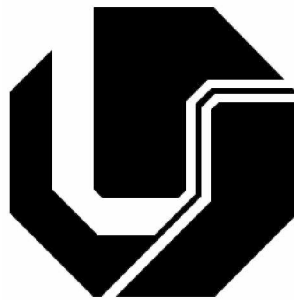

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE ACIONAMENTO DIGITAL PARA
MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

MARCOS JOSÉ DE MORAES FILHO

MARÇO

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE ACIONAMENTO DIGITAL PARA
MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

Dissertação apresentada por **Marcos José de Moraes Filho** à
Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica**, realizada em 30/03/2017
pela banca examinadora:

Prof. **Luciano Coutinho Gomes**, Dr. (UFU) - Orientador
Prof. **Augusto W. F. V. Silveira**, Dr. (UFU) - Coorientador
Prof. **Darizon Alves de Andrade**, PhD (UFU)
Prof. **Ghunter Paulo Viajante**, PhD (IFG)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE ACIONAMENTO DIGITAL PARA
MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR MARCOS JOSÉ DE MORAES FILHO À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCIANO COUTINHO GOMES, Dr.

Orientador

ALEXANDRE CARDOSO, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-graduação stricto sensu em Engenharia Elétrica da UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M827d Moraes Filho, Marcos José de, 1991-
2017 Desenvolvimento de plataforma de acionamento digital para motor a
relutância variável 8/6 / Marcos José de Moraes Filho. - 2017.
80 f. : il.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.
Coorientador: Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Motores de relutância - Teses. 3.
Histerese - Teses. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972- II. Silveira,
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da, 1981- III. Universidade Federal
de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV.
Título.

CDU: 621.3

DEDICATÓRIA

A todos os que contribuíram com meu crescimento pessoal e profissional, que doaram ora apoio, paciência, um sorriso ou um abraço sincero.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo, professor e orientador Luciano Coutinho Gomes, pela apoio, motivação, paciência e atenção permanente.

A todos os companheiros do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), professores ou alunos, pois, com auxílio, paciência, experiência e conselhos de todos este trabalho tornou-se possível.

Aos professores Darizon Alves de Andrade e Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira pela disposição e conselhos ao longo do trabalho.

Aos amigos Cássio Alves de Oliveira, Josemar Alves dos Santos Júnior, Nelson Behnke Júnior e Juliene Alves Almeida por toda a contribuição.

A minha família, pela paciência e compreensão, principalmente à Beatriz do Carmo Ferreira e Thayane Queiroz Ramos.

A todos os funcionários do departamento de engenharia elétrica e coordenação da pós-graduação, em especial a Cinara Fagundes.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que contribuíram para a realização deste trabalho por meio de apoio financeiro.

*“Existe um momento na vida de cada pessoa que é
possível sonhar e realizar nossos sonhos... E esse
momento tão fugaz chama-se presente e tem a duração do
tempo que passa.”*

Mário Quintana

RESUMO

Este trabalho vem contribuir para o estudo da máquina a relutância variável acionada como motor, por meio da proposta de uma plataforma de acionamento e controle de corrente para a mesma. O objetivo principal é implementar a plataforma de forma a ser modular, possibilitando alterações em sua estrutura física de forma simplificada, e por elementos robustos, a fim de suportar os testes impostos. A plataforma deverá prover a aquisição de dados com precisão e confiabilidade, além de propiciar a segurança tanto das pessoas quanto dos equipamentos ao longo dos ensaios realizados.

A fim de se atingir o objetivo principal, algumas etapas intermediárias serão expostas e discutidas, tal como uma breve abordagem do princípio de funcionamento da máquina a relutância variável; a apresentação do protótipo utilizado e suas características mecânicas e elétricas; definição do conversor e implementação computacional do acionamento do motor a relutância variável 8/6. Os resultados obtidos na implementação computacional serão discutidos e confrontados com os resultados experimentais.

A validação da plataforma proposta é efetuada por meio de ensaios com cargas conhecidas, verificando a atuação do controle de corrente e o comportamento da máquina para cada um destes ensaios.

Palavras-chave: Acionamento, DSP, histerese, MATLAB/Simulink, motor a relutância variável 8/6, plataforma, simulação.

ABSTRACT

This work contributes to the study of the switched reluctance machine driven as motor, through the proposal of a drive system by current control. The main objective is to implement a modular system, allowing physical structure changes in a simplified mode, with robust components to support the imposed tests. The platform should provide data acquisition with precision and reliability, as well as providing security for the people and equipment during the tests performed.

In order to achieve the main objective, some intermediate steps will be exposed and discussed, such as a brief approach to the operating principle of the switched reluctance machine; the presentation of the prototype used and the mechanical and electrical characteristics; definition of the system (converter) and computational simulation of switched reluctance motor 8/6 drive. The results obtained in the computational simulation will be discussed and compared with the experimental results.

The validation of the proposed system is carried out by means of tests with known loads, verifying the current control act and the machine behavior for each of these tests.

Keywords: 8/6 switched reluctance motor, DSP, drive, hysteresis, MATLAB/Simulink, platform, simulation.

Lista de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Perfil transversal do MRV 8/6.....	7
Figura 2.2 - a) Ligação série. b)Ligação paralelo.....	7
Figura 2.3 - Circuito equivalente monofásico do MRV.....	8
Figura 2.4 - Localização das grandezas de projeto.....	12
Figura 2.5 - Lâmina do estator e suas medidas.....	12
Figura 2.6 - Lâmina do rotor e suas medidas.	12
Figura 2.7 - Densidade de fluxo magnético da MaRV 8/6.....	14
Figura 2.8 - Perfil de indutância da MaRV para alguns valores específicos de corrente.....	15
Figura 2.9 - Perfil do fluxo da MaRV para alguns valores específicos de corrente.....	15
Figura 2.10 - Perfil de indutância em 3D para diferentes valores de correntes e posições do rotor.	16
Figura 2.11 - Perfil de fluxo em 3D para diferentes valores de correntes e posições do rotor.	16
Figura 2.12 - Protótipo do MRV 8/6.	17
Figura 2.13 - Estator do protótipo.	17
Figura 2.14 - Rotor do protótipo.....	17
Figura 2.15 - Relação entre polos do estator e do rotor no protótipo.....	17
Figura 2.16 - Perfil de indutância para a MaRV não saturada.	18
Figura 2.17 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para 0°	19
Figura 2.18 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_1	19
Figura 2.19 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_2	20
Figura 2.20 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_3	20
Figura 2.21 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_4	21
Figura 2.22 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_5	21
Figura 2.23 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_6	22
Figura 2.24 - Perfil de indutância ideal para as quatro fases da MaRV 8/6.....	23

Capítulo 3

Figura 3.1 - Diagrama de blocos no Simulink®.....	25
Figura 3.2 - Bloco computacional da máquina a relutância variável 8/6.	26
Figura 3.3 - Entrada de parâmetros elétricos e mecânicos.	26

Figura 3.4 - Entrada de tabelas específicas.....	26
Figura 3.5 - Topologia do conversor half-bridge para o MRV 8/6.	27
Figura 3.6 - Etapa de magnetização do conversor.....	27
Figura 3.7 - Etapa de roda livre do conversor.	27
Figura 3.8 - Etapa de desmagnetização do conversor.	27
Figura 3.9 - Bloco computacional que calcula a posição do rotor e define qual fase deve ser acionada.....	28
Figura 3.10 - Subcircuito do bloco computacional que calcula a posição do rotor e define qual fase deve ser acionada.	28
Figura 3.11 - Referência específica do modelo de MaRV do simulink®.	29
Figura 3.12 - Relação entre perfil de indutância e corrente (controle tipo histerese).....	30
Figura 3.13 - Curvas de indutância nas quatro fases do MRV 8/6.....	31
Figura 3.14 - Curvas de fluxo nas quatro fases do MRV 8/6.....	31
Figura 3.15 - Curvas das correntes nas quatro fases do MRV 8/6.	31
Figura 3.16 - Curvas da corrente instantânea e média na fase A.	31
Figura 3.17 - Indutâncias, gatilhos nas chaves controladas e correntes nas quatro fases do MRV 8/6.....	32
Figura 3.18 - Chaves controladas da fase A.	33
Figura 3.19 - Tensão nas quatro fases do MRV 8/6.....	33
Figura 3.20 - Localização e sentidos das grandezas expostas nas figuras 3.21 e 3.22.....	34
Figura 3.21 - Curvas da corrente instantânea, tensão e potência instantânea na saída do retificador.....	34
Figura 3.22 - Perfis das correntes instantâneas na saída do retificador, no capacitor, no conversor half-bridge e na fase A do motor.	34
Figura 3.23 - Velocidade do eixo do MRV 8/6.....	34
Figura 3.24 - Torque eletromagnético instantâneo das quatro fases do MRV 8/6.....	35
Figura 3.25 - Torque eletromagnético instantâneo e médio no MRV 8/6.....	35
Figura 3.26 - Deslocamento angular do polo do rotor em relação as fases.....	36
Figura 3.27 - Potências médias de entrada e saída do MRV 8/6.....	36

Capítulo 4

Figura 4.1 - Diagrama em blocos da plataforma experimental completa.....	38
Figura 4.2 - Módulo IGBT 6MBI100S-060.	39
Figura 4.3 - Circuito elétrico equivalente do módulo IGBT 6MBI100S-060 [14].	39

Figura 4.4 - Esquema elétrico de fechamento dos módulos IGBT para acionamento do MRV 8/6.	40
Figura 4.5 - Esquema elétrico dos circuitos isoladores [15].	40
Figura 4.6 - Esquema elétricos das fontes dos circuitos isoladores.	41
Figura 4.7 - Módulo eZdspTMF28335.	42
Figura 4.8 - Principais circuitos que compõem os módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente.	43
Figura 4.9 - Esquema elétrico do circuito de condicionamento de sinais digitais.	44
Figura 4.10 - Encoder absoluto TRD-NA1024NW [16].	45
Figura 4.11 - Sistema simulador de carga [11].	47
Figura 4.12 - Montagem final do subsistema de potência.	47
Figura 4.13 - Montagem final do subsistema de aquisição e controle.	47
Figura 4.14 - Sistema final de acionamento e controle do MRV 8/6.	48
Figura 4.15 - Sistema completo: acionamento e controle, MRV 8/6 e sistema simulador de carga.	48
Figura 4.16 - Diagrama de bloco do sistema de controle.	49
Figura 4.17 - Pontos de medição de tensão e corrente após o retificador.	51
Figura 4.18 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.	52
Figura 4.19 - Corrente da fase A (laranja) e pulso da chave controlada da fase A (rosa).	52
Figura 4.20 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.	53
Figura 4.21 - Torque do MRV 8/6.	53
Figura 4.22 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.	54
Figura 4.23 - Relação entre corrente de fase e corrente adquirida.	54
Figura 4.24 - Corrente da fase A (laranja) e pulso da chave controlada da fase A (rosa).	54
Figura 4.25 - Corrente de fase, corrente adquirida, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.	54
Figura 4.26 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.	55
Figura 4.27 - Torque do MRV 8/6.	55
Figura 4.28 - Fonte fornecendo energia ao banco de capacitores e a fase do motor.	55
Figura 4.29 - Banco de capacitores fornece energia a fase do motor.	55
Figura 4.30 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.	56
Figura 4.31 - Corrente de fase, corrente adquirida, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.	56
Figura 4.32 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.	57

Figura 4.33 - Torque do MRV 8/6.....	57
Figura 4.34 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.	57
Figura 4.35 - Corrente de fase, corrente adquirida, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.....	57
Figura 4.36 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.	58
Figura 4.37 - Torque do MRV 8/6.....	58

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Resumo das dimensões do protótipo.	13
Tabela 4.1 - Relação entre corrente média de fase e corrente de pico.	59
Tabela 4.2 - Grandezas obtidas nos ensaios.	59

Lista de abreviaturas e símbolos

Os subscritos a , b , c e d denotam respectivamente as grandezas vinculadas às fases a , b , c e d da máquina a relutância variável 8/6.

ca	Corrente alternada
cc	Corrente contínua
MaRV	Máquina a relutância variável
MRV	Motor a relutância variável
MCC	Máquina de corrente contínua
v	Tensão na fase da máquina
R_f	Resistência do enrolamento da fase
i	Corrente que circula no enrolamento da fase
$L(\theta, i)$	Indutância da fase, dependente da posição do rotor e da corrente da fase
e	Força contra eletromotriz
ω_m	Velocidade angular mecânica do eixo
p_e	Potência elétrica instantânea de entrada do circuito
p_{ent}	Potência instantânea entregue no entreferro
T_{emg}	Torque eletromagnético
T_a	Torque eletromagnético produzido pela fase A
T_{mec}	Torque mecânico
D	Coefficiente de atrito viscoso do sistema
J	Momento de inércia do sistema
i_a	Corrente na fase A
$L_a(\theta, i)$	Indutância da fase A
r_a	Resistência do enrolamento da fase A
t	Tempo
β_r	Ângulo dos polos do rotor
β_s	Ângulo dos polos do estator
D_s	Diâmetro externo do estator
D_r	Diâmetro externo do rotor
g	Comprimento do entreferro

l	Comprimento do rotor
t_r	Largura dos polos do rotor
t_s	Largura dos polos do estator
h_r	Altura dos polos do rotor
h_s	Altura dos polos do estator
Y_r	Culatra do rotor
Y_s	Culatra do estator
D_{eixo}	Diâmetro do eixo
FEMM	Finite Element Method Magnetics
rpm	Rotações por minuto
MATLAB	Matrix laboratory
L_{min}	Indutância mínima
L_{max}	Indutância máxima
N_s	Número de polos do estator
N_r	Número de polos do rotor
DSP	Processador digital de sinais
DSC	Controlador digital de sinais
τ_e	Zona de torque efetivo
ε	Ângulo de condução de energia
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

Sumário

Capítulo 1	1
1.1 - Considerações iniciais.....	1
1.2 - Aplicações da MaRV	2
1.3 - Objetivos do trabalho.....	4
1.4 - Estrutura da dissertação	5
Capítulo 2	6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Objetivos.....	6
2.3 - Aspectos construtivos e principais características	6
2.4 - Equações elétricas e mecânicas do MRV 8/6	7
2.5 - Protótipo utilizado no trabalho.....	12
2.6 - Princípio de funcionamento	18
Capítulo 3	24
3.1 - Introdução	24
3.2 - Objetivos.....	24
3.3 - Simulação computacional	24
3.3.1 - Motor a relutância variável 8/6	25
3.3.1 - Conversor half-bridge	26
3.3.3 - Sistema de determinação de posição e sistema de controle de corrente	28
3.4 - Resultados da simulação	30
Capítulo 4	37
4.1 - Introdução	37

4.2 - Objetivos	37
4.3 - Projeto e montagem	37
4.3.1 - Conversor half-bridge e isoladores	38
4.3.2 - Fontes de alimentação e transformador com as saídas isoladas	40
4.3.3 - Processador digital de sinais (DSP)	41
4.3.4 - Módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente	42
4.3.5 - Condicionadores de níveis digitais	44
4.3.6 - Encoder absoluto	45
4.3.7 - Sistema simulador de carga	46
4.4 - Montagem final da plataforma	47
4.5 - Programação do DSP	49
4.6 - Resultados experimentais	50
4.6.1 - Ensaio 1: Torque médio de 0,77 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 150 V	51
4.6.2 - Ensaio 2: Torque médio de 3,2 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 300 V	53
4.6.3 - Ensaio 3: Torque médio de 3,9 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 300 V	56
4.6.4 - Ensaio 4: Torque médio de 4,5 N.m, velocidade de 2200 rpm e tensão de 300 V	57
Capítulo 5	61
5.1 - Conclusões finais	61
5.2 - Propostas para trabalhos futuros	62
Apêndice A - Tabela de fluxo magnético [Wb] por corrente de fase [A] e por posição do rotor [°]	63
Apêndice B - Código de programação do DSP	67
Referências bibliográficas	76

Capítulo 1

Introdução geral e apresentação do trabalho

1.1 - Considerações iniciais

A máquina a relutância variável é uma máquina elétrica na qual o torque é produzido pela tendência do rotor movimentar-se para a posição em que a indutância do enrolamento excitado é máxima, podendo esse movimento ser linear ou rotacional [7]. Pode-se afirmar então que a grandeza fundamental de uma MaRV é a indutância, existindo um ponto em que seu valor é máximo, correspondente à posição onde os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados; e um ponto em que a indutância é mínima, correspondente à posição onde estes polos estão completamente desalinhados. Estas posições recebem o nome de posição de equilíbrio estável e posição de equilíbrio instável, respectivamente. Energizando a fase da máquina na posição de equilíbrio estável, o rotor permanecerá parado indefinidamente. Por outro lado, energizando a fase da máquina na posição de equilíbrio instável, o rotor poderá se movimentar no sentido horário ou anti-horário buscando a posição de equilíbrio estável.

Apesar de apresentar registros conhecidos desde 1842 [1] e vantagens tanto construtivas quanto operacionais em relação às máquinas elétricas convencionais, tais como as máquinas de corrente contínua, de indução e síncronas, a máquina a relutância teve sua capacidade pouco explorada e com lenta evolução, principalmente devido à forte dependência de um sistema de chaveamento de suas fases e a necessidade do conhecimento da posição instantânea do rotor.

Nas últimas décadas, devido ao grande avanço de diversas áreas da engenharia elétrica, tais como a eletrônica de potência, microcontroladores, sistemas de sensoriamento, dentre outras, muitas máquinas não convencionais vêm tornando-se objetos de estudos, e dentre estas máquinas tem-se a MaRV em diversas configurações, sendo acionada tanto como motor quanto gerador. Apesar de apresentar algumas limitações, a máquina a relutância variável mostra-se capaz de competir com máquinas convencionais em aplicações devido à:

- Robustez, permitindo trabalho em ambientes sujeitos a altas temperaturas e vibrações;
- Tolerância à falta de fases em motores polifásicos, visto que as fases são controladas de modo independente;
- Construção simples, com enrolamentos concentrados nos polos e rotor laminado;

-
- Redução de perdas ôhmicas no rotor, visto à inexistência de enrolamentos no mesmo;
 - Alimentação a partir de uma fonte de corrente contínua, apresentando impacto positivo na implementação do conversor para seu acionamento;
 - Elevado conjugado de partida;
 - Alta relação torque/volume; característica que gera impactos financeiros visto à redução da matéria prima em sua produção.

Devido às características acima listadas o estudo científico das MaRVs tem aumentado significativamente, e com isso as possibilidades de aplicações destas máquinas tornam-se bastante atraentes em diversos setores energéticos.

1.2 - Aplicações da MaRV

Uma forma de se mensurar o crescente interesse na MaRV é a quantidade de patentes registradas e publicações cujo foco seja esta máquina. Segundo [37], antes de 1976 existiam 67 patentes registradas nas quais o cerne era a MaRV, no entanto, entre 1976 e 1999 este número subiu para 1755; e com relação às publicações, observa-se a mesma tendência de comportamento.

A exposição do desenvolvimento da máquina a relutância ao longo da história não será minuciosamente abordada devido à ampla bibliografia que vem tratando do tema ao longo dos últimos anos, tal como [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 17, 37]. Nesta etapa serão enfatizadas aplicações referentes à máquina, assim como as principais áreas nas quais ela mostra-se competitiva e viável atualmente.

Dentre os diversos setores nos quais a MaRV pode agregar contribuições, atualmente destacam-se: setor aeronáutico e espacial, automotivo, principalmente na área de tração elétrica, e na geração de energia eólica. Os estudos referentes às MaRVs concentram-se em aplicações nas quais necessitam-se de velocidades variáveis e, em que há a presença da eletrônica de potência. Pois, para propósitos que exigem velocidades variáveis as máquinas convencionais também demandam a utilização de conversores eletrônicos, permitindo que a MaRV possa competir em tais usos sem que a necessidade do conversor seja um diferencial [5].

Uma característica marcante do MRV é o perfil do conjugado produzido, pois, devido a sua estrutura de dupla saliência e às características do acionamento o mesmo apresenta aspecto oscilatório. Todavia, com o desenvolvimento de técnicas modernas de controle de torque [19,

20, 22], tem-se a redução ou eliminação da oscilação do conjugado, e por consequência a redução da vibração mecânica e dos ruídos acústicos.

Em 1994 [27] estuda a aplicação da máquina a relutância variável para empregos no setor aeronáutico, abordando a característica da dualidade do acionamento desta máquina, trabalhando como motor e gerador. A característica que permite a comutação da MaRV entre motor e gerador é a ausência de enrolamentos de campo ou ímãs permanentes em seu rotor, permitindo definir seu comportamento a partir de seu sistema de controle. Em 2010, tem-se outro exemplo de estudo da característica de acionamento como motor e gerador da MaRV em [28], no qual o autor aborda o acionamento da máquina como motor, voltado a tração elétrica; e como gerador operando em velocidade variável, voltado a geração de energia eólica.

A área automotiva mostra-se como campo fértil ao MRV, principalmente com seu acionamento voltado a tração elétrica. No ano de 2000 [29], estuda o uso do MRV para veículos elétricos e veículos elétricos híbridos, abordando as características estáticas e dinâmicas do motor, a fim de contribuir com os aspectos de projeto e controle relevantes à área automotiva. Em [30] tem-se a proposta de aplicação de um MRV tetrafásico, de potência 50 kW em veículos elétricos híbridos, sendo o controle do mesmo implementado por meio de um DSP. Ainda dentro da área automotiva, destacam-se diversos estudos, [31, 32, 33, 34, 35, 36], que abordam além de aplicações para os MRV para tração elétrica, técnicas de otimização para se obter o torque médio máximo, frenagem regenerativa e redução de perdas.

Em 2013, no salão do automóvel de Genebra, a empresa Land Rover apresentou o resultado obtido em suas pesquisas referentes a veículos elétricos, no qual substituiu o motor diesel e a caixa de câmbio do modelo Land Rover Defender 110 por um MRV de 70 kW, o qual é alimentado por uma bateria de 27 kWh, possibilitando uma autonomia em torno de 80 km quando completamente carregado, e uma velocidade máxima próxima a 110 km/h. Visto à aplicação do veículo em situações típicas off-road e baixa velocidade, o mesmo pode ser utilizado por até 8 horas [38, 39].

Outra aplicação na qual a MaRV mostra-se viável é na tração híbrida para ônibus urbanos ecológicos e veículos oficiais locais, pois, tais veículos apresentam alto índice de poluição e baixa eficiência devido a seus itinerários e deslocamento predominante em ambiente urbano [40].

Uma tecnologia que foi criada a fim de reduzir o consumo de combustíveis fósseis pelos veículos, e consequentemente, a emissão de dióxido de carbono na atmosfera é o start/stop, cuja função é desligar o motor quando o veículo encontra-se totalmente parado, por exemplo, em um congestionamento ou semáforo, e religa-o quando o acelerador é pressionado. Para esta

aplicação tem-se a proposta da MaRV acionada como gerador, permitindo atingir-se alta eficiência de geração em toda a faixa de velocidade e carga [41].

A partir dos diversos estudos acima citados, tem-se que a MaRV apresenta atrativos para inúmeras aplicações industriais, validando os esforços dos diversos grupos industriais e da comunidade científica para que esta máquina venha a ocupar uma posição de destaque dentro do conjunto das máquinas elétricas.

1.3 - Objetivos do trabalho

O objetivo principal do trabalho é a implementação de uma plataforma de acionamento digital para o MRV 8/6, de forma que a mesma seja robusta, flexível e modular, permitindo ensaios para MaRVs de diversas configurações, com relação a quantidade de polos e potências. A plataforma deverá assegurar ainda a precisão e confiabilidade dos dados obtidos, e a segurança tanto das pessoas quanto dos equipamentos quando ocorrer o acionamento da máquina.

A fim de atingir o objetivo principal as seguintes metas foram traçadas:

- Compreender o princípio de funcionamento da máquina a relutância variável 8/6;
- Criar simulação computacional e configurá-la com os parâmetros do protótipo disponível, operando como motor;
- Ao longo da simulação analisar o comportamento do motor sob algumas condições de cargas e correntes do estator;
- Montar conversor de potência para o MRV 8/6;
- Montar fontes e circuitos isoladores que propiciem a interface entre o microcontrolador e o conversor de potência;
- Montar módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente;
- Montar módulos condicionadores de níveis digitais;
- Definir o microcontrolador que efetuará o controle de corrente da máquina;
- Implementar sistema de controle de corrente para o motor;
- Garantir que o sistema trabalhe de forma precisa, confiável e segura;
- Efetuar ensaios experimentais e analisar os resultados obtidos;
- Obter contribuições científicas a partir do trabalho, por meio de publicações em conferências e periódicos;
- Propor novos estudos a partir do resultado final obtido.

1.4 - Estrutura da dissertação

O trabalho foi dividido em cinco capítulos que apresentam um estudo da máquina a relutância variável 8/6 acionada como motor, de modo a abordar aspectos matemáticos, construtivos e operacionais da mesma.

O capítulo 1 apresenta um levantamento bibliográfico a fim de evidenciar a origem da máquina a relutância variável, suas vantagens e aplicações abordadas em trabalhos desenvolvidos pela comunidade científica.

O capítulo 2 traz aspectos construtivos, características da máquina, equacionamento matemático, princípio de funcionamento e a apresentação do protótipo a ser utilizado ao longo do trabalho, incluso algumas simulações computacionais pautadas em dados obtidos da etapa de projeto do protótipo.

O capítulo 3 apresenta a simulação do acionamento do MRV 8/6 modelada a partir de dados do protótipo a ser utilizado; e aspectos do controle de corrente imposto. Os resultados computacionais serão expostos e discutidos a fim nortear o comportamento da máquina quando acionada experimentalmente.

No capítulo 4 é detalhado o projeto da plataforma de acionamento e controle do MRV 8/6. Serão abordadas as etapas construtivas dos elementos de potência e de controle da plataforma, tais como: o conversor half-bridge e os circuitos isoladores, as fontes de alimentação, os módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente, os módulos de condicionamento de sinais digitais. Também serão expostos o encoder utilizado, indispensável ao acionamento do motor, e a programação do DSP, a qual será responsável pelo controle da máquina. Posteriormente serão realizados ensaios experimentais, tendo seus resultados apresentados e discutidos.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho proposto e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Adicionalmente foram anexadas a tabela de fluxo magnético por corrente de fase e por posição do rotor do protótipo utilizado no trabalho (apêndice A), indispensável a etapa de simulação computacional; e o código do sistema de controle implementado no DSP (apêndice B).

Capítulo 2

Máquina utilizada no projeto e princípio de funcionamento do MRV 8/6

2.1 - Introdução

As máquinas a relutância variável têm sido foco de diversos estudos na área de máquinas e acionamentos elétricos, em suas diversas configurações, tais como 4/4 (quatro polos no estator e quatro polos no rotor), 6/4 (seis polos no estator e quatro no rotor), 6/6 (seis polos no estator e seis polos no rotor), 8/6 (oito polos no estator e seis no rotor), dentre outras, sendo a mesma acionada tanto como motor quanto como gerador.

