
P_g_u_4 = 0.637*u_0*L*log(1+(d_9/d_7));

%% Culatra do translador
l_ty_u_4 = l_ty_u_1;
A_ty_u_4 = A_ty_u_1;

%% Culatra do estator
l_sy_u_4 = l_sy_u_1;
A_sy_u_4 = A_sy_u_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_4 = d_9;
z_u_4 = d_9;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_4 = T_ph*i_ph(i);
B_sp_u_4 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_4 = B_sp_u_4*A_sp_u_4;
    B_tp_u_4 = flux_u_4/A_tp_u_4;

```

```

B_ty_u_4 = flux_u_4/A_ty_u_4;
B_sy_u_4 = flux_u_4/A_sy_u_4;
B_g_u_4 = (flux_u_4/P_g_u_4)*(u_0/l_g_u_4);

H_sp_u_4 = curva_BH(B_sp_u_4,material_magnetico,0);
H_tp_u_4 = curva_BH(B_tp_u_4,material_magnetico,0);
H_ty_u_4 = curva_BH(B_ty_u_4,material_magnetico,0);
H_sy_u_4 = curva_BH(B_sy_u_4,material_magnetico,0);

Fmm_u_4_aprox =
(2*((H_sp_u_4*l_sp_u_4)+((1/2)*(H_tp_u_4*l_tp_u_4)+(flux_u_4/P_g_u_4)))+((
H_ty_u_4*l_ty_u_4)+(H_sy_u_4*l_sy_u_4));

[B_sp_u_4,erro] = calculo_erro(B_sp_u_4,Fmm_u_4,Fmm_u_4_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u_4 > B_max
    B_sp_u_4 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_u(i,4) = (Fmm_u_4*flux_u_4)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,4) = ((B_g_u_4^2)/(2*u_0))*L*z_u_4; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,4) = -((B_g_u_4^2)/(2*u_0))*x_u_4*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 5

%% Pólo do estator
l_sp_u_5 = 2*((h_s-t_5-d_8)/2)+(b_sy/2));
A_sp_u_5 = A_sp_u_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_u_5 = w_ss;
P_g_u_5 = u_0*L*((h_s-t_5-d_8)/w_ss);

%% Culatra do estator
l_sy_u_5 = w_sp+w_ss;
A_sy_u_5 = A_sy_u_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_5 = w_ss;
z_u_5 = h_s-t_5-d_8;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_5 = ((h_s-d_7)/h_s)*T_ph*i_ph(i);
B_sp_u_5 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)

```

```

it = it + 1;

flux_u_5 = B_sp_u_5*A_sp_u_5;
B_sy_u_5 = flux_u_5/A_sy_u_5;
B_g_u_5 = (flux_u_5/P_g_u_5)*(u_0/l_g_u_5);

H_sp_u_5 = curva_BH(B_sp_u_5,material_magnetico,0);
H_sy_u_5 = curva_BH(B_sy_u_5,material_magnetico,0);

Fmm_u_5_aprox =
(2*((H_sp_u_5*l_sp_u_5)+(flux_u_5/P_g_u_5)))+(H_sy_u_5*l_sy_u_5);

[B_sp_u_5,erro] = calculo_erro(B_sp_u_5,Fmm_u_5,Fmm_u_5_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u_5 > B_max
    B_sp_u_5 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_u(i,5) = 2*((Fmm_u_5*flux_u_5)/(i_ph(i)^2))
f_x_u(i,5) = ((B_g_u_5^2)/(2*u_0))*L*z_u_5; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,5) = -((B_g_u_5^2)/(2*u_0))*x_u_5*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 6

%% Pólo do estator
l_sp_u_6 = l_sp_u_4;
A_sp_u_6 = A_sp_u_1;

%% Pólo do translador
l_tp_u_6 = b_ty/2;
A_tp_u_6 = A_tp_u_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_u_6 = h_t+l_g;
P_g_u_6 = u_0*L*((abs(w_sp-(2*d_9)))/(h_t+l_g));

