

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**MODELAGEM MATEMÁTICA E SISTEMA EMBARCADO EM
DSP/FPGA PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM GRV 8/6
COM ESTIMATIVA EM TEMPO REAL DAS CURVAS DE
INDUTÂNCIA E CONJUGADO**

RICARDO TIRONE FIDELIS

JUNHO

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E SISTEMA EMBARCADO EM
DSP/FPGA PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM GRV 8/6
COM ESTIMATIVA EM TEMPO REAL DAS CURVAS DE
INDUTÂNCIA E CONJUGADO

Dissertação apresentada por **Ricardo Tirone Fidelis** à
Universidade Federal de Uberlândia para **obtenção do**
título de Mestre em Engenharia Elétrica, realizada em
27/06/2018 pela banca examinadora:

Prof. **Luciano Coutinho Gomes**, Dr. (UFU) – Orientador
Prof. **Ghunter Paulo Viajante**, Dr. (IFG) - Coorientador
Prof. **Darizon Alves de Andrade**, Dr. (UFU)
Prof. **José Luis Domingos**, Dr. (IFG)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E SISTEMA EMBARCADO EM
DSP/FPGA PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM GRV 8/6
COM ESTIMATIVA EM TEMPO REAL DAS CURVAS DE
INDUTÂNCIA E CONJUGADO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR RICARDO TIRONE FIDELIS À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCIANO COUTINHO GOMES, dr
Orientador

GHUNTER PAULO VIAJANTE, dr
Co-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.

F451m
2018 Fidelis, Ricardo Tirone, 1986-
 Modelagem matemática e sistema embarcado em DSP/FPGA para
 acionamento e controle de um GRV 8/6 e estimativa em tempo real das
 curvas de indutância e conjugado / Ricardo Tirone Fidelis. - 2018.
 176 f. : il.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.

Coorientador: Ghunter Paulo Viajante.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1152>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Máquinas elétricas - Modelos matemáticos - Teses. 3. Máquinas elétricas - Simulação (Computadores) - Teses. 4. - Teses. I. Gomes, Luciano Coutinho. II. Viajante, Ghunter Paulo. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

DEDICATÓRIA

A minha família e a todos amigos que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu concluísse essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa mais um sonho realizado, e uma nova etapa que se inicia. Não posso deixar de agradecer a dádiva da vida e as graças que tenho recebido de Deus.

Agradeço a meus pais **Marcos dos Santos Fidelis** e **Aparecida Tirone Fidelis** e minha querida irmã **Hérica Tirone Fidelis**, que não mediram esforços para que fosse possível concluir mais esta etapa de minha vida.

Agradeço aos amigos, professores e orientadores **Luciano Coutinho Gomes** e **Darizon Alves de Andrade**, que acreditaram em minhas capacidades e no meu potencial de desenvolver este projeto me apoiando e dando suporte sempre, agradeço também aos colegas da UFU que tive o prazer de dividir muitas horas de estudos, trabalho e diversão.

Agradeço o professor, amigo e co-orientador deste trabalho **Ghunter Paulo Viajante** que me acompanhou em todas as etapas até a conclusão deste trabalho, orientando, guiando e ensinando sempre com muita atenção, paciência e entusiasmo.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia por todo o apoio durante a construção deste projeto, especialmente aos amigos e professores **Eric Neri Chaves** e **Marcos Antônio Arantes de Freitas**.

Agradeço à Escola SENAI de Itumbiara, por ter acreditado em meu potencial e incentivado a minha formação profissional, especialmente os colegas de trabalho **Jozaldo José da Costa**, **Juliano Marcelino Ribeiro** e **Claiton Candido Vieira** que contribuíram ativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agraço a **todos os amigos** e companheiros que tive o privilégio de conviver, em especial ao colega de classe e irmão na amizade **Fabício Ferreira Mendonça** pelo apoio em todos os momentos de dificuldade no desenvolvimento deste trabalho e na vida pessoal.

“Quem duvida da vida tem culpa
Quem evita a dúvida também tem”
Gessinger, H.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo da Máquina a Relutância Variável, apresentando a construção de uma plataforma experimental capaz de realizar o acionamento da Máquina a Relutância Variável como gerador, disponibilizando todos os circuitos, componentes e elementos necessários ao acionamento da máquina. Foi desenvolvido um algoritmo para o acionamento utilizando DSP/FPGA, ambos conectados a um sistema supervisorio desenvolvido especificamente para este trabalho. É apresentado uma análise das curvas de indutância da MRV e desenvolvida uma modelagem matemática que permite reproduzir as curvas através de polinômios para utilização em ferramentas de simulação e no acionamento para estimação da indutância instantânea e conjugado. Também é apresentado um estudo do comportamento dinâmico da MRV operando como gerador em relação a modificação de alguns parâmetros operacionais como carga, velocidade, tensão de excitação, ângulos de chaveamento e falta de fase.

Palavras-chave: Máquina a Relutância Variável, Gerador, Bancada de Acionamento, Estimador em Tempo Real da Indutância.

ABSTRACT

This work presents a contribution to the study of the Variable Reluctance Machine, presenting the construction of an experimental platform capable of carrying out the reluctance of the machine as a generator, making available all the circuits, components and elements necessary to drive the machine. An algorithm was developed for the drive using DSP / FPGA, both connected to a supervisory system developed specifically for this work. An analysis of MRV inductance curves is presented and a mathematical modeling is developed that allows to reproduce the curves through polynomials for use in simulation tools and in the drive for estimation of the instantaneous and torque inductance. It is also presented a study of the dynamic behavior of the Switched Reluctance Machine operating as a generator in relation to the modification of some operational parameters such as load, speed, excitation voltage, switching angles and lack of phase.

Keywords: Switched Reluctance Machine, Generator, Workbench for Drive, Inductance estimator.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Estrutura de uma MRV..... | 25 |
| Figura 2.2 - Características de uma Solenóide..... | 25 |
| Figura 2.3 - Perfil de indutância incremental para diferentes valores de corrente e posição..... | 27 |
| Figura 2.4 - Perfil de indutância e pulso de acionamento de uma fase do Gerador a Relutância Variável. ... | 28 |
| Figura 2.5 - Conversor half-bridge utilizado para acionar o GRV..... | 29 |
| Figura 2.6 - Circuito de magnetização das fases do GRV..... | 29 |
| Figura 2.7 - Circuito de desmagnetização do GRV..... | 29 |
| Figura 2.8 - Elevação das turbinas eólicas [13],[14]..... | 31 |
| Figura 2.9 - Potência elétrica gerada por turbinas eólicas [13],[14]..... | 31 |
| Figura 2.10 - circuito de uma única fase do GRV..... | 33 |
| Figura 2.11 - Curva de Magnetização típica para uma fase do Gerador..... | 35 |
| Figura 3.1 - Curvas de Indutâncias obtidas por elementos finitos..... | 39 |
| Figura 3.2 - Comportamento da indutância para diferentes valores de corrente..... | 40 |
| Figura 3.3 - Comportamento da indutância para diferentes posições angulares..... | 41 |
| Figura 3.4 - Curvas de níveis para a indutância obtida a partir de elementos finitos..... | 42 |
| Figura 3.5 - Mapas de contorno para a indutância, obtidos a partir de elementos finitos..... | 42 |
| Figura 3.6 - Representação do vetor de base para normalização da curva..... | 43 |
| Figura 3.7 - Comportamento da indutância (p.u.) em função da posição angular e corrente após a primeira normalização..... | 44 |
| Figura 3.8 - Irregularidades resultantes da primeira normalização..... | 44 |
| Figura 3.9 - Curvas de nível da indutância normalizada..... | 45 |
| Figura 3.10 - Curva de nível da indutância não normalizada..... | 45 |
| Figura 3.11 - Curvas formadoras da indutância variável expressas em p.u..... | 46 |
| Figura 3.12 - Metodologia utilizada na determinação dos coeficientes..... | 48 |
| Figura 3.13 - Representação do comportamento do entreferro durante o alinhamento e desalinhamento dos polos..... | 48 |
| Figura 3.14 - Desenho Esquemático da MRV..... | 49 |
| Figura 3.15 - Curvas representando as dimensões do rotor e estator..... | 50 |
| Figura 3.16 - Forma de onda para um único período..... | 50 |
| Figura 3.17 - Formas de onda representadas no MatLAB..... | 51 |
| Figura 3.18 - Detalhamento da área do entreferro..... | 51 |
| Figura 3.19 - Representação da área máxima do entreferro..... | 52 |
| Figura 3.20 - Representação da área dos polos do estator que provocam a redução do entreferro..... | 52 |
| Figura 3.21 - Perfil da Relutância/Entreferro obtidos pela convolução, perfil esperado para a indutância.... | 53 |
| Figura 3.22 - Telas obtidas durante a simulação das equações..... | 55 |
| Figura 3.23 - Método de interpolação por splines cúbicas [34]..... | 56 |
| Figura 3.24 - Curva a ser modelada..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.25 - i -ésimo intervalo compreendido entre x_i e $x_{(i+1)}$ | 57 |
| Figura 3.26 - Curvas geradoras da indutância, obtidas pelos coeficientes. | 61 |
| Figura 3.27 - Composição das curvas "principais" e "residuais"..... | 61 |
| Figura 3.28 - Curva de indutância final gerada a partir dos coeficientes..... | 62 |
| Figura 3.29 - Comparação entre a curva original e a curva modelada..... | 62 |
| Figura 4.1 - Tela de configuração do modelo da MRV no PSIM..... | 66 |
| Figura 4.2 - Máquina a Relutância Variável na Simulação do PSIM..... | 66 |
| Figura 4.3 - Conversor de potência da simulação..... | 67 |
| Figura 4.4 - Arranjo simulando uma máquina de indução com controle de velocidade..... | 67 |
| Figura 4.5 - Bloco "wind turbine" utilizado para simular turbina eólica..... | 67 |
| Figura 4.6 - Determinação dos pulsos de disparo na simulação..... | 68 |
| Figura 4.7 - Determinação dos coeficientes para funções dos ângulos..... | 68 |
| Figura 4.8 - Determinação dos coeficientes para as funções dependentes da corrente..... | 69 |
| Figura 4.9 - Cálculo das curvas formadoras da indutância..... | 69 |
| Figura 4.10 - Curva da indutância principal em função do ângulo..... | 70 |
| Figura 4.11 - Curva da indutância residual em função do ângulo..... | 70 |
| Figura 4.12 - Curva da indutância principal em função da corrente..... | 71 |
| Figura 4.13 - Curva da indutância residual em função da corrente..... | 71 |
| Figura 4.14 - Curva final da indutância dependente da posição angular e da corrente..... | 72 |
| Figura 4.15 - Função que calcula a derivada parcial da indutância..... | 72 |
| Figura 4.16 - Derivada Parcial da Indutância em relação à posição rotórica..... | 73 |
| Figura 4.17 - Curvas formadoras da indutância estimadas durante a simulação..... | 74 |
| Figura 4.18 - Indutância estimada e corrente medida na fase da máquina..... | 75 |
| Figura 4.19 - Corrente e tensão nas fases, tensão na carga..... | 75 |
| Figura 4.20 - Correntes e tensões nas fases da máquina durante a simulação..... | 76 |
| Figura 4.21 - Derivada da indutância, Corrente e tensão na fase C e Conjugado medido..... | 77 |
| Figura 4.22 - Conjugado..... | 77 |
| Figura 4.23 - Rendimento estimado..... | 78 |
| Figura 4.24 - Estratégia de controle para a tensão gerada..... | 79 |
| Figura 4.25 - Malha de Controle da tensão gerada..... | 79 |
| Figura 4.26 - Formas de onda obtidas..... | 79 |
| Figura 5.1 - Diagrama simplificado de acionamentos para a MRV..... | 80 |
| Figura 5.2 - Conjunto MIT-MRV-Encoder montado e alinhado..... | 82 |
| Figura 5.3 - Bancada Finalizada..... | 82 |
| Figura 5.4 - Croqui com as dimensões do protótipo construído..... | 84 |
| Figura 5.5 - Estator da máquina construída..... | 84 |
| Figura 5.6 - Rotor do protótipo construído..... | 85 |
| Figura 5.7 - Rotor do protótipo construído montado junto ao estator..... | 85 |
| Figura 5.8 - Protótipo desmontado - Identificação das partes..... | 86 |
| Figura 5.9 - Imperfeições no acabamento do rotor..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.10 - Histograma e curva normal dos desvios encontrados | 87 |
| Figura 5.11 - circuito simplificado das conexões dos barramentos para o acionamento da MRV na função gerador e motor ou Gerador excitado..... | 89 |
| Figura 5.12 - esquemático completo do conversor utilizado para o acionamento da MRV. | 89 |
| Figura 5.13 - Arranjo feito entre os módulos IGBT. | 91 |
| Figura 5.14 - Módulos montados e interligados. | 91 |
| Figura 5.15 - Representação do momento de excitação no arranjo. | 92 |
| Figura 5.16 - Representação da etapa de roda livre para o acionamento como motor..... | 92 |
| Figura 5.17 - Representação da etapa de roda livre para o acionamento como gerador. | 93 |
| Figura 5.18 - Diagrama do circuito isolador de sinais. | 93 |
| Figura 5.19 - Gate Drive completo. | 94 |
| Figura 5.20 - Medição dos pulsos na entrada e saída do Gate Drive. | 94 |
| Figura 5.21 - Pulso de comando das quatro fases da máquina [Largura 15 Graus]..... | 95 |
| Figura 5.22 - NI MyRIO - Dispositivo de aquisição e processamento de sinais. | 95 |
| Figura 5.23 - Circuito esquemático do condicionador de sinais. | 97 |
| Figura 5.24 - Fotografia do condicionador de sinais. | 97 |
| Figura 5.25 - Função principal embarcada no DSP. | 99 |
| Figura 5.26 - Referência para os momentos de acionamento de cada uma das fases. | 100 |
| Figura 5.27 - Função para determinar os pulsos de acionamentos. | 100 |
| Figura 5.28 - Forma de onda da tensão durante o estado de motorização da MRV. | 102 |
| Figura 5.29 - Corrente durante o estado de motorização da MRV. | 102 |
| Figura 5.30 - Forma de onda da tensão na fase A da MRV durante o acionamento como Gerador..... | 103 |
| Figura 5.31 - Forma de onda da corrente na fase A da MRV durante o acionamento com gerador..... | 103 |
| Figura 5.32 - forma de onda da tensão na carga durante o acionamento como gerador. | 104 |
| Figura 5.33 - Tela principal da supervisão do acionamento. | 104 |
| Figura 6.1 - Tensão gerada em função da tensão de excitação e largura do pulso de acionamento. | 106 |
| Figura 6.2 - Tensão gerada em função da tensão de excitação para diferentes valores largura de pulsos.... | 107 |
| Figura 6.3 - Tensão gerada em função da largura de pulso para diferentes valores de tensão de excitação. | 107 |
| Figura 6.4 -Potência gerada em função da tensão de excitação e variação do pulso de acionamento. | 108 |
| Figura 6.5 - Potência gerada em função da tensão de excitação para diferentes larguras de pulsos de acionamento. | 108 |
| Figura 6.6 - Potência gerada em função da largura de pulso para diferentes valores de tensão de excitação. | 109 |
| Figura 6.7 - Estimativa da potência drenada da excitação para diferentes larguras de pulso | 109 |
| Figura 6.8 - Estimativa de potência drenada da fonte de excitação para diferentes tensões de excitação. ... | 110 |
| Figura 6.9 - Corrente e tensão medida para a variação da carga. | 112 |
| Figura 6.10 - Tensão medida para a condição de acionamento com maior carga..... | 112 |
| Figura 6.11 - Corrente e estimativa da potência drenada na fonte de excitação. | 113 |
| Figura 6.12 - Esquema simplificado do controle da velocidade da máquina de indução. | 114 |
| Figura 6.13 - Tensão registrada para um perfil de velocidade senoidal. | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.14 - Tensão registrada para um perfil de velocidade triangular. | 115 |
| Figura 6.15 - Tensão registrada para um perfil de velocidade do tipo dente de serra..... | 116 |
| Figura 6.16 - Perfil de tensão registrado para variações em degraus na velocidade..... | 117 |
| Figura 6.17 - Ensaio de referência com as quatro fases acionadas, Vgerada x Tensão de excitação. | 118 |
| Figura 6.18 - Ensaio de referência com as quatro fases acionadas, Vgerada x Largura do pulso de acionamento. | 118 |
| Figura 6.19 - Registro das medições com o acionamento com 3 fases. Vgerada x Largura do pulso de excitação. | 119 |
| Figura 6.20 - Registro do acionamento com 3 fases, Vgerada x Tensão de excitação. | 119 |
| Figura 6.21 - Comparação para cada uma condição de funcionamento analisada..... | 120 |
| Figura 6.22 - Estratégia de controle implementada. | 121 |
| Figura 6.23 - Código fonte do controle (LabVIEW) | 122 |
| Figura 6.24 - Tensão Gerada e sinal de referência | 122 |
| Figura 6.25 - Sinal de controle (Largura do Pulso de Acionamento) | 123 |
| Figura 7.1 - Fotografia da bancada de medição..... | 125 |
| Figura 7.2 - Esquema de conexão dos medidores..... | 126 |
| Figura 7.3 - Tela do analisador durante uma das medições..... | 128 |
| Figura 7.4 - Conexão das fases da máquina no segundo teste..... | 128 |
| Figura 7.5 - Fator para as fases conectadas em série..... | 129 |
| Figura 7.6 - Tensão e Corrente Medidas na fase A da MRV..... | 130 |
| Figura 7.7 - Corrente e tensões medidas..... | 130 |
| Figura 7.8 - Tela de supervisão dos valores estimados..... | 132 |
| Figura 7.9 - Código para envio dos dados armazenados para as saídas analógicas..... | 133 |
| Figura 7.10 - Derivada da indutância e conjugado estimado..... | 134 |
| Figura 7.11 - Corrente e indutância estimada para a fase B. | 134 |
| Figura 7.12 - Indutância Instantânea e Corrente..... | 135 |
| Figura 7.13 - Derivada da indutância | 135 |
| Figura 7.14 - Curvas de Indutância e a derivada em relação à posição angular. | 136 |
| Figura 7.15 - Comparação entre valores estimados e simulados. | 136 |
| Figura 7.16 - Curvas coletadas. | 137 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 - Pontos utilizados para determinação dos coeficientes.----- | 59 |
| Tabela 3.2 - Coeficientes utilizados para as curvas dependentes da posição angular. ----- | 60 |
| Tabela 3.3 - Coeficientes utilizados para as curvas dependente da corrente. ----- | 60 |
| Tabela 5.1 - Componentes da bancada. ----- | 83 |
| Tabela 5.2 - Posições de alinhamento entre o rotor e estator no protótipo. ----- | 88 |
| Tabela 5.3 - Configuração dos relés para cada tipo de acionamento. ----- | 90 |
| Tabela 5.4 - Identificação das entradas e saídas utilizadas/disponíveis. ----- | 96 |
| Tabela 6.1 - Resumo do ensaio de variação da excitação e pulsos de acionamento.----- | 110 |
| Tabela 6.2 - Condições de cargas utilizadas para o ensaio. ----- | 111 |
| Tabela 6.3 - Síntese dos resultados. ----- | 121 |
| Tabela 7.1 - Instrumentos utilizados para ensaio. ----- | 125 |
| Tabela 7.2 - Valores Medidos no ensaio. ----- | 126 |
| Tabela 7.3 - Valores apurados e calculados. ----- | 127 |
| Tabela 7.4 - Valores medidos no segundo ensaio ----- | 128 |
| Tabela 7.5 - Valores calculados no segundo ensaio. ----- | 129 |
| Tabela 7.6 - Resumo dos resultados do ensaio. ----- | 129 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| A | Corrente em Amperes |
| a | Coefficiente para curva de indutância principal |
| AC | <i>Alternating Current</i> |
| b | Coefficiente para curva de indutância principal |
| c | Coefficiente para curva de indutância principal |
| CLB | <i>Configurable Logic Blocks</i> |
| D | Coefficiente de atrito viscoso |
| d | Coefficiente para curva de indutância principal |
| DC | <i>Direct Current</i> |
| e | Coefficiente para curva de indutância principal |
| Estator | Curva representando as dimensões físicas do estator |
| Estator' | Curva modificada para o estator |
| Estator'' | Curva final do estator. |
| f | Coefficiente para curva de indutância principal |
| Fmm | Forma magnetomotriz |
| FPGA | <i>Field Programmable Gate Arrays</i> |
| g | Coefficiente para curva de indutância principal |
| GRV | Gerador a Relutância Variável |
| h | Coefficiente para curva de indutância principal |
| HB | <i>Half-Bridge</i> |
| i | Corrente Elétrica |
| I | Coefficiente para curva de indutância residual |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| J | Momento de inércia |
| j | Coefficiente para curva de indutância residual |
| k | Coefficiente para curva de indutância residual |
| L | Coefficiente para curva de indutância residual |
| $l(i, \theta)$ | Indutância da máquina dependente da posição angular e da corrente |
| $L_p(i)$ | Curva principal da indutância, dependente apenas da corrente. |