2.2 - Objetivos

Serão apresentadas a seguir algumas características particulares, o equacionamento matemático que rege seu comportamento, o protótipo utilizado neste trabalho e o princípio de funcionamento da máquina a relutância variável 8/6.

2.3 - Aspectos construtivos e principais características

Do ponto de vista construtivo o MRV destaca-se por possuir polos salientes tanto no rotor quanto no estator e, ausência de enrolamentos ou ímãs permanentes no rotor, característica que contribui para a redução das perdas ôhmicas e uma construção simplificada. É uma máquina robusta e confiável, visto a tolerância à falta de fase em máquinas polifásicas e a possibilidade de executar trabalhos em ambientes que estão sob condições adversas; apresenta boa relação conjugado/volume e baixo custo de construção [3, 9]. Abaixo temos o perfil transversal da máquina foco deste estudo, um MRV 8/6.

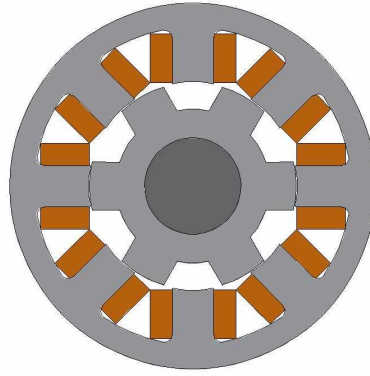


Figura 2.1 - Perfil transversal do MRV 8/6.

Os enrolamentos são formados por pares de bobinas concentradas que envolvem os polos do estator diametralmente opostos, e podem ser ligados em série ou paralelo, figura 2.2. A escolha da ligação como série ou paralelo ocorrerá de acordo com os níveis de tensão ou corrente desejados, de acordo com limitações elétricas do enrolamento estatórico ou mesmo do conversor que irá acioná-la.

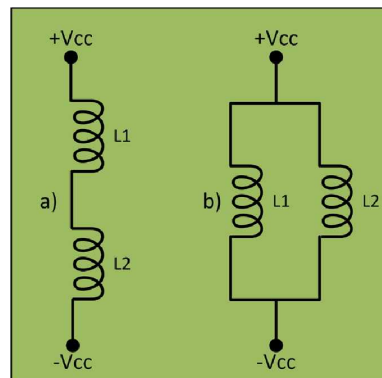


Figura 2.2 - a) Ligação série. b) Ligação paralelo.

Com relação à quantidade de números de polos do rotor e do estator, enfatiza-se que as configurações com um maior número de polos resultam em menores oscilações no conjugado da máquina, todavia, exigem um conversor com uma quantidade maior de elementos.

2.4 - Equações elétricas e mecânicas do MRV 8/6

Esta seção abordará de forma breve e direta o equacionamento dinâmico e para regime permanente do MRV 8/6, desprezando o efeito da indutância mútua entre as fases. Uma abordagem matemática mais detalhada pode ser encontrada em [1, 2, 3, 4, 5].

O circuito monofásico equivalente de um MRV é apresentado na figura 2.3.

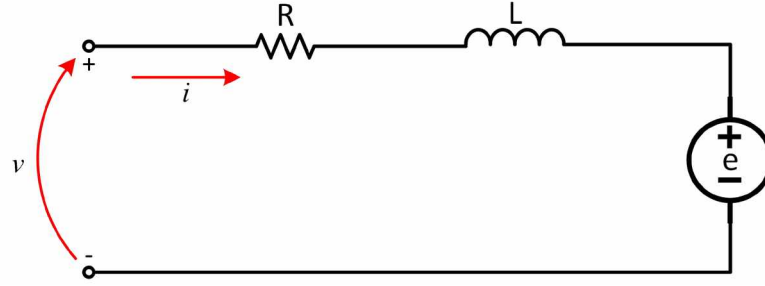


Figura 2.3 - Circuito equivalente monofásico do MRV.

Equacionando o circuito equivalente monofásico, tomando que a indutância é uma grandeza dependente tanto da posição do rotor quanto da corrente de fase [1], tem-se:

$$v = R_f i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$

Onde:

v - Tensão na fase da máquina (V).

R_f - Resistência do enrolamento da fase (Ω).

i - Corrente que circula no enrolamento da fase (A).

$L(\theta, i)$ - Indutância da fase, dependente da posição do rotor e da corrente da fase (H).

e - Força contra eletromotriz (V).

A relação entre fluxo enlaçado e a indutância é expressa na equação abaixo.

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \quad (2.2)$$

Onde:

$\lambda(\theta, i)$ - Fluxo enlaçado pelo enrolamento da máquina (Wb).

A força contra eletromotriz é obtida pela equação 2.3:

$$e = i \omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.3)$$

Onde:

ω_m - Velocidade angular mecânica do eixo (rad/s).

Tem-se então que a equação 2.1 pode ser reescrita tal que:

$$v = R_f i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.4)$$

Na expressão acima temos que os três termos da direita representam respectivamente, a queda de tensão no resistor, a queda de tensão no indutor e a força contra eletromotriz induzida no circuito equivalente monofásico. Descrito matematicamente o comportamento da tensão no circuito equivalente monofásico por meio da equação 2.4, podemos de forma simples equacionar a potência de entrada do circuito de maneira que:

$$p_e = vi \quad (2.5)$$

Onde:

p_e - Potência instantânea na entrada do circuito (VA).

Logo,

$$p_e = R_f i^2 + i L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i^2 \omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.6)$$

Utilizando-se de algumas ferramentas matemáticas a fim de obter parâmetros que experimentalmente possam ser mensurados [1, 2], teremos:

$$p_e = R_f i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.7)$$

Na equação 2.7 observa-se que a potência instantânea de entrada tem como componentes, respectivamente, as perdas resistivas no enrolamento, a taxa de variação da energia armazenada no campo magnético e a potência entregue no entreferro, a qual é expressa por:

$$p_{ent} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \omega_m \quad (2.8)$$

Onde:

p_{ent} - Potência instantânea entregue no entreferro (W).

A partir da equação 2.8 que rege o comportamento da potência entregue no entreferro, equacionar-se o torque eletromagnético tal que:

$$T_{emg} = \frac{P_{ent}}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

É importante salientar que todo o equacionamento acima foi efetuado tomando como base o equivalente monofásico, logo, para o MRV 8/6 teremos a expressão geral para a produção de torque eletromagnético como:

$$T_{emg} = T_a + T_b + T_c + T_d \quad (2.10)$$

Onde:

T_a - Torque eletromagnético produzido pela fase A (N.m).

T_b - Torque eletromagnético produzido pela fase B (N.m).

T_c - Torque eletromagnético produzido pela fase C (N.m).

T_d - Torque eletromagnético produzido pela fase D (N.m).

Substituindo a equação 2.9 na equação 2.10, considerando-se as quatro fases do MRV 8/6 teremos:

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_d^2 \frac{\partial L_d(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.11)$$

Para efetuar o equacionamento de forma a se obter o torque mecânico disponível a carga acionada pelo motor, faz-se necessário levar em consideração a parcela de conjugado de atrito viscoso e a parcela de conjugado de inércia, de forma que o torque mecânico é descrito pela equação 2.12.

$$T_{mec} = T_{emg} - D\omega_m - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.12)$$

Onde:

D - Coeficiente de atrito viscoso do sistema (kg.m²/s).

J - Momento de inércia do sistema (kg.m²).

Tem-se a partir do desenvolvimento acima as equações que descrevem o comportamento elétrico e mecânico do MRV 8/6. Todavia, a fim de representar equações de estados da máquina a relutância variável acionada como motor, estas equações são reagrupadas e reescritas de forma matricial, equação 2.13, ação a qual facilita o emprego de métodos numéricos para sua solução [2].

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ T_{mec} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d & 0 & 0 \\ m & n & p & q & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ \omega_m \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a(\theta, i) & 0 & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{\partial L_a(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & L_b(\theta, i) & 0 & 0 & 0 & i_b \frac{\partial L_b(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_c(\theta, i) & 0 & 0 & i_c \frac{\partial L_c(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & L_d(\theta, i) & 0 & i_d \frac{\partial L_d(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Onde:

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{2} i_a \frac{\partial L_a(\theta, i)}{\partial \theta} & p &= \frac{1}{2} i_c \frac{\partial L_c(\theta, i)}{\partial \theta} \\ n &= \frac{1}{2} i_b \frac{\partial L_b(\theta, i)}{\partial \theta} & q &= \frac{1}{2} i_d \frac{\partial L_d(\theta, i)}{\partial \theta} \end{aligned}$$

Designando por $[V]$, $[R]$, $[I]$, $[L]$ e $\dot{[I]}$ as matrizes na ordem em que aparecem na equação 2.13, obtém-se:

$$[V] = [R][I] + [L]\dot{[I]} \quad (2.14)$$

Isolando-se a matriz $\dot{[I]}$ obtemos a equação de estados do MRV 8/6 tal que:

$$\dot{[I]} = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (2.15)$$

A obtenção da equação de estados, equação 2.15, permite a descrição completa do comportamento de cada fase da máquina em qualquer instante. As matrizes $[R]$ e $[L]$ são compostas pelos valores de resistências e indutâncias de cada fase, características construtivas de cada máquina específica. A solução desse sistema é facilitada através de métodos numéricos computacionais.

2.5 - Protótipo utilizado no trabalho

O protótipo utilizado neste trabalho é uma máquina 8/6 com potência nominal de 2,2 kW (3 cv) e corrente nominal de 10 A, a qual foi desenvolvida dentro do laboratório que dá suporte ao projeto, desde as etapas referentes à definição das medidas e dos materiais, a modelagem, o estudo elétrico e magnético, simulações, findando em sua construção efetiva.

As figuras 2.4, 2.5 e 2.6 retratam a localização das grandezas de projeto apresentadas na tabela 2.1 através de suas siglas, o desenho das lâminas do estator e suas medidas, o desenho das lâminas do rotor e suas medidas, respectivamente.

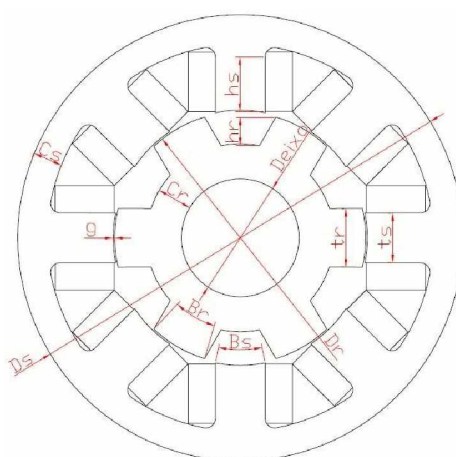


Figura 2.4 - Localização das grandezas de projeto.

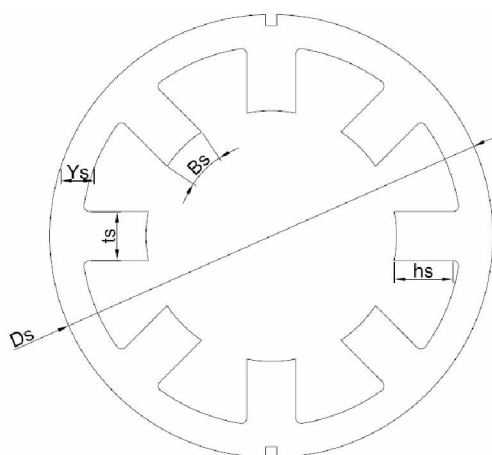


Figura 2.5 - Lâmina do estator e suas medidas.

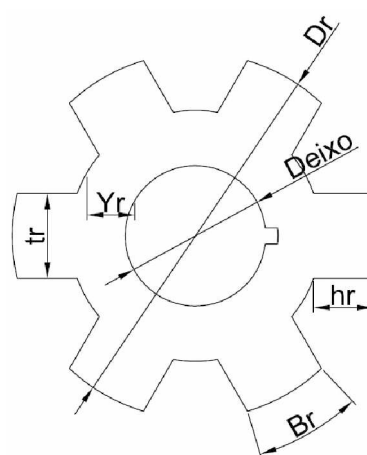


Figura 2.6 - Lâmina do rotor e suas medidas.

As principais dimensões da MaRV 8/6 projetada seguem na tabela abaixo.

Parâmetro	Siglas	MRV 8/6
Ângulo dos polos do rotor	β_r	24,5°
Ângulo dos polos do estator	β_s	22,5°
Diâmetro externo do rotor	D_r	90,5 mm
Diâmetro externo do estator	D_s	160 mm
Comprimento do entreferro	g	0,3 mm
Comprimento do rotor	l	63 mm
Largura dos polos do rotor	t_r	18,3 mm
Largura dos polos do estator	t_s	17,8 mm
Altura dos polos do rotor	h_r	15 mm
Altura dos polos do estator	h_s	22 mm
Culatra do rotor	Y_r	13 mm
Culatra do estator	Y_s	12,45 mm
Diâmetro do eixo	D_{eixo}	34,5 mm

Tabela 2.1 - Resumo das dimensões do protótipo.

A partir das medidas expostas na tabela 2.1 [10] a máquina foi desenhada no AutoCAD® e o esboço foi exportado para o software FEMM, onde iniciou-se a análise magnética e elétrica por meio de elementos finitos, utilizando o método de triangulação. Nesta etapa, o funcionamento da máquina foi simulado para diversos valores de correntes e posições do rotor. Um código de programação foi utilizado para otimizar essas simulações, e foram obtidos diversos dados, tais como a densidade de fluxo.

A MaRV, assim como as demais máquinas elétricas, é fundamentalmente um conversor eletromecânico de energia, e como tal para que esta conversão seja efetivada o campo magnético exerce uma função direta, visto que o mesmo é utilizado como meio de acoplamento e conversão entre a energia elétrica e a energia mecânica. A figura 2.7, obtida durante a etapa

de simulação utilizando-se elementos finitos ilustra uma posição de alinhamento entre os polos do rotor e do estator, e observa-se o elevado fluxo magnético, pois, nesta posição tem-se o menor valor para o entreferro, e conseqüentemente a menor relutância do circuito magnético, o que acarreta o melhor caminho dentre os possíveis para o fluxo magnético [8].

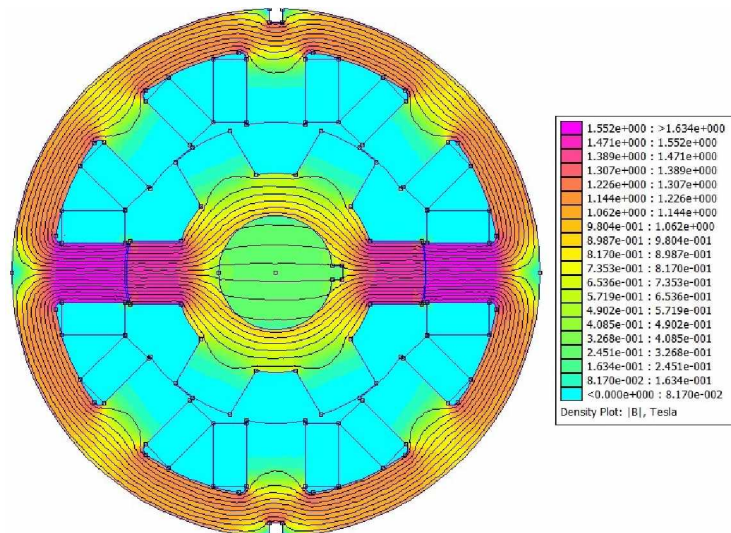


Figura 2.7 - Densidade de fluxo magnético da MaRV 8/6.

Na MaRV, conforme exposto na seção 2.4, a indutância é dependente tanto da posição do rotor quanto da corrente de fase e conforme [3, 12] esta é uma característica da grandeza indutância incremental. Entretanto doravante a mesma será tratada por indutância. O conceito de indutância incremental torna-se extremamente relevante quando se trata de representar o modelo da máquina considerando o efeito da saturação magnética do material que constitui o circuito magnético, efeito que ocorre principalmente quando a máquina é acionada como gerador [2, 3, 12], e a partir de propostas matemáticas específicas [3, 12, 13].

Após a realização das simulações no FEMM, os dados foram organizados em tabelas, apêndice A, no intuito de se obter curvas de suma importância para se analisar o comportamento da máquina antes da etapa construtiva da mesma. Dentre as curvas obtidas tem-se a curva de indutância para valores específicos de corrente, figura 2.8, na qual observa-se que a indutância apresenta aspecto inverso em relação à corrente, ou seja, à medida que a corrente tem seu valor elevado a indutância apresenta uma redução no mesmo.

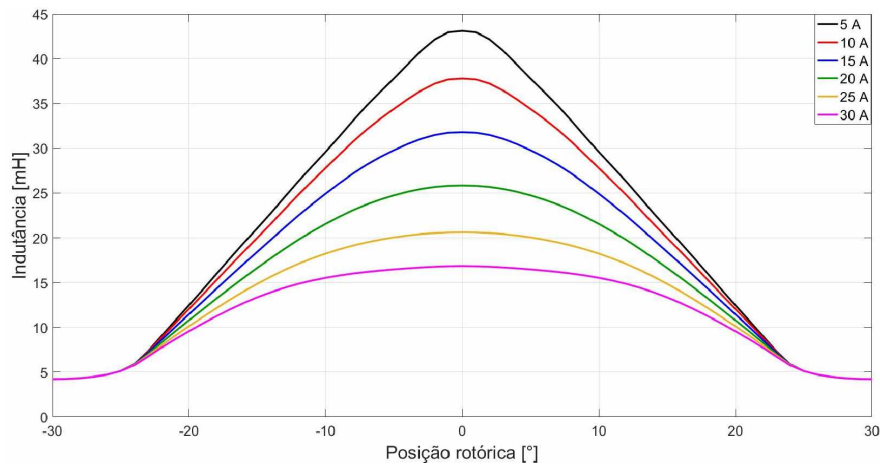


Figura 2.8 - Perfil de indutância da MaRV para alguns valores específicos de corrente.

Tomando a curva de fluxo para valores específicos de corrente, apresenta-se a figura 2.9. Nesta figura observa-se que para pequenos valores de corrente as curvas são essencialmente lineares. Todavia, à medida que a corrente é elevada as curvas de fluxo tendem a apresentar uma inflexão acentuada, efeito o qual ocorre devido à saturação magnética. Quando temos a saturação magnética, o fluxo concatenado não segue de forma linear o crescimento da corrente, e tende a acarretar consequências não desejadas sobre a máquina tal como limitar a quantidade de conjugado disponível e aquecimento elevado [2, 8]. A partir da figura 2.9 estima-se que para a região de acionamento e correntes impostas o MRV 8/6 operará sobre a região na qual o fluxo magnético se comporta de forma aproximadamente linear.

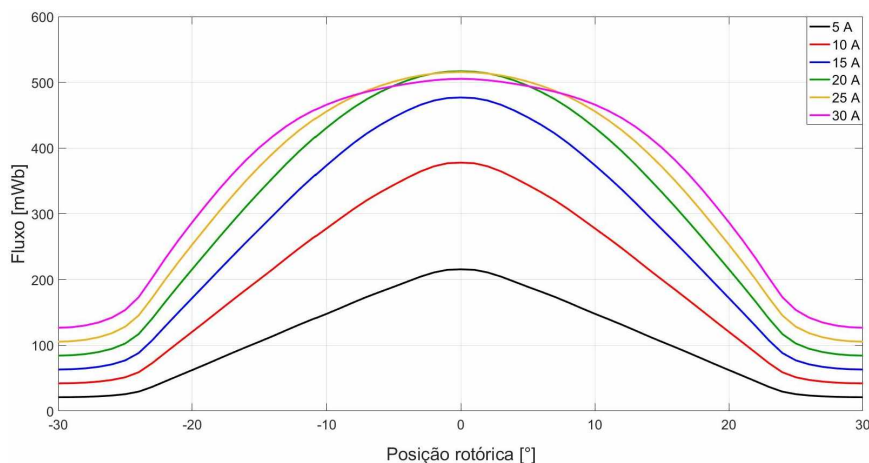


Figura 2.9 - Perfil do fluxo da MaRV para alguns valores específicos de corrente.

Por meio de codificação proposta em [3, 12] destacam-se nas figuras 2.10 e 2.11 as superfícies de indutância e fluxo, respectivamente, para diversos valores de correntes e posições do rotor, de forma que a corrente foi tomada entre 0 e 30 A, e a posição rotórica no intervalo de

-30° a 30°, compreendendo este intervalo o período para um ciclo completo de uma fase. Nas figuras 2.10 e 2.11 comprova-se novamente o comportamento das grandezas indutância e fluxo, de forma que apesar de ambas apresentarem seus valores máximos para a posição de alinhamento dos polos do estator e do rotor, a indutância apresenta valores elevados para pequenos valores de corrente, enquanto o fluxo apresenta valores elevados para elevados valores de corrente.

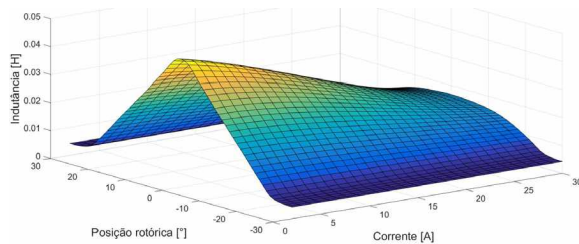


Figura 2.10 - Perfil de indutância em 3D para diferentes valores de correntes e posições do rotor.

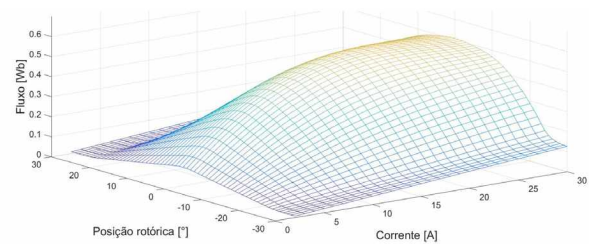


Figura 2.11 - Perfil de fluxo em 3D para diferentes valores de correntes e posições do rotor.

Concluída a etapa de simulações o protótipo foi efetivamente construído. A figura 2.12 enfatiza a montagem final da máquina, a qual após projetada foi adaptada a fim de se utilizar a carcaça de um motor de indução trifásico, fornecedora WEG, modelo W22, 3 cv, 6 polos, modelo de carcaça 100 L e forma construtiva B3D (montagem na posição horizontal, motor com pés, eixo à direita olhando para a caixa de ligação). Com relação aos dados a exemplo: tensão nominal do motor, quantidade de terminais, fator de serviço, rendimento, dentre outros; não foram de grande importância, visto que a aquisição do motor foi focada basicamente em sua carcaça e forma construtiva.

Na figura 2.13 mantém-se o foco no estator da máquina, e observa-se uma característica muito marcante nas MaRVs que são seus polos salientes. No estudo proposto tem-se uma máquina com 8 polos de forma que os polos simétricos estão conectados em série, exigindo um acionamento tetrafásico. O corte das lâminas do estator, assim como suas medidas, foram mostrados na figura 2.5.

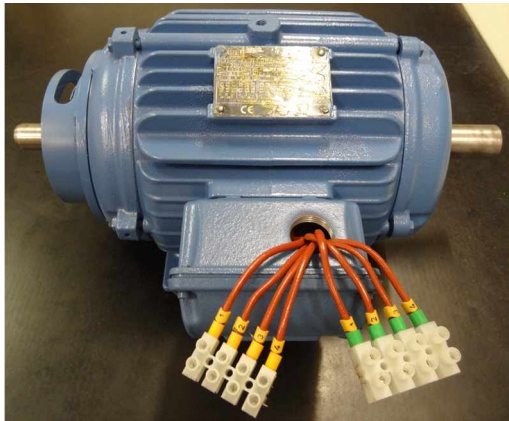


Figura 2.12 - Protótipo do MRV 8/6.

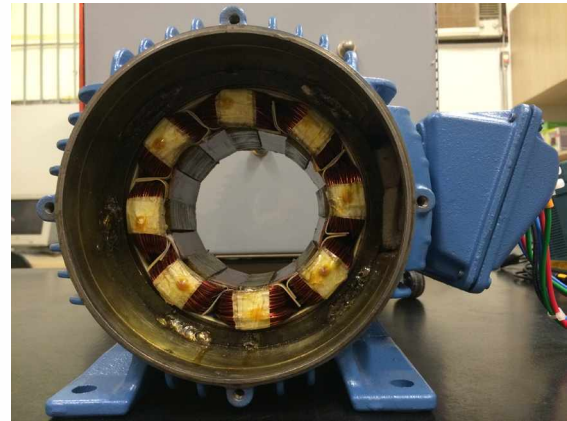


Figura 2.13 - Estator do protótipo.

Na figura 2.14 temos a ênfase no rotor da máquina projetada, o qual é construído com lâminas prensadas de forma que se tenham 6 polos. Na figura 2.15 tem-se a relação entre os polos do estator e rotor, para a configuração 8/6 os polos do estator estão deslocados 45° mecânicos entre si e os polos do rotor estão deslocados 60° mecânicos entre si.

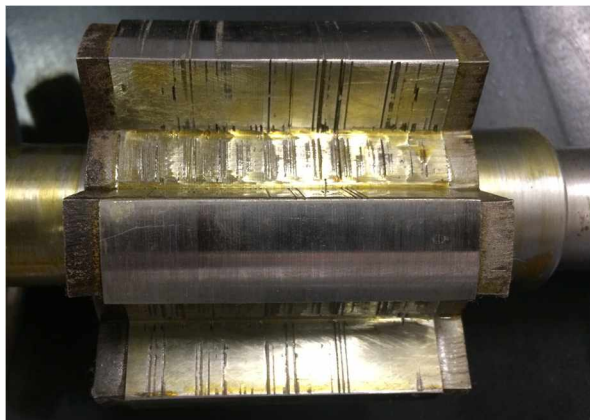


Figura 2.14 - Rotor do protótipo.



Figura 2.15 - Relação entre polos do estator e do rotor no protótipo.

Todas as etapas de projeto desta máquina, inclusive as deduções matemáticas para se definir as medidas de todos os elementos da mesma são minuciosamente abordadas nas referências [10, 26].

2.6 - Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento da MaRV baseia-se na variação da indutância, sendo o perfil desta grandeza diretamente afetado pelos valores angulares dos polos do estator e do rotor [10]. O perfil de indutância para uma MaRV terá um ciclo tal que:

$$Ciclo = \frac{2 \cdot \pi}{N_r} \text{ rad} \quad (2.16)$$

Para uma máquina ideal tem-se que, enquanto não houver sobreposição dos polos do estator e do rotor, o sistema apresentará um valor mínimo de indutância (L_{\min}), e quando os polos estiverem completamente sobrepostos, teremos o valor máximo de indutância (L_{\max}) [1, 6]. Abaixo temos o perfil de indutância não saturado para uma das fases da MaRV 8/6.