%% Culatra do translador
l_ty_u_6 = l_ty_u_1;
A_ty_u_6 = A_ty_u_1;

%% Culatra do estator
l_sy_u_6 = l_sy_u_1;
A_sy_u_6 = A_sy_u_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_6 = w_sp-(2*d_9);
z_u_6 = h_t+l_g;

```

```

%% % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_6 = Fmm_u_4;
B_sp_u_6 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_6 = B_sp_u_6*A_sp_u_6;
    B_tp_u_6 = flux_u_6/A_tp_u_6;
    B_ty_u_6 = flux_u_6/A_ty_u_6;
    B_sy_u_6 = flux_u_6/A_sy_u_6;
    B_g_u_6 = (flux_u_6/P_g_u_6)*(u_0/l_g_u_6);

    H_sp_u_6 = curva_BH(B_sp_u_6,material_magnetico,0);
    H_tp_u_6 = curva_BH(B_tp_u_6,material_magnetico,0);
    H_ty_u_6 = curva_BH(B_ty_u_6,material_magnetico,0);
    H_sy_u_6 = curva_BH(B_sy_u_6,material_magnetico,0);

    Fmm_u_6_aprox =
(2*((H_sp_u_6*l_sp_u_6)+(H_tp_u_6*l_tp_u_6)+(flux_u_6/P_g_u_6)))+((H_ty_u_6
*l_ty_u_6)+(H_sy_u_6*l_sy_u_6));

    [B_sp_u_6,erro] = calculo_erro(B_sp_u_6,Fmm_u_6,Fmm_u_6_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u_6 > B_max
        B_sp_u_6 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,6) = (Fmm_u_6*flux_u_6)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,6) = ((B_g_u_6^2)/(2*u_0))*L*z_u_6;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,6) = -((B_g_u_6^2)/(2*u_0))*x_u_6*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% % Caminho 7

%% % Pólo do estator
l_sp_u_7 = l_sp_u_1;
A_sp_u_7 = A_sp_u_1;

%% % Pólo do translador
l_tp_u_7 = l_tp_u_1;
A_tp_u_7 = A_tp_u_1;

%% % Gap (permeância magnética)
l_g_u_7 = 1.211*l_g;
P_g_u_7 = 0.134*u_0*t_5;

%% % Culatra do translador

```

```

l_ty_u_7 = l_ty_u_1;
A_ty_u_7 = A_ty_u_1;

% % % Cuiatra do estator
l_sy_u_7 = l_sy_u_1;
A_sy_u_7 = A_sy_u_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_7 = 0;
z_u_7 = 0;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_7 = Fmm_u_1;
B_sp_u_7 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_7 = B_sp_u_7*A_sp_u_7;
    B_tp_u_7 = flux_u_7/A_tp_u_7;
    B_ty_u_7 = flux_u_7/A_ty_u_7;
    B_sy_u_7 = flux_u_7/A_sy_u_7;
    B_g_u_7 = (flux_u_7/P_g_u_7)*(u_0/l_g_u_7);

    H_sp_u_7 = curva_BH(B_sp_u_7,material_magnetico,0);
    H_tp_u_7 = curva_BH(B_tp_u_7,material_magnetico,0);
    H_ty_u_7 = curva_BH(B_ty_u_7,material_magnetico,0);
    H_sy_u_7 = curva_BH(B_sy_u_7,material_magnetico,0);

    Fmm_u_7_aprox =
(2*((H_sp_u_7*l_sp_u_7)+(H_tp_u_7*l_tp_u_7)+((1/4)*(flux_u_7/P_g_u_7))))+((
H_ty_u_7*l_ty_u_7)+(H_sy_u_7*l_sy_u_7));

    [B_sp_u_7,erro] = calculo_erro(B_sp_u_7,Fmm_u_7,Fmm_u_7_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u_7 > B_max
        B_sp_u_7 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,7) = (Fmm_u_7*flux_u_7)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,7) = ((B_g_u_7^2)/(2*u_0))*L*z_u_7; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,7) = -((B_g_u_7^2)/(2*u_0))*x_u_7*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 8