| | |
|------------------|--|
| $LP(i, \theta)$ | Indutância principal |
| $l_p(\theta)$ | Curva principal da indutância, dependente apenas da posição angular (p.u.) |
| $l_r(i)$ | Indutância Residual dependente da corrente (p.u.) |
| $L_r(i, \theta)$ | Indutância residual |
| $L_r(\theta)$ | Indutância Residual dependente da posição angular (p.u.) |
| LUT | LookUp tables |
| MAX_p | Valor Máximo da Indutância Principal |
| MAX_r | Valor Máximo da Indutância Residual |
| μ_0 | Permeabilidade magnética do enrolamento |
| MRV | Máquina a Relutância Variável |
| N | Número de espiras do enrolamento |
| n | Coefficiente para curva de indutância residual |
| NI | <i>National Instruments</i> |
| ω | Velocidade |
| o | Coefficiente para curva de indutância residual |
| ϕ | Fluxo Magnético |
| p | Coefficiente para curva de indutância residual |
| PI | Proporcional, Integral |
| RAM | <i>Random Access memory</i> |
| RIO | <i>Recordable Input Output</i> |
| RPM | Rotações por Minutos |
| Rotor | Curva representando as dimensões físicas do rotor |
| Rotor' | Curva modificada para o rotor |
| Rotor'' | Curva final do rotor. |
| RT | <i>Real Time</i> |
| t | Tempo em segundos |
| T_e | Conjugado Eletromagnético |
| u | Função degrau unitário |
| θ_{on} | Ângulo inicial para a magnetização da fase |
| θ_{off} | Ângulo final para a magnetização da fase |
| θ | Ângulo ou posição angular |
| T_m | Conjugado mecânico |

| | |
|----|---------------------|
| V | Tensão em Volts |
| v | Tensão elétrica |
| W | Potência em Watts |
| W' | Co-energia |
| * | Operador Convolução |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 - Considerações Iniciais | 21 |
| 1.1 Objetivo Geral | 22 |
| 1.2 Objetivos Específico..... | 22 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho | 23 |
| Capítulo 2 - Máquina a Relutância Variável | 24 |
| 2.1 Gerador A Relutância Variável..... | 27 |
| 2.2 Aplicações do Gerador A Relutância Variável | 30 |
| 2.2.1 Aplicações em Geração Eólica | 30 |
| 2.2.2 Aplicações Aeronáutica e Espacial..... | 32 |
| 2.2.3 Aplicações Automotivas | 32 |
| 2.3 Equações elétricas e mecânicas | 33 |
| Capítulo 3 - Modelagem das Curvas de Indutância | 39 |
| 3.1.1 Modelo Matemático para as curvas de Indutância a partir da geometria da máquina..... | 48 |
| 3.1.2 Modelagem polinomial de curvas utilizando splines cúbicas | 55 |
| 3.1.3 Determinação das curvas de Indutância..... | 58 |
| 3.1.4 Simplificação do modelo..... | 62 |
| Capítulo 4 - Ferramenta Computacional para Simulação | 66 |
| 4.1 Circuito Elétrico - Software PSIM..... | 66 |
| 4.1.1 Estimador de Indutância e estimador de conjugado..... | 68 |
| 4.2 Resultados da Simulação | 73 |
| 4.2.1 Controle da tensão gerada..... | 78 |
| Capítulo 5 - Bancada de Acionamento | 80 |
| 5.1 Dispositivos Eletromecânicos e eletroeletrônicos de Acionamento | 81 |
| 5.1.1 Máquina a Relutância..... | 83 |
| 5.1.2 Conversor de Potência..... | 89 |
| 5.1.3 Circuito Isolador de Sinal - Gate Drive..... | 93 |
| 5.1.4 Dispositivo de processamento DSP/FPGA | 95 |
| 5.1.5 Conjunto de Cargas | 96 |
| 5.1.6 Transdutor de sinais | 96 |
| 5.2 Estratégia de acionamento | 98 |
| 5.3 Teste da Bancada | 101 |
| 5.3.1 Comissionamento e Testes Iniciais | 101 |
| 5.3.2 Software de Supervisão e Controle..... | 104 |

| | |
|--|------------|
| Capítulo 6 - Ensaio | 106 |
| 6.1 Ensaio com tensão de excitação variável e Largura de pulso variável | 106 |
| 6.2 Ensaio de Variação da Carga | 111 |
| 6.3 Ensaio com diferentes perfis de velocidades | 113 |
| 6.4 Ensaio com a falta de uma fase..... | 117 |
| 6.5 Síntese dos ensaios | 120 |
| 6.6 controle da tensão | 121 |
| Capítulo 7 - Estimador de Indutância | 124 |
| 7.1.1 Ensaio da Indutância | 124 |
| 7.1.2 Estimador da indutância instantânea | 130 |
| Capítulo 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 138 |
| RELAÇÃO DE PRODUTIVIDADE OBTIDA COM O TRABALHO | 140 |
| APENDICE A – CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO | 143 |
| APENDICE A1 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA EXTRAIR AS CURVAS DE INDUTÂNCIA | 143 |
| APENDICE A2 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA GERAR AS CURVAS A PARTIR DAS DIMENSÕES FÍSICA DA MRV | 144 |
| APENDICE A3 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA GERAR OS COEFICIENTES | 145 |
| APENDICE A4 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA RECOMPOR A FORMA DE ONDA TRIDIMENSIONAL A PARTIR DOS COEFICIENTES | 146 |
| APENDICE B – CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO | 147 |
| APENDICE B1 - VISÃO GERAL DA SIMULAÇÃO | 147 |
| APENDICE B2 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO | 148 |
| APENDICE B3 – CONVERSOR HALF-BRIDGE E CARGAS | 149 |
| APENDICE B4 – MÁQUINA A RELUTÂNCIA E PARAMETROS UTILIZADOS | 150 |
| APENDICE B5 – TABELA UTILIZADA PARA SIMULAÇÃO – INDUTÂNCIA | 151 |
| APENDICE B6 – CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR DE INDUÇÃO E CONTROLE DA TENSÃO GERADA | 160 |
| APENDICE B7 – LÓGICA DE DISPARO | 161 |
| APENDICE B8 – ESTIMADOR DE INDUTÂNCIA | 162 |
| APENDICE B9 – CÁLCULO DA INDUTÂNCIA E DAS DERIVADAS | 163 |
| APENDICE B10 – CÓDIGO FONTE DAS SUB-FUNÇÕES EM C | 164 |

| | |
|--|------------|
| APENDICE C – CÓDIGO FONTE DA APLICAÇÃO EMBARCADA..... | 166 |
| APENDICE C1 – TELA DE SUPERVISÃO E CONTROLE..... | 166 |
| APENDICE C2 – FUNÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DO ENCODER..... | 167 |
| APENDICE C3 – LEITURA DO ENCODER E DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO ATUAL..... | 168 |
| APENDICE C4 – VISÃO GERAL DA FUNÇÃO PRINCIPAL REAL TIME..... | 169 |
| APENDICE C5 – BLOCOS DA FUNÇÃO PRINCIPAL..... | 170 |
| REFERÊNCIAS..... | 173 |

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, os sistemas de acionamento de máquinas elétricas evoluíram de forma rápida, apresentando significativos avanços em termos de eficiência, precisão e potência convertida [1]. No âmbito destes avanços, novas máquinas passaram a fazer parte do conjunto de alternativas aplicáveis a sistemas de acionamento com velocidade variável. Dentro deste novo conjunto destacam-se as Máquinas a Relutância Variável (MRV).

Do ponto de vista construtivo, a MRV é robusta, simples de ser projetada e não possui enrolamentos no rotor, o que a torna mais barata em relação às máquinas elétricas de mesma potência e rotação.

Atualmente uma boa parcela de toda a energia elétrica produzida em uma nação industrializada é processada por motores elétricos como usuários finais. Na geração, apesar de técnicas recentes de aproveitamento de fontes alternativas, os geradores elétricos rotativos são responsáveis pela quase totalidade da energia elétrica produzida. De forma que a importância das máquinas elétricas no contexto global de gestão energética e de sustentabilidade não tem paralelos. Vem, portanto, a evidência de que a compreensão das características e demandas operacionais das máquinas elétricas devem estar sob contínua investigação, na busca constante por melhores índices de flexibilidade, rendimento e desempenho operacional.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo estudar o funcionamento da MRV, suas diversas áreas de aplicação, especialmente na geração eólica. Objetiva também o desenvolvimento de uma plataforma experimental para o acionamento de uma Máquina a Relutância 8/6, disponibilizando de forma didática e fácil utilização, todos os dispositivos, circuitos e recursos necessários ao acionamento e controle.