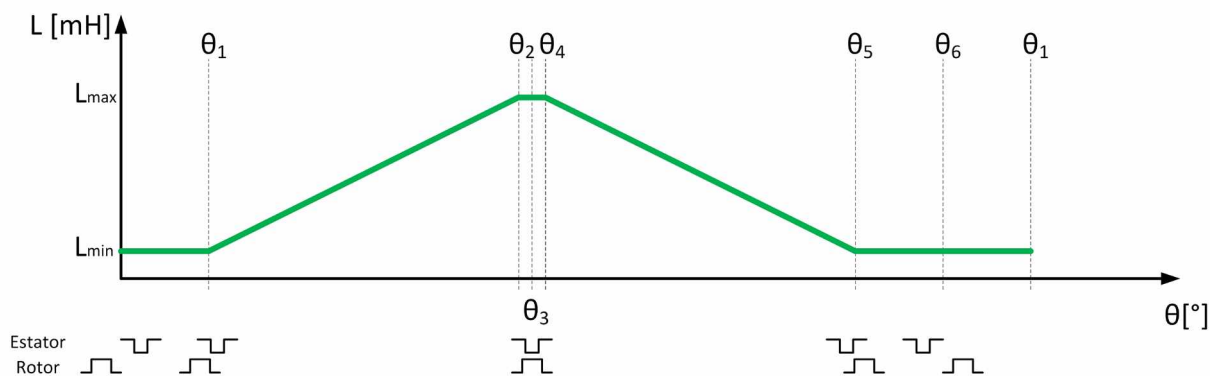


Figura 2.16 - Perfil de indutância para a MaRV não saturada.

Apesar da impossibilidade prática de termos o perfil de indutância conforme mostrado na figura 2.16, devido à saturação magnética da MaRV [1], sabe-se que a saturação causa uma curvatura no perfil de indutância próximo aos pontos de alinhamentos dos polos do estator e do rotor (L_{\max}), característica a qual exerce influência negativa no torque da máquina. Todavia, o perfil da figura 2.16 nos traz pontos angulares de extrema importância para compreensão do princípio de funcionamento da máquina e também para o acionamento da mesma.

Os valores dos ângulos θ_1 a θ_6 variam conforme o número de polos do estator, do rotor, assim como os valores angulares destes dois elementos. A partir da equação 2.16, tem-se que o perfil de indutância se repetirá a cada 60° para a MaRV 8/6, assim inicia-se a análise de cada ponto destacado na figura 2.16.

Posição 0° : Neste ponto os polos do estator e do rotor estão completamente desalinhados, de forma que a distância entre seus centros será de $\frac{\pi}{N_r}$ rad, conforme ilustrado na figura 2.17.

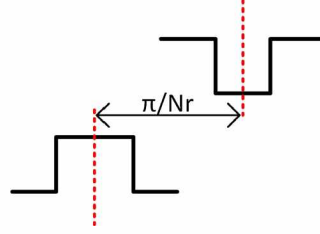


Figura 2.17 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para 0° .

Posição θ_1 : Neste ponto inicia-se a sobreposição dos polos do estator e do rotor, momento no qual começamos a ter um perfil crescente de indutância a partir de L_{\min} .

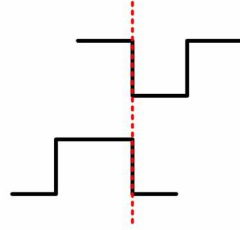


Figura 2.18 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_1 .

Como têm-se todas as medidas físicas da MaRV 8/6 utilizada neste projeto, podem ser calculados todos os pontos angulares abordados, tal que:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{N_r} - (\beta_s + \beta_r) \right] \\ \theta_1 &= \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_s + \beta_r}{2} \right) \\ \theta_1 &= \frac{180^\circ}{6} - \left(\frac{22,5^\circ + 24,5^\circ}{2} \right) \\ \theta_1 &= 6,5^\circ\end{aligned}\tag{2.17}$$

Ou seja, a partir do ponto tomado como referência de 0° até o ponto angular θ_1 , ocorrerá um deslocamento de $6,5^\circ$ do rotor em relação ao estator.

Posição θ_2 : Entre θ_1 e θ_2 existirá um perfil crescente de indutância, visto que em θ_1 temos o início da sobreposição dos polos do estator e do rotor, e em θ_2 os polos estão

completamente sobrepostos. Entre os pontos θ_1 e θ_2 o deslocamento angular é equivalente a medida do ângulo do polo do estator, conforme enfatizado na figura 2.19.

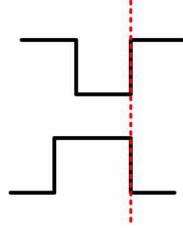


Figura 2.19 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_2 .

Matematicamente tem-se a definição de θ_2 , tal que:

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \theta_1 + \beta_s \\ \theta_2 &= 6,5^\circ + 22,5^\circ \\ \theta_2 &= 29^\circ\end{aligned}\tag{2.18}$$

Posição θ_3 : Neste ponto ocorrerá o alinhamento completo entre os polos do estator e do rotor, pois, seus centros estão alinhados, figura 2.20. O deslocamento para atingir este ponto a partir de θ_2 é igual a metade da diferença entre as medidas angulares dos polos do rotor e do estator. Neste momento, a indutância ainda mantém seu valor máximo visto que a sobreposição entre os polos é mantida.

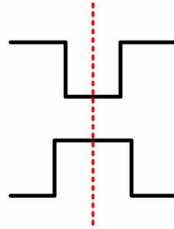


Figura 2.20 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_3 .

Matematicamente:

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \theta_2 + \left(\frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) \\ \theta_3 &= 29^\circ + \left(\frac{24,5^\circ - 22,5^\circ}{2}\right) \\ \theta_3 &= 30^\circ\end{aligned}\tag{2.19}$$

Posição θ_4 : Neste ponto a sobreposição ainda é mantida, figura 2.21. Entretanto, a partir do mesmo o perfil da indutância tornara-se decrescente. O deslocamento angular em relação ao ponto anterior será novamente a metade da diferença entre as medidas angulares dos polos do rotor e do estator.

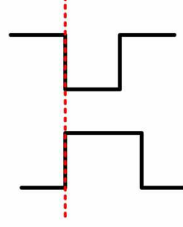


Figura 2.21 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_4 .

Equacionando este ponto teremos:

$$\begin{aligned}\theta_4 &= \theta_3 + \left(\frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) \\ \theta_4 &= 30^\circ + \left(\frac{24,5^\circ - 22,5^\circ}{2}\right) \\ \theta_4 &= 31^\circ\end{aligned}\tag{2.20}$$

Posição θ_5 : Entre os pontos θ_4 e θ_5 dispõe-se de um perfil decrescente de indutância, visto que no decorrer deste deslocamento a sobreposição dos polos está sendo reduzida, até atingir θ_5 , ponto no qual não existe sobreposição entre os polos do estator e do rotor e a indutância atinge o valor mínimo. Entre os pontos θ_4 e θ_5 o deslocamento angular é equivalente a medida do ângulo do polo do estator, conforme enfatizado na figura 2.22.

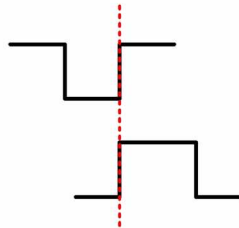


Figura 2.22 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_5 .

Obtém-se o valor de θ_5 de forma que:

$$\begin{aligned}\theta_5 &= \theta_4 + \beta_s \\ \theta_5 &= 31^\circ + 22,5^\circ \\ \theta_5 &= 53,5^\circ\end{aligned}\tag{2.21}$$

Posição θ_6 : Neste ponto tem-se novamente os polos do estator e do rotor totalmente desalinhados, conforme figura 2.23.

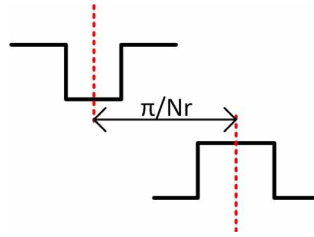


Figura 2.23 - Posicionamento entre os polos do estator e do rotor para θ_6 .

Matematicamente a partir de θ_5 obtém-se:

$$\begin{aligned}\theta_6 &= \theta_5 + \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_s + \beta_r}{2} \right) = \frac{2 \cdot \pi}{N_r} \\ \theta_6 &= \frac{360^\circ}{6} \\ \theta_6 &= 60^\circ\end{aligned}\tag{2.22}$$

Findada a análise no ponto angular θ_6 , compõe-se um período completo para o perfil de indutância da MaRV. Dois conceitos importantes quando se analisa o perfil de indutância para efetuar o acionamento da máquina em questão são: zona de torque efetivo (τ_e) e o ângulo de condução de energia (ε).

A zona de torque efetivo indica o ângulo através do qual uma fase pode produzir torque útil comparável ao torque nominal, e é análoga ao menor arco oriundo da sobreposição entre os polos do rotor e do estator [7], logo:

$$\tau_e = \beta_s\tag{2.23}$$

O ângulo de condução de energia representa o intervalo de comutação de uma fase para outra em um ciclo mecânico da máquina, e de forma analítica é definido por [10]:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{N_s}{2} \cdot N_r}\tag{2.24}$$

No caso específico da MaRV, foco deste trabalho, teremos:

$$\tau_e = 22,5^\circ$$

$$\varepsilon = 15^\circ$$

A importância destes ângulos encontra-se no fato de que durante o acionamento, a fim de garantir o melhor aproveitamento da máquina, é interessante que seja mantido o ângulo de condução com um valor inferior a $22,5^\circ$ para cada fase, a partir do momento em que se inicia a sobreposição dos polos, evitando a geração de torque em sentido contrário. Com relação ao ângulo de condução de energia, este indica a partir de qual ponto inicia-se a sobreposição das fases, ou seja, 15° após a sobreposição dos polos ocorrerá um perfil de indutância crescente da fase subsequente, observado na figura 2.24, o que permite que seja tomada a decisão de durante o acionamento se trabalhar ou não com fases sobrepostas.

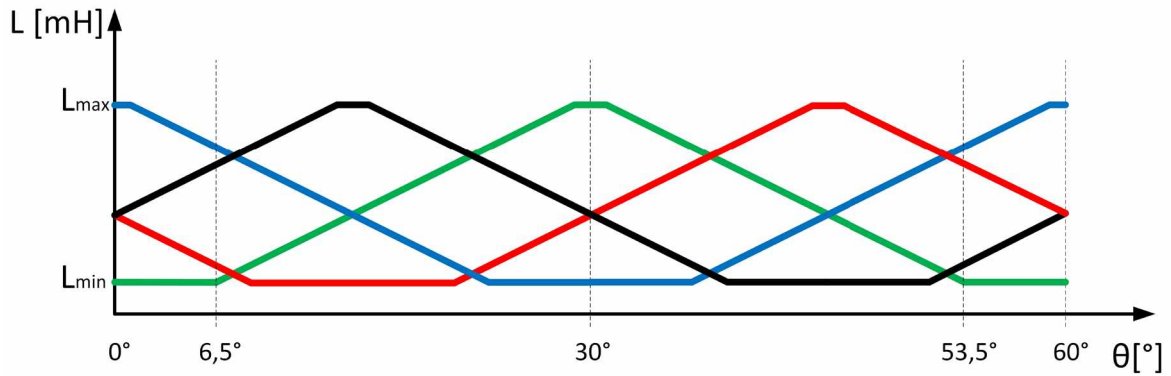


Figura 2.24 - Perfil de indutância ideal para as quatro fases da MaRV 8/6.

Todas as fases apresentam perfis de indutância idênticos, todavia, com um deslocamento ao longo do eixo horizontal. A máquina será acionada como motor, e é necessário que a magnetização das fases seja efetuada durante o crescimento do valor da indutância em relação à variação da posição rotórica, e de forma a sempre acionar as fases sequencialmente.

Ao longo do desenvolvimento exposto foram utilizados os valores angulares dos polos do rotor e do estator para a máquina foco do trabalho, porém, tanto as figuras quanto o equacionamento são válidos para qualquer MaRV, independentemente da quantidade de polos do rotor e do estator, assim como o valor dos ângulos dos mesmos.

Capítulo 3

Simulação computacional

3.1 - Introdução

A simulação computacional é uma etapa de grande valia ao longo do trabalho científico, visto que a mesma permite que se tenha um direcionamento do comportamento da máquina real, possibilitando, ainda que durante esta etapa, questionamentos possam ser levantados e modificações efetuadas sem oferecer riscos à segurança ou acarretar algum dispêndio financeiro desnecessário.

3.2 - Objetivos

Neste capítulo será abordada a simulação computacional do MRV 8/6 e discutido de forma sucinta os elementos que compõe a simulação do ponto de vista funcional.

Como objetivo principal desta etapa, vislumbra-se a utilização dos dados obtidos por meio da simulação como ferramenta auxiliar na especificação dos elementos que irão compor o acionamento experimental, pois, uma vez conhecidas a ordem de grandeza das correntes e tensões sobre cada fase, pode-se dimensionar com uma boa margem de segurança e precisão os dispositivos semicondutores que irão compor o conversor.

Ao longo desta etapa os ângulos de condução poderão ser alterados a fim de analisar o efeito que o mesmo causa no comportamento da máquina.

3.3 - Simulação computacional

A etapa da simulação norteará o acionamento da máquina estudada a fim de confirmar o comportamento e amplitude de algumas grandezas, tais como: fluxo magnético, indutância, corrente por fase, torque por fase e velocidade angular do rotor. Na figura 3.1 é mostrado o

modelo completo utilizado na simulação, o qual é composto por vários subsistemas, tal que os principais são:

- Motor a relutância variável 8/6.
- Conversor half-bridge.
- Sistema de determinação de posição e sistema de controle de corrente.

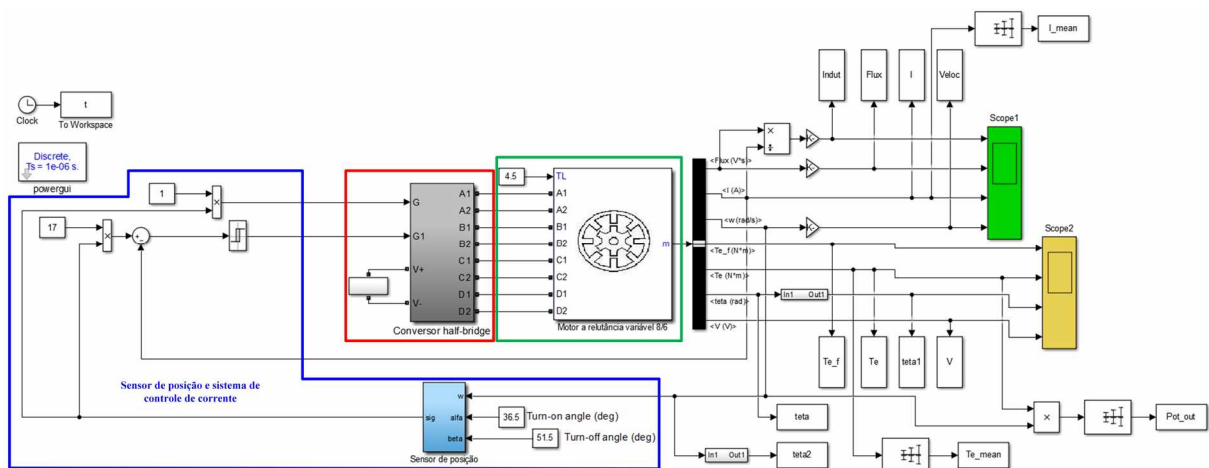


Figura 3.1 - Diagrama de blocos no Simulink®.

Nas próximas seções serão apresentados, de forma breve e concisa, o comportamento de cada um dos subsistemas acima destacados.

3.3.1 - Motor a relutância variável 8/6

Foi definida a utilização do modelo computacional de máquina a relutância variável presente no Simulink®, o qual é uma ferramenta de modelagem e simulação de sistemas baseado em diagramação gráfica por blocos do software MATLAB®. Tal modelo é pautado em referências consolidadas [1, 17] e vem sendo testado e validado em diversos trabalhos envolvendo esta máquina nos últimos anos [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Contudo, ao longo da simulação do comportamento do protótipo foram implementadas algumas modificações no modelo padrão da máquina disponível no Simulink®, a fim de obter uma maior quantidade de parâmetros, e também foram utilizados os dados específicos da máquina projetada.

O modelo da máquina, figura 3.2, pode operar tanto como motor quanto gerador, observados os ajustes necessários para cada tipo de operação, e recebe como entradas o valor do conjugado da carga e o valor da tensão em cada fase. Foi utilizada uma carga constante de

4,5 N.m, tendo em mente ser um valor representativo e palpável de ser imposto na etapa de implementação experimental, e velocidade de 2000 rpm. O valor da tensão em cada fase da máquina é fornecido pelo conversor.

Como elementos de saída para este bloco têm-se as seguintes grandezas instantâneas disponíveis: fluxo em cada fase, corrente por fase, velocidade angular do rotor, torque por fase, torque total, deslocamento angular do rotor e tensão nas fases do estator.

Na guia de entrada de parâmetros, figura 3.3, fornece-se o valor de algumas grandezas elétricas e mecânicas da máquina que irá ser simulada. Também é necessário o fornecimento ao modelo de algumas tabelas específicas, figura 3.4, de forma que a de maior importância é a tabela que contém o valor do fluxo magnético em função do valor da corrente de fase e da posição do rotor, apêndice A, dados os quais foram obtidos a partir da análise por elementos finitos.

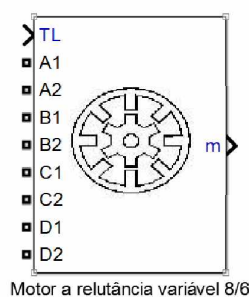


Figura 3.2 - Bloco computacional da máquina a relutância variável 8/6.

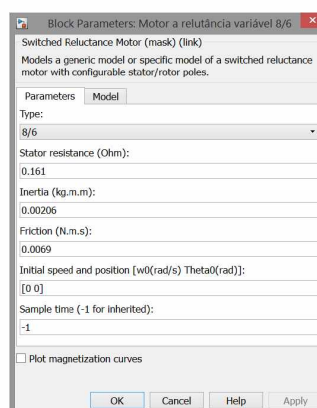


Figura 3.3 - Entrada de parâmetros elétricos e mecânicos.

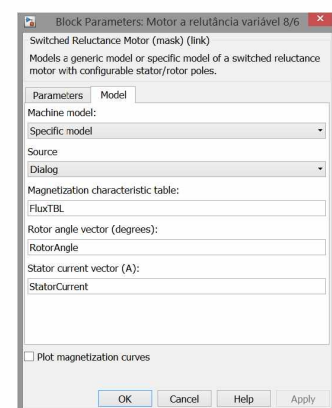


Figura 3.4 - Entrada de tabelas específicas.

3.3.1 - Conversor half-bridge

Na etapa de simulação foi escolhida a topologia do conversor que seria utilizado no acionamento, elemento fundamental e que impõe grande impacto no comportamento da máquina. A topologia de conversor escolhida foi a half-bridge, figura 3.5, que caracteriza-se por possuir duas chaves controladas em série com cada fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina de cada fase após o período de magnetização da mesma.

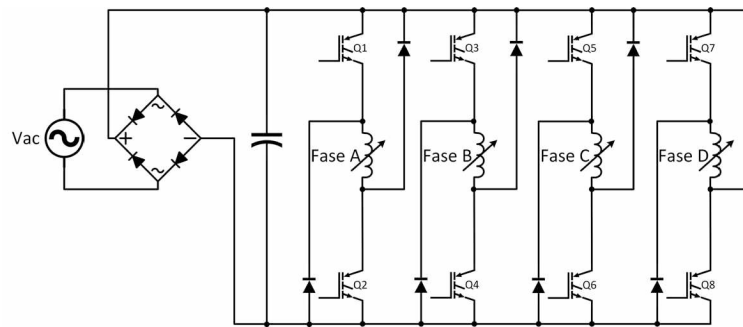


Figura 3.5 - Topologia do conversor half-bridge para o MRV 8/6.

O conversor half-bridge apresenta três etapas de funcionamento, tal que:

- Etapa de magnetização: esta etapa, figura 3.6, ocorre quando ambas as chaves controladas de cada braço são fechadas e a fase fica sujeita a tensão imposta pelo barramento de corrente contínua, acarretando um crescimento da corrente neste enrolamento e fornecendo energia ao motor. Ambos os diodos do braço em questão estão inversamente polarizados.
- Etapa de roda livre: esta etapa, figura 3.7, ocorre quando apenas umas das chaves controladas do braço é mantida fechada, ação a qual faz com que o diodo referente a esta chave torne-se diretamente polarizado, possibilitando que a corrente do enrolamento circule por este diodo. Nesta etapa, teremos uma tensão nula na carga e a corrente irá apresentar um decaimento exponencial.
- Etapa de desmagnetização: esta etapa, figura 3.8, ocorre quando ambas as chaves controladas são abertas, fazendo com que a energia armazenada no indutor flua por meio dos dois diodos presentes em cada braço do conversor, até o momento em que o indutor esteja completamente sem energia. Nesta etapa, a fase fica sujeita a tensão inversa do barramento de corrente contínua, fato que contribui com que a taxa de decrescimento da corrente seja alta, enquanto a energia armazenada na fase na forma de campo magnético é parcialmente devolvida a fonte.

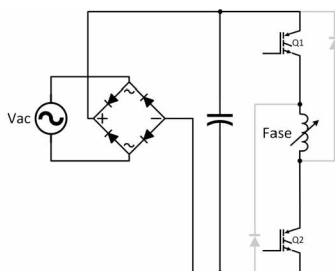


Figura 3.6 - Etapa de magnetização do conversor.

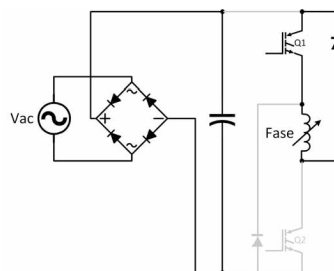


Figura 3.7 - Etapa de roda livre do conversor.

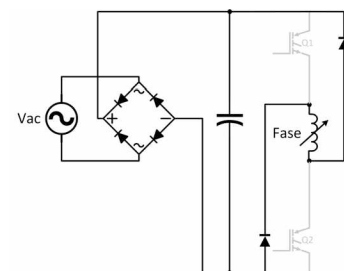


Figura 3.8 - Etapa de desmagnetização do conversor.

Visto que a máquina em questão é tetrafásica, a análise anteriormente exposta é válida para cada uma das fases.

3.3.3 - Sistema de determinação de posição e sistema de controle de corrente

Um elemento indispensável ao acionamento da MaRV, seja como motor ou gerador, é um sistema que forneça o posicionamento relativo ou absoluto, do rotor em relação ao estator, não necessariamente sendo um sensor.

Na etapa de simulação utilizamos uma lógica que fornece o posicionamento entre estator e rotor a partir da velocidade angular do rotor, tal como pode ser visualizado nas figuras 3.9 e 3.10. Após receber a velocidade angular da máquina esta variável é integrada, fornecendo a posição de cada polo da mesma. A posição do rotor é comparada com os valores alfa e beta, a fim de definir qual fase deve estar ativa para esta posição. Uma função específica é aplicada de modo que a cada 60° mecânicos a posição do rotor seja zerada, valor que corresponde ao ciclo da MaRV 8/6.

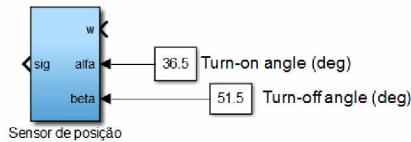


Figura 3.9 - Bloco computacional que calcula a posição do rotor e define qual fase deve ser acionada.

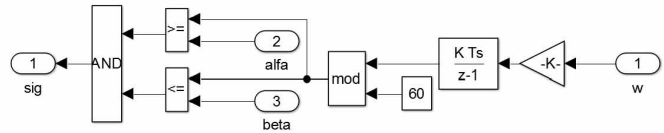


Figura 3.10 - Subcircuito do bloco computacional que calcula a posição do rotor e define qual fase deve ser acionada.

O valor do ângulo de condução é estabelecido a partir da diferença entre a posição na qual a fase é desenergizada (θ_{off}) e a posição na qual a fase é energizada (θ_{on}); e os valores destes ângulos são definidos a partir de um sistema de referência específico do modelo de MaRV utilizado pelo Simulink®, tal como mostrado na figura 3.11, além da forma que se quer acionar a máquina.

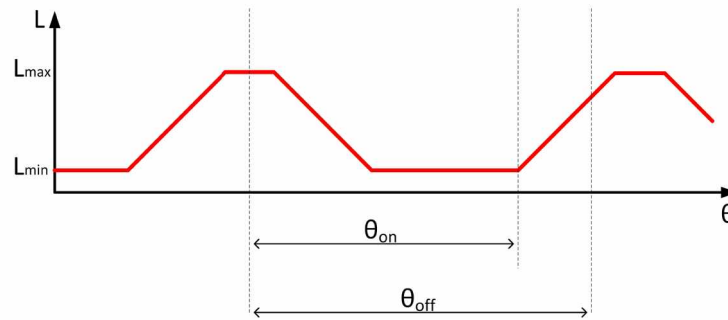


Figura 3.11 - Referência específica do modelo de MaRV do simulink®.

Após a definição de qual fase deve ser ativada, o bloco representado na figura 3.10 envia um sinal ao sistema que irá efetuar o controle de corrente, a fim de mantê-la dentro dos limites estabelecidos enquanto esta fase estiver em seu intervalo de energização, ou seja, foi implementado um controle de histerese sobre a corrente. Quando a fase estiver fora de seu intervalo de condução, o sinal enviado ao conversor por meio do controle de corrente é que esta chave deve ser mantida permanentemente aberta.

Do ponto de vista do conversor, enquanto o controle atua, teremos três situações para cada fase, tal que:

1ª situação - A fase acaba de entrar em seu intervalo de condução

Nesta situação, o conversor é acionado de forma a trabalhar na etapa de magnetização, possibilitando o crescimento da corrente até que o limite superior da histerese seja atingido ou até que o intervalo de condução da fase em questão finde.

2ª situação - A fase encontra-se no seu intervalo de condução e a corrente atingiu o limite superior da histerese de corrente

Neste ponto, o conversor é acionado de forma a atuar em sua etapa de roda livre, propiciando um decaimento da corrente até o limite inferior definido no controle de histerese da corrente, ponto o qual retoma-se a etapa de magnetização.

3ª situação - A fase encontra-se fora de seu intervalo de condução independentemente do valor da corrente

Neste ponto, o conversor recebe sinal baixo nas duas chaves controladas da fase em questão, por meio do sistema de controle, de forma que o mesmo inicia a etapa de desmagnetização.

A figura 3.12 ilustra o comportamento esperado da corrente por fase, tendo como referência o perfil de indutância para esta mesma fase. Nesta figura, observa-se claramente as 3 situações impostas através do conversor por meio do controle de corrente e posição.