% % % Pólo do estator

```

```

l_sp_u_8 = l_sp_u_1;
A_sp_u_8 = A_sp_u_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_u_8 = l_tp_u_1;
A_tp_u_8 = A_tp_u_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_u_8 = pi*((sqrt(2))/4)*((2*d_7)+d_8+d_9); % [m]: comprimento
if (l_g_u_8 >= 3*t_0)
    P_g_u_8 = (u_0*(t_5/sqrt(2))*((d_8+d_9)/2))/l_g_u_8; % [???]:
permeância do fluxo
else
    P_g_u_8 = 0.318*u_0*((d_8+d_9)/2)*log(1+((2*(t_5/sqrt(2)))/l_g_u_8));
% [???]: permeância do fluxo
end

% % % Culatra do translador
l_ty_u_8 = l_ty_u_1;
A_ty_u_8 = A_ty_u_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u_8 = l_sy_u_1;
A_sy_u_8 = A_sy_u_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_8 = d_9;
z_u_8 = t_5;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_8 = Fmm_u_1;
B_sp_u_8 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_8 = B_sp_u_8*A_sp_u_8;
    B_tp_u_8 = flux_u_8/A_tp_u_8;
    B_ty_u_8 = flux_u_8/A_ty_u_8;
    B_sy_u_8 = flux_u_8/A_sy_u_8;
    B_g_u_8 = (flux_u_8/P_g_u_8)*(u_0/l_g_u_8);

    H_sp_u_8 = curva_BH(B_sp_u_8,material_magnetico,0);
    H_tp_u_8 = curva_BH(B_tp_u_8,material_magnetico,0);
    H_ty_u_8 = curva_BH(B_ty_u_8,material_magnetico,0);
    H_sy_u_8 = curva_BH(B_sy_u_8,material_magnetico,0);

    Fmm_u_8_aprox =
(2*((H_sp_u_8*l_sp_u_8)+(H_tp_u_8*l_tp_u_8)+((1/4)*(flux_u_8/P_g_u_8))))+((
H_ty_u_8*l_ty_u_8)+(H_sy_u_8*l_sy_u_8));

    [B_sp_u_8,erro] = calculo_erro(B_sp_u_8,Fmm_u_8,Fmm_u_8_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u_8 > B_max
    B_sp_u_8 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;

```

```

        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,8) = (Fmm_u_8*flux_u_8)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,8) = ((B_g_u_8^2)/(2*u_0))*L*z_u_8;    % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,8) = -((B_g_u_8^2)/(2*u_0))*x_u_8*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

%% Caminho 9

%% Pólo do estator
l_sp_u_9 = l_sp_u_4;
A_sp_u_9 = A_sp_u_1;

%% Pólo do translador
l_tp_u_9 = l_tp_u_6;
A_tp_u_9 = A_tp_u_1;

%% Gap (permeância magnética)
l_g_u_9 = 1.211*l_g;
P_g_u_9 = 0.268*u_0*(abs(w_sp-(2*d_9)));

%% Culatra do translador
l_ty_u_9 = l_ty_u_6;
A_ty_u_9 = A_ty_u_1;

%% Culatra do estator
l_sy_u_9 = l_sy_u_1;
A_sy_u_9 = A_sy_u_1;

%% Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_9 = 0;
z_u_9 = 0;

%% Parâmetros p/ processo iterativo
Fmm_u_9 = Fmm_u_4;
B_sp_u_9 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_9 = B_sp_u_9*A_sp_u_9;
    B_tp_u_9 = flux_u_9/A_tp_u_9;
    B_ty_u_9 = flux_u_9/A_ty_u_9;
    B_sy_u_9 = flux_u_9/A_sy_u_9;
    B_g_u_9 = (flux_u_9/P_g_u_9)*(u_0/l_g_u_9);