Busca-se ainda a realização de uma série de ensaios sobre o comportamento dinâmico da Máquina a Relutância Variável, como operação em malha aberta e fechada, acionamento em velocidades diferentes, diferentes tensões de excitação e ângulos de magnetização. e o desenvolvimento de uma metodologia para estimar a indutância instantânea da máquina.

Adicionalmente busca-se um modelo matemático capaz de estimar com precisão a indutância instantânea e conjugado da MRV 8/6.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo estudar o funcionamento da Máquinas a Relutância Variável 8/6, seus métodos de acionamento e ainda a construção de uma bancada para o acionamento de Máquinas a Relutância Variável acionada como gerador possibilitando a análise e avaliação do seu o comportamento dinâmico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

Este trabalho busca o estudo do funcionamento da Máquina a Relutância Variável 8/6 operando como gerador, desenvolvendo um modelo computacional capaz de simular o acionamento da MRV e também através do acionamento de um protótipo de MRV desenvolvido em uma parceria entre o NuPSE (Núcleo de Pesquisa em Sistemas de Energia) do Instituto Federal de Goiás e o LAcE (Laboratório de Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Uberlândia).

As metas do trabalho são:

1. Estudo da Máquina a Relutância Variável operando como gerador.
 2. Estudo das formas de acionamento e estratégias de controle.
 3. Desenvolver um modelo computacional que permita simular o comportamento do gerador.
 4. Desenvolver uma metodologia para estimar ou construir as curvas de indutâncias de uma máquina a relutância.
 5. Desenvolver uma bancada para acionamento da máquina, construindo, instalando e conectando todos os circuitos necessário ao seu acionamento e controle.
 6. Desenvolver um algoritmo para o acionamento da MRV.
 7. Acionar a Máquina a Relutância como gerador, operando em malha aberta e interpretando a influência das principais variáveis presente em seu acionamento.
 8. Estudar o comportamento dinâmico da Máquina a Relutância frente a oscilação e variação de alguns parâmetros, como ângulos de magnetização, velocidade e tensão de excitação.
 9. Contribuir cientificamente, publicando o trabalho em conferencias e periódicos.
 10. Propor novas pesquisas a partir do trabalho proposto.
-

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos e apresentação dos resultados este trabalho foi organizado da seguinte forma:

O **capítulo 2** apresenta a Máquina a Relutância Variável, descrevendo brevemente seu processo evolutivo e características que a tornam única quando comparada a outros tipos de máquinas elétricas. Neste capítulo ainda é discutido sobre algumas aplicações e desenvolvido um modelo matemático capaz de descrever o comportamento da máquina.

O **capítulo 3** apresenta a modelagem das curvas de indutância a partir dos resultados obtidos por elementos finitos e dimensões físicas do protótipo.

O **capítulo 4** apresenta um modelo computacional desenvolvido para simular a Máquina a Relutância Variável como Gerador, são apresentados resultados das simulações para o funcionamento do Gerador e do estimador de indutância.

O **capítulo 5** descreve a bancada construída, detalhando os principais componentes e circuitos utilizados, em especial o conversor de potência adotado para o acionamento. São apresentados os resultados obtidos, apresentando a plataforma experimental desenvolvida e o aplicativo de supervisão implementado.

O **capítulo 6** apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados utilizando a plataforma experimental desenvolvida, sendo um ensaio com diferentes velocidade e perfis de velocidade de acionamento, ensaio com a variação dos pulso de magnetização, ensaio com variação da tensão de excitação e por fim um ensaio verificando o comportamento da máquina durante a ausência ou falha de uma das fase, todos resultados são apresentados e discutidos.

O **Capítulo 7** apresenta os resultados obtidos com o estimador de indutância na aplicação embarcada.

O **capítulo 8** apresenta considerações sobre o trabalho realizado juntamente com sugestões de projetos de pesquisas utilizando a bancada experimental implementada.

CAPÍTULO 2

MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O interesse industrial em Máquinas a Relutância Variável tem crescido desde 1950. O recente surgimento de aplicações a partir os anos 1980 tem estimulado universidades e indústrias a trabalharem em pesquisas e desenvolvimento [2]. Esse interesse deve-se principalmente ao avanço da eletrônica de potência e surgimento de novos mercados para a aplicação de MRV tanto em aplicações industriais como em aplicações domésticas como ar condicionados, ferramentas manuais, ventiladores, exaustores, sistemas de bombeamento, aplicações automotivas dentre outras.

Sob os aspectos construtivos a MRV pode ser estudada em diversas configurações, sendo estas configurações conhecidas como $m \times n$, onde m é o número de polos do estator e n é o número de polos no rotor [3].r. Dentre as configurações polifásicas a topologia 6×4 e $8/6$ são usualmente as mais pesquisadas no meio científico. A Figura 2.1 apresenta a estrutura de uma máquina a relutância polifásica.

A MRV consiste em uma estrutura em dupla saliência e apresenta bobinas somente nos polos do estator [4], [5]. Neste caso os pares de polos diametralmente opostos no estator formam uma fase e suas bobinas são usualmente ligadas em série e percorridas pela mesma corrente pulsada [6].

As bobinas restritas aos polos do estator proporcionam um menor custo com cobre, além de reduzir as perdas por efeito Joule, com um menor custo com material ferro magnético e cobre, o custo de fabricação da MRV torna se um fator interessante para esse tipo de máquina[7].

A simples construção e o baixo custo de fabricação são apenas algumas características positivas da MRV. As ausências de ímãs permanentes e escovas, aliadas a solidez do rotor reduzem em larga escala o custo com manutenção [8] e aumentam a robustez [7] deste tipo de máquina, além de permitir uma operação em velocidades bastante elevadas, com possibilidades de aplicação em diversos segmentos [3].

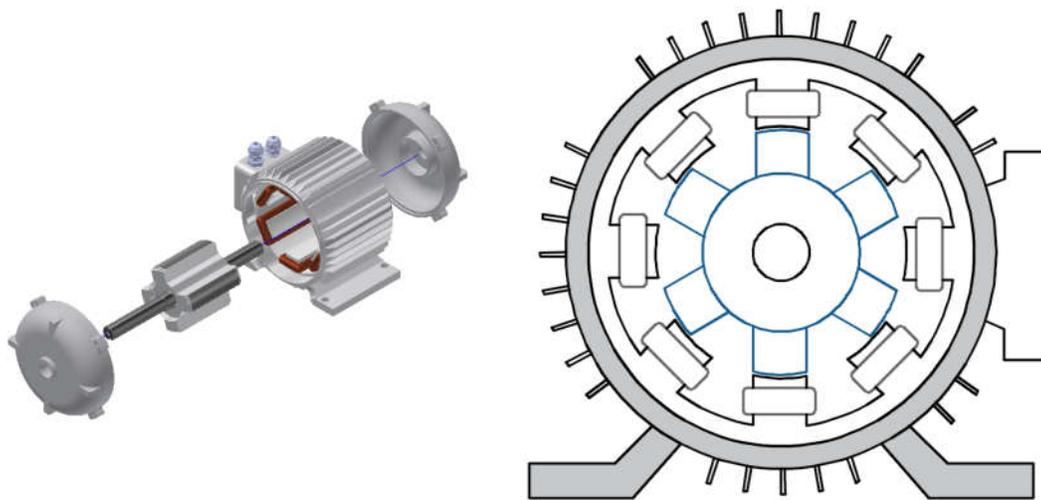


Figura 2.1 - Estrutura de uma MRV.

A produção de conjugado nas Máquinas a Relutância Variável pode ser explicada de forma simplificada utilizando os princípios elementares de conversão de energia eletromagnética de uma solenoide, como apresentado na Figura 2.2. Uma solenoide com N voltas, quando excitada com uma corrente i , existe a presença de um fluxo magnético Φ . Aumentando a corrente de excitação fará com que a armadura se mova em direção a parte fixa.

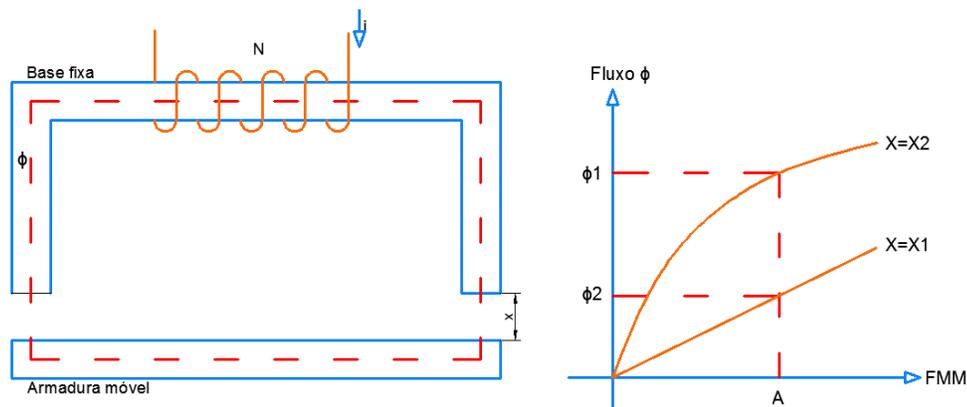


Figura 2.2 - Características de uma Solenoide.

A Figura 2.2 ainda apresenta um gráfico do fluxo magnético em função da força magnetomotriz (fmm) para duas situações diferentes, considerando os limites do gap , $x1$ e $x2$, onde $x1 > x2$. Para a posição $x1$ existe uma relação linear devido a relutância do gap de ar ser dominante sobre as demais relutâncias presentes no circuito magnético.

Sendo assim, o diferencial da indutância será proporcional ao conjugado expresso em $N.m/A^2$. É importante destacar que o conjugado não é constante, variando constantemente implicando que, uma MRV não terá um curso estável como acontece em máquinas C.C. e C.A.

Segundo [2] essas características levam a algumas implicações:

- O conjugado é proporcional ao quadrado da corrente, sendo assim a corrente poderá ser unipolar para produzir um torque unidirecional, ao contrário do que acontece em máquinas C.A. O fato de necessitar de uma corrente fluindo em um único sentido pode ser visto como uma vantagem, pois será necessário somente um sistema de chaveamento para a fonte de potência para controlar a corrente na fase da MRV.
 - A direção de rotação pode ser facilmente modificada, alterando a sequência de chaveamento da excitação do estator.
 - As MRVs necessitam de um conversor controlável para sua operação e não pode operar conectada diretamente à rede. Assim para aplicações em velocidade constante o conversor se torna oneroso quando comparado às máquinas de indução e síncronas.
 - O conjugado será obtido durante declive da indutância em função da posição do rotor para aplicações como gerador. Percebe-se que a indutância do enrolamento do estator é uma função dependente de ambos parâmetros, corrente e posição, tornando não linear. Devido sua natureza não linear, um circuito equivalente simples para esse tipo de máquina não é possível.
 - Sendo o conjugado proporcional ao quadrado da corrente, as MRVs se assemelham às máquinas C.C. Implicando em um excelente conjugado de partida.
 - A geração se faz possível em corrente contínua quando operando na região de decrescimento da indutância.
 - Existem indutâncias mútuas de valores pequenos entre os enrolamentos da MRV, e para propósitos práticos podem ser desprezados sem comprometer o controle da máquina. Essa característica é única dentre as máquinas elétricas, implicando que um curto circuito ou falha em uma das fases não terá efeito nas demais fases.
-

Das considerações acima, pode se deduzir que uma Máquina a Relutância Variável será similar a um motor de passo[2], exceto pelas seguintes características:

- Número reduzido de polos;
- Passo angular relativamente grande;
- Polos salientes;
- Capacidade para altos conjugados.

Isso reforça a aplicabilidade da Máquina a Relutância Variável, principalmente em aplicações que necessitem velocidades variáveis.

2.1 GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

De forma semelhante ao que ocorre com outros tipos de máquinas elétricas, é possível utilizar a Máquina a Relutância Variável como gerador, neste caso, o GRV (Gerador a Relutância Variável) atuará como um conversor eletromecânico de energia, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

Durante o processo de acionamento da Máquina a Relutância Variável, a indutância em cada uma das fases apresenta um comportamento não linear, variando em função da posição do eixo da máquina e também da corrente de excitação utilizada [3] [9] [10] [11] [12], conforme exibido na Figura 2.3, fazendo com que o momento de acionamento de cada fase determine seu comportamento.

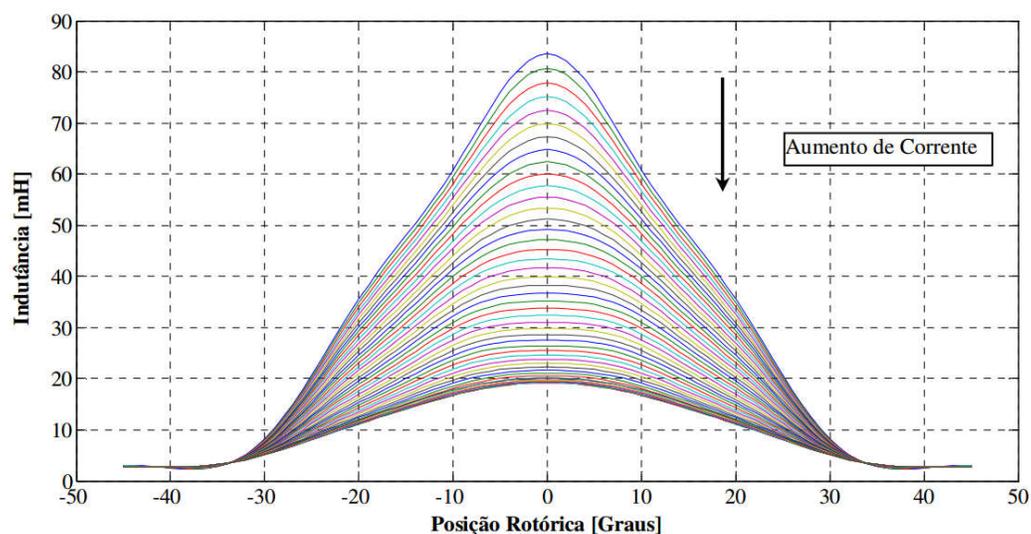


Figura 2.3 - Perfil de indutância incremental para diferentes valores de corrente e posição.

Para que a Máquina a Relutância Variável opere como gerador é necessário magnetizar as fases da máquina durante o decréscimo da sua indutância [3], [11]. Conforme demonstrado na Figura 2.4 o acionamento de cada fase da MRV será feito no momento em que a indutância diminui, sendo θ_{on} o ângulo inicial de acionamento, representando o momento em que as chaves são acionadas e a fase é magnetizada. θ_{off} representa o ângulo final de acionamento, momento em a fase deixará de ser magnetizada.