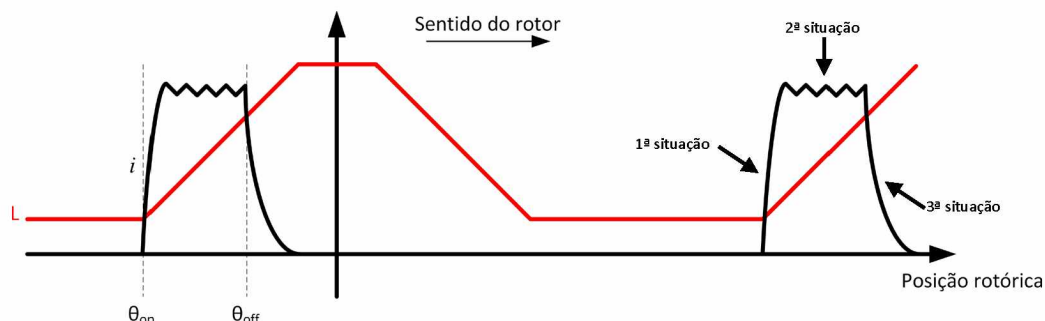


Figura 3.12 - Relação entre perfil de indutância e corrente (controle tipo histerese).

Com base na figura 3.12, observa-se que o ângulo de condução não é definido durante todo o intervalo angular no qual tem-se perfil crescente de indutância para a fase, pois, após a abertura das chaves controladas a corrente leva algum tempo para atingir valores próximos de zero. Caso a fase não seja desmagnetizada antes do alinhamento total entre os polos, será gerado conjugado negativo pela mesma.

3.4 - Resultados da simulação

Nesta seção teremos a apresentação dos resultados computacionais obtidos para uma situação específica, visto que a mesma será abordada na etapa de resultados experimentais. A máquina a relutância operando como motor, impondo uma carga fixa de 4,5 N.m em seu eixo, e uma histerese de corrente entre 16 e 18 A. A tensão de alimentação do sistema foi uma fonte de corrente contínua de 311 V e o ângulo de condução de cada fase foi de 15°, tomado a partir do momento de sobreposição dos polos do estator e do rotor de cada fase, o que garante que não estaremos trabalhando com fases sobrepostas. O tempo de simulação foi de 5 s, a fim de garantir que a máquina atingiu regime permanente, e os gráficos foram tomados entre o intervalo de 4,99 e 5 s.

Nas figuras 3.13 e 3.14, temos respectivamente as curvas de indutância e fluxo para as quatro fases da máquina, e em ambos os gráficos observa-se que as curvas apresentam aspecto diferente com relação ao perfil ideal, pois, nos trechos em que o controle de corrente atual tanto

a indutância quanto o fluxo sofrem distorções, o que é esperado, visto que ambas as grandezas são dependentes da corrente.

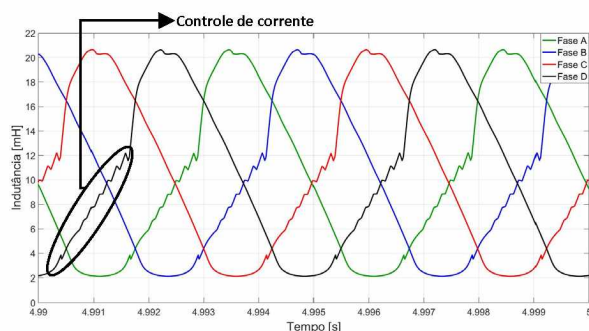


Figura 3.13 - Curvas de indutância nas quatro fases do MRV 8/6.

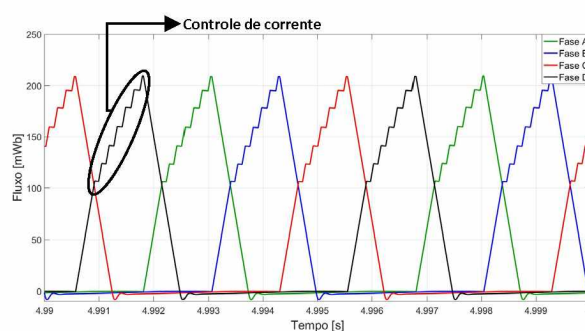


Figura 3.14 - Curvas de fluxo nas quatro fases do MRV 8/6.

A figura 3.15 traz as correntes em cada uma das fases, e nota-se que no momento em que a corrente na fase A começa a decrescer, indicando que o intervalo de condução desta fase chegou ao fim, a corrente na fase B inicia um comportamento crescente, e este mesmo processo se repete sequencialmente e ciclicamente, de forma que sempre haverá uma fase conduzindo. Evidencia-se o controle da corrente de forma a manter os valores dentro da faixa de 16 a 18 A, quando estiver no intervalo de condução da respectiva fase.

A figura 3.16 enfatiza a corrente instantânea e média da fase A, tendo que a relação entre a corrente média e a corrente de pico é de aproximadamente 0,2489, ou seja, apesar dos altos picos de corrente o valor médio é em torno de 24,89% deste valor. Este valor percentual é de extrema importância na etapa de implementação experimental, visto que os condutores, conectores, chaves controladas, dentre outros elementos também serão dimensionados levando em consideração a corrente média, e não somente a corrente de pico.

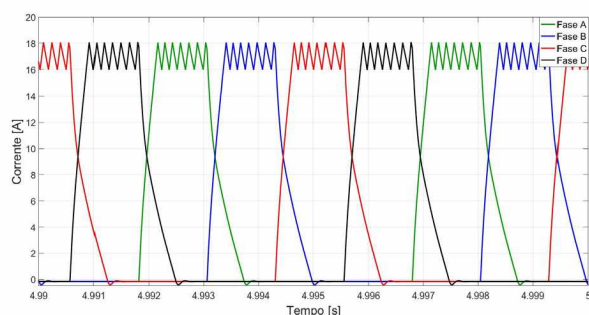


Figura 3.15 - Curvas das correntes nas quatro fases do MRV 8/6.

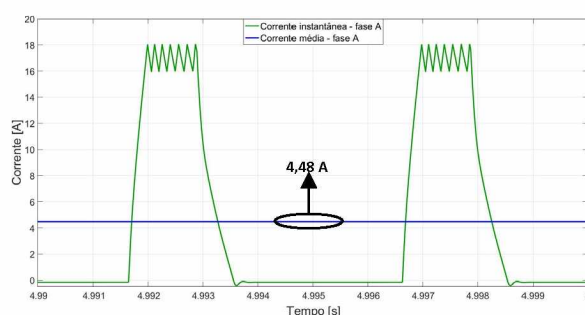


Figura 3.16 - Curvas da corrente instantânea e média na fase A.

A figura 3.17 ilustra em um mesmo gráfico o comportamento da indutância, dos pulsos dos gatilhos das chaves e da corrente nas quatro fases da máquina. Para operação da MaRV como motor as chaves do conversor devem ser acionadas na região de crescimento da indutância. Observando-se uma fase específica nota-se o reflexo do chaveamento na corrente e na indutância desta, de forma que no momento em que a fase entra em sua região de condução as chaves são mantidas fechadas por um intervalo de tempo maior, pois, a corrente parte de um valor 0 e o controle de histerese somente começa a atuar quando a mesma atinge o limite superior definido, e partir deste ponto tem-se a atuação incisiva do controle.

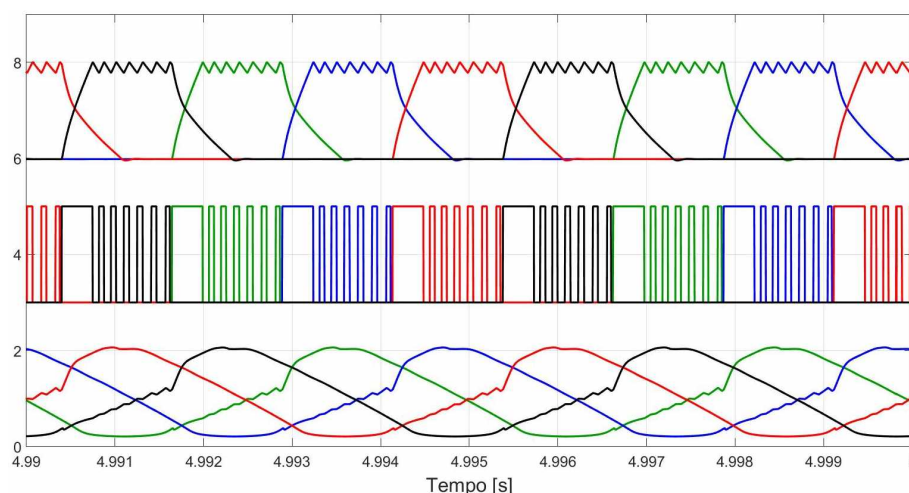


Figura 3.17 - Indutâncias, gatilhos nas chaves controladas e correntes nas quatro fases do MRV 8/6.

Abordando ainda o sistema de controle tem-se a figura 3.18, a qual enfatiza a etapa de roda livre imposta pelo conversor half-bridge. Enquanto a fase está em sua região de condução a chave superior, responsável pela etapa de roda livre, é mantida fechada ao longo de todo este intervalo; e a chave inferior, do respectivo braço do conversor, é responsável por comutar entre as etapas de magnetização e roda livre. Quando ambas as chaves estiverem fechadas, nível alto em seus gatilhos, tem-se a etapa de magnetização, e quando uma das chaves estiver fechada e a outra aberta, nível alto e baixo em seus gatilhos, respectivamente, tem-se a etapa de roda livre.

No momento em que ambas as chaves são abertas, inicia-se a etapa de desmagnetização, e pode-se observar o efeito do ponto de vista da tensão nas fases da máquina, figura 3.19. Estabelecendo uma relação entre as etapas impostas ao conversor e a tensão da fase, observa-se que na etapa de magnetização tem-se 311 V sobre a fase, visto que a fase fica submetida a tensão imposta pelo barramento cc. Na etapa de roda livre a fase fica submetida a uma tensão nula, visto que a corrente está sendo dissipada na própria fase, utilizando um diodo de roda livre

como caminho. E finalmente quando tem-se a etapa de desmagnetização, observa-se a tensão de -311 V na fase, pois, quando as duas chaves são abertas a fase comporta-se como uma fonte, polarizando diretamente os dois diodos de roda livre e permitindo que o barramento cc, devido ao novo caminho criado, imponha tensão negativa sobre a fase.

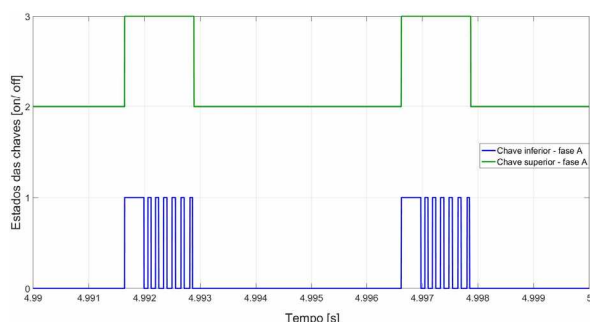


Figura 3.18 - Chaves controladas da fase A.

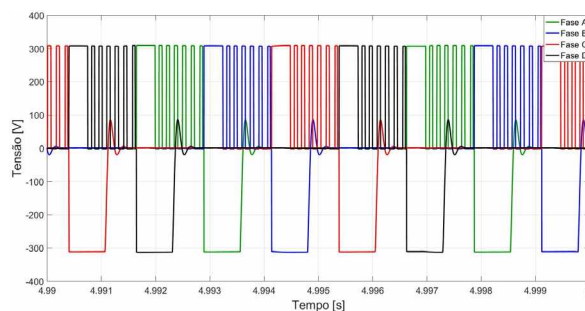


Figura 3.19 - Tensão nas quatro fases do MRV 8/6.

A figura 3.20 ilustra a localização e sentidos das grandezas expostas nas figuras 3.21 e 3.22, visto que, mesmo que a saída do retificador trifásico, o banco de capacitores e o conversor half-bridge permaneçam conectados em um mesmo ponto, têm-se perfis de correntes específicos para cada elemento.

A figura 3.21 ilustra a relação entre corrente, tensão e potência instantâneas fornecidas na saída da etapa de retificação, e observa-se que a tensão é essencialmente contínua, enquanto a corrente apresenta altos picos em intervalos de tempo médio de 2,5 ms. O comportamento da corrente fornecida pelo retificador é resultado da interação entre o banco de capacitores e o enrolamento estatórico do MRV 8/6. Como a potência instantânea é obtida pelo produto direto entre tensão e corrente, a mesma apresenta aspecto semelhante ao observado na corrente de saída do retificador, ou seja, picos elevados em intervalos de tempo aproximadamente regulares.

A figura 3.22 destaca a relação entre as correntes em alguns pontos específicos do acionamento, de forma que observa-se o comportamento das mesmas de acordo com as expectativas, tal que:

- Na etapa de desmagnetização de uma fase tem-se o retorno de corrente do conversor (I_M) para o capacitor (I_C).
- Na etapa de roda livre do conversor as correntes I_M e I_C são nulas.
- Quando a fonte está fornecendo corrente, grande parte da mesma é absorvida pelo banco de capacitores.

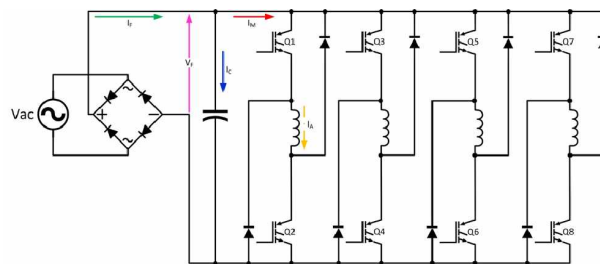


Figura 3.20 - Localização e sentidos das grandezas expostas nas figuras 3.21 e 3.22.

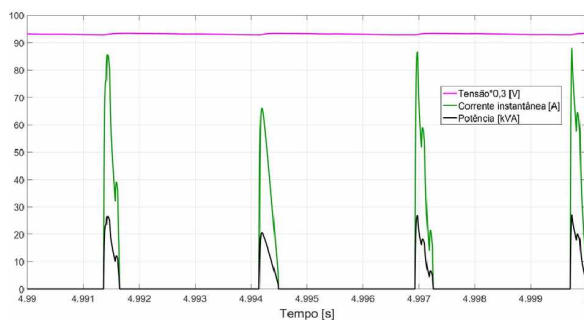


Figura 3.21 - Curvas da corrente instantânea, tensão e potência instantânea na saída do retificador.

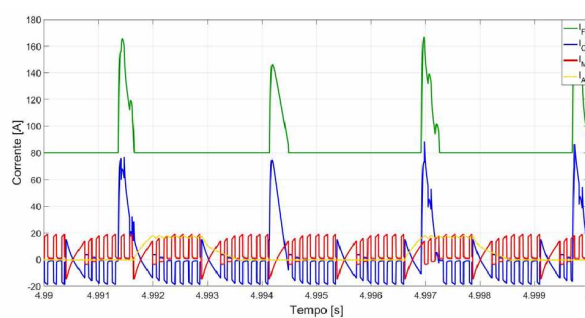


Figura 3.22 - Perfis das correntes instantâneas na saída do retificador, no capacitor, no conversor half-bridge e na fase A do motor.

O comportamento da velocidade do MRV 8/6 é mostrado na figura 3.23, e a máquina atinge o regime permanente para a situação imposta em aproximadamente 1,25 s, momento a partir do qual a velocidade estabilizou-se em 2000 rpm, com oscilações desprezíveis. Visto que não foi implementado controle em malha fechada para a velocidade, tal grandeza sofre variações em função da corrente (valor de histerese) e da carga imposta ao eixo, características as quais serão fixas tanto nas simulações computacionais quanto ao longo dos ensaios experimentais.

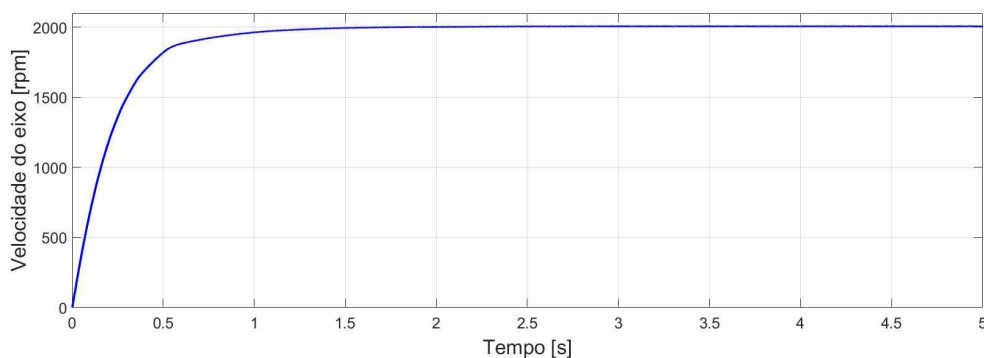


Figura 3.23 - Velocidade do eixo do MRV 8/6.

As curvas do torque eletromagnético do MRV 8/6 são apresentadas nas figuras 3.24 e 3.25, de forma que cada figura aborda um aspecto específico desta grandeza. Na figura 3.24 tem-se o torque produzido por cada fase, comprovando a correta definição do intervalo de condução, dado que não existe a produção de conjugado negativo. O sinal do torque é positivo, pois, a máquina está produzindo torque eletromagnético positivo em relação ao sentido de rotação do rotor, quando o mesmo encontra-se em movimento rotacional.

A figura 3.25 mostra o torque resultante produzido pelo motor, ou seja, a partir da relação entre a contribuição parcial de cada uma das quatro fases tem-se o perfil de torque exposto. Observa-se que o torque resultante apresenta o menor valor no momento em que uma fase é desmagnetizada e a fase subsequente é magnetizada. A oscilação do torque, observada na figura 3.25, é uma característica da máquina a relutância variável em decorrência principalmente de seu aspecto construtivo, vinculado a sua estrutura composta de polos salientes tanto no estator quanto no rotor, e consequente chaveamento da corrente em seu acionamento. Entretanto, atualmente podem ser encontrados diversos estudos que descrevem métodos e estratégias que possibilitam não somente a redução destas oscilações, como o controle preciso do torque nesta máquina. Esta figura também contém o torque eletromagnético médio, o qual é determinado relacionando-se a integral do torque instantâneo ao longo do período considerado e o valor deste período. Para a situação imposta tem-se um torque médio de aproximadamente 5,97 N.m.

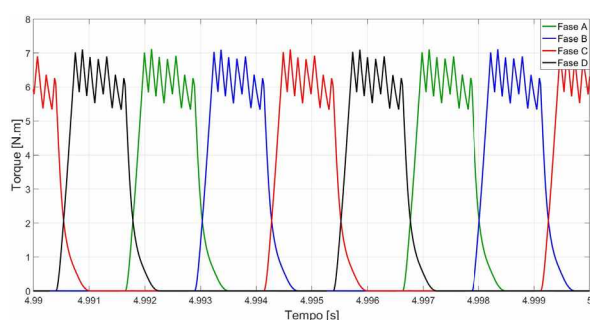


Figura 3.24 - Torque eletromagnético instantâneo das quatro fases do MRV 8/6.

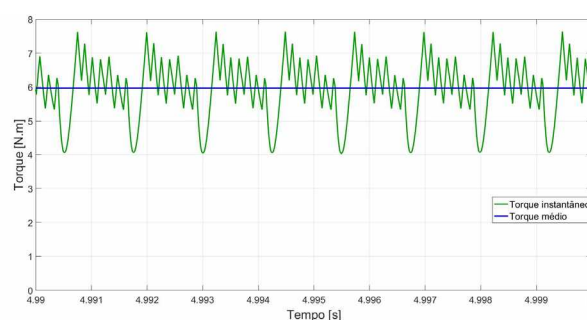


Figura 3.25 - Torque eletromagnético instantâneo e médio no MRV 8/6.

Conforme discutido no capítulo 2, o perfil de indutância da MaRV 8/6 se repetirá a cada 60° , e cada fase apresentará um perfil de indutância com um deslocamento (atraso) de 15° em relação à fase subsequente. Fisicamente este intervalo é ilustrado na figura 3.26, a qual indica os deslocamentos angulares dos polos do rotor em relação às fases. Observa-se que a cada 60°

de deslocamento do rotor tem-se sua posição reinicializada, ou seja, a cada 60° tem-se a repetição da fase ativa.

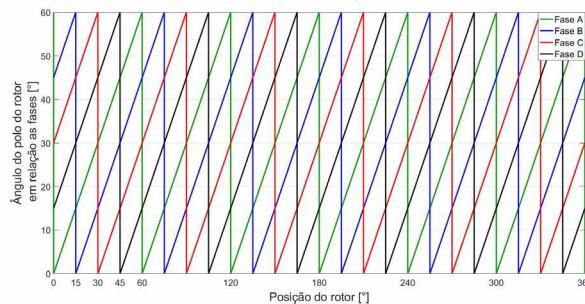


Figura 3.26 - Deslocamento angular do polo do rotor em relação as fases.

A figura 3.27 ilustra os valores médios das potências de entrada, adquirida no barramento cc, e de saída, a qual é a potência disponível no eixo da máquina. Relacionando-se estas duas grandezas obtém-se um rendimento estimado da máquina em torno de 75,35%, o qual é um valor aceitável perante outras máquinas da mesma faixa de potência. Convém ressaltar que o rendimento de 75,35% é um rendimento estimado para a máquina acionada para um determinado valor de corrente, carga e velocidade.

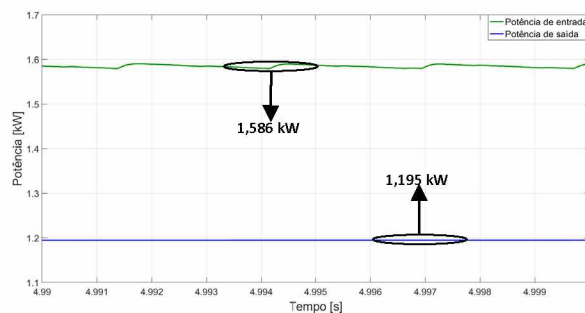


Figura 3.27 - Potências médias de entrada e saída do MRV 8/6.

Ao longo deste capítulo foram abordadas as diretrizes definidas no decorrer da simulação computacional e expostos os resultados obtidos por meio da mesma; resultados os quais corroboraram as expectativas do ponto de vista comportamental do MRV 8/6, além de nortear e auxiliar o dimensionamento dos elementos na etapa experimental.

Capítulo 4

Montagem da plataforma e resultados experimentais

4.1 - Introdução

Após a definição da máquina e do conversor, desenvolvimento e teste da modelagem matemática em ambiente de simulação computacional, iniciou-se a etapa construtiva da plataforma de acionamento e controle do MRV 8/6; a qual é indispensável à aquisição de resultados experimentais.

4.2 - Objetivos

Para validar o trabalho proposto é necessária a construção de uma plataforma de acionamento e controle da máquina objeto deste estudo. Dessa forma, no intuito de aproveitar ao máximo os recursos oferecidos pela universidade, uma das premissas seguidas durante a etapa de projeto da plataforma foi de que a mesma deveria ser robusta e modular. Robusta, pois estará sujeita a condições atípicas e extremas; e modular para que possa ser utilizada no acionamento de máquinas a relutância com diversas configurações e potências, sem a necessidade de alteração em sua estrutura física. Os resultados obtidos em alguns ensaios utilizando o MRV 8/6 serão expostos neste capítulo.

4.3 - Projeto e montagem

Na etapa de projeto e montagem da plataforma criaram-se 7 subcircuitos principais do ponto de vista funcional, os quais em conjunto permitem o acionamento e controle do MRV 8/6, divisão a qual segue abaixo:

- Conversor half-bridge e isoladores.
- Fontes de alimentação e transformador com as saídas isoladas.
- Processador digital de sinais (DSP).

- Módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente.
- Condicionadores de níveis digitais.
- Encoder absoluto.
- Sistema simulador de carga.

A figura 4.1 representa o diagrama em blocos da plataforma utilizada.

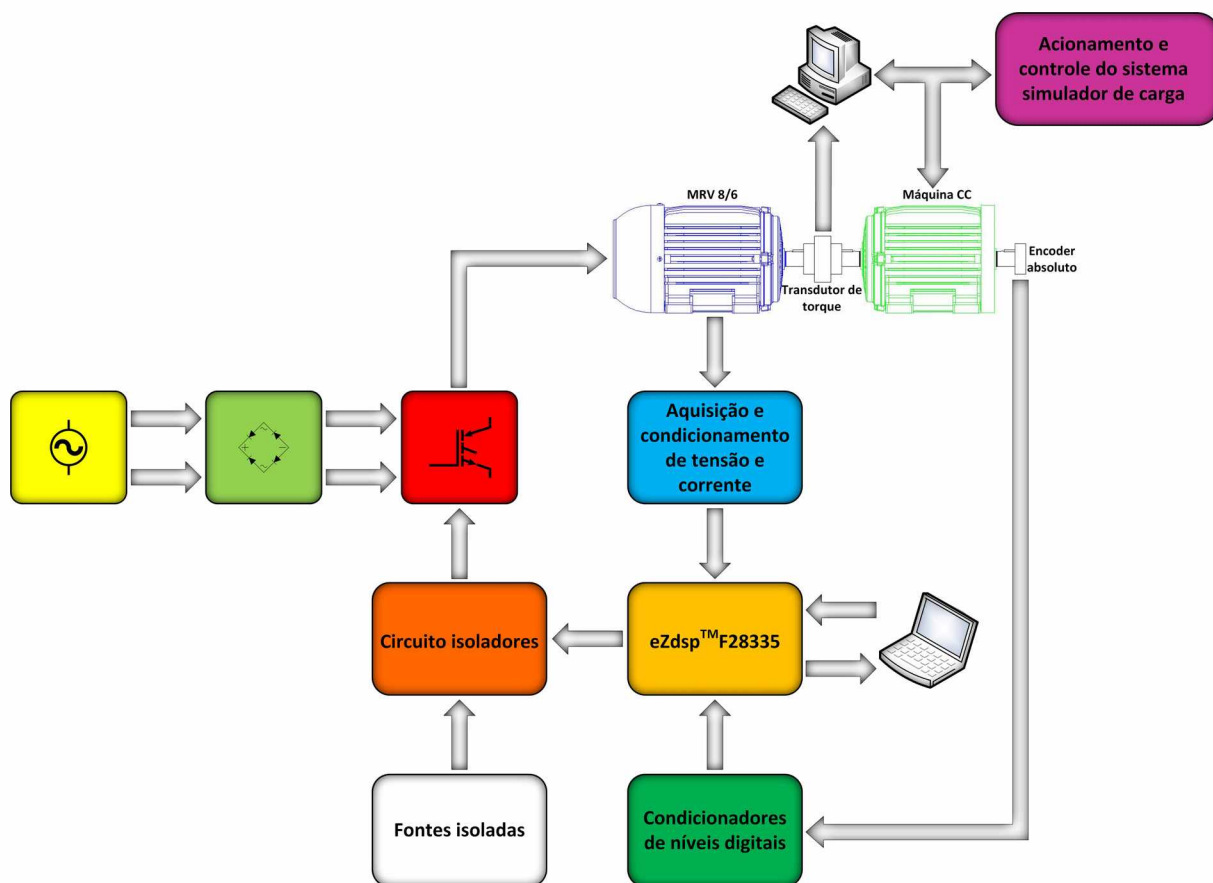


Figura 4.1 - Diagrama em blocos da plataforma experimental completa.