    H_sp_u_9 = curva_BH(B_sp_u_9,material_magnetico,0);
    H_tp_u_9 = curva_BH(B_tp_u_9,material_magnetico,0);
    H_ty_u_9 = curva_BH(B_ty_u_9,material_magnetico,0);
    H_sy_u_9 = curva_BH(B_sy_u_9,material_magnetico,0);

```

```

Fmm_u_9_aprox =
(2*((H_sp_u_9*l_sp_u_9)+(H_tp_u_9*l_tp_u_9)+((1/2)*(flux_u_9/P_g_u_9)))+((
H_ty_u_9*l_ty_u_9)+(H_sy_u_9*l_sy_u_9));

[B_sp_u_9,erro] = calculo_erro(B_sp_u_9,Fmm_u_9,Fmm_u_9_aprox);

% verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
if B_sp_u_9 > B_max
    B_sp_u_9 = B_max;
    num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
    if num_it_saturacao == 10
        break;
    end
else
    num_it_saturacao = 0;
end
end

it
L_u(i,9) = (Fmm_u_9*flux_u_9)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,9) = ((B_g_u_9^2)/(2*u_0))*L*z_u_9; % [N]: força de propulsão
devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,9) = -((B_g_u_9^2)/(2*u_0))*x_u_9*L; % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

% % Caminho 10

% % % Pólo do estator
l_sp_u_10 = abs(h_s-(d_9/2))+(b_sy/2);
A_sp_u_10 = A_sp_u_1;

% % % Pólo do translador
l_tp_u_10 = (b_ty/2)-(d_9/2);
A_tp_u_10 = A_tp_u_1;

% % % Gap (permeância magnética)
l_g_u_10 = (pi/2)*(h_t+l_g+d_9);
if (l_g >= 3*t_0)
    P_g_u_10 = (u_0*(w_sp-(2*d_9))*d_9)/l_g_u_10; % [???]: permeância
do fluxo
else
    P_g_u_10 = 0.318*u_0*d_9*log(1+((2*(w_sp-(2*d_9)))/l_g)); % [???]:
permeância do fluxo
end

% % % Culatra do translador
l_ty_u_10 = l_ty_u_6;
A_ty_u_10 = A_ty_u_1;

% % % Culatra do estator
l_sy_u_10 = l_sy_u_1;
A_sy_u_10 = A_sy_u_1;

% % % Deslocamento nos eixos X e Z p/ cálculo das forças de propulsão e
normal
x_u_10 = w_sp-(2*d_9);
z_u_10 = t_5;

% % % Parâmetros p/ processo iterativo

```

```

Fmm_u_10 = Fmm_u_4;
B_sp_u_10 = 1e-3;
erro = 1.1*erro_max;
it = 0;

while abs(erro) > abs(erro_max)
    it = it + 1;

    flux_u_10 = B_sp_u_10*A_sp_u_10;
    B_tp_u_10 = flux_u_10/A_tp_u_10;
    B_ty_u_10 = flux_u_10/A_ty_u_10;
    B_sy_u_10 = flux_u_10/A_sy_u_10;
    B_g_u_10 = (flux_u_10/P_g_u_10)*(u_0/l_g_u_10);

    H_sp_u_10 = curva_BH(B_sp_u_10,material_magnetico,0);
    H_tp_u_10 = curva_BH(B_tp_u_10,material_magnetico,0);
    H_ty_u_10 = curva_BH(B_ty_u_10,material_magnetico,0);
    H_sy_u_10 = curva_BH(B_sy_u_10,material_magnetico,0);

    Fmm_u_10_aprox =
(2*((H_sp_u_10*l_sp_u_10)+(H_tp_u_10*l_tp_u_10)+((1/2)*(flux_u_10/P_g_u_10)
)))+(H_ty_u_10*l_ty_u_10)+(H_sy_u_10*l_sy_u_10));

    [B_sp_u_10,erro] = calculo_erro(B_sp_u_10,Fmm_u_10,Fmm_u_10_aprox);