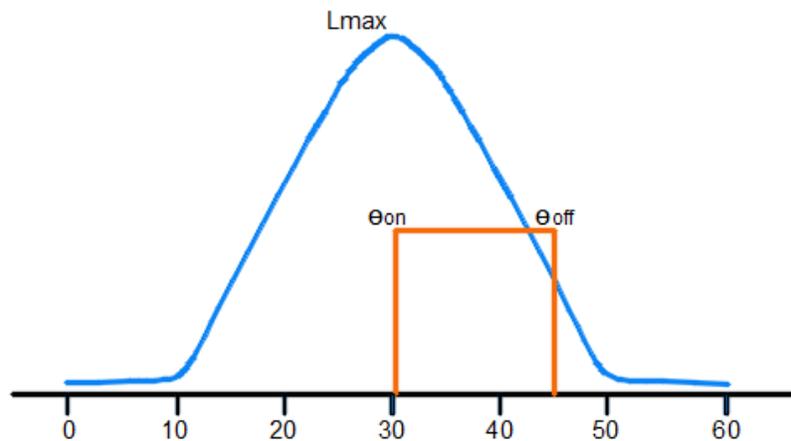


Figura 2.4 - Perfil de indutância e pulso de acionamento de uma fase do Gerador a Relutância Variável.

A Figura 2.5 apresenta o desenho esquemático do conversor *Half-Bridge* (HB) adaptado para a MRV operar como gerador, com o circuito de alimentação da carga do Gerador a Relutância Variável (GRV) separado do circuito de magnetização das fases.

A magnetização da fase somada à entrada de conjugado mecânico no eixo faz com que apareça uma força contra eletromotriz que aumenta a taxa de crescimento da curva da corrente, caracterizando o processo de geração de energia elétrica [3]. Após o desligamento das chaves do conversor, os diodos que constituem o circuito de desmagnetização das bobinas são polarizados diretamente conduzindo a energia acumulada até a carga, essa energia é constituída pela energia fornecida pela fonte de alimentação juntamente com a energia convertida de mecânica para elétrica.

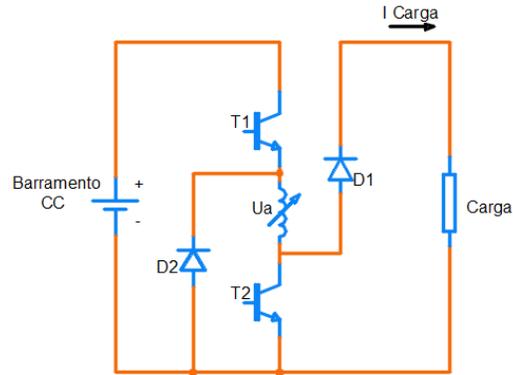


Figura 2.5 - Conversor half-bridge utilizado para acionar o GRV.

Os circuitos de magnetização e desmagnetização das fases da máquina operando como gerador podem ser observados nas Figuras 2.6 e 2.7, respectivamente

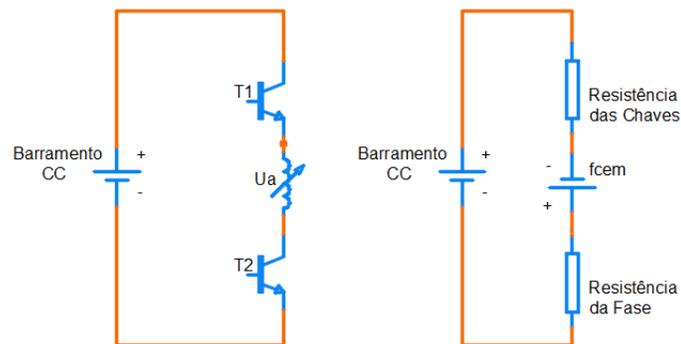


Figura 2.6 - Circuito de magnetização das fases do GRV.

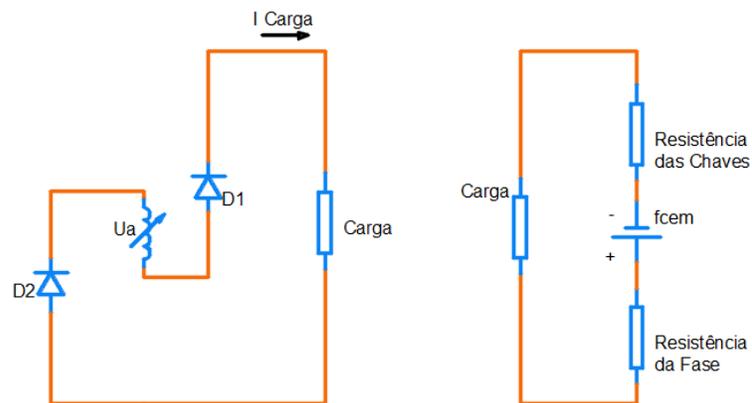


Figura 2.7 - Circuito de desmagnetização do GRV.

2.2 APLICAÇÕES DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Os estudos das MRV hoje se concentram principalmente em aplicações que demandam um acionamento com velocidades variáveis, sendo necessária a utilização de conversores eletrônicos para o seu funcionamento, tornando assim a MRV competitiva frente às demais máquinas elétricas[13].

2.2.1 Aplicações em Geração Eólica

O consumo global de energia elétrica cresce e apresenta tendências de um crescimento contínuo e elevado, sendo assim, toda tecnologia disponível para uma geração e distribuição eficiente deve ser utilizada para que o consumidor final tenha uma energia de qualidade e com preço acessível [13].

Com o crescimento acelerado do consumo de energia elétrica, a utilização de outras fontes de energia se faz necessária, principalmente após a desregulamentação do sistema elétrico e a redução de investimentos em grandes centrais elétricas [14].

Uma das propostas de investimentos focados na energia eólica pode ser vista na Figura 2.8 e 2.9, onde há um crescimento na potência gerada com o aumento da altura das unidades geradoras. E fica evidenciado também com um desenvolvimento dessas unidades geradoras ocorrendo cada vez de forma mais rápida, considerando os últimos anos [13] [14].

Estas Figuras apresentam também, que no ano de 2003 já era possível utilizar aero gerador com capacidade de 5MW de potência.

A aplicação de energia eólica exige um tipo de máquina que tenha uma boa atuação em velocidades variáveis ou que seja adaptada para tal. O desenvolvimento de máquinas elétricas para esta aplicação é visto com entusiasmo, pois o gerador de indução é hoje em maior parte utilizado, com o uso de escovas e caixas de câmbio para adequação da velocidade.

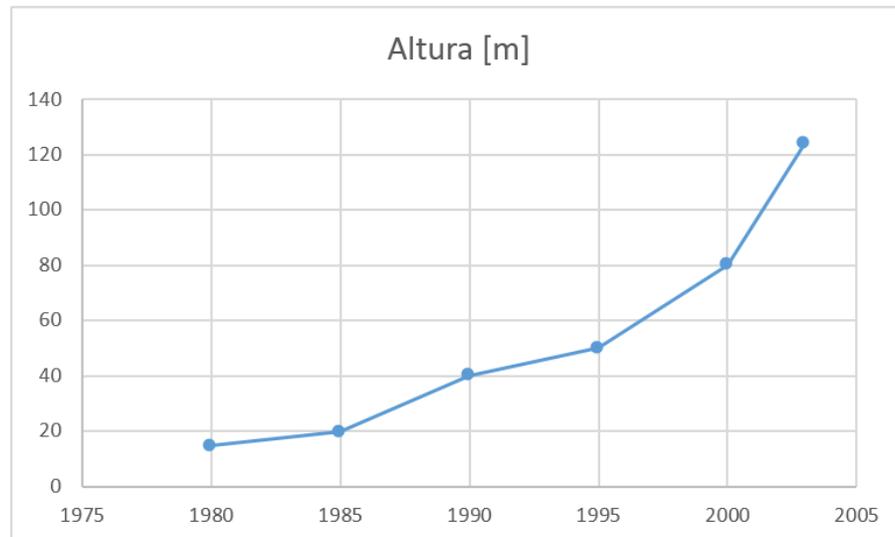


Figura 2.8 - Elevação das turbinas eólicas [13],[14].

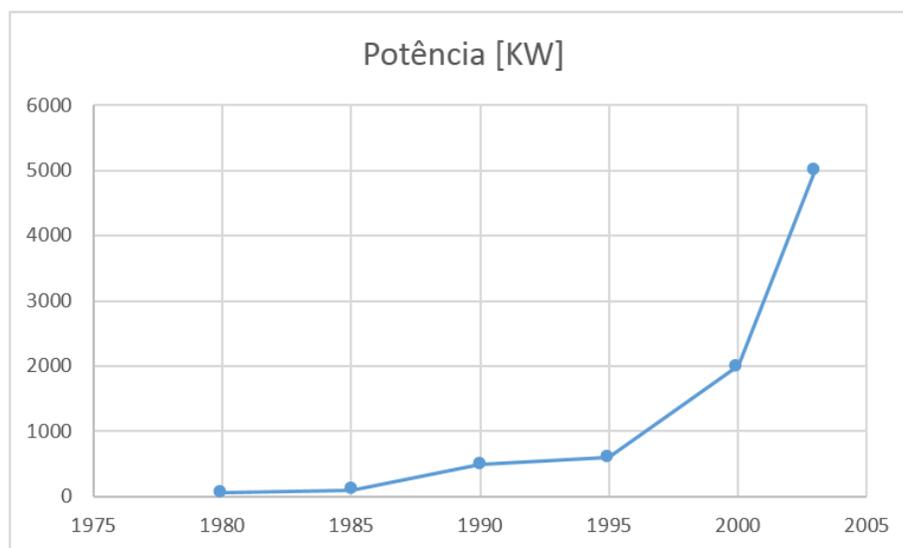


Figura 2.9 - Potência elétrica gerada por turbinas eólicas [13],[14].

Em [13] é apresentado um estudo de como seria o uso ideal de uma unidade geradora aplicada a pequenas unidades de produção como unidades rurais ou cargas dispersas. Um trabalho semelhante foi desenvolvido em [3] onde é desenvolvido um sistema completo de acionamento, controle, inversão da tensão C.C. gerada em tensão C.A. e injetada na rede como potência ativa.

2.2.2 Aplicações Aeronáutica e Espacial

A dualidade de funcionamento da MRV, tendo uma boa operação tanto como motor quanto como gerador [8], além da aplicabilidade em velocidades variáveis e um grande leque de velocidades funcionais, permitiu que a MRV fosse estudada para aplicações aeronáuticas.

A força aérea americana é um dos grandes responsáveis pelo crescente número de trabalhos acerca das MRVs [8], com a criação do programa *More electric Aircraft* (MEA). O programa americano estimula principalmente os trabalhos onde a máquina opera como Gerador e Motor de partida a Relutância [8] e [13].

A não possibilidade de desligar a excitação é um problema inerente às máquinas de imã permanente e às que possuem enrolamentos no rotor, quando estas funcionam como gerador. Problema este que não é encontrado na MRV [15].

Nesta aplicação o uso do GRV é interessante para aplicações futuras, onde o mesmo apareceria como fonte elétrica para a alimentação dos circuitos elétricos e eletrônicos que crescem cada vez mais nas aeronaves. Dessa forma o gerador seria acoplado diretamente ao eixo das turbinas do avião, sendo esta a fonte de torque, ou seja, a entrada mecânica para o funcionamento do gerador.

2.2.3 Aplicações Automotivas

A crescente preocupação com conforto e segurança faz com que os carros utilizem cada vez mais opcionais eletrônicos, atuadores e controladores elétricos, fato este que chama a atenção, pois a possibilidade de fazer com que os carros se tornem mais elétricos, pode ser interessante para o desenvolvimento da MRV sendo aplicada neste caso como gerador.

Com os carros utilizando mais sistemas embarcados elétricos e eletrônicos, a opção por um método de tração elétrica também é muito estudada. A utilização de um gerador elétrico ligado diretamente ao eixo das rodas do veículo se torna interessante, pois assim a alimentação do sistema elétrico do carro, além de recarga da bateria pode ser feita utilizando a energia gerada através do aproveitamento do conjugado mecânico disponibilizado pelo carro.

Os veículos híbridos e elétricos utilizam a bateria elétrica parcialmente ou totalmente como fonte de energia necessária para o seu funcionamento. A MRV atuando como gerador aparece como uma opção viável interligando o motor de partida e o alternador [8], podendo

dessa forma realizar a recarga das baterias utilizadas no sistema híbrido ou totalmente elétrico.

O controle para este tipo de aplicação e para aplicações aeronáuticas ainda necessitam de uma atenção especial e vem se desenvolvendo [16]. O controle é realizado em seu conversor, no sistema de disparo das chaves, pois a alternância de funcionamento como motor e gerador está ligada justamente no momento em que a chave é disparada.

2.3 EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS

O circuito de uma única fase do Gerador a Relutância Variável (GRV) é apresentado na Figura 2.10, sendo composto de forma simplificada por uma resistência representando a resistividade do cobre utilizado no enrolamento, uma indutância variável representando a indutância do enrolamento.

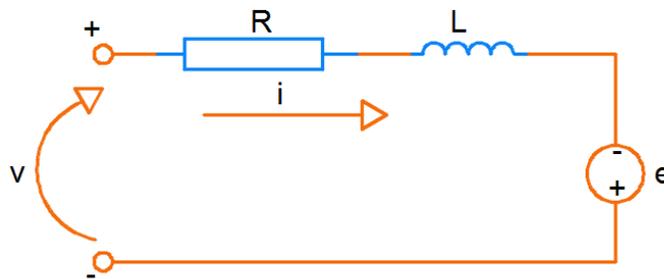


Figura 2.10 - circuito de uma única fase do GRV.

A equação da tensão na fase estão apresentadas equações 2.1 e 2.2.

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (2.1)$$

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + e \quad (2.2)$$

Onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, L é a indutância incremental da fase e θ é a posição do rotor. A variação dessa mesma indutância em função da posição é chamada de indutância incremental. O terceiro termo do lado direito da equação é a força contra eletromotriz e , que isoladamente pode ser escrita como:

$$e = i\omega \frac{L(i, \theta)}{d\theta} \quad (2.3)$$

Onde, ω é a velocidade angular do rotor.

A equação mecânica da máquina pode ser obtida a partir da análise da sua dinâmica de movimento. O que se observa é que no gerador a máquina primária deve fornecer conjugado mecânico (T_m) capaz de equilibrar o conjugado eletromagnético resistente, de vencer a inércia rotacional nas variações de velocidade e de vencer o atrito dinâmico nos mancais de sustentação e guia do rotor. O conjugado eletromagnético é de natureza resistente, isto é, atua de forma a se opor à causa que o provocou, de modo que é intrinsecamente negativo em relação ao sentido de rotação do GRV [8]. Assim, a equação do conjugado do GRV se apresenta na forma:

$$T_m = T_{emag} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

Onde:

T_m = Conjugado mecânico aplicado;

T_{emag} = Conjugado eletromagnético;

D = Coeficiente de atrito viscoso;

ω = Velocidade angular;

J = Momento de inércia.