Nas seções subsequentes teremos a explicação detalhada referente a cada subcircuito, tanto do ponto de vista construtivo quanto do ponto de vista funcional no conjunto proposto.

4.3.1 - Conversor half-bridge e isoladores

Seguindo a premissa da construção de um conversor half-bridge robusto, que possibilite os testes necessários sem a preocupação de uma possível falha ou dano a plataforma, foi escolhido para esta aplicação o módulo IGBT da empresa Fuji Electric Co., modelo 6MBI100S-

060, o qual suporta a tensão coletor-emissor de 600 V, corrente contínua de 100 A e correntes de pico de até 200 A. Abaixo temos uma foto do módulo e o esquema elétrico equivalente, respectivamente.

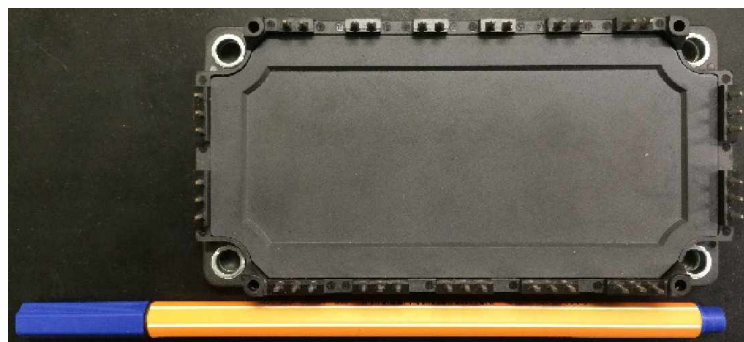


Figura 4.2 - Módulo IGBT 6MBI100S-060.

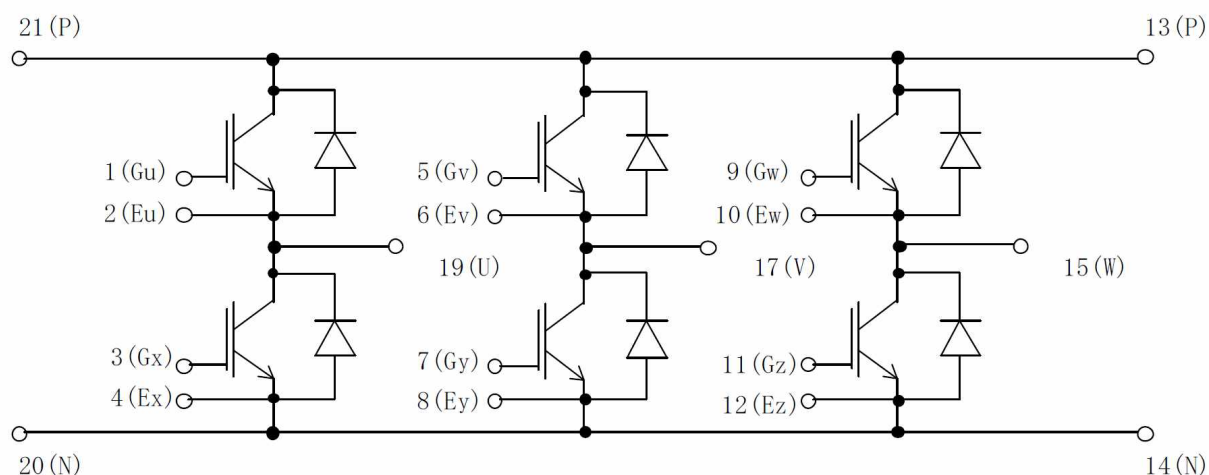


Figura 4.3 - Circuito elétrico equivalente do módulo IGBT 6MBI100S-060 [14].

Como observa-se no esquema elétrico equivalente acima, figura 4.3, internamente o módulo está na configuração full-bridge, por isso, são necessários alguns fechamentos específicos entre seus terminais, a fim de que o mesmo seja convertido a configuração half-bridge. Optou-se por conectar entre si os terminais de gate e emissor em algumas chaves específicas, acarretando que as chaves em que este fechamento ocorra sempre estejam no estado de corte, porém, os diodos equivalentes de roda livre continuam habilitados para o uso. Como será acionada uma máquina tetrafásica é necessário o uso de três módulos IGBT, com o fechamento esquematizado conforme ilustrado na figura 4.4, na qual os elementos destacados terão seus gates e emissores curto-circuitados.

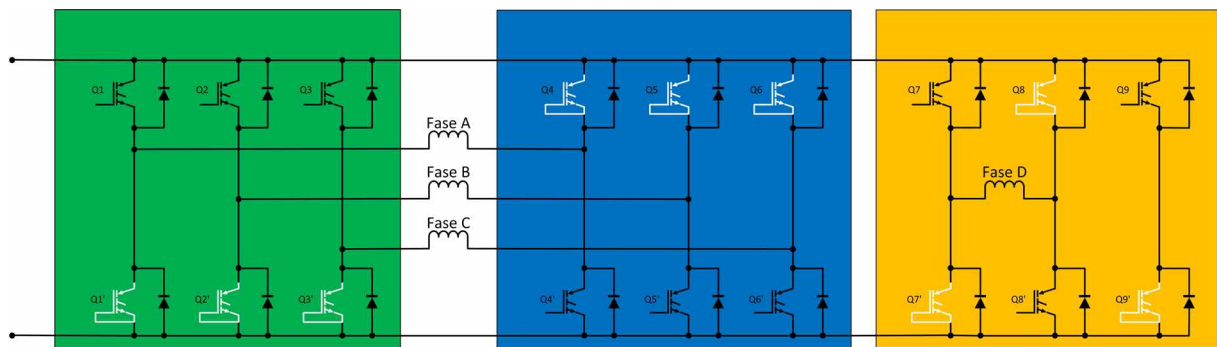


Figura 4.4 - Esquema elétrico de fechamento dos módulos IGBT para acionamento do MRV 8/6.

O último braço (chaves Q9 e Q9') teve seu fechamento conforme mostrado na figura 4.4. Assim, posteriormente, pode ser utilizado como uma reserva caso algum dos outros braços apresente defeito ou mesmo em um estudo futuro envolvendo a frenagem da máquina acionada por este conversor.

Os circuitos que propiciam a interface entre o sistema de controle e o sistema de potência, garantindo o desacoplamento elétrico entre ambos são os circuitos isoladores, totalizando nove circuitos, um para cada chave e o qual tem seu esquema elétrico exposto na figura 4.5.

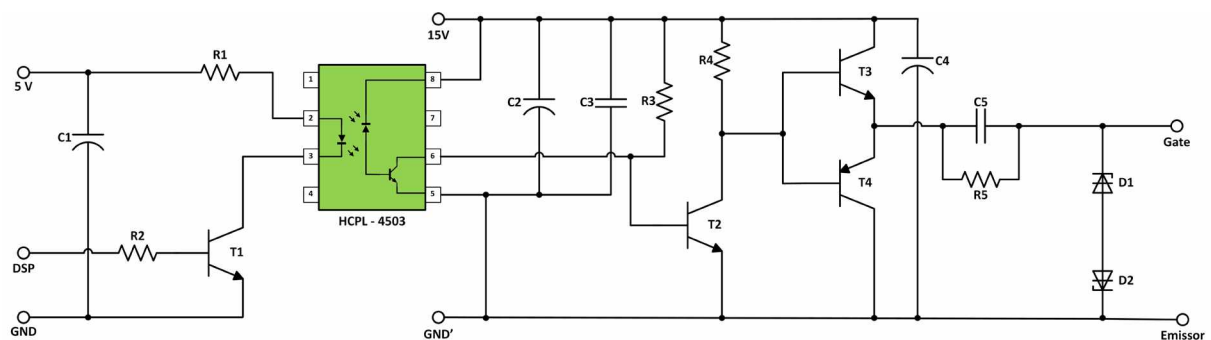


Figura 4.5 - Esquema elétrico dos circuitos isoladores [15].

Os circuitos isoladores agregam também a função de amplificar a tensão de saída do microcontrolador, a fim de garantir o correto funcionamento das chaves dos módulos IGBT e criar uma referência de terra própria para cada chave, visto que a referência de terra da chave superior de cada braço não pode apresentar o mesmo referencial de terra da chave inferior.

4.3.2 - Fontes de alimentação e transformador com as saídas isoladas

Para efetivamente existir o isolamento elétrico entre as chaves, o sistema de potência e o sistema de controle, a saída de cada circuito isolador deve ser alimentada por uma fonte distinta. Foram utilizadas nove fontes com saídas de 15 V/1 A, tem-se o esquema elétrico das mesmas abaixo.

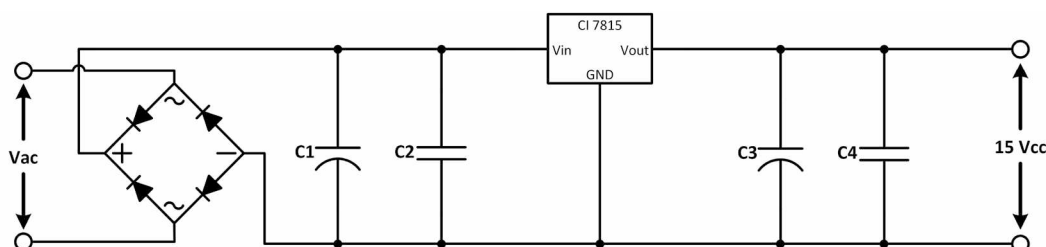


Figura 4.6 - Esquema elétrico das fontes dos circuitos isoladores.

Somente utilizar circuitos de fontes independentes não garante um referencial de terra distinto para cada fonte, a fim de suprir esta necessidade utilizou-se um transformador com nove saídas isoladas de 18 V/1 A cada; o qual é responsável pela alimentação de todas as fontes.

4.3.3 - Processador digital de sinais (DSP)

A fim de implementar um sistema de controle também robusto optou-se por utilizar o módulo independente eZdspTMF28335, da empresa Spectrum Digital Incorporated[®], o qual é uma ótima opção para se desenvolver aplicações pautadas no controlador digital de sinal TMS320F28335 da Texas Instruments[®], provendo diversos recursos de entradas/saídas digitais, entradas analógicas e possibilidades de comunicação.

Para o controle de sistemas em tempo real e que realizem uma quantidade elevada de operações matemáticas um DSP é o dispositivo mais indicado. Abaixo temos algumas das principais características do hardware do módulo utilizado [25]:

- Utiliza o controlador digital de sinais TMS320F28335;
- Clock de entrada de 30 MHz;
- Frequência de operação de 150 MHz;
- Unidade de ponto flutuante integrada de 32 bits;
- 68 kB de memória RAM integrada;
- 512 kB de memória flash integrada;
- 16 canais de entrada para conversores analógico-digital (ADC) de 12 bits;

-
- Conector RS-232 on board;
 - Interface CAN 2.0 on board.

A figura 4.7 mostra o módulo eZdspTMF28335 utilizado no projeto.



Figura 4.7 - Módulo eZdspTMF28335.

4.3.4 - Módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente

Durante o acionamento do MRV necessita-se da aquisição de algumas grandezas elétricas, as quais são adquiridas e condicionadas pelo circuito ilustrado na figura 4.8, que conta com quatro circuitos básicos de forma que:

Circuito 1 - Entrada dos transdutores de corrente e tensão: a etapa de entrada dos transdutores é dimensionada (capacitores e resistores) de acordo com os níveis das grandezas que irão ser adquiridas.

Circuito 2 - Estágio de filtro anti-aliasing: neste estágio tem-se o início do condicionamento do sinal, sendo este presente tanto ao sinal de corrente quanto ao sinal de tensão. O filtro anti-aliasing tem por função limitar a frequência de aquisição do sinal amostrado, de forma que sinais fora da frequência desejada, geralmente ruídos, sejam atenuados. O filtro foi projetado de modo que sua frequência de corte seja 70 kHz.

Circuito 3 - Estágio de condicionamento final e somador de nível contínuo: neste estágio temos o condicionamento do sinal de 0 a 3,3 V, além da somatória de um nível contínuo de forma que, o nível 0 torna-se 1,65 V (ideal para nossa aplicação utilizando o eZdspTMF28335), ou seja, a partir disso pode-se trabalhar com um sinal alternado em níveis adequados as entradas analógicas do DSP em questão. Assim como o circuito anterior este está presente no condicionamento tanto da corrente quanto da tensão.

Circuito 4 - Tensão de referência: neste estágio ocorre a geração do nível contínuo que será adicionado ao estágio de condicionamento final, a fim de elevar o nível 0 recebido pelo DSP.

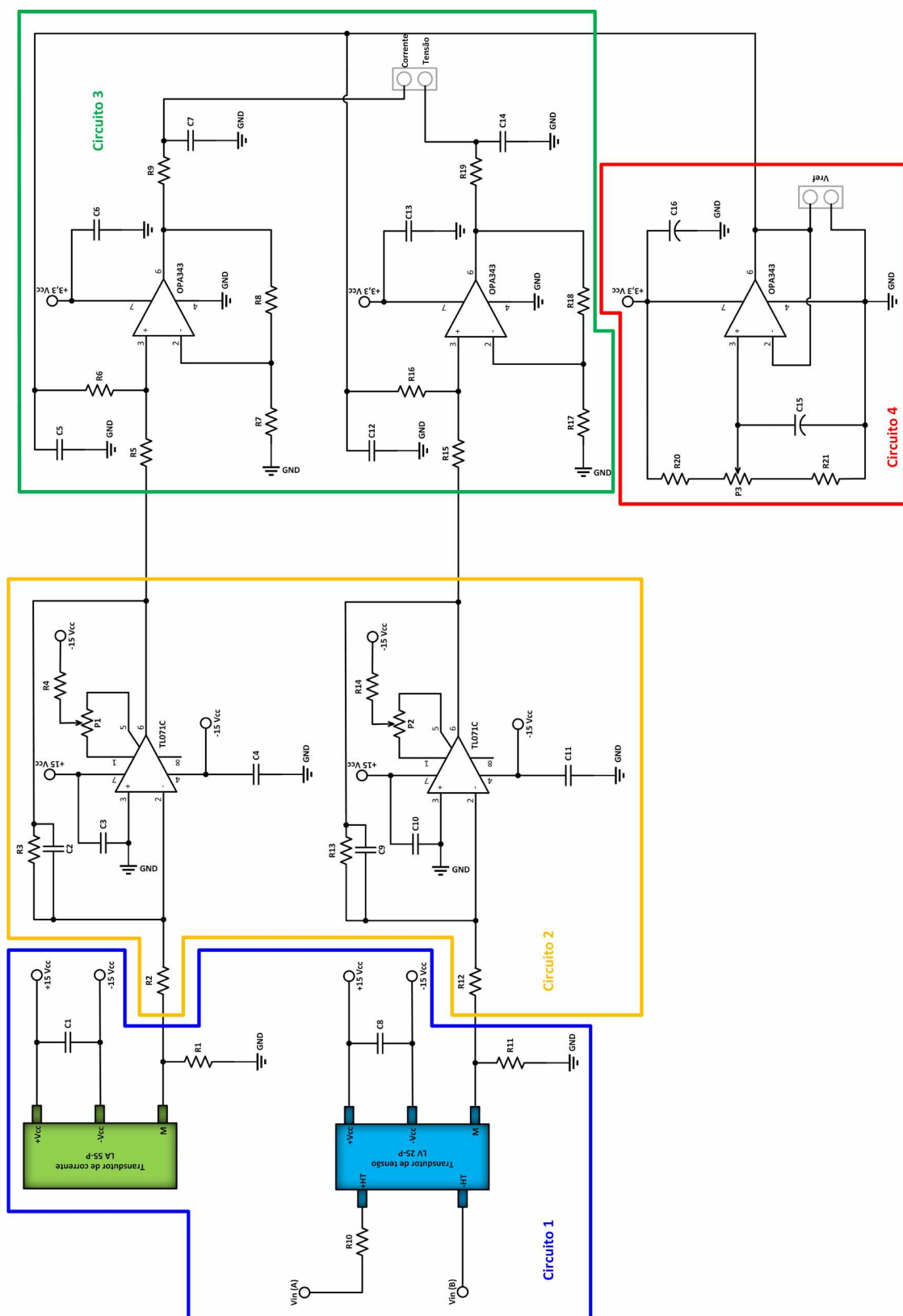


Figura 4.8 - Principais circuitos que compõem os módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente.

É necessário o uso de quatro destes circuitos, visto que, cada fase da máquina necessita de uma placa individual.

4.3.5 - Condicionadores de níveis digitais

Alguns elementos da plataforma proposta não apresentam sinais digitais dentro de níveis (do ponto de vista de amplitude) aceitáveis pelo DSP utilizado, e a função deste circuito é fazer o condicionamento de sinais digitais de forma que possam ser aplicados como entradas no DSP, ou mesmo que as saídas do DSP possam ser utilizadas em outros sistemas digitais que utilizem padrões diferentes dos níveis 0 e 3,3 V. A aplicação deste circuito na plataforma é fazer a interface entre o encoder, que apresenta níveis digitais de tensão de 0 e 15 V, e o DSP, que somente aceita níveis digitais de 0 e 3,3 V.

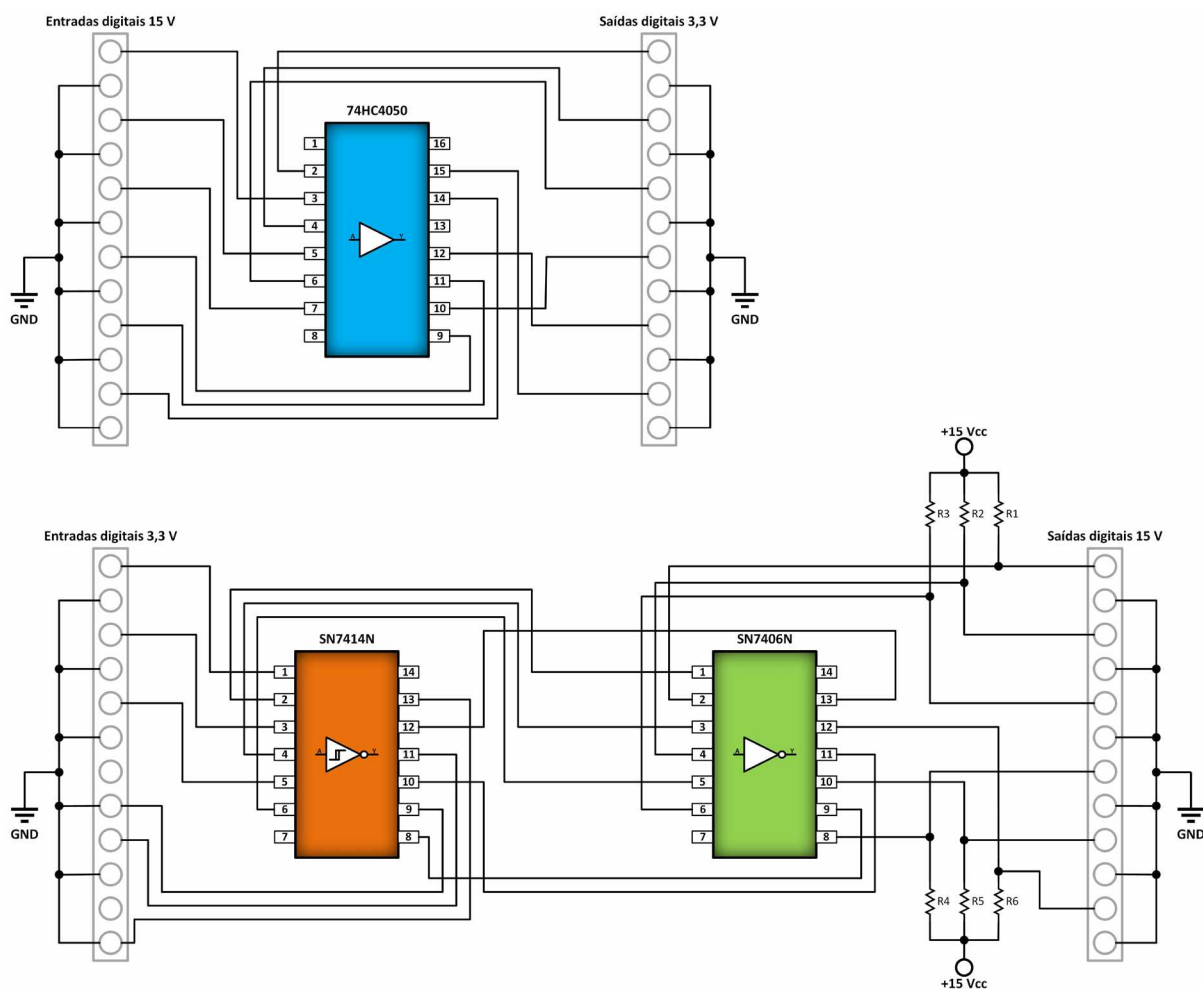


Figura 4.9 - Esquema elétrico do circuito de condicionamento de sinais digitais.

No acionamento proposto utilizou-se o condicionamento digital para ajustar os valores de 0 e 15 V para 0 e 3,3 V, respectivamente. Todavia, montamos a placa com a função inversa, ou seja, 0 e 3,3 V para 0 e 15 V a fim de tornar a plataforma versátil e viável a estudos futuros.

4.3.6 - Encoder absoluto

A função deste elemento é fornecer de forma precisa a posição dos polos do rotor em relação aos polos do estator, para que, a partir desta informação possamos identificar o momento correto de energização/desenergização de cada fase da máquina ou mesmo como a máquina será acionada, motor ou gerador. O encoder utilizado neste projeto necessariamente deve ser do tipo absoluto, pois, neste tipo de encoder a posição é dada pela leitura de um código único para cada posição; condição indispensável para o correto acionamento do MRV, visto que cada fase tem seu intervalo fixo de acionamento. O encoder utilizado foi o modelo TRD-NA1024NW, figura 4.10.



Figura 4.10 - Encoder absoluto TRD-NA1024NW [16].

Dentre as principais características apresentadas pelo encoder destacam-se [16]:

- Resolução de 0,351° graus mecânicos (10 bits);
- Saída no formato de código Gray, o que reduz os erros de leitura para velocidades elevadas;
- Contagem incrementada no sentido horário e decrementada no sentido anti-horário;
- Velocidade máxima contínua: 3000 rpm;
- Velocidade máxima instantaneamente: 5000 rpm.

Comumente a aquisição da posição instantânea do rotor é efetuada por meio de sensores óticos digitais acoplados ao eixo do motor, todavia, optou-se por utilizar o encoder devido a

maior precisão e a possibilidade de se trabalhar com velocidades mais elevadas, situação a qual torna-se inviável com a utilização de sensores óticos. E novamente partindo da premissa de implementar uma plataforma que possibilite o uso para diversas máquinas de forma simples, definiu-se por não acoplar o encoder ao eixo do MRV, e sim a máquina de corrente contínua pertencente a bancada que simula cargas mecânicas.

4.3.7 - Sistema simulador de carga

A fim de analisar o funcionamento da máquina em condições reais, uma alternativa é utilizar um sistema simulador de cargas mecânicas. O sistema simulador de cargas utilizado foi proposto e implementado em trabalhos anteriores, sendo detalhado na referência [11] e composto de forma simplificada pelos seguintes elementos:

- Estrutura metálica: esta estrutura foi projetada a fim de permitir ensaios de motores elétricos de até 5 cv, com diversos modelos e tamanhos de carcaça, reduzir a vibração do sistema quando em funcionamento além de possibilitar alguns ajustes de alturas e alinhamentos.
- Máquina primária: o sistema de simulação de carga utiliza uma máquina de corrente contínua com excitação independente, a qual é uma máquina extremamente versátil em suas aplicações como motor ou gerador. A imposição de conjugado é garantida pelo controle da corrente de armadura da máquina cc, e a velocidade no eixo é determinada pela máquina sob teste, nesta situação um MRV 8/6.
- Sistema de sensoriamento, aquisição e controle: para executar de forma plena sua proposta o sistema de carga agrega um complexo e amplo conjunto de sensoriamento, aquisição e controle, composto por sensores de efeito hall para tensão e corrente, transdutor de conjugado, medidor de velocidade, dentre outros elementos.

Na figura 4.11 tem-se a estrutura básica que compõe o sistema simulador de carga e a localização de elementos como a máquina sob teste, a máquina cc, o encoder e o transdutor de conjugado.

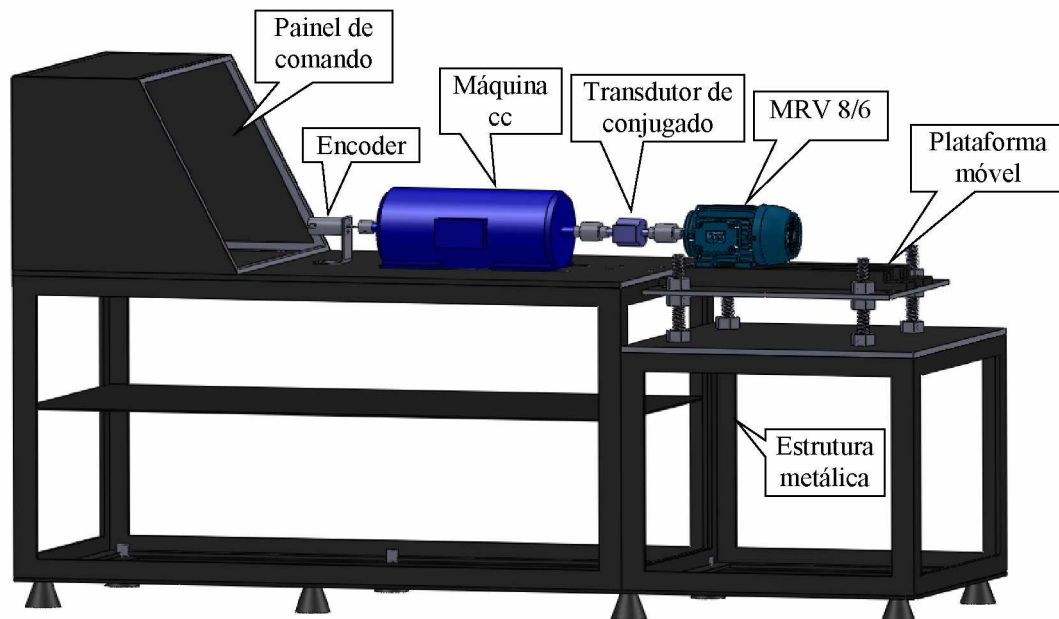


Figura 4.11 - Sistema simulador de carga [11].