    % verifica se o valor de B realmente atingiu o ponto de saturação
do material magnético
    if B_sp_u_10 > B_max
        B_sp_u_10 = B_max;
        num_it_saturacao = num_it_saturacao+1;
        if num_it_saturacao == 10
            break;
        end
    else
        num_it_saturacao = 0;
    end
end

it
L_u(i,10) = (Fmm_u_10*flux_u_10)/(i_ph(i)^2)
f_x_u(i,10) = ((B_g_u_10^2)/(2*u_0))*L*z_u_10;    % [N]: força de
propulsão devido à excitação de um único pólo
f_z_u(i,10) = -((B_g_u_10^2)/(2*u_0))*x_u_10*L;    % [N]: força normal
devido à excitação de um único pólo

L_u_total(i,1) =
(2*L_u(i,1))+(4*L_u(i,2))+(2*sum(L_u(i,3:4)))+L_u(i,6)+(4*sum(L_u(i,7:8)))+
(2*sum(L_u(i,9:10)))
f_x_u_total(i,1) = 0;
f_x_u_total(i,1) = 2*f_x_u_total(i,1)
f_z_u_total(i,1) = 2*f_z_u(i,1);
f_z_u_total(i,1) = 2*f_z_u_total(i,1)

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% % Limites lineares

x(1) = (1/3)*((w_ts+w_tp)/2);
x(2) = 2.*x(1);

```

```

x(3) = 3.*x(1);
x(4) = x(3)+x(1);
x(5) = x(3)+x(2);
x(6) = w_ts+w_tp;
x_fase = [0 x];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% % Indutâncias p/ corrente máxima (conforme o valor máximo do vetor de
correntes de fase

sprintf('L_a (i_ph_max): %0.3f mH',L_a_total(size(i_ph,1),1)*1e3)
sprintf('L_13d (i_ph_max): %0.3f mH',L_13d_total(size(i_ph,1),1)*1e3)
sprintf('L_23d (i_ph_max): %0.3f mH',L_23d_total(size(i_ph,1),1)*1e3)
sprintf('L_u (i_ph_max): %0.3f mH',L_u_total(size(i_ph,1),1)*1e3)

% % Indutância de fase

L_fase = [L_u_total L_23d_total L_13d_total L_a_total L_13d_total
L_23d_total L_u_total];

% % Gráfico

% % % Exato

figure(1)
plot(x_fase.*1e3,L_fase.*1e3);
title('Perfil da indutância de fase da MLRC');
xlabel('posição do translador - x (mm)');
ylabel('Indutância de fase - L (mH)');
grid on;
for i = 1:1:num_elementos_i_ph
    legenda{i,1} = cat(2,num2str(i_ph(i,1)), ' A');
end
legend(legenda);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% % Fluxo concatenado (fc)

if (num_elementos_i_ph > 1) % só calcula o fluxo concatenado se houver mais
de 1 ponto no vetor de corrente de fase (i_ph)

    % % % Vetor de fluxo concatenado p/ a posição desalinhada

    fc_u = L_u_total(:,1).*i_ph;

    % % % Vetor de fluxo concatenado p/ a posição de 2/3 de desalinhamento

    fc_23d = L_23d_total(:,1).*i_ph;

    % % % Vetor de fluxo concatenado p/ a posição de 1/3 de desalinhamento

    fc_13d = L_13d_total(:,1).*i_ph;

    % % % Vetor de fluxo concatenado p/ a posição alinhada

    fc_a = L_a_total(:,1).*i_ph;

    % % Curva característica (baseado no conjugado médio)

```

```
figure(2)
plot([0;i_ph],[0;fc_u], '-b',...
     [0;i_ph],[0;fc_23d], '-b',...
     [0;i_ph],[0;fc_13d], '-b',...
     [0;i_ph],[0;fc_a], '-b')
title('Curva característica da MRRC');
xlabel('corrente de fase - I_p_h (A)');
ylabel('Fluxo concatenado - \lambda (Wb)');
grid on;
end
```