A produção de conjugado nas Máquinas a Relutância Variável pode ser explicada utilizando os princípios elementares de conversão de energia eletromagnética de uma solenoide, uma solenoide com N voltas, quando excitada com uma corrente i , existe a presença de um fluxo magnético Φ . Aumentando a corrente de excitação fará com que a armadura se mova em direção a parte fixa.

A energia elétrica do circuito pode ser escrita como apresentado na equação 2.5.

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int Ni d\Phi = \int F d\Phi \quad (2.5)$$

Onde e é a força eletromotriz e F é a força magnetomotriz. A energia elétrica do circuito eletromagnético é igual a soma da energia armazenada na bobina, e a energia convertida em energia mecânica no momento imediatamente anterior ao início do deslocamento da armadura, podendo ser escrito conforme a equação 2.6.

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.6)$$

Para os casos em que exista uma excitação constante, considerando uma força magnetomotriz constante, o incremento de força mecânica realizado será igual a taxa de variação da coenergia $W^{co}F$, que pode ser deduzida como complemento da energia de campo [2], chegando ao incremento de força mecânica ilustrado pela equação 2.7 e 2.8.

$$\delta W_m = \delta W^{co}_f \quad (2.7)$$

Adaptando o caso do solenoide aos aspectos construtivos e de funcionamento da MRV, percebe-se que a variação do *gap* de ar ou entreferro dependerá fundamentalmente de um ângulo θ relativo entre o rotor e estator de forma que o total de energia armazenada também dependerá da posição angular (θ) do rotor em relação ao estator, baseando-se na Figura 2.11 que apresenta a curva de magnetização típica para uma fase de um GRV foi possível obter a equação do conjugado eletromagnético.

$$W^{co}_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int N\Phi di = \int \lambda(\theta, i)i di = \int L(\theta, i)i di \quad (2.8)$$

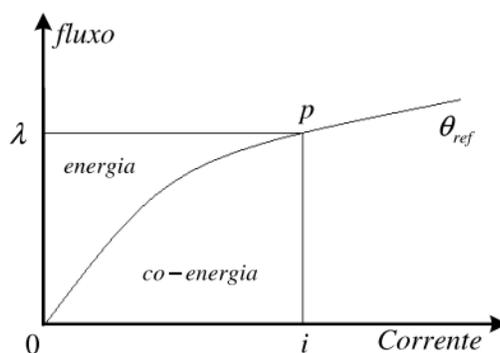


Figura 2.11 - Curva de Magnetização típica para uma fase do Gerador.

Como esta equação se aplica a cada fase da máquina, a co-energia instantânea do GRV será dada por:

$$W^{co} = W^{co}_1 + W^{co}_2 + \dots + W^{co}_f \quad (2.9)$$

Ou mais formalmente, por:

$$W^{co} = \sum_{k=1}^F W_k^{co}(i, \theta) \quad (2.10)$$

Segundo [3], o conjugado eletromagnético instantâneo é dado pela equação:

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (2.11)$$

Cuja expansão é:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_1^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \dots + \frac{\partial W_n^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

A substituição da equação 2.4 na equação 2.12 Resulta em:

$$T_{emag} = \left(\frac{\partial W_1^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \dots + \frac{\partial W_n^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \right) + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.13)$$

As equações elétricas e a equação mecânica do GRV podem ser agrupadas e reescritas na forma matricial, considerando-se uma máquina de quatro fases, conforme mostrado na equação 2.14, o que facilita o emprego de métodos numéricos para sua solução. Não foi contemplado nesta análise os efeitos das indutâncias mútuas entre as fases.

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

Onde:

$$[V] = \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \\ Vd \\ Tm \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 & e_1 \\ 0 & L_b(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & e_2 \\ 0 & 0 & L_c(i, \theta) & 0 & 0 & e_3 \\ 0 & 0 & 0 & L_d(i, \theta) & 0 & e_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$[\dot{I}] = \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$r_{k=1,2,3,4} = \frac{1}{2} i_k \frac{\partial L_k(i, \theta)}{\partial \theta}; k=1,2,3,4. \quad (2.20)$$

$$e_{k=1,2,3,4} = i_k \frac{\partial L_k(i, \theta)}{\partial \theta}; k=1,2,3,4. \quad (2.21)$$

Da equação 2.14 é possível escrever a equação de estados da máquina isolando-se a matriz $[\dot{I}]$ de modo a obter:

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (2.22)$$

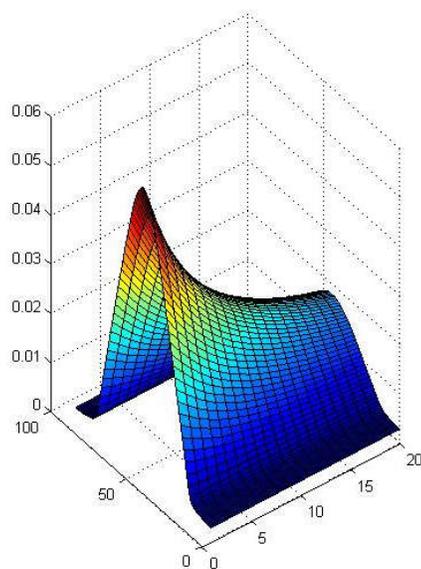
Esta equação de estados descreve completamente o estado de cada fase da máquina a qualquer instante. Os valores de resistências e das indutâncias das fases que formam os elementos da matriz $[R]$ e $[L]$ são determinados por características construtivas da máquina. Estes são medidos em máquinas já fabricadas, ou calculadas durante a fase de projeto. A equação 2.22 trata de uma equação diferencial e para cada vetor de entrada V é possível encontrar o vetor de saída I . A solução desse sistema é acessível através de métodos numéricos computacionais iterativos.

CAPÍTULO 3

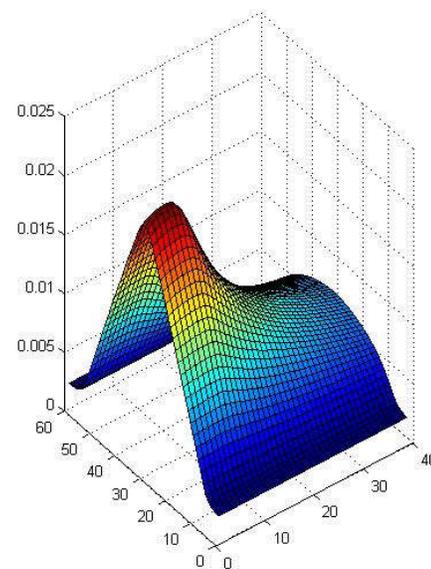
MODELAGEM DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA

O comportamento da indutância da Máquina à Relutância Variável é dependente do valor da corrente e posição angular do rotor em relação ao estator [1][2][3], apresentando assim, um comportamento totalmente não linear e de difícil modelagem.

A curva de indutância de uma MRV é apresentada na Figura 3.1, as curvas foram obtidas através do Método dos Elementos Finitos, sendo a curva 01-a da Máquina 6x4 apresentada em [3] e a curva 01-b da máquina 8/6 apresentada em [27].



(a) Curvas de Indutância, MRV 6x4



(b) Curvas de Indutância, MRV 8x6

Figura 3.1 - Curvas de Indutâncias obtidas por elementos finitos.

Considerando a influência da corrente e da posição angular, a modelagem matemática da curva se torna complexa. Em [3] é apresentada uma modelagem da curva de indutância utilizando séries de Fourier, onde é possível estimar com precisão satisfatória as indutâncias instantâneas nas fases da MRV [3], porém deseja-se a obtenção de polinômios

que exijam um menor esforço computacional para o DSP, facilitando a utilização em simulações computacionais e em aplicações embarcadas.

Na Figura 3.2 é possível observar o comportamento da indutância para diferentes valores de corrente e para diferentes valores de posição angular na Figura 3.3, sendo a Figura 3.2-a para uma MRV 8/6 e 3.2-b uma MRV 6x4.

Alguns trabalhos publicados, aproximam as curvas para formas de ondas conhecidas, como trapezoidais, senoidais ou modelos linearizados, obtendo assim resultados aproximados que dependendo da topologia e potência da máquina podem ser satisfatórios e aceitáveis.

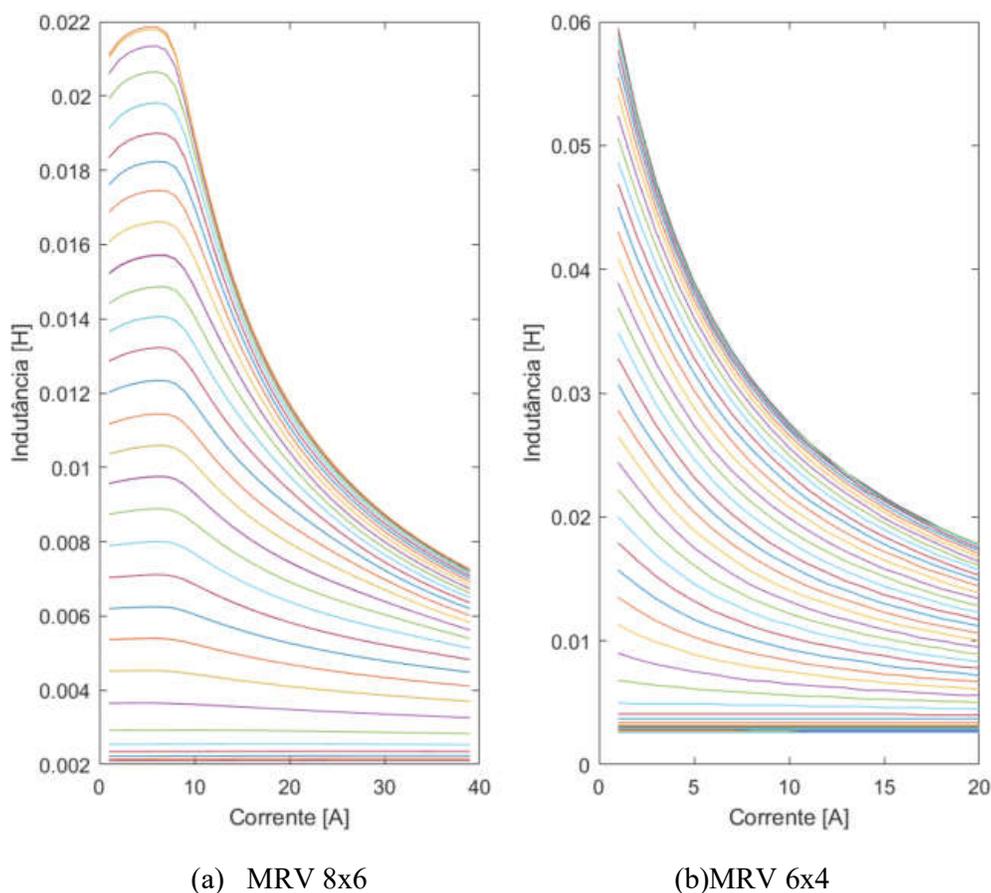


Figura 3.2 - Comportamento da indutância para diferentes valores de corrente.

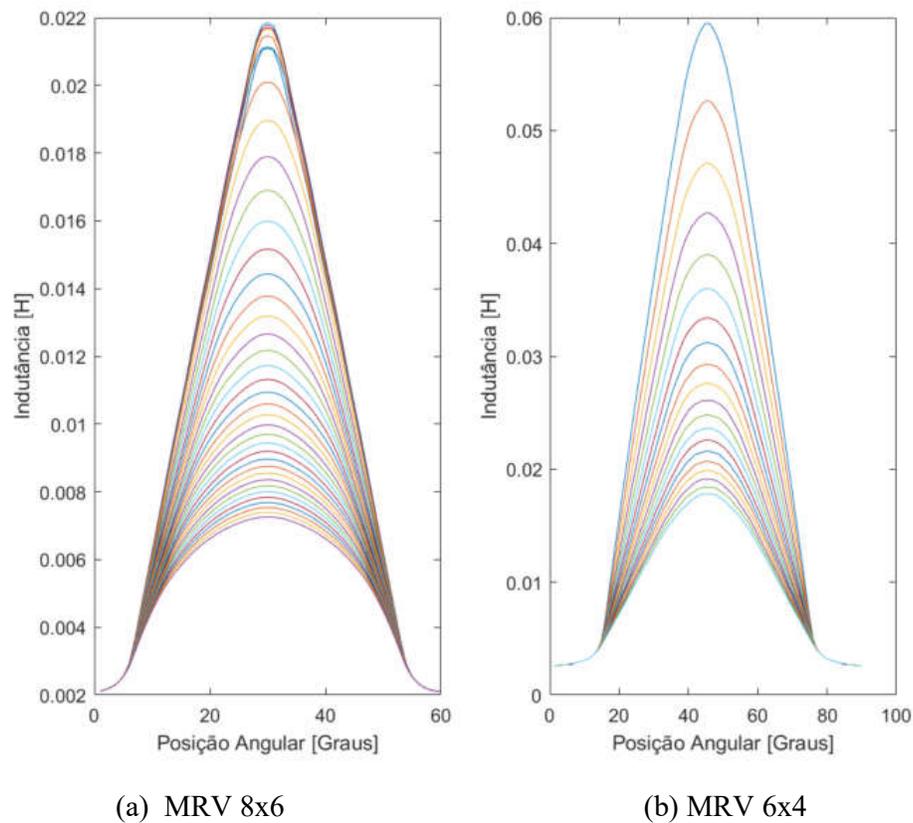


Figura 3.3 - Comportamento da indutância para diferentes posições angulares.

Estudando o comportamento da indutância mostrada na Figura 3.1, percebe-se que, mesmo sendo um comportamento não linear, existe um padrão de comportamento. Uma forma eficiente de perceber esse padrão é através da análise das curvas de nível da superfície tridimensional obtida pelas curvas de indutância para correntes e ângulos, a Figura 3.4 e 3.5 apresentam as curvas de nível para uma das curvas obtidas por elementos finitos.

Analisando as curvas de apresentadas na Figura 3.4 é possível obter uma coleção de mapas de contorno, onde fica evidente a influência individual da corrente e da posição angular na indutância.

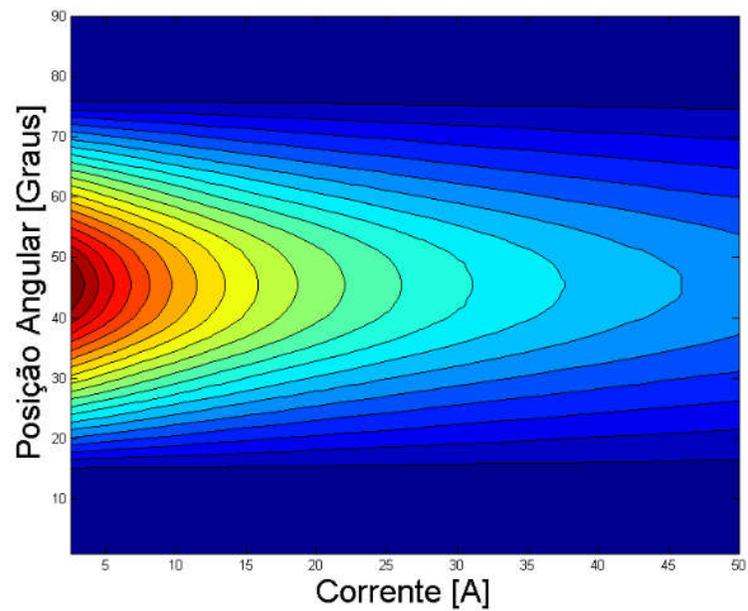


Figura 3.4 - Curvas de níveis para a indutância obtida a partir de elementos finitos.