4.4 - Montagem final da plataforma

A integração final da parte de potência, ou seja, módulos IGBTs, capacitores do conversor, os circuitos isoladores com suas respectivas fontes, e o transformador com nove saídas isoladas é mostrada na figura 4.12. O subsistema de aquisição e controle é mostrado na figura 4.13, o qual é composto pelos módulos de aquisição e condicionamento de tensão e corrente, módulos condicionadores de níveis digitais, DSP e pela fonte que irá alimentar todos esses circuitos.

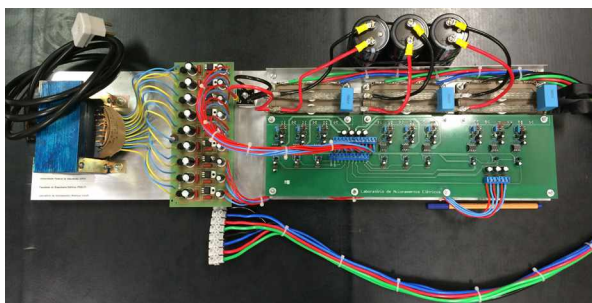


Figura 4.12 - Montagem final do subsistema de potência.

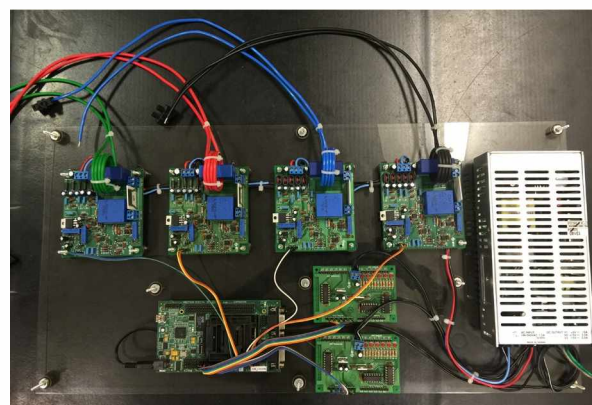


Figura 4.13 - Montagem final do subsistema de aquisição e controle.

Os dois subsistemas mostrados anteriormente são interligados de modo a trabalhar em conjunto, e teremos uma plataforma completa de acionamento e controle para o MRV 8/6, conforme figura 4.14.

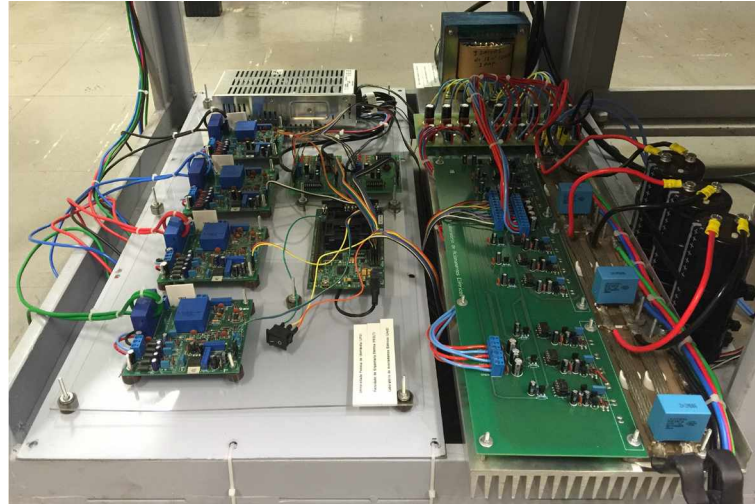


Figura 4.14 - Sistema final de acionamento e controle do MRV 8/6.

A figura 4.15 traz a montagem experimental completa, a qual é composta pelo sistema de acionamento e controle, MRV 8/6 e sistema simulador de carga.

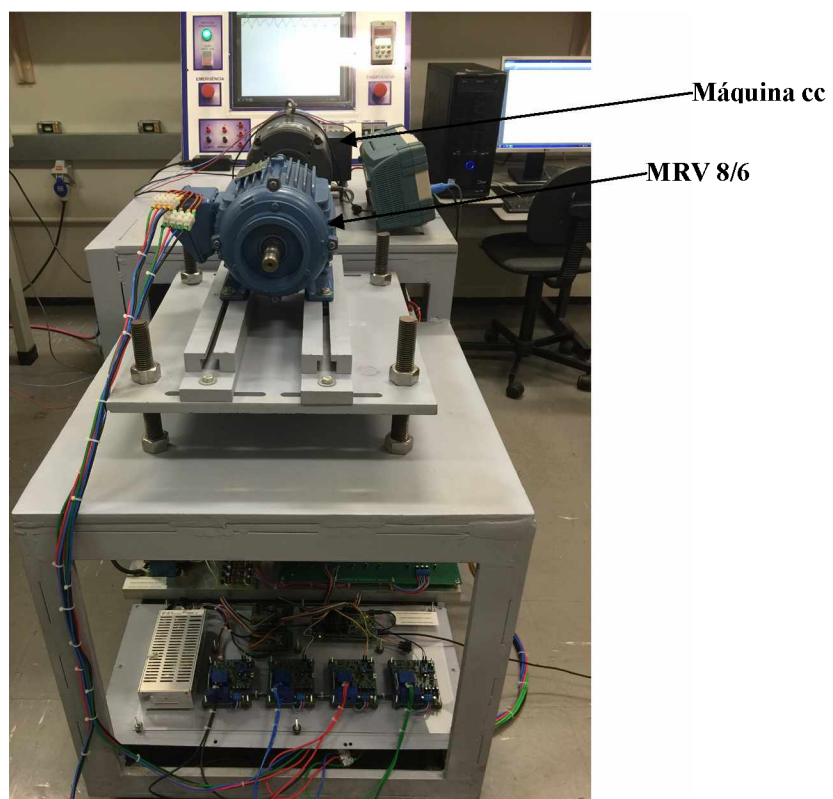


Figura 4.15 - Sistema completo: acionamento e controle, MRV 8/6 e sistema simulador de carga.

Conforme proposta inicial para se efetuar o acionamento de outro MRV, desde que respeitada a questão da quantidade de fases, do ponto de vista de montagem física basta efetuar o desligamento do conector elétrico entre o motor e o conversor, e o desacoplamento mecânico entre o eixo do motor e o transdutor de torque.

4.5 - Programação do DSP

O software de programação definido para se trabalhar com o módulo eZdspTMF28335 foi o Code Composer Studio (CCS) v6, o qual apresenta um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que fornece suporte para o controlador TMS320F28335.

Tendo em vista que o foco do trabalho não é a forma ou meio de programação, a codificação segue no apêndice B. A figura 4.16 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle implementado.

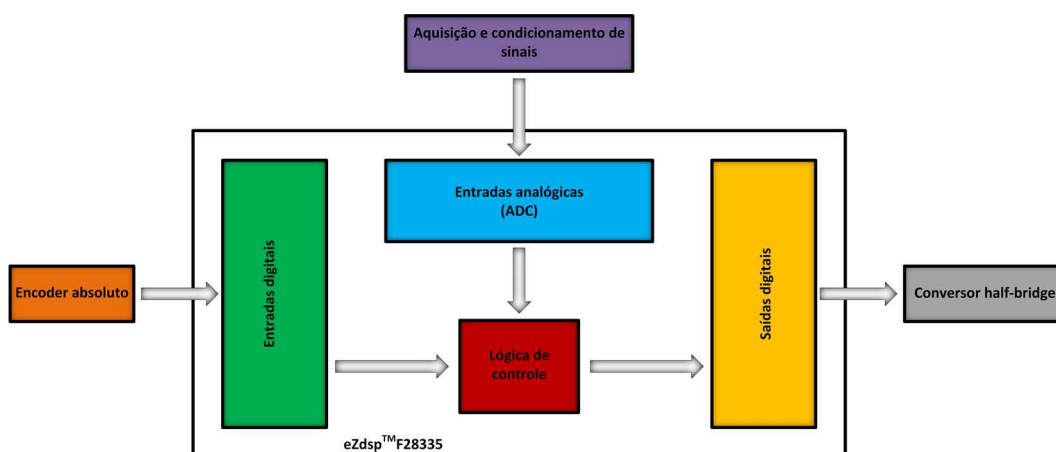


Figura 4.16 - Diagrama de bloco do sistema de controle.

A lógica de controle é o cerne do acionamento, de forma que a mesma recebe os dados de entrada que são a posição do rotor e a corrente em cada uma das fases, e a partir desses dados impõe o chaveamento ao conversor de potência. O controle implementado para a corrente foi do tipo histerese, e o valor de set point foi definido de forma que a velocidade do motor fosse mantida constante mesmo com sua operação em malha aberta de velocidade, para cada carga imposta ao eixo do MRV.

Convém ressaltar que o conhecimento da posição do rotor é crucial para um bom desempenho do controle, pois, por meio dele define-se quais chaves deverão ser acionadas de

forma a atuar na fase correta e de forma sequencial, e ao longo do intervalo no qual esta fase estará sendo acionada o controle de corrente por histerese inicia sua atuação. Analisando o comportamento do sistema do ponto de vista das chaves do conversor, durante o intervalo no qual a histerese atua ocorrem basicamente duas situações:

1 - Magnetização: ambas as chaves estão fechadas; e neste caso a fase fica sujeita a tensão imposta pelo barramento cc do conversor, acarretando um rápido crescimento na corrente de fase. Esta etapa será mantida até que a corrente atinja o valor máximo definido na histerese.

2 - Roda livre: quando a corrente atinge o máximo valor definido uma das chaves do braço que aciona a fase em questão é aberta e a outra é mantida fechada, assim a corrente na fase decresce suavemente visto que o conversor está atuando na etapa de roda livre.

Findado o intervalo no qual determinada fase é acionada, intervalo de condução, ambas as chaves controladas são abertas e a fase inicia a etapa de desmagnetização, etapa na qual os diodos de roda livre são diretamente polarizados, possibilitando que a energia armazenada no indutor no decorrer das etapas anteriores seja parcialmente devolvida ao banco de capacitores. Concomitantemente a etapa de desmagnetização de uma fase inicia-se a etapa de magnetização da fase subsequente.

4.6 - Resultados experimentais

Finalizada a etapa de montagem da plataforma de acionamento e controle iniciaram-se os ensaios e aquisição de resultados experimentais. A seguir serão abordados os resultados obtidos em 4 ensaios, os quais foram realizados para a velocidade em torno de 2000 rpm e alterando-se a carga do eixo; partindo da condição de carga inferior a 1 N.m e concluindo em uma carga próxima a 5 N.m. Nesta direção, ajusta-se a carga imposta ao eixo e o valor da histerese de corrente de forma a manter a velocidade constante em regime permanente.

Os principais objetivos da etapa experimental foram:

- 1° - Validar a plataforma proposta;
- 2° - Comprovar a atuação do controle de corrente;
- 3° - Obter perfis de algumas grandezas do MRV 8/6 para as situações propostas, tais como corrente, torque e potência.

Os critérios para a realização dos ensaios foram:

- 1° - Analisar o comportamento do motor em regime permanente;
- 2° - Utilizar a etapa de roda livre do conversor half-bridge;
- 3° - Ângulo de condução é definido em 15° , de forma que não há sobreposição de fases.

A fim de explorar o perfil da potência na entrada do circuito, em todos os ensaios foram efetuadas a medição da corrente e tensão após a retificação, figura 4.17, de forma a se obter o perfil da potência instantânea diretamente no osciloscópio, assim como seu valor médio.

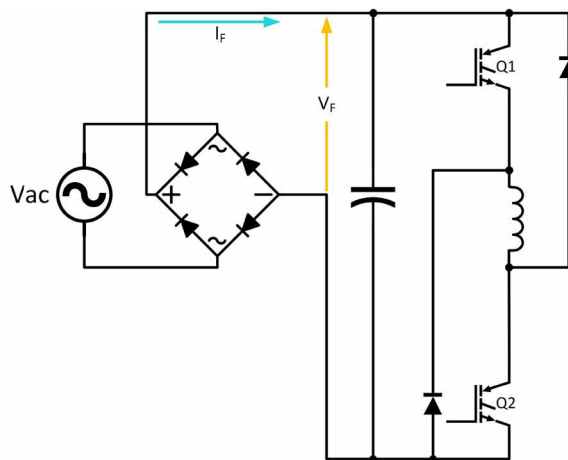


Figura 4.17 - Pontos de medição de tensão e corrente após o retificador.

O perfil de torque instantâneo disponível no eixo do motor e o valor médio, abordados em todos os ensaios expostos a seguir, são levantados por meio do transdutor de conjugado pertencente ao sistema simulador de carga [11].

4.6.1 - Ensaio 1: Torque médio de 0,77 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 150 V

Neste ensaio não foi imposta carga ao eixo da máquina, todavia, a mesma não está a vazio, pois tem acoplado ao seu eixo a máquina de corrente contínua e o transdutor de conjugado [11]. Foi imposto um controle de histerese no qual os limites foram definidos como 5,5 e 7,5 A.

Na figura 4.18 tem-se as correntes nas quatro fases do MRV 8/6, e comprova-se que o controle de corrente não chega a atuar visto que, para regime permanente e sem imposição de carga ao eixo (somente o peso do rotor da máquina cc, as perdas por atrito, elétricas e eletromagnéticas) a corrente não atinge o valor mínimo necessário a atuação do controle. Uma

situação relevante é que mesmo sem a atuação do controle de corrente, caso o limite seja definido como um valor inferior a 7,5 A, o MRV 8/6 não entra em movimento, pois, no momento da partida uma corrente superior à corrente em regime permanente é solicitada, a fim de permitir que o motor supere o momento de inércia do sistema e adquira conjugado de aceleração. À medida que o motor adquire velocidade temos a elevação da força contra eletromotriz e consequente redução da corrente de fase.

Na figura 4.19 evidencia-se a relação entre a corrente na fase A e o pulso no gate da chave controlada desta fase, e comprova-se a alteração instantânea do comportamento da corrente perante atuação na chave. Enquanto a chave é mantida fechada, possibilitando a magnetização da fase, a corrente apresenta um aspecto crescente, todavia, no instante em que a chave é aberta, momento no qual o ângulo máximo de condução foi atingido, tem-se início o processo de decrescimento da corrente para a fase em questão. Por meio deste gráfico também comprova-se que os filtros e elementos que compõem o sistema de aquisição e controle foram corretamente dimensionados e montados.

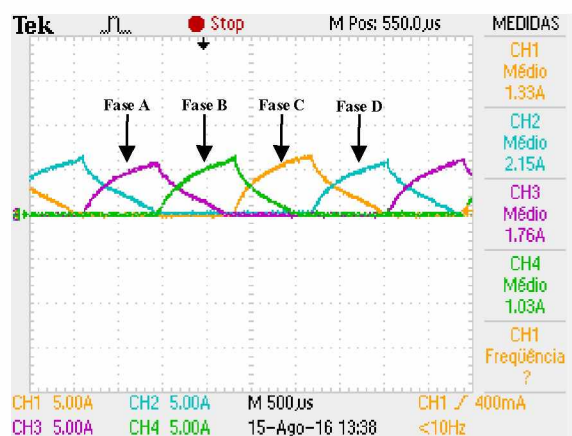


Figura 4.18 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.



Figura 4.19 - Corrente da fase A (laranja) e pulso da chave controlada da fase A (rosa).

A figura 4.20 ressalta a potência instantânea na entrada da máquina, no ponto de medição exposto na figura 4.17. Para este ensaio o valor de potência média consumida pelo MRV 8/6 foi de 400 VA, e convém salientar que esta potência não deve ser tomada como a potência do motor a vazio.

Na figura 4.21 tem-se o perfil do torque disponível no eixo do motor, e conforme abordado em seções anteriores confirma-se o aspecto oscilatório do torque, apresentando valores entre 0,76 N.m e 0,86 N.m.

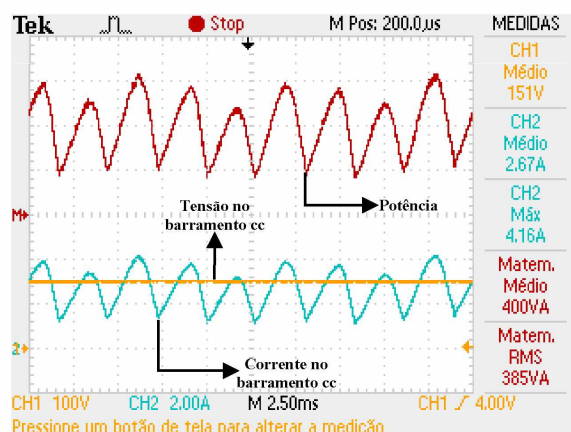


Figura 4.20 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.

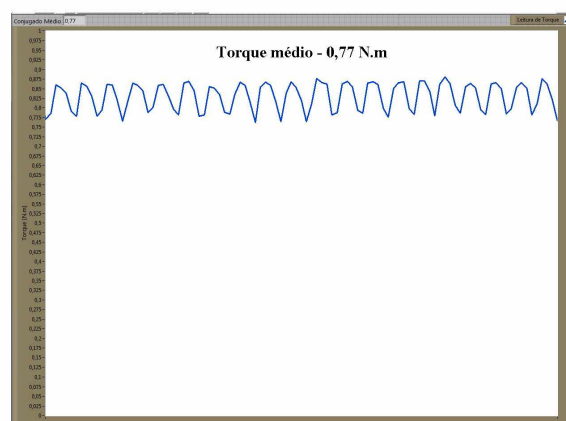


Figura 4.21 - Torque do MRV 8/6.

4.6.2 - Ensaio 2: Torque médio de 3,2 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 300 V

Neste ensaio foi imposto ao eixo do MRV 8/6 uma carga de aproximadamente 3,2 N.m e um controle de histerese no qual os limites foram definidos como 11,0 e 13,0 A.

Na figura 4.22 observa-se o comportamento das correntes nas fases do motor, e neste ensaio o controle de histerese efetivamente atua, de forma a manter a corrente dentro dos limites determinados enquanto a fase em questão estiver em sua região de condução. No aspecto que tange ao formato de onda, nota-se que entre as quatro fases ocorrem pequenas diferenças. A relação entre a corrente média e a corrente de pico para este ensaio é de aproximadamente 0,2346, ou seja, a corrente média é aproximadamente 23,46% do valor da corrente de pico.

A figura 4.23 ilustra a relação entre a corrente mensurada diretamente na fase, por meio de ponteiros de corrente, e o sinal fornecido pelo módulo exposto na seção 4.3.4 ao DSP, de forma que este sinal é mensurado diretamente na entrada analógica do DSP. Analisando o formato de onda comprova-se a fidelidade do sinal aquisitionado à corrente de fase; e com relação à amplitude o ajuste é feito via software no próprio DSP, apresentado no apêndice B, de forma que obtenha-se um sinal fiel ao comportamento da corrente de fase.

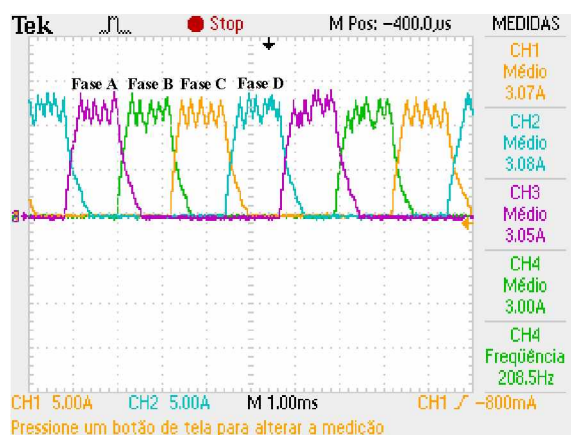


Figura 4.22 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.

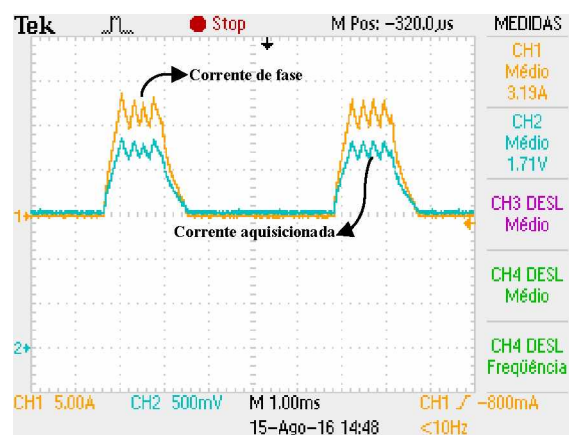


Figura 4.23 - Relação entre corrente de fase e corrente adquirida.

Na figura 4.24 é evidenciada a relação entre a corrente de fase e o pulso no gate da chave controlada desta fase, e conforme ocorreu no ensaio anterior, tem-se a alteração do comportamento da corrente de fase em função do estado da chave. Mesmo durante a etapa de roda livre na qual o controle atua de forma mais incisiva, o resultado mostrou-se satisfatório.

A fim de mensurar o período necessário para que cada ciclo do software de controle (leitura das entradas, execução do controle e atualização das saídas) seja completado utilizou-se um bit de scan time, o qual permite se comprovar que a frequência na qual o software de controle é executado, em torno de 70 kHz, é superior a frequência solicitada pelo chaveamento. O comportamento do bit de scan time, da corrente de fase, da corrente adquirida e do pulso no gate da chave controlada da fase são mostrados na figura 4.25.

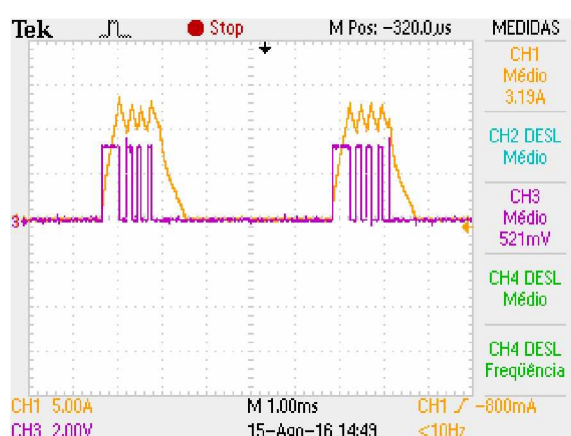


Figura 4.24 - Corrente da fase A (laranja) e pulso da chave controlada da fase A (rosa).

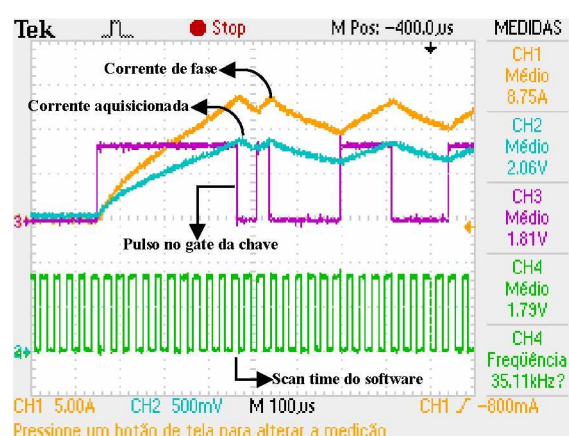


Figura 4.25 - Corrente de fase, corrente adquirida, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.

O gráfico que ilustra o comportamento da tensão, corrente e potência após a etapa de retificação é mostrado na figura 4.26. Neste ensaio observa-se que a corrente fornecida pela fonte apresenta um aspecto pulsante cíclico, e mantém-se com valor zero por um intervalo de tempo relevante, situação a qual ocorre devido a interação entre a fonte de alimentação, o banco de capacitores do conversor e a devolução parcial de energia durante o processo de desmagnetização de cada fase. Em um primeiro momento, figura 4.28, a fonte fornece corrente a fim de carregar o banco de capacitores e magnetizar a fase que encontra-se em condução. Após o processo de carga do banco de capacitores, o mesmo assume o fornecimento de energia a máquina, figura 4.29. Assim sendo, no período o qual o banco de capacitores está suprimindo a máquina não há solicitação de corrente da fonte de alimentação. À medida que o banco de capacitores sofre o processo de descarga, gradativamente a fonte volta a assumir o fornecimento de energia, e consequentemente de corrente. Neste ensaio a potência média solicitada mensurada após o retificador foi de 1,11 kVA.

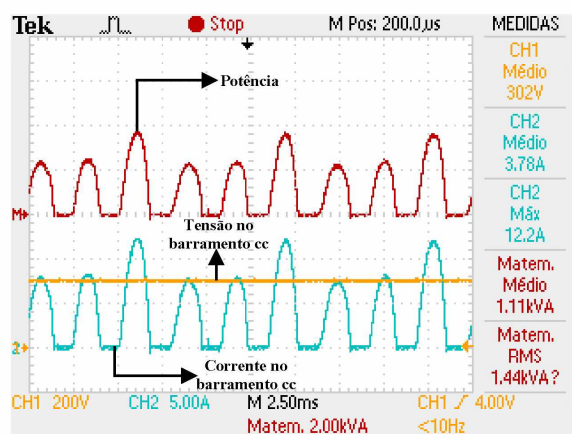


Figura 4.26 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.

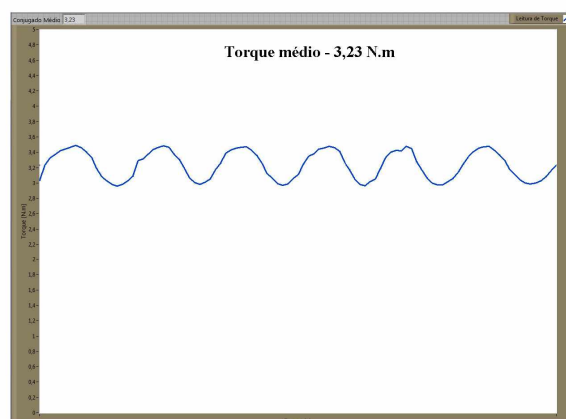


Figura 4.27 - Torque do MRV 8/6.

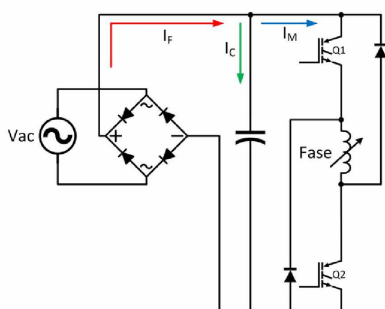


Figura 4.28 - Fonte fornecendo energia ao banco de capacitores e a fase do motor.

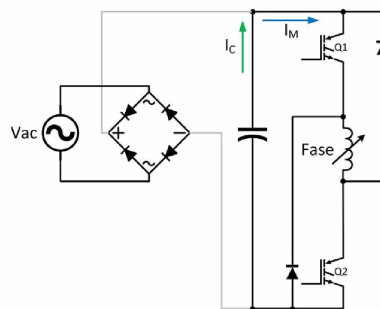


Figura 4.29 - Banco de capacitores fornece energia a fase do motor.

Na figura 4.27 tem-se o torque do MRV 8/6 para o ensaio em questão, o qual apresenta valores entre 2,95 N.m e 3,5 N.m. Apesar do aspecto oscilatório têm-se variações mais suaves se comparada a situação do ensaio 1.