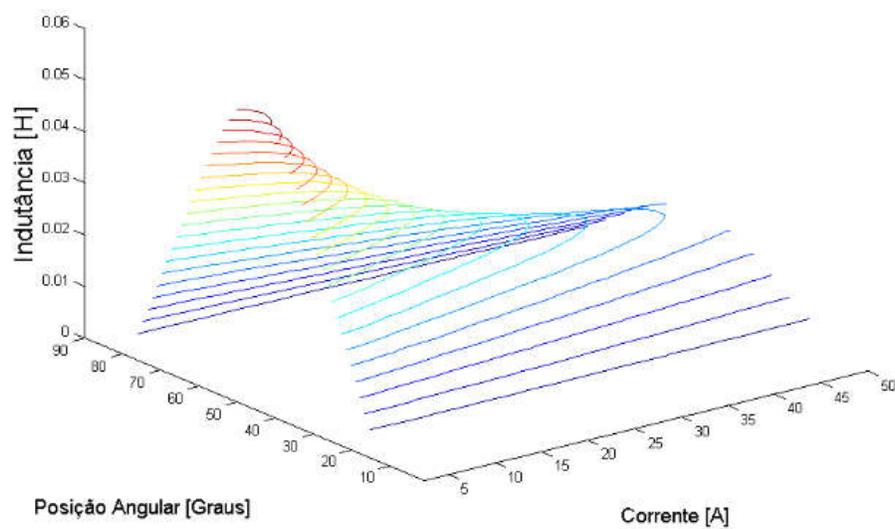


Figura 3.5 - Mapas de contorno para a indutância, obtidos a partir de elementos finitos.

Uma forma prática de utilizar este padrão é observar cada uma das curvas através de valores proporcionais, permitindo assim fazer uma aproximação em que a indutância possa ser analisada como dependente de um único parâmetro, corrente ou posição angular, para

isto a curva será normalizada utilizando um vetor base representando a influência da corrente para a indutância, identificado por $L_p(i)$.

O processo aqui chamado de normalização se assemelha-se ao processo utilizado em sistemas elétricos de potência para representar grandezas elétricas em p.u., porém não será utilizado um único valor de base, mas sim vetores de base. Vetores estes que serão modelados em polinômios e utilizados para reconstruir a curva original. A equação 3.1 representa matematicamente a normalização aqui descrita.

$$l(i, \theta) = \frac{L(i, \theta)}{\text{Maximo}(L_p(i))}, [pu] \quad (3.1)$$

A Figura 3.6 apresenta uma representação da curva de referência e do vetor de base para a normalização.

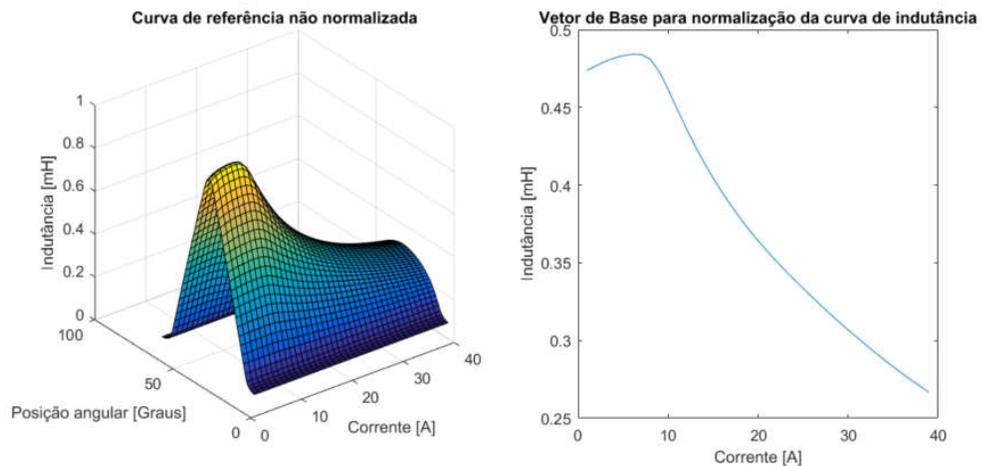


Figura 3.6 - Representação do vetor de base para normalização da curva.

A Figura 3.7 exibe a curva tridimensional normalizada expressa em p.u. para a variação da indutância em relação a posição angular para diversos valores de corrente. Uma característica interessante para esta representação, é a pouca influência que a corrente passa a ter sobre a curva, permitindo assim, momentaneamente considerar a indutância dependente apenas da posição angular. No entanto ainda se percebe algumas variações e irregularidades nas curvas, sendo estas pequenas variações atribuídas a outros fatores que influenciem na indutância e não foram considerados, associadas às deformações provocadas pela normalização feita. Estas variações e irregularidades podem ser percebidas observando a Figura 3.8.

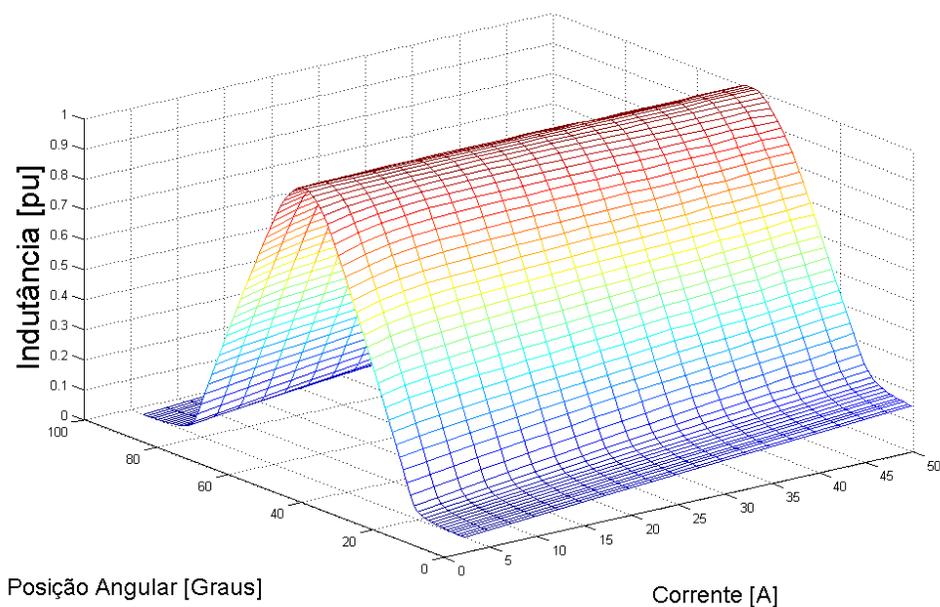


Figura 3.7 - Comportamento da indutância (p.u.) em função da posição angular e corrente após a primeira normalização.

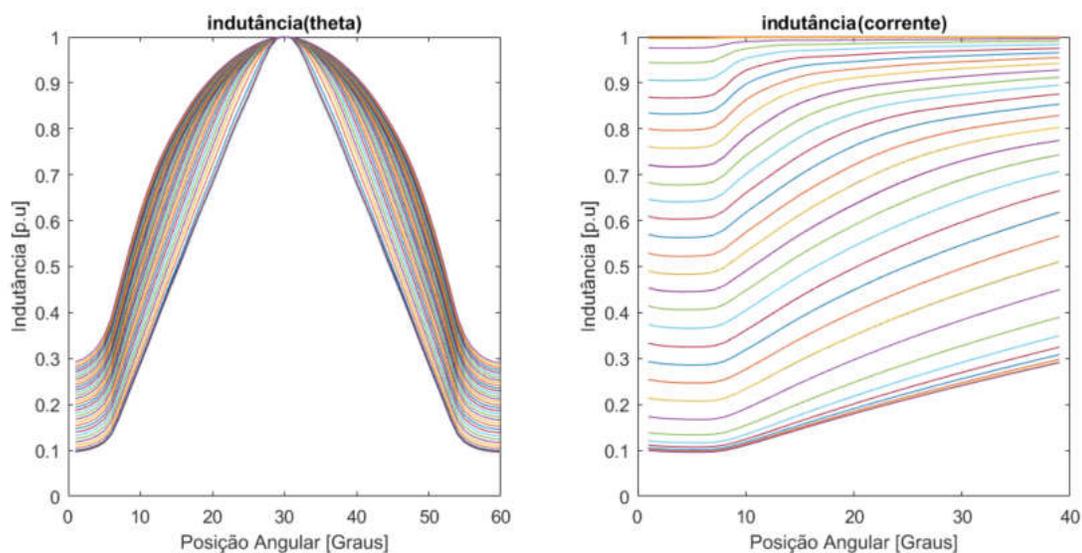


Figura 3.8 - Irregularidades resultantes da primeira normalização.

Considerando as curvas proporcionais, é possível definir uma curva média de indutância para ser utilizado como vetor base para a posição angular. Neste trabalho optou-se por utilizar uma curva obtida a partir das dimensões físicas da máquina.

A Figura 3.9 apresenta as curvas de nível para a curva normalizada apresentada na Figura 3.7. Fica evidente que houve uma linearização, provocada pela normalização da curva

através vetor base da corrente ao se comparar com a forma original apresentada na Figura 3.10.

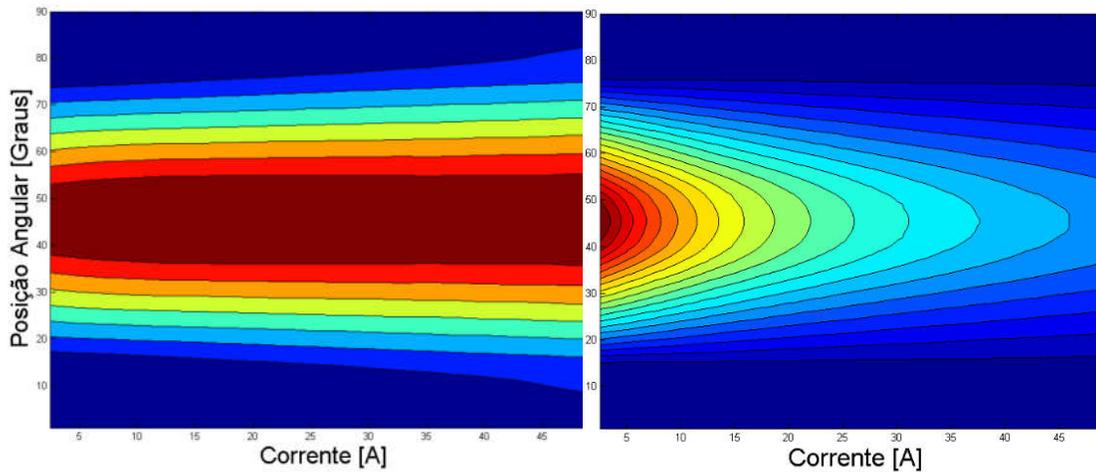


Figura 3.9 - Curvas de nível da indutância normalizada.

Figura 3.10 - Curva de nível da indutância não normalizada.

Ao se representar a indutância desta forma, pode-se estabelecer uma relação matemática para convencionar uma representação da indutância da MRV. A equação 3.2 convencionou a indutância dependente da corrente e da posição angular, desta forma a indutância está representada como a composição de três funções. $L_p(i)$ que depende fundamentalmente da corrente e servirá como valores de base para a curva, $l_p(\theta)$ que depende fundamentalmente da posição angular e $L_r(i, \theta)$ que representa as irregularidades apresentadas na Figura 3.8. Em alguns casos a $L_r(i, \theta)$ pode ser desprezada por não ter influência significativa, foi observado em alguns testes e simulações realizados que a topologia 6/4 apresentou uma irregularidade correspondente a cerca de 1% do valor máximo da curva, podendo ser desprezado. O mesmo não ocorreu para a topologia 8/6 que as irregularidades atingiram valores próximos de 35% do valor máximo.

$$L(i, \theta) = L_p(i) \cdot [l_p(\theta) + L_r(i, \theta)] \quad (3.2)$$

A parcela da indutância L_r permanece dependendo da corrente e da posição angular, sendo assim, é conveniente também normalizá-la e reescrevê-la como uma composição de duas funções, a equação 3.3 exibe a equação 3.2 reescrita.

$$L(i, \theta) = \text{Max}_p \cdot l_p(i) \cdot [l_p(\theta) + \text{Max}_r \cdot l_r(i) \cdot l_r(\theta)] \quad (3.3)$$

Utilizando as curvas obtidas através do Método dos Elementos Finitos, foram extraídas as curvas identificadas na equação 3.3, que estão apresentadas na Figura 3.11, sendo a Figura 3.11-a para a máquina 6/4 e a Figura 3.11-b para a máquina 8/6.

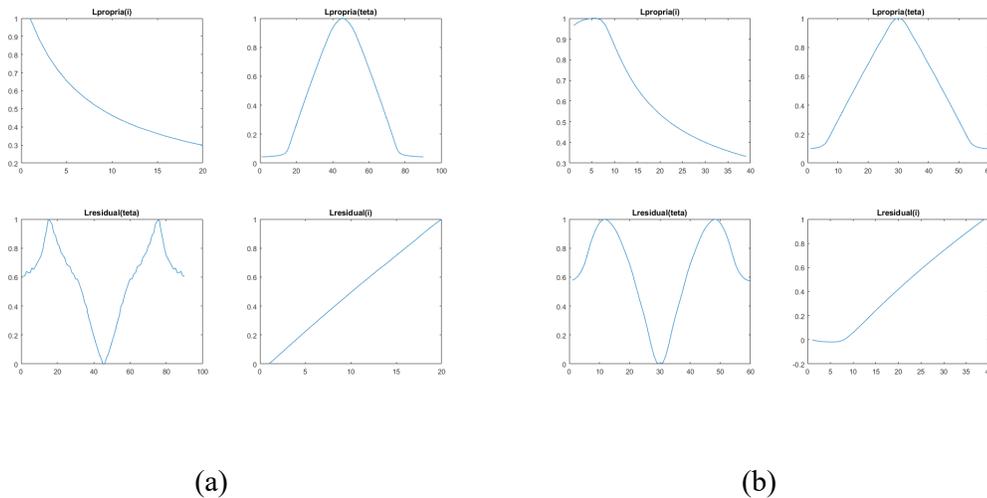


Figura 3.11 - Curvas formadoras da indutância variável expressas em p.u.

Convencionando que o termo aqui chamado de “residual” refere-se a todos fatores que influenciam a indutância e não foram normalizados pelo vetor base $l_p(i)$, um estudo mais aprofundado é necessário afim de identificar tais fontes e isolar as mútuas em uma única curva ou confirmar que $l_p(i)$ representa as indutâncias mútuas. O mesmo ocorre com as indutâncias identificadas como “principal”, estudos mais aprofundados devem ser feitos a fim de determinar se o que aqui convencionado como “principal” representa as indutâncias próprias reais de uma máquina, a função utilizada para extrair as curvas a partir do modelo obtido por elementos finitos está apresentada no apêndice A1.

É conveniente expressar todas as curvas em valores percentuais, pois desta forma toda a modelagem construída poderá ser válida também para outras máquinas de construção similar, onde a particularidade de cada máquina será expressa por duas variáveis MAX_p e MAX_r .

$$l(i, \theta) = l_p(i) \cdot [l_p(\theta) + MAX_r \cdot l_r(i) \cdot l_r(\theta)] \quad (3.4)$$

$$\frac{L(i, \theta)}{MAX_p} = l(i, \theta) = l_p(i) \cdot [l_p(\theta) + MAX_r \cdot l_r(I) \cdot l_r(\theta)] \quad (3.5)$$

Ao se considerar as curvas exibidas em 3.11, assume-se que as curvas dependente da corrente tem seu comportamento fundamentalmente em função da saturação do material ferromagnético e os valores dependente da posição angular se comportam em função da variação dos entreferros e caminhos preferencias do fluxo magnético.

Desta forma a metodologia desenvolvida e utilizada para modelagem das curvas de indutância está representada de forma simplificada na Figura 3.12 e dividida em algumas etapas:

1. Determinação do vetor base para a curva principal da posição angular.
 - a. Obtido a partir da geometria da máquina.
 - b. Obtido a partir da média das curvas normalizadas (menor precisão, maior simplicidade)
 2. Determinação do vetor base para a curva principal para corrente
 - a. Obtido pela curva dos elementos finitos
 3. Normalização da curva obtida por elementos finitos.
 4. Subtração entre a curva normalizada e o vetor base para a curva principal da posição angular
 5. Normalização do resíduo obtido da subtração entre as curvas normalizada e base da posição angular.
 - a. Obtenção das curvas residuais para posição angular e corrente.
 - i. Obtenção dos valores MAX_p e MAX_r diretamente das curvas residuais
 - ii. Obtenção dos valores MAX_p e MAX_r através de ensaios na máquina física.
 6. Determinação dos coeficientes para as splines cúbicas no modelo de Lagrange.
 7. Resolução dos polinômios para determinar a indutância instantânea.
-

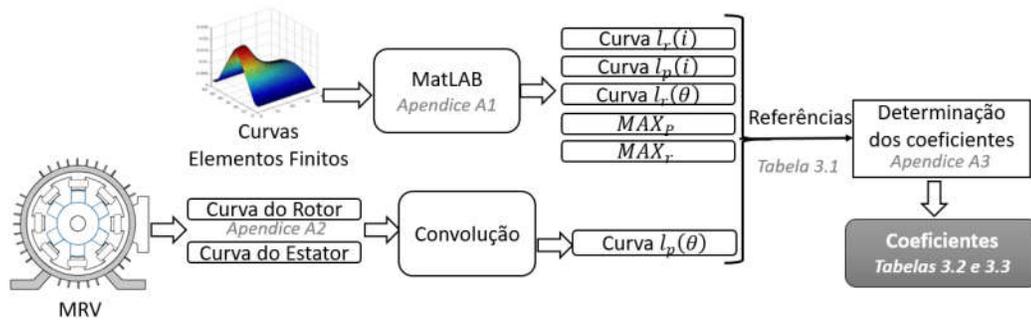


Figura 3.12 - Metodologia utilizada na determinação dos coeficientes.

A metodologia utilizada está apresentada e detalhada nos tópicos seguintes deste capítulo, e foram utilizadas no modelo computacional (simulação) e embarcadas no DSP/FPGA.

3.1.1 Modelo Matemático para as curvas de Indutância a partir da geometria da máquina.

Considerando o circuito magnético da Máquina a Relutância Variável, a relutância do circuito dependerá do entreferro presente entre o estator e rotor. Com o movimento angular do rotor, o entreferro é modificando sendo mínimo com o alinhamento dos polos do estator e rotor, situação em que a relutância é mínima e a indutância máxima.

A Figura 3.13 exibe uma representação do comportamento do entreferro durante o alinhamento e desalinhamento dos polos,



Figura 3.13 - Representação do comportamento do entreferro durante o alinhamento e desalinhamento dos polos.

A indutância pode ser definida como a relação entre o enlace total do fluxo e a corrente elétrica.

$$\text{Indutância} = \frac{N \cdot \Phi}{i} \quad (3.6)$$

Onde:

N = Número de espiras do enrolamento.

i = Corrente elétrica,

ϕ = Fluxo Total,

O fluxo total pode ser definido como a razão entre a força magnetomotriz (FMM) e a relutância do meio de propagação das linhas de campo, neste caso a soma da relutância do entreferro (ar) com a do material ferromagnético.

$$\phi = \frac{FMM}{\mathcal{R}_{Ferro} + \mathcal{R}_{Ar}} \quad (3.7)$$

Como a relutância do ar é muito superior à do material ferromagnético, por simplificação será considerado somente a relutância do entreferro.

$$\phi = \frac{FMM}{\mathcal{R}_{Ar}} \quad (3.8)$$

Considerando as implicações das equações 3.6 e 3.8, pode-se definir que a indutância será diretamente proporcional ao fluxo e inversamente proporcional à relutância.

Sendo a relutância inversamente proporcional ao entreferro, busca-se determinar o comportamento do entreferro durante o movimento angular do rotor, desta forma será possível indiretamente determinar o comportamento da relutância e da indutância.

3.1.1.1 Determinação do vetor base da indutância para as posições angulares

Considerando uma MRV de dimensões genéricas A, B, C e D conforme exibido na Figura 3.14.

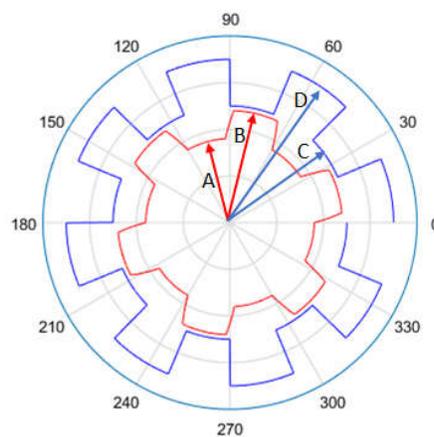


Figura 3.14 - Desenho Esquemático da MRV

É possível descrever a curva do rotor e a curva do estator utilizando uma conversão de coordenadas, representando no plano cartesianos as menores distancias entre o centro da

máquina e o limite do material ferromagnético para cada posição angular no rotor e estator durante uma volta completa, obtendo assim formas de ondas periódicas conforme exibido na Figura 3.15.

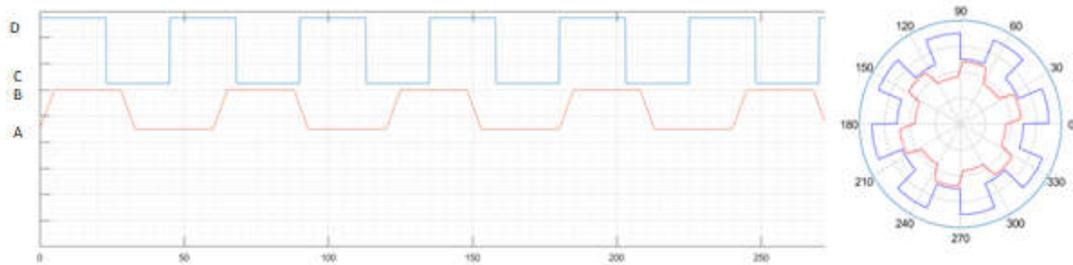


Figura 3.15 - Curvas representando as dimensões do rotor e estator.

Por serem curvas periódicas, toda a análise será feita para um único período da onda, a partir deste ponto é possível expressar estas curvas utilizando séries de Fourier, porém deseja-se um modelo polinomial que não dependa da somatória de uma série de curvas.

Considerando as formas de onda apresentadas na Figura 3.16, determinou-se uma forma de representação matemática para as curvas utilizando a função degrau ou *Heaviside*, sendo $u(\theta - \theta^0)$ a função degrau unitário.

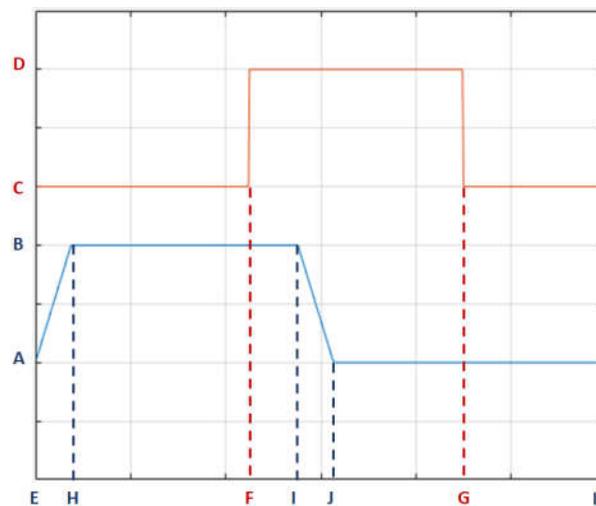


Figura 3.16 - Forma de onda para um único período.

Para o estator:

$$Estator(\theta) = C + (D - C) * (u(\theta - F) - u(\theta - G)) \quad (3.9)$$

Para o rotor:

$$\text{Inclinacao} = (B - A)/(H - E) \quad (3.10)$$

$$\text{Reta1} = \text{Inclinacao} * (\theta - E) \quad (3.11)$$

$$\text{Reta2} = \text{Inclinacao} * (\theta - I) \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Rotor}(\theta) = & A + \text{reta1} * (u(\theta - E) - u(\theta - H)) + (B - A) * (u(\theta - H) \\ & - u(\theta - J)) - \text{reta2} * (u(\theta - I) - u(\theta - J)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

A Figura 3.17 exibe a forma de onda gráfica obtida no MatLAB para as equações do rotor e estator.

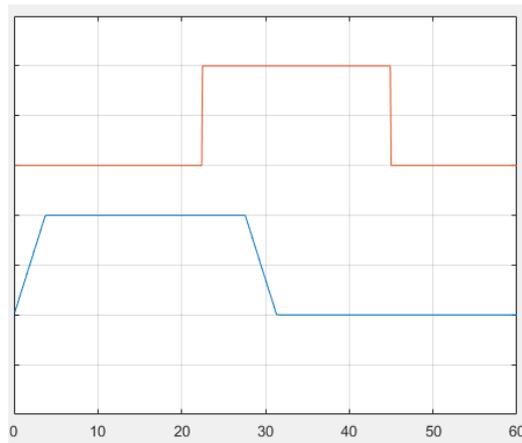


Figura 3.17 - Formas de onda representadas no MatLAB.

Determinadas as curvas será feita uma análise da área do entreferro, que será proporcional à relutância, a Figura 3.18 apresenta um detalhamento da Figura 3.13, apresentando os momentos em que a área é máxima e mínima, sendo L_p a largura do polo no estator.



Figura 3.18 - Detalhamento da área do entreferro.

Utilizando como referência as curvas modeladas nas equações 3.9 e 3.13, é possível determinar uma expressão matemática que represente o valor máximo do entreferro em relação ao estator, apresentado na Figura 3.19.

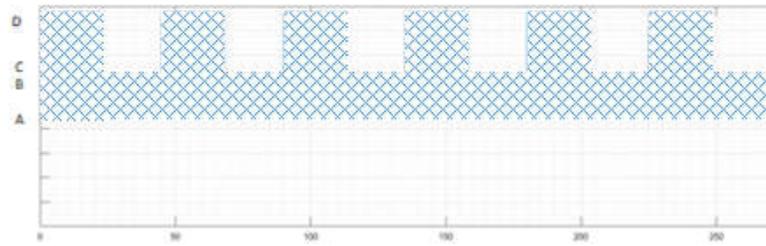


Figura 3.19 - Representação da área máxima do entreferro.

Na Figura 3.20 está destacada a área preenchida pelo polo do rotor que sombreia a área destacada na Figura 3.19, devendo esta ser subtraída da área apresentada na Figura 3.20, para obter a resultante que representa a distância real do entreferro. Essa análise é de difícil interpretação, pois as Figuras apenas ilustram uma posição entre o rotor e estator, devendo-se ainda considerar a rotação do eixo do rotor, desta forma a curva do estator será utilizada como referência (estática), e deverá ser feita o deslocamento da curva do rotor devido a rotação do eixo, gerando assim o perfil real do entreferro durante uma volta completa do rotor.

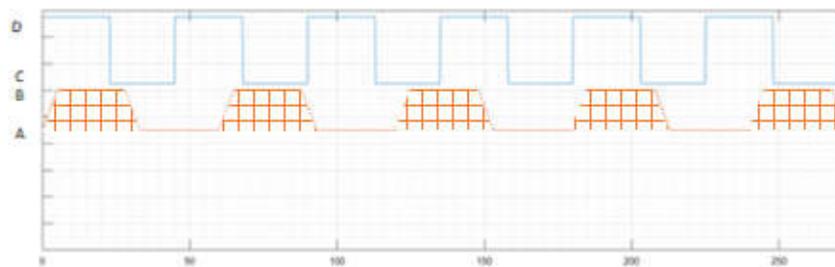


Figura 3.20 - Representação da área dos polos do estator que provocam a redução do entreferro.

As equações 3.14 e 3.15 apresentam a adaptação das equações 3.9 e 3.13 para a representação vista nas Figuras 3.19 e 3.20.

$$Estator'(\theta) = -A + (C + (D - C) * (u(\theta - F) - u(\theta - G))) \quad (3.14)$$

$$Rotor'(\theta) = reta1 * (u(\theta - E) - u(\theta - H)) + (B - A) * (u(\theta - H) - u(\theta - J)) - reta2 * (u(\theta - I) - u(\theta - J)) \quad (3.15)$$

Segundo [32] o operador matemático convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas, resulta numa terceira que mede a soma do produto dessas funções ao longo da região subentendida pela superposição delas em função do deslocamento existente entre elas.

Em [32] e [33] a convolução matemática entre duas funções $f(\theta)$ e $g(\theta)$ é definida como a integral do produto de uma das funções por uma cópia deslocada e invertida da outra, tendo a função resultante dependência do valor do deslocamento. Para as curvas modeladas nas equações 3.14 e 3.15, considerando θ a variável independente e x o deslocamento, pode-se definir conforme apresentado na equação 3.16.

$$(f * g)(\theta) = h(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(x - \theta) dx \quad (3.16)$$

Realizando a convolução das equações 3.14 e 3.15 obteve-se a curva apresentada na Figura 3.21, porém a curva representa o perfil de variação do entreferro e relutância que é inversamente proporcionais à indutância.