4.6.3 - Ensaio 3: Torque médio de 3,9 N.m, velocidade de 2000 rpm e tensão de 300 V

Neste ensaio foi imposto ao eixo uma carga de aproximadamente 3,9 N.m e um controle de histerese no qual os limites foram definidos como 13,0 e 15,0 A.

A figura 4.30 traz o comportamento das correntes nas quatro fases do motor, de forma que o mesmo assim como a atuação do controle de corrente atendem as expectativas. A relação entre a corrente média e a corrente de pico para este ensaio é de aproximadamente 0,2373, ou seja, a corrente média é aproximadamente 23,73% do valor da corrente de pico.

A figura 4.31 enfatiza o comportamento do bit de scan time, da corrente de fase, da corrente aquisicionada e do pulso no gate da chave controlada da fase, de forma que podemos comprovar a conformidade entre a corrente de fase e a corrente mensurada, além do efeito do chaveamento na fase em questão.

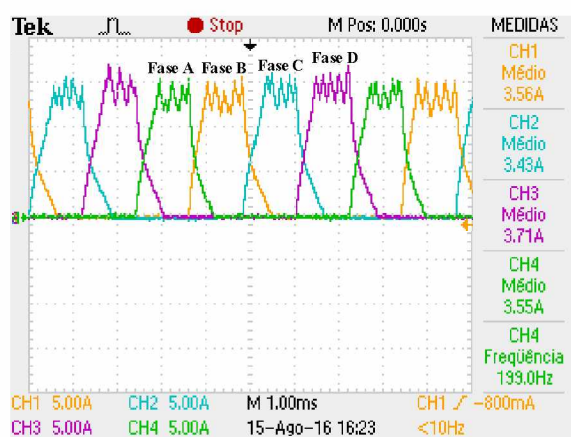


Figura 4.30 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.

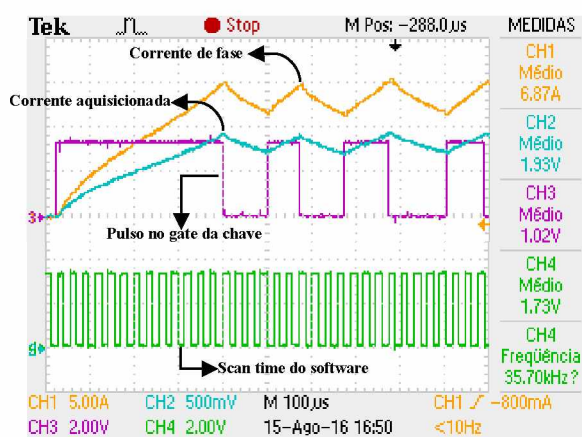


Figura 4.31 - Corrente de fase, corrente aquisicionada, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.

Os perfis de corrente, tensão e potência após a retificação são mostrados na figura 4.32, e se assemelham muito ao comportamento destas grandezas no ensaio anterior, com potência média solicitada da rede de 1,27 kVA. O torque é mostrado na figura 4.33 e também apresenta

perfil muito semelhante ao salientado no ensaio 2, todavia denota valores entre 3,68 N.m e 4,11 N.m.

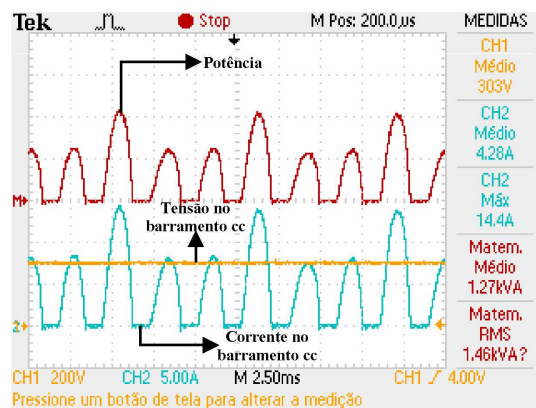


Figura 4.32 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.

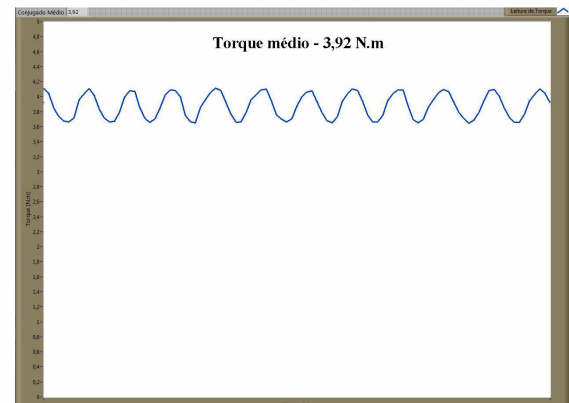


Figura 4.33 - Torque do MRV 8/6.

4.6.4 - Ensaio 4: Torque médio de 4,5 N.m, velocidade de 2200 rpm e tensão de 300 V

Neste ensaio a velocidade do eixo foi mantida em 2200 rpm, carga imposta de aproximadamente 4,5 N.m e um controle de histerese no qual os limites foram definidos como 16,0 e 18,0 A.

As correntes das quatro fases do motor são mostradas na figura 4.34.

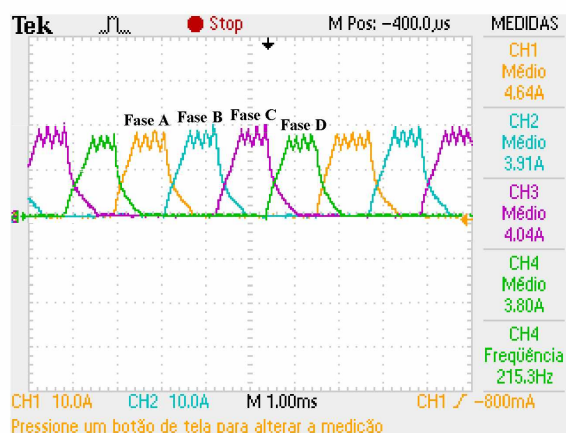


Figura 4.34 - Correntes nas 4 fases do MRV 8/6.

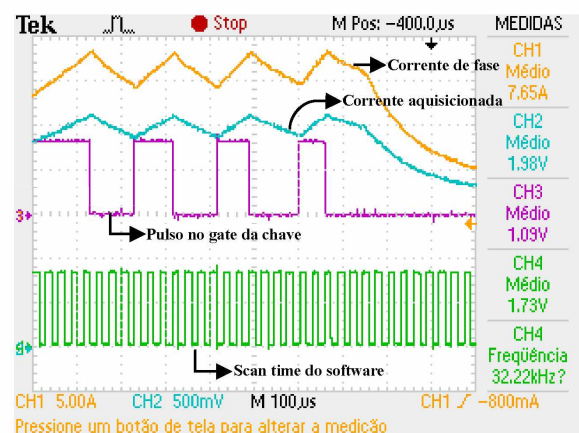


Figura 4.35 - Corrente de fase, corrente aquisitionada, pulso no gate da chave controlada e sinal de scan time do software de controle.

Tem-se que a relação entre a corrente média e a corrente de pico é de aproximadamente 0,2277, portanto a corrente média é aproximadamente 22,77% do valor da corrente de pico. Quanto ao formato de onda, figura 4.35, observa-se que o controle atua e o desempenho do mesmo responde às expectativas.

A figura 4.36 aborda o comportamento da tensão, corrente e potência na entrada do conversor; e conforme esperado o comportamento assemelha-se muito com os resultados obtidos nos ensaios 2 e 3. A potência média consumida para as condições deste ensaio foi de 1,52 kVA. A figura 4.37 enfatiza o torque, e o mesmo apresenta valores entre 4,33 N.m e 4,8 N.m.

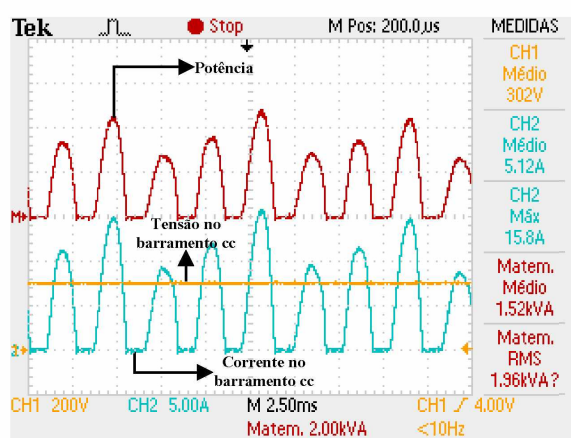


Figura 4.36 - Tensão, corrente e potência no barramento cc do conversor.

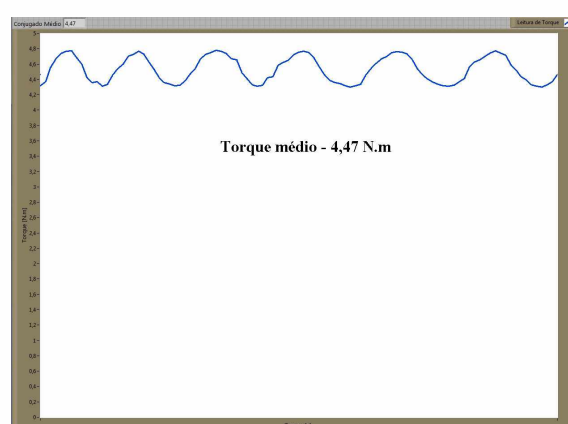


Figura 4.37 - Torque do MRV 8/6.

Reunindo alguns dados obtidos por meio dos quatro ensaios têm-se as tabelas 4.1 e 4.2. A tabela 4.1 aborda a relação entre a corrente média de fase e a corrente de pico para cada um dos ensaios, de forma que para o ensaio 1 a corrente de pico foi de 6,75 A, visto que o controle de corrente não atua, enquanto nos demais ensaios a corrente de pico é o valor máximo definido na histerese de corrente. Nota-se a propensão da relação abordada a manter-se com valores próximos a 0,24, ou seja, apesar dos elevados picos de corrente, a corrente média no acionamento desta máquina apresenta um valor pequeno perante os picos, o que acarreta grande vantagem na etapa de implementação experimental. No capítulo 3 esta correspondência foi abordada e obtido como resultado que a corrente média corresponde a aproximadamente 24,89% da corrente de pico, comprovando-se a proximidade dos resultados computacionais e experimentais.

Ensaio	Média das correntes de fase [A]	Corrente de pico [A]	$\frac{\text{Corrente média}}{\text{Corrente de pico}}$ [%]
1	1,57	6,75	23,26
2	3,05	13,0	23,46
3	3,56	15,0	23,73
4	4,10	18,0	22,77

Tabela 4.1 - Relação entre corrente média de fase e corrente de pico.

A tabela 4.2 relaciona diversas grandezas, como potência média de entrada e saída da máquina, torque médio e rendimento. A potência média de entrada é mensurada após a etapa de retificação do conversor half-bridge, com auxílio de osciloscópio com ponteiros de tensão e corrente; e o torque médio é adquirido pelo transdutor de torque pertencente ao sistema simulador de carga, de forma que seus dados são tratados em software específico. A potência média de saída é calculada a partir da relação entre torque e velocidade para máquinas elétricas, equação 2.9.

Ensaio	Corrente de histerese [A]	Potência média de entrada [VA]	Torque médio [N.m]	Potência média de saída [W]	Rendimento [%]
1	5,5 à 7,5	400	0,77	161,27	40,32
2	11,0 à 13,0	1110	3,23	676,49	60,95
3	13,0 à 15,0	1270	3,92	821,00	64,64
4	16,0 à 18,0	1520	4,47	1029,81	67,75

Tabela 4.2 - Grandezas obtidas nos ensaios.

A estimativa do rendimento em cada ensaio permite avaliar a tendência do mesmo à medida que o motor é predisposto a ser acionado sob condições nominais; de modo que o rendimento apresenta uma elevação à medida que cargas maiores são adicionadas ao eixo da máquina.

Esta plataforma apresenta como contribuição o levantamento preciso de alguns dados, por meio de um ambiente confiável, flexível e robusto, possibilitando ainda:

- Mensuração precisa da posição do rotor da máquina;
- Levantamento das curvas de indutância da máquina, permitindo o confronto entre os dados obtidos na etapa de projeto e os dados adquiridos experimentalmente.

Todavia, a plataforma demanda algumas melhorias as quais encontram-se em processo de implementação, tais como:

- Inserção de transdutor de velocidade, o qual possibilitará o monitoramento e controle da velocidade da máquina;
- Controle de corrente de armadura da máquina de corrente contínua, a partir do qual pode-se impor carga controlada.

Capítulo 5

Conclusões e considerações finais

5.1 - Conclusões finais

A plataforma de acionamento e controle implementada, projetada de forma a ser flexível, modular e robusta, vem a contribuir de forma contínua a pesquisas referentes a máquinas a relutância variável, satisfazendo a proposta inicial do referido trabalho. Esta plataforma em conjunto ao sistema simulador de carga possibilita um ambiente propício a estudos cujo foco seja a MaRV, acionada tanto como motor quanto como gerador.

O modelo computacional utilizado mostrou-se capaz de contribuir com a previsão do comportamento da máquina, possibilitando a análise de operação perante diversas condições. Os resultados obtidos na simulação computacional mostram-se de grande valia, visto que, a partir dos mesmos pode-se ter um direcionamento em relação às amplitudes das grandezas elétricas durante o acionamento da máquina na etapa experimental.

Os resultados experimentais foram mostrados e discutidos, comprovando a coerência entre a simulação computacional e a implementação experimental; reforçando a importância da etapa de simulação computacional. Por meio dos resultados experimentais também se comprovam algumas características do acionamento do MRV 8/6, tais como:

- Elevados picos de corrente, todavia, baixa corrente média, de forma que no protótipo utilizado a corrente média apresenta valor em torno de 24% do valor da corrente máxima.
- Perfil oscilatório do conjugado para um controle de malha aberta, proveniente das características construtivas da máquina e do acionamento imposto.
- Tendência de aumento do rendimento da máquina à medida que é acionada em condições próximas as nominais.

5.2 - Propostas para trabalhos futuros

Baseado nos resultados obtidos, na disponibilidade do sistema simulador de carga e da plataforma de acionamento e controle implementada, apresentam-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Normatização dos ensaios para a máquina a relutância variável a partir de normas existentes para outras máquinas;
- Implementação de controle de velocidade em malha fechada;
- Análise da influência dos ângulos θ_{on} e θ_{off} no comportamento do motor, e efeitos da sobreposição de fases no acionamento;
- Estudo e aplicação de outras técnicas para o controle de corrente no motor;
- Estimador de conjugado para o MRV 8/6;
- Estudos visando à redução da oscilação e controle do conjugado no MRV 8/6;
- Estudo do desempenho dinâmico da máquina frente a diferentes tipos de cargas;
- Comparação entre desempenho do MRV 8/6 em relação a máquinas convencionais, para as mesmas situações.

Apêndice A - Tabela de fluxo magnético [Wb] por corrente de fase [A] e por posição do rotor [°].

Corrente [A]	Posição do rotor [°]							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.020589	0.020589	0.020366	0.019831	0.019134	0.018370	0.017653	0.016957
2	0.042202	0.042060	0.041190	0.039844	0.038234	0.036671	0.035223	0.033747
3	0.064390	0.064170	0.062827	0.060749	0.058264	0.055851	0.053616	0.051336
4	0.086693	0.086396	0.084586	0.081784	0.078431	0.075174	0.072155	0.069074
5	0.108970	0.108599	0.106326	0.102807	0.098597	0.094505	0.090710	0.086836
6	0.131147	0.130708	0.127986	0.123763	0.118712	0.113794	0.109231	0.104570
7	0.153008	0.152512	0.149391	0.144517	0.138675	0.132968	0.127656	0.122218
8	0.173688	0.173180	0.169884	0.164594	0.158156	0.151775	0.145764	0.139568
9	0.190170	0.189749	0.187001	0.182226	0.175959	0.169284	0.162701	0.155823
10	0.200921	0.200573	0.198492	0.194764	0.189519	0.183318	0.176639	0.169382
11	0.208582	0.208239	0.206424	0.203244	0.198827	0.193422	0.187174	0.180024
12	0.214707	0.214360	0.212715	0.209827	0.205793	0.200880	0.195152	0.188403
13	0.219671	0.219342	0.217877	0.215269	0.211515	0.206858	0.201489	0.195242
14	0.223806	0.223497	0.222168	0.219796	0.216347	0.211996	0.206931	0.201077
15	0.227476	0.227170	0.225895	0.223657	0.220484	0.216507	0.211789	0.206252
16	0.230926	0.230609	0.229334	0.227140	0.224130	0.220483	0.216143	0.210956
17	0.234244	0.233910	0.232618	0.230443	0.227502	0.224040	0.220033	0.215232
18	0.237444	0.237089	0.235788	0.233638	0.230740	0.227359	0.223545	0.219091
19	0.240521	0.240148	0.238854	0.236739	0.233883	0.230553	0.226833	0.222594
20	0.243474	0.243092	0.241820	0.239750	0.236946	0.233663	0.229998	0.225864
21	0.246307	0.245926	0.244690	0.242670	0.239922	0.236690	0.233078	0.229014
22	0.249035	0.248664	0.247464	0.245501	0.242817	0.239651	0.236089	0.232067
23	0.251685	0.251327	0.250160	0.248247	0.245630	0.242534	0.239027	0.235059
24	0.254282	0.253936	0.252792	0.250919	0.248363	0.245339	0.241902	0.237987
25	0.256840	0.256502	0.255378	0.253534	0.251024	0.248065	0.244704	0.240850
26	0.259358	0.259029	0.257920	0.256100	0.253630	0.250723	0.247433	0.243648
27	0.261835	0.261513	0.260420	0.258624	0.256183	0.253319	0.250094	0.246378
28	0.264270	0.263955	0.262877	0.261105	0.258693	0.255865	0.252691	0.249043
29	0.266662	0.266353	0.265291	0.263542	0.261161	0.258364	0.255233	0.251650
30	0.269009	0.268706	0.267661	0.265934	0.263583	0.260819	0.257725	0.254197
31	0.271311	0.271014	0.269984	0.268281	0.265961	0.263230	0.260173	0.256673
32	0.273569	0.273277	0.272263	0.270582	0.268294	0.265599	0.262576	0.259116
33	0.275783	0.275497	0.274498	0.272839	0.270582	0.267927	0.264935	0.261515
34	0.277957	0.277676	0.276691	0.275052	0.272828	0.270207	0.267251	0.263871
35	0.280094	0.279817	0.278844	0.277224	0.275029	0.272442	0.269522	0.266183
36	0.282196	0.281923	0.280961	0.279358	0.277187	0.274636	0.271751	0.268461
37	0.284265	0.283996	0.283045	0.281457	0.279309	0.276785	0.273938	0.270679
38	0.286305	0.286039	0.285097	0.283524	0.281397	0.278902	0.276084	0.272863
39	0.288317	0.288054	0.287121	0.285560	0.283452	0.280986	0.278193	0.275009
40	0.290303	0.290042	0.289116	0.287568	0.285477	0.283030	0.280266	0.277116

Corrente [A]	Posição do rotor [°]							
	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.016241	0.015444	0.014631	0.013886	0.013149	0.012349	0.011516	0.010693
2	0.032133	0.030424	0.028813	0.027284	0.025716	0.024049	0.022341	0.020710
3	0.048845	0.046204	0.043718	0.041358	0.038943	0.036380	0.033759	0.031263
4	0.065707	0.062135	0.058773	0.055581	0.052315	0.048845	0.045302	0.041927
5	0.082598	0.078105	0.073875	0.069855	0.065739	0.061369	0.056899	0.052645
6	0.099471	0.094063	0.088968	0.084125	0.079165	0.073896	0.068507	0.063379
7	0.116260	0.109950	0.104007	0.098344	0.092541	0.086375	0.080076	0.074084
8	0.132780	0.125617	0.118854	0.112369	0.105719	0.098666	0.091492	0.084649
9	0.148321	0.140441	0.132907	0.125599	0.118129	0.110273	0.102311	0.094650
10	0.161437	0.153070	0.144917	0.136922	0.128812	0.120355	0.111782	0.103446
11	0.171964	0.163336	0.154761	0.146293	0.137749	0.128858	0.119848	0.111022
12	0.180503	0.171803	0.163014	0.154245	0.145425	0.136240	0.126944	0.117783
13	0.187759	0.179243	0.170416	0.161459	0.152450	0.143036	0.133521	0.124105
14	0.194107	0.185956	0.177246	0.168201	0.159045	0.149462	0.139762	0.130130
15	0.199696	0.192017	0.183584	0.174562	0.165323	0.155596	0.145728	0.135915
16	0.204718	0.197473	0.189445	0.180567	0.171324	0.161488	0.151474	0.141495
17	0.209345	0.202431	0.194819	0.186220	0.177050	0.167169	0.157036	0.146909
18	0.213604	0.206995	0.199734	0.191489	0.182501	0.172652	0.162430	0.152175
19	0.217495	0.211246	0.204279	0.196381	0.187677	0.177938	0.167661	0.157302
20	0.221025	0.215180	0.208535	0.200928	0.192545	0.183014	0.172733	0.162301
21	0.224321	0.218802	0.212522	0.205189	0.197095	0.187854	0.177657	0.167177
22	0.227472	0.222155	0.216218	0.209213	0.201361	0.192427	0.182416	0.171936
23	0.230513	0.225314	0.219647	0.213016	0.205396	0.196727	0.186991	0.176569
24	0.233483	0.228357	0.222845	0.216547	0.209234	0.200792	0.191356	0.181064
25	0.236408	0.231340	0.225907	0.219857	0.212866	0.204665	0.195494	0.185405
26	0.239265	0.234242	0.228879	0.222961	0.216285	0.208371	0.199417	0.189570
27	0.242061	0.237092	0.231784	0.225938	0.219492	0.211898	0.203158	0.193554
28	0.244800	0.239889	0.234625	0.228857	0.222530	0.215237	0.206748	0.197357
29	0.247473	0.242640	0.237415	0.231696	0.225455	0.218385	0.210191	0.201010
30	0.250098	0.245315	0.240158	0.234499	0.228302	0.221369	0.213474	0.204519
31	0.252653	0.247944	0.242846	0.237241	0.231097	0.224242	0.216589	0.207900
32	0.255148	0.250532	0.245484	0.239929	0.233841	0.227047	0.219544	0.211146
33	0.257596	0.253051	0.248070	0.242585	0.236547	0.229798	0.222376	0.214241
34	0.259999	0.255500	0.250603	0.245183	0.239199	0.232497	0.225130	0.217190
35	0.262341	0.257927	0.253087	0.247747	0.241807	0.235152	0.227832	0.220007
36	0.264655	0.260296	0.255519	0.250256	0.244371	0.237764	0.230491	0.222733
37	0.266932	0.262618	0.257898	0.252717	0.246896	0.240337	0.233108	0.225402
38	0.269152	0.264899	0.260233	0.255127	0.249379	0.242871	0.235687	0.228025
39	0.271345	0.267136	0.262524	0.257488	0.251813	0.245366	0.238227	0.230611
40	0.273497	0.269332	0.264772	0.259800	0.254190	0.247821	0.240732	0.233157

Corrente [A]	Posição do rotor [°]							
	16	17	18	19	20	21	22	23
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.009908	0.009119	0.008279	0.007432	0.006605	0.005773	0.004940	0.004079
2	0.019127	0.017478	0.015782	0.014064	0.012392	0.010724	0.009041	0.007303
3	0.028848	0.026336	0.023760	0.021156	0.018627	0.016111	0.013574	0.010960
4	0.038661	0.035269	0.031794	0.028290	0.024891	0.021514	0.018117	0.014621
5	0.048528	0.044252	0.039870	0.035454	0.031176	0.026932	0.022666	0.018286
6	0.058409	0.053248	0.047960	0.042632	0.037471	0.032353	0.027212	0.021946
7	0.068264	0.062217	0.056023	0.049787	0.043749	0.037756	0.031735	0.025573
8	0.077974	0.071041	0.063954	0.056837	0.049935	0.043074	0.036191	0.029182
9	0.087134	0.079368	0.071473	0.063551	0.055841	0.048180	0.040521	0.032757
10	0.095234	0.086817	0.078294	0.069706	0.061324	0.053014	0.044720	0.036309
11	0.102318	0.093436	0.084449	0.075358	0.066464	0.057642	0.048817	0.039811
12	0.108737	0.099515	0.090167	0.080696	0.071383	0.062129	0.052833	0.043261
13	0.114769	0.105281	0.095619	0.085818	0.076141	0.066500	0.056770	0.046696
14	0.120538	0.110784	0.100870	0.090775	0.080775	0.070769	0.060641	0.050099
15	0.126096	0.116116	0.105957	0.095595	0.085292	0.074954	0.064453	0.053473
16	0.131466	0.121303	0.110902	0.100293	0.089718	0.079062	0.068206	0.056842
17	0.136692	0.126318	0.115728	0.104881	0.094054	0.083101	0.071907	0.060159
18	0.141781	0.131205	0.120445	0.109383	0.098310	0.087079	0.075571	0.063435
19	0.146746	0.136021	0.125063	0.113804	0.102493	0.090999	0.079190	0.066713
20	0.151602	0.140744	0.129593	0.118143	0.106606	0.094868	0.082765	0.069951
21	0.156356	0.145358	0.134048	0.122405	0.110655	0.098691	0.086302	0.073166
22	0.161025	0.149862	0.138423	0.126603	0.114653	0.102465	0.089810	0.076358
23	0.165609	0.154352	0.142723	0.130744	0.118599	0.106190	0.093285	0.079526
24	0.170097	0.158668	0.146958	0.134826	0.122490	0.109873	0.096725	0.082655
25	0.174477	0.162973	0.151136	0.138853	0.126329	0.113518	0.100138	0.085801
26	0.178746	0.167206	0.155258	0.142828	0.130122	0.117129	0.103523	0.088886
27	0.182899	0.171404	0.159325	0.146754	0.133875	0.120707	0.106880	0.091993
28	0.186924	0.175493	0.163334	0.150633	0.137595	0.124252	0.110213	0.095042
29	0.190804	0.179500	0.167284	0.154463	0.141282	0.127762	0.113522	0.098095
30	0.194526	0.183433	0.171173	0.158243	0.144933	0.131237	0.116804	0.101127
31	0.198098	0.187202	0.174997	0.161979	0.148547	0.134682	0.120061	0.104116
32	0.201533	0.190847	0.178746	0.165674	0.152124	0.138105	0.123295	0.107159
33	0.204853	0.194326	0.182411	0.169329	0.155665	0.141500	0.126506	0.110093
34	0.208059	0.197692	0.185981	0.172940	0.159167	0.144870	0.129695	0.113062
35	0.211143	0.201028	0.189442	0.176495	0.162633	0.148216	0.132860	0.116018
36	0.214099	0.204152	0.192790	0.179983	0.166064	0.151534	0.135997	0.118959
37	0.216925	0.207257	0.196029	0.183392	0.169457	0.154827	0.139114	0.121939
38	0.219639	0.210229	0.199169	0.186714	0.172810	0.158095	0.142215	0.124794
39	0.222274	0.213060	0.202223	0.189943	0.176120	0.161335	0.145300	0.127686
40	0.224855	0.215802	0.205194	0.193078	0.179382	0.164557	0.148370	0.130567

Corrente [A]	Posição do rotor [°]						
	24	25	26	27	28	29	30
0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1	0.003239	0.002701	0.002438	0.002282	0.002187	0.002132	0.002104
2	0.005840	0.005097	0.004702	0.004460	0.004311	0.004228	0.004202
3	0.008762	0.007646	0.007053	0.006690	0.006466	0.006343	0.006304
4	0.011686	0.010197	0.009405	0.008922	0.008622	0.008458	0.008405
5	0.014611	0.012750	0.011758	0.011153	0.010779	0.010573	0.010509
6	0.017539	0.015302	0.014112	0.013386	0.012936	0.012689	0.012612
7	0.020468	0.017858	0.016467	0.015619	0.015094	0.014806	0.014717
8	0.023397	0.020413	0.018824	0.017854	0.017253	0.016924	0.016818
9	0.026326	0.022971	0.021182	0.020090	0.019413	0.019042	0.018926
10	0.029253	0.025533	0.023541	0.022325	0.021574	0.021162	0.021032
11	0.032177	0.028093	0.025902	0.024563	0.023736	0.023282	0.023140
12	0.035098	0.030647	0.028258	0.026796	0.025899	0.025405	0.025245
13	0.038014	0.033215	0.030620	0.029036	0.028063	0.027528	0.027358
14	0.040924	0.035773	0.032984	0.031276	0.030229	0.029651	0.029465
15	0.043824	0.038334	0.035348	0.033518	0.032395	0.031776	0.031576
16	0.046719	0.040896	0.037713	0.035760	0.034561	0.033901	0.033687
17	0.049603	0.043470	0.040078	0.038003	0.036729	0.036027	0.035800
18	0.052477	0.046022	0.042444	0.040247	0.038897	0.038153	0.037913
19	0.055344	0.048581	0.044810	0.042491	0.041065	0.040280	0.040026
20	0.058198	0.051137	0.047175	0.044735	0.043234	0.042408	0.042140
21	0.061045	0.053692	0.049540	0.046979	0.045403	0.044536	0.044255
22	0.063879	0.056245	0.051905	0.049223	0.047573	0.046664	0.046375
23	0.066704	0.058788	0.054270	0.051468	0.049742	0.048792	0.048484
24	0.069518	0.061338	0.056634	0.053712	0.051912	0.050920	0.050606
25	0.072322	0.063881	0.058997	0.055956	0.054082	0.053049	0.052714
26	0.075117	0.066421	0.061359	0.058200	0.056252	0.055177	0.054836
27	0.077903	0.068953	0.063720	0.060444	0.058422	0.057306	0.056937
28	0.080676	0.071488	0.066080	0.062688	0.060591	0.059435	0.059068
29	0.083440	0.074020	0.068439	0.064930	0.062761	0.061563	0.061167
30	0.086195	0.076543	0.070796	0.067173	0.064930	0.063692	0.063282
31	0.088937	0.079054	0.073152	0.069415	0.067099	0.065821	0.065415
32	0.091670	0.081576	0.075506	0.071656	0.069268	0.067949	0.067521
33	0.094394	0.084081	0.077858	0.073896	0.071437	0.070077	0.069636
34	0.097111	0.086582	0.080208	0.076136	0.073605	0.072205	0.071741
35	0.099818	0.089090	0.082557	0.078375	0.075773	0.074333	0.073875
36	0.102515	0.091585	0.084903	0.080613	0.077939	0.076460	0.075980
37	0.105197	0.094076	0.087247	0.082850	0.080106	0.078587	0.078104
38	0.107872	0.096561	0.089588	0.085085	0.082272	0.080714	0.080207
39	0.110541	0.099037	0.091928	0.087319	0.084438	0.082840	0.082321
40	0.113202	0.101517	0.094264	0.089553	0.086603	0.084966	0.084423

Apêndice B - Código de programação do DSP

```
#include <math.h>
#include "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define GetCurTime() PS_GetSysTimer()

void Task();

DefaultType fGblIFase_A = 0.0;
DefaultType fGblVFase_A = 0.0;
DefaultType fGblIFase_B = 0.0;
DefaultType fGblIFase_C = 0.0;
DefaultType fGblIFase_D = 0.0;
DefaultType fGblVFase_C = 0.0;
DefaultType fGblVFase_D = 0.0;
DefaultType fGblPos = 0.0;
DefaultType fGblconv = 0.0;
DefaultType fGblY1 = 0.0;
DefaultType fGblY2 = 0.0;
DefaultType fGblY3 = 0.0;
DefaultType fGblY4 = 0.0;
DefaultType fGblY5 = 0.0;
DefaultType fGblY6 = 0.0;
DefaultType fGblY7 = 0.0;
DefaultType fGblY8 = 0.0;
DefaultType fGblLim_sup = 0.0;
DefaultType fGblLim_inf = 0.0;
DefaultType fGblV25 = 0.0;
DefaultType fGblV26 = 0.0;
DefaultType fGblV28 = 0.0;
DefaultType fGblChave_geral = 0.0;
DefaultType fGblV27 = 0.0;
DefaultType fGblVFase_B = 0.0;
DefaultType fGblBit9_MSB = 0.0;
DefaultType fGblBit8 = 0.0;
DefaultType fGblBit7 = 0.0;
DefaultType fGblBit6 = 0.0;
DefaultType fGblBit5 = 0.0;
DefaultType fGblBit4 = 0.0;
DefaultType fGblBit3 = 0.0;
DefaultType fGblBit2 = 0.0;
DefaultType fGblBit1 = 0.0;
DefaultType fGblBit0_LSB = 0.0;

void Task()
{
    DefaultType fTI_ADC1_1, fC1, fSUM1, fC2, fMULT1, fTI_ADC1, fC9,
    fSUM5, fC10, fMULT5;
    DefaultType fTI_ADC1_3, fC3, fSUM2, fC4, fMULT2, fTI_ADC1_5, fC5,
    fSUM3, fC6, fMULT3;
    DefaultType fTI_ADC1_7, fC7, fSUM4, fC8, fMULT4, fTI_ADC1_4, fC13,
    fSUM7, fC14, fMULT7;
    DefaultType fTI_ADC1_6, fC15, fSUM8, fC16, fMULT8, fTI_DIN2_4,
    fTI_DIN1, fNOT1, fTI_DIN1_1;
    DefaultType fNOT2, fXOR1, fTI_DIN1_2, fNOT3, fXOR2, fTI_DIN1_3,
    fNOT4, fXOR3, fTI_DIN1_4;
    DefaultType fNOT5, fXOR4, fTI_DIN1_5, fNOT6, fXOR5, fTI_DIN1_6,
    fNOT7, fXOR6, fTI_DIN1_7;
```

```

    DefaultType fNOT8, fXOR7, fTI_DIN2, fNOT9, fXOR8, fTI_DIN2_1, fNOT10,
    fXOR9, fTI_DIN2_2;
    DefaultType fTI_DIN2_3, fSSCB2, fSSCB2_1, fSSCB2_2, fTI_ADC1_2, fC11,
    fSUM6, fC12, fMULT6;
    DefaultType fSSCB1, fSSCB1_1, fSSCB1_2, fSSCB1_3, fSSCB1_4, fSSCB1_5,
    fSSCB1_6, fSSCB1_7;
    DefaultType fSSCB1_8, fSSCB1_9;

    fTI_ADC1_1 = PS_GetDcAdc(1);
    fTI_ADC1 = PS_GetDcAdc(0);
    fTI_ADC1_3 = PS_GetDcAdc(3);
    fTI_ADC1_5 = PS_GetDcAdc(5);
    fTI_ADC1_7 = PS_GetDcAdc(7);
    fTI_ADC1_4 = PS_GetDcAdc(4);
    fTI_ADC1_6 = PS_GetDcAdc(6);
    fTI_DIN2_4 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 11)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 27)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 6)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_2 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 13)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_3 = (PS_GetDigitInB() & ((Uint32)1 << (34 - 32))) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_4 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 7)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_5 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 15)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_6 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 16)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN1_7 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 17)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN2 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 18)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN2_1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 19)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN2_2 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 31)) ? 1 : 0;
    fTI_DIN2_3 = (PS_GetDigitInA() & ((Uint32)1 << 30)) ? 1 : 0;
    fTI_ADC1_2 = PS_GetDcAdc(2);
    fC1 = 1.4355;
    fSUM1 = fTI_ADC1_1 - fC1;
    fC2 = 17.2;
    fMULT1 = fSUM1 * fC2;
#ifdef _DEBUG
    fGblIFase_A = fMULT1;
#endif
    fC9 = 1.4355;
    fSUM5 = fTI_ADC1 - fC9;
    fC10 = 625;
    fMULT5 = fSUM5 * fC10;
#ifdef _DEBUG
    fGblVFase_A = fMULT5;
#endif
    fC3 = 1.4355;
    fSUM2 = fTI_ADC1_3 - fC3;
    fC4 = 17.2;
    fMULT2 = fSUM2 * fC4;
#ifdef _DEBUG
    fGblIFase_B = fMULT2;
#endif
    fC5 = 1.4355;
    fSUM3 = fTI_ADC1_5 - fC5;
    fC6 = 17.2;
    fMULT3 = fSUM3 * fC6;
#ifdef _DEBUG
    fGblIFase_C = fMULT3;
#endif
    fC7 = 1.4355;
    fSUM4 = fTI_ADC1_7 - fC7;
    fC8 = 17.2;
    fMULT4 = fSUM4 * fC8;

```

```

#ifdef _DEBUG
    fGblIFase_D = fMULT4;
#endif
    fC13 = 1.4355;
    fSUM7 = fTI_ADC1_4 - fC13;
    fC14 = 625;
    fMULT7 = fSUM7 * fC14;
#ifdef _DEBUG
    fGblVFase_C = fMULT7;
#endif
    fC15 = 1.4355;
    fSUM8 = fTI_ADC1_6 - fC15;
    fC16 = 625;
    fMULT8 = fSUM8 * fC16;
#ifdef _DEBUG
    fGblVFase_D = fMULT8;
#endif
    fNOT1 = !fTI_DIN1;
    fNOT2 = !fTI_DIN1_1;
    fXOR1 = (fNOT1 != 0) ^ (fNOT2 != 0);
    fNOT3 = !fTI_DIN1_2;
    fXOR2 = (fXOR1 != 0) ^ (fNOT3 != 0);
    fNOT4 = !fTI_DIN1_3;
    fXOR3 = (fXOR2 != 0) ^ (fNOT4 != 0);
    fNOT5 = !fTI_DIN1_4;
    fXOR4 = (fXOR3 != 0) ^ (fNOT5 != 0);
    fNOT6 = !fTI_DIN1_5;
    fXOR5 = (fXOR4 != 0) ^ (fNOT6 != 0);
    fNOT7 = !fTI_DIN1_6;
    fXOR6 = (fXOR5 != 0) ^ (fNOT7 != 0);
    fNOT8 = !fTI_DIN1_7;
    fXOR7 = (fXOR6 != 0) ^ (fNOT8 != 0);
    fNOT9 = !fTI_DIN2;
    fXOR8 = (fXOR7 != 0) ^ (fNOT9 != 0);
    fNOT10 = !fTI_DIN2_1;
    fXOR9 = (fXOR8 != 0) ^ (fNOT10 != 0);
    {
        static float posdec = 0, conv = 0, resol = 0.3515625;

        static int aux1 = 0;

        posdec = (512*fNOT1 + 256*fXOR1 + 128*fXOR2 + 64*fXOR3 +
32*fXOR4 + 16*fXOR5 + 8*fXOR6 + 4*fXOR7 + 2*fXOR8 + 1*fXOR9)*resol;

        if ((posdec >= 0.0 && posdec <= 15.0) || (posdec > 60.0 &&
posdec <= 75.0) || (posdec > 120.0 && posdec <= 135.0) || (posdec > 180.0
&& posdec <= 195.0) || (posdec > 240.0 && posdec <= 255.0) || (posdec >
300.0 && posdec <= 315.0))
        {
            fSSCB2=1;
        }

        if ((posdec > 15.0 && posdec <= 30.0) || (posdec > 75.0 &&
posdec <= 90.0) || (posdec > 135.0 && posdec <= 150.0) || (posdec > 195.0
&& posdec <= 210.0) || (posdec > 255.0 && posdec <= 270.0) || (posdec >
315.0 && posdec <= 330.0))
        {
            fSSCB2=2;
        }
    }

```

```

        if ((posdec > 30.0 && posdec <= 45.0) || (posdec > 90.0 &&
posdec <= 105.0) || (posdec > 150.0 && posdec <= 165.0) || (posdec > 210.0
&& posdec <= 225.0) || (posdec > 270.0 && posdec <= 285.0) || (posdec >
330.0 && posdec <= 345.0))
        {
            fSSCB2=3;
        }

        if ((posdec > 45.0 && posdec <= 60.0) || (posdec > 105.0 &&
posdec <= 120.0) || (posdec > 165.0 && posdec <= 180.0) || (posdec > 225.0
&& posdec <= 240.0) || (posdec > 285.0 && posdec <= 300.0) || (posdec >
345.0 && posdec <= 360.0))
        {
            fSSCB2=4;
        }

        conv = ((int)posdec)%60;

        if (aux1 == 0)
        {
            aux1 = 1;
        }

        else
        {
            aux1 = 0;
        }

        fSSCB2_1 = aux1;
        fSSCB2_2 = conv;
    }

#ifdef _DEBUG
    fGblPos = fSSCB2;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblconv = fSSCB2_2;
#endif

    fC11 = 1.4355;
    fSUM6 = fTI_ADC1_2 - fC11;
    fC12 = 625;
    fMULT6 = fSUM6 * fC12;
    {
        // fTI_DIN2_4 - Chave on/off
        // fSSCB2 - Posição do rotor
        // fMULT1 - Corrente da fase A
        // fMULT2 - Corrente da fase B
        // fMULT3 - Corrente da fase C
        // fMULT4 - Corrente da fase D
        // fMULT8 - Tensão da fase D
        // fMULT7 - Tensão da fase C
        // fMULT6 - Tensão da fase B
        // fMULT5 - Tensão da fase A
        // fSSCB1 e fSSCB1_1 - Chaves da fase A
        // fSSCB1_2 e fSSCB1_3 - Chaves da fase B
        // fSSCB1_4 e fSSCB1_5 - Chaves da fase C
        // fSSCB1_6 e fSSCB1_7 - Chaves da fase D
    }

```

```

static float lim_sup = 7.5;
static float lim_inf = 5.5;

fSSCB1_8 = lim_sup;
fSSCB1_9 = lim_inf;

if (fTI_DIN2_4==1) //Se a chave on/off estiver na posição on.
{
    if(fSSCB2==1) //Angulo de condução da fase A.
    {
        fSSCB1_2=0;
        fSSCB1_3=0;
        fSSCB1_4=0;
        fSSCB1_5=0;
        fSSCB1_6=0;
        fSSCB1_7=0;

        if(fMULT1 >= lim_sup)
        {
            fSSCB1=1;
            fSSCB1_1=0;
        }

        if(fMULT1 <= lim_inf)
        {
            fSSCB1=1;
            fSSCB1_1=1;
        }
    }

    if(fSSCB2==2) //Angulo de condução da fase B.
    {
        fSSCB1=0;
        fSSCB1_1=0;
        fSSCB1_4=0;
        fSSCB1_5=0;
        fSSCB1_6=0;
        fSSCB1_7=0;

        if(fMULT2 >= lim_sup)
        {
            fSSCB1_2=1;
            fSSCB1_3=0;
        }

        if(fMULT2 <= lim_inf)
        {
            fSSCB1_2=1;
            fSSCB1_3=1;
        }
    }

    if(fSSCB2==3) //Angulo de condução da fase C.
    {
        fSSCB1=0;
        fSSCB1_1=0;
        fSSCB1_2=0;
        fSSCB1_3=0;
        fSSCB1_6=0;
        fSSCB1_7=0;
    }
}

```

```

        if(fmULT3 >= lim_sup)
        {
            fSSCB1_4=1;
            fSSCB1_5=0;
        }

        if(fmULT3 <= lim_inf)
        {
            fSSCB1_4=1;
            fSSCB1_5=1;
        }
    }

    if(fSSCB2==4) //Angulo de condução da fase D.
    {
        fSSCB1=0;
        fSSCB1_1=0;
        fSSCB1_2=0;
        fSSCB1_3=0;
        fSSCB1_4=0;
        fSSCB1_5=0;

        if(fmULT4 >= lim_sup)
        {
            fSSCB1_6=1;
            fSSCB1_7=0;
        }

        if(fmULT4 <= lim_inf)
        {
            fSSCB1_6=1;
            fSSCB1_7=1;
        }
    }
}

if (FTI_DIN2_4==0) //Se a chave on/off estiver na posição off.
{
    fSSCB1=0;
    fSSCB1_1=0;
    fSSCB1_2=0;
    fSSCB1_3=0;
    fSSCB1_4=0;
    fSSCB1_5=0;
    fSSCB1_6=0;
    fSSCB1_7=0;
}

}

#ifdef _DEBUG
    fGbly1 = fSSCB1;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGbly2 = fSSCB1_1;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGbly3 = fSSCB1_2;
#endif

```

```

#ifdef _DEBUG
    fGblY4 = fSSCB1_3;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblY5 = fSSCB1_4;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblY6 = fSSCB1_5;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblY7 = fSSCB1_6;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblY8 = fSSCB1_7;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblLim_sup = fSSCB1_8;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblLim_inf = fSSCB1_9;
#endif

#ifdef _DEBUG
    fGblV25 = fTI_ADC1_1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV26 = fSUM1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV28 = fSUM5;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblChave_geral = fTI_DIN2_4;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblV27 = fTI_ADC1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblVFase_B = fMULT6;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit9_MSB = fNOT1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit8 = fXOR1;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit7 = fXOR2;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit6 = fXOR3;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit5 = fXOR4;
#endif

```

```

#ifdef _DEBUG
    fGblBit4 = fXOR5;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit3 = fXOR6;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit2 = fXOR7;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit1 = fXOR8;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblBit0_LSB = fXOR9;
#endif
    (fSSCB1 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 21) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 21);
    (fSSCB1_1 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 23) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 23);
    (fSSCB1_2 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 0) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 0);
    (fSSCB1_3 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 1) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 1);
    (fSSCB1_4 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 2) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 2);
    (fSSCB1_5 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 3) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 3);
    (fSSCB1_6 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 4) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 4);
    (fSSCB1_7 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 5) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 5);
    (fSSCB2_1 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitB((Uint32)1 << (32 - 32)) :
PS_SetDigitOutBitB((Uint32)1 << (32 - 32));
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 3, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 4, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 5, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 6, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 7, 1.0);
    PS_AdcInit(0, !0);
    PS_InitDigitIn(27, 100);
    PS_InitDigitIn(6, 100);
    PS_InitDigitIn(13, 100);
    PS_InitDigitIn(34, 100);
    PS_InitDigitIn(7, 100);
    PS_InitDigitIn(15, 100);
    PS_InitDigitIn(16, 100);
    PS_InitDigitIn(17, 100);
    PS_InitDigitIn(18, 100);
    PS_InitDigitIn(19, 100);
    PS_InitDigitIn(31, 100);
    PS_InitDigitIn(30, 100);
}

```

```
    PS_InitDigitIn(11, 100);
    PS_InitDigitOut(21);
    PS_InitDigitOut(23);
    PS_InitDigitOut(0);
    PS_InitDigitOut(1);
    PS_InitDigitOut(2);
    PS_InitDigitOut(3);
    PS_InitDigitOut(4);
    PS_InitDigitOut(5);
    PS_InitDigitOut(32);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr();    //Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
        Task();
    }
}
```

Referências bibliográficas

- [1] KRISHNAN, R. **Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications**. CRC Press, 2001, 432, ISBN-10: 0849308380.
- [2] SILVEIRA, A. W. F. V. D. **Controle de tensão na carga para motor/gerador a relutância variável de três fases**. 2011. 202 (Doutor em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [3] VIAJANTE, G. P. **Gerador a relutância variável em conexão com a rede elétrica para injeção de potência ativa**. 2013. 169 (Doutor em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [4] DIAS, R. J. **Motores a relutância variável 6x4 e 6x6. Estudo comparativo de operação e desempenho**. 2011. 116 (Mestre em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [5] COELHO, A. **Simulação, projeto e teste de um gerador a relutância chaveado trifásico 6x4**. 2011. 152 (Mestre em engenharia elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [6] VIJAYRAGHAVAN, P. **Design of switched reluctance motors and development of a universal controller for switched reluctance and permanent magnet brushless DC motor drives**. 2001. 215 (Doctor of philosophy in electrical engineering). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [7] MILLER, T. J. E. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines**. Newnes, 2001, 272. ISBN ISBN-10: 0750650737.
- [8] OLIVEIRA, E. S. L. D. **Projeto, construção, simulação, implementação e testes de um gerador a relutância chaveado monofásico**. 2011. 138 (Mestre em engenharia elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

-
- [9] COSTA, R. D. S. **Análise, projeto e construção do motor monofásico à relutância chaveado: uma solução eficiente para cargas de potência fracionária**. 2004. 158 (Mestre em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [10] MORAES FILHO, M. J. et al. **Projeto de máquina a relutância variável 8/6 e impacto do ângulo do polo do rotor em seu desempenho**. XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2016. Vitória - ES: 1644-1649 p. 2016.
- [11] SILVA, F. D. S. E. **Bancada de simulação de cargas mecânicas para motor de indução trifásico acionado por conversor de frequência**. 2015. 124 (Mestre em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [12] BERNARDELI, V. R. **Estudo sobre comportamento do gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado**. 2014. 160 (Doutor em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [13] ANDRADE, D. A.; KRISHNAN, R. Characterization of switched reluctance machines using Fourier series approach. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 2001, Sept. 30 2001-Oct. 4 2001. p.48-54 vol.1.
- [14] Fuji Electric Co., Ltd. **Datasheet IGBT Module 6MBI100S-060**. 2003. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/217771/FUJI/6MBI100S-060.html>, acessado em 15/12/2016.
- [15] POMILIO, J. A. “Apostila de Eletrônica de potência”, Universidade Estadual de Campinas.
- [16] Koyo Electronics Industries Co., Ltd. **TRD-NA Series**: 468-471 p. 2016. http://www.koyoele.co.jp/english/product/encoder/pdf/TRD_NA.pdf, acessado em 15/12/2016.

-
- [17] MILLER, T. J. E. **Switched Reluctance Motors and Their Control**. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993, 200. ISBN ISBN-10: 0198593872.
- [18] LE-HUY, H.; BRUNELLE, P. A versatile nonlinear switched reluctance motor model in Simulink using realistic and analytical magnetization characteristics. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005., 2005, 6-10 Nov. 2005. p.6 pp.
- [19] KEYAN, J.; ZHUO, Z. Study on direct torque control system of switched reluctance motor. 2011 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), 2011, 3-5 Aug. 2011. p.904-908.
- [20] PETRUȘ, V. et al. Direct torque control of a 4-phase Switched Reluctance Machine. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, 2011, 8-10 Sept. 2011. p.270-275.
- [21] KUMAR, M. K.; MURTHY, G. R. K. Performance of 8/6 switched reluctance motor in open loop and closed loop control with various converter topologies. 2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG), 2014, 19-20 Sept. 2014. p.1-7.
- [22] DONG, M. Research on Reduction the Torque Ripple in Switched Reluctance Motor. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 2016, 4-6 July 2016. p.1071-1074.
- [23] PRASAD, N.; JAIN, S. Simulation of Switched Reluctance Motor for Performance Analysis Using MATLAB/SIMULINK Enviroment and use of FPGA for its control. **International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering 1(1): 91-98(2012)**, p. 8, 2012. ISSN 2277-2626.
- [24] SRIVASTAVA, K. et al. Simulation and Modeling of 8/6 Switched Reluctance Motor Using Digital Controller. **International Journal of Electronics Engineering, 3 (2), 2011, pp. 241- 246**, p. 7, 2011. ISSN 0973-7383.

-
- [25] Spectrum Digital Incorporated, **eZdspTMF28335 - Technical Reference**. 2007. http://c2000.spectrumdigital.com/ezf28335/docs/ezdspf28335c_techref.pdf, acessado em 08/09/2016.
- [26] BIANCHI, R. B.; ANDRADE, D. A. **Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos**. XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica - XI CBQEE. Campina Grande - PB, 2015.
- [27] RADUN, A. Generating with the switched reluctance motor. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. APEC '94. Conference Proceedings 1994., Ninth Annual, 1994, 13-17 Feb 1994. p.41-47 vol.1.
- [28] CHEN, H.; GU, J. J. Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 15, n. 3, p. 421-432, 2010. ISSN 1083-4435.
- [29] RAHMAN, K. M. et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 1, p. 111-121, 2000. ISSN 0093-9994.
- [30] SHUANGHONG, W. et al. Implementation of a 50-kW four-phase switched reluctance motor drive system for hybrid electric vehicle. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 41, n. 1, p. 501-504, 2005. ISSN 0018-9464.
- [31] KIYOTA, K.; CHIBA, A. Design of Switched Reluctance Motor Competitive to 60-kW IPMSM in Third-Generation Hybrid Electric Vehicle. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 6, p. 2303-2309, 2012. ISSN 0093-9994.
- [32] XUE, X. D. et al. Multi-Objective Optimization Design of In-Wheel Switched Reluctance Motors in Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 9, p. 2980-2987, 2010. ISSN 0278-0046.

-
- [33] RILEY, C. P. et al. Simulation based design of reluctance motors for traction applications in hybrid and electric vehicles. 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014, 8-10 April 2014. p.1-6.
- [34] ARYANEZHAD, M. 85A novel designing approach to dual rotor switched reluctance motor based electric vehicles. 2015 30th International Power System Conference (PSC), 2015, 23-25 Nov. 2015. p.54-59.
- [35] SUN, M. et al. Design and Optimization of Switched Reluctance Motor for Propulsion System of Small Electric Vehicle. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016, 17-20 Oct. 2016. p.1-5.
- [36] RAFAJDUS, P. et al. Efficiency and losses analysis in switched reluctance motors for electric vehicles. 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), 2015, 2-4 Sept. 2015. p.705-710.
- [37] SILVEIRA, A. F. V. D. **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado**. 2008. 258 (Doutor em engenharia elétrica). Faculdade de engenharia elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.
- [38] Nidec, <http://www.srdrives.com/land-rover.shtml>, acessado em 10/12/2016.
- [39] Drives&Controls, http://drivesncontrols.com/news/fullstory.php/aid/3872/Switched_reluctance_motors_power_electric_Land_Rovers.html, acessado em 10/12/2016.
- [40] Nidec, <http://www.srdrives.com/green-propulsion.shtml>, acessado em 10/12/2016.
- [41] Nidec, <http://www.srdrives.com/starter-generator.shtml>, acessado em 10/12/2016.