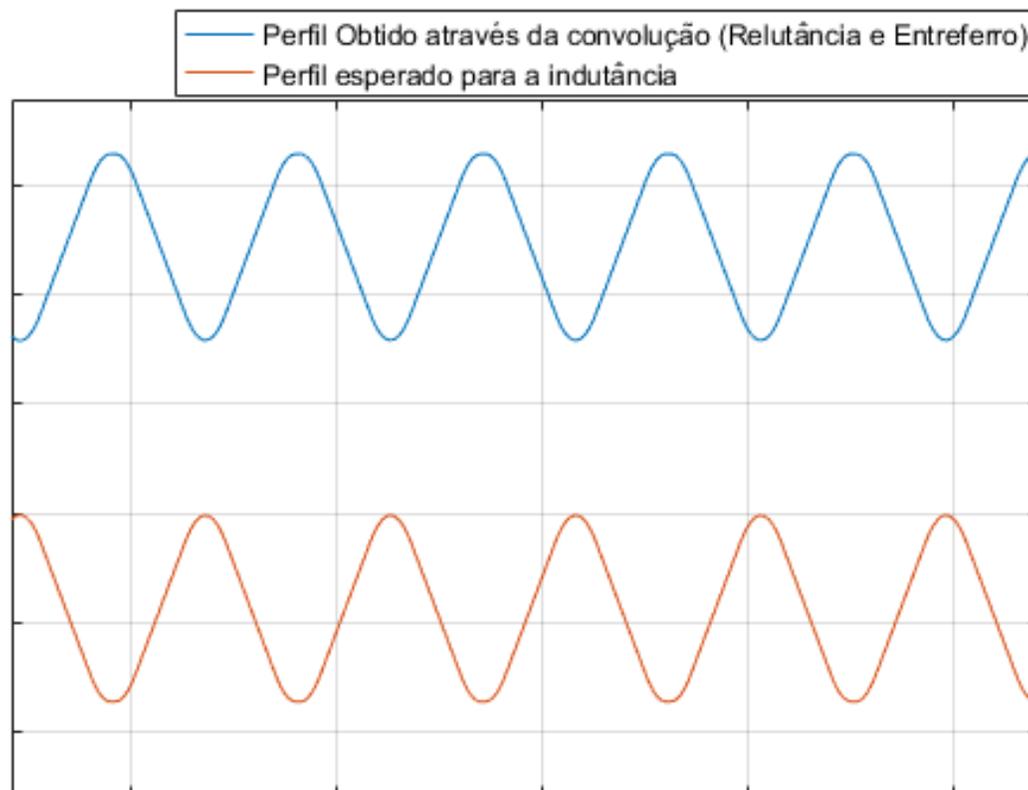


Figura 3.21 - Perfil da Relutância/Entreferro obtidos pela convolução, perfil esperado para a indutância.

Afim de se obter o perfil da indutância será feito um ajuste na curva do estator, invertendo a curva em relação ao seu valor máximo, de forma que a convolução retorne a diferença entre o entreferro máximo e o entreferro de cada posição no deslocamento da curva. Tendo assim um perfil inversamente proporcional à relutância e diretamente proporcional à indutância.

Como toda esta análise busca a determinação do perfil que a indutância terá em função do entreferro e não o seu valor numérico, o resultado será dividido pelo seu valor máximo resultando em uma curva unitária que represente o perfil esperado para a indutância, sendo necessário conhecer o valor máximo de indutância para determinar seu valor numérico. No capítulo 5 é apresentada uma proposta de método para obtenção deste valor.

Desta forma as equações 3.17, 3.18 e 3.19 apresentam o modelo utilizado para determinar o perfil da indutância (vetor base) que será utilizado como $l(\theta)$.

$$Estator''(\theta) = D - \left(-A + \left(C + (D - C) * (u(\theta - F) - u(\theta - G)) \right) \right) \quad (3.17)$$

$$Rotor''(\theta) = reta1 * (u(\theta - E) - u(\theta - H)) + (B - A) * (u(\theta - H) - u(\theta - J)) - reta2 * (u(\theta - I) - u(\theta - J)) \quad (3.18)$$

$$l(\theta) = \frac{\int_0^6 estator''(x).rotor''(\theta - x).dx}{Maximo(\int_0^6 estator''(x).rotor''(\theta - x).dx)} \quad (3.19)$$

A Figura 3.22 apresenta uma série de telas obtidas na simulação das equações apresentadas.

Cada tela possui quatro gráficos, o gráfico A representa as curvas obtidas pelas equações 3.9 e 3.13, o Gráfico B representa as equações 3.14 e 3.15 com a área que representa a diferença entre o entreferro máximo e o entreferro instantâneo colorida, o Gráfico C apresenta o resultado da convolução da equação 3.16, o Gráfico D é uma representação tridimensional das posições relativas entre o rotor e estator.

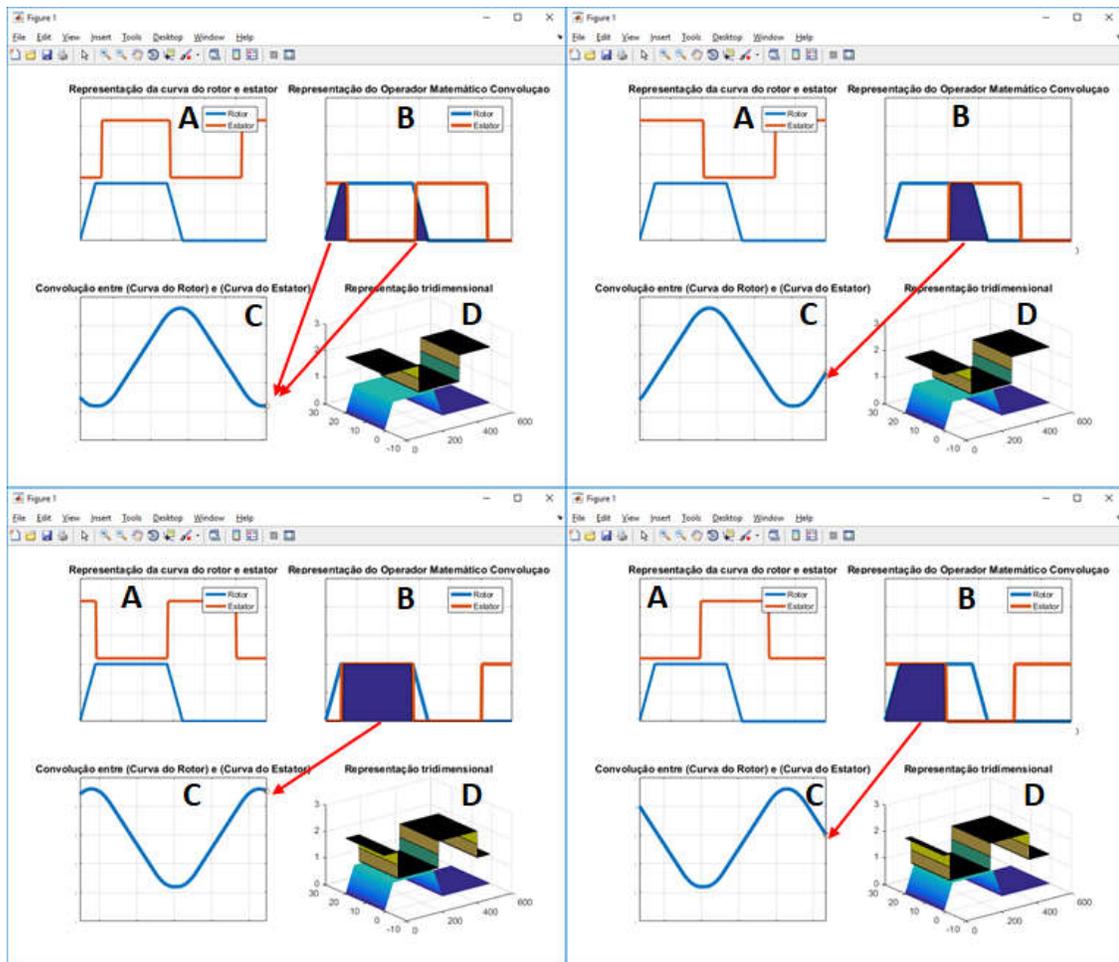


Figura 3.22 - Telas obtidas durante a simulação das equações.

3.1.2 Modelagem polinomial de curvas utilizando splines cúbicas

A modelagem foi desenvolvida utilizando Splines cúbicas a partir de polinômios na forma de Lagrange [34], pois apresentam derivada contínua em todos os pontos, Característica que não é obtida em splines lineares ou quadráticas e polinômios de Newton. Considerando que para a determinação do conjugado de cada uma das fases é necessário conhecer a derivada instantânea da indutância, esta característica se torna essencial para o modelo a ser determinado.

Em splines cúbicas, a interpolação é feita com polinômios de terceira ordem. Sendo assim apresentará quatro coeficientes a, b, c e d:

$$f(x) = [a \ b \ c \ d] \cdot \begin{bmatrix} x^3 \\ x^2 \\ x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$f(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (3.21)$$

$$f'(x) = 3 \cdot a \cdot x^2 + 2 \cdot b \cdot x + c \quad (3.22)$$

$$f''_i(x) = \frac{d^2 f}{dx^2} = 6ax + 2b \quad (3.23)$$

A Figura 3.23 , retirada de [34] exhibe de forma geral o método de interpolação.

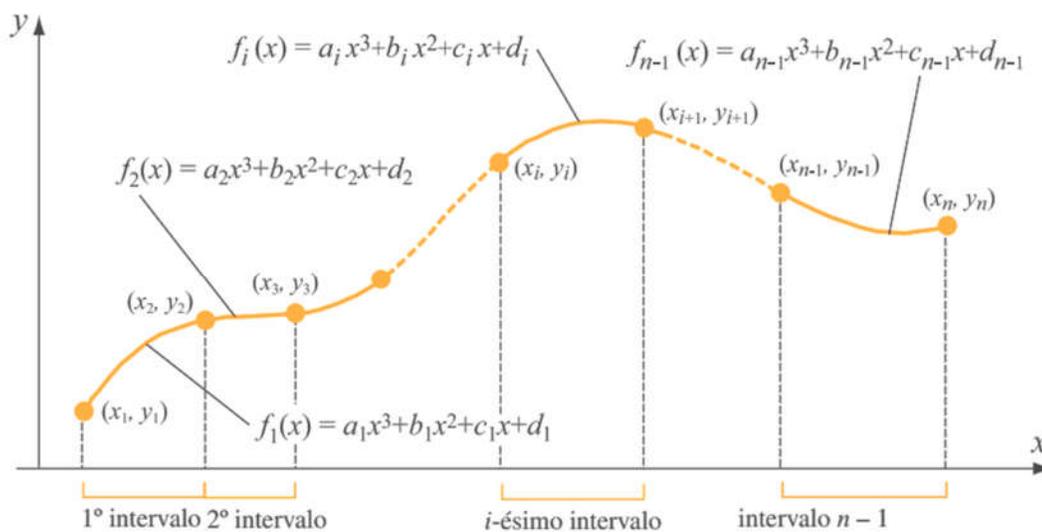


Figura 3.23 - Método de interpolação por splines cúbicas [34].

A determinação de splines cúbicas inicia-se a partir da derivada segunda do polinômio. A Figura 3.24, mostra a curva a ser modelada em (a), a derivada primeira (b) e a derivada segunda em (c).

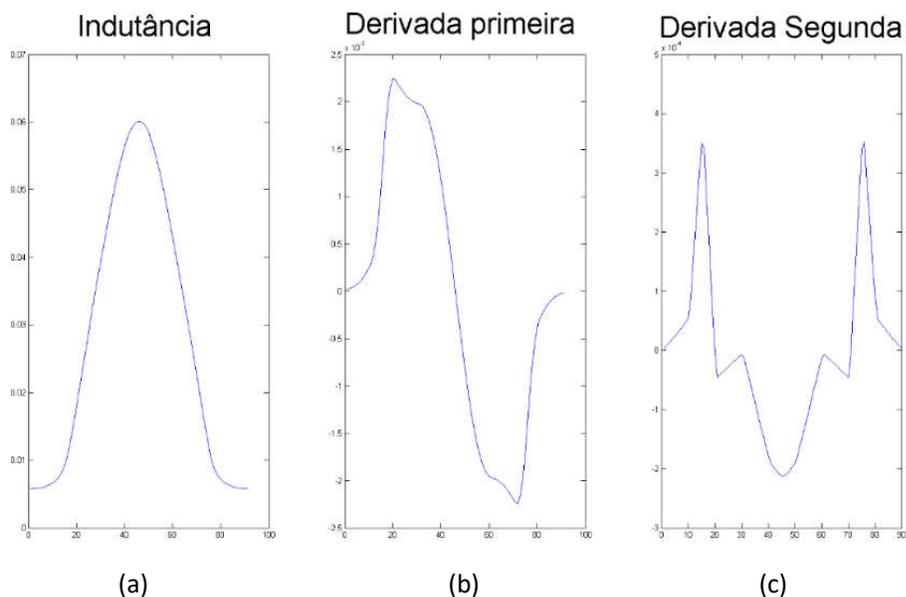


Figura 3.24 - Curva a ser modelada.

A Figura 3.25 mostra um i -ésimo intervalo compreendido entre x_i e x_{i+1} .

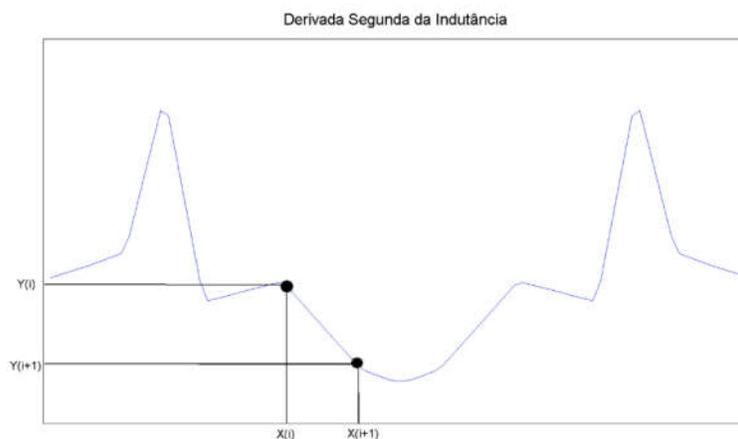


Figura 3.25 - i -ésimo intervalo compreendido entre x_i e x_{i+1}

A derivada segunda de um polinômio de terceira ordem é uma função linear. Significando que dentro de cada spline, a derivada segunda é uma função linear de x , podendo ser representada na forma de Lagrange, a forma de Lagrange está apresentada na equação 3.21.

$$f_i''(x) = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} f_i''(x_i) + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} f_i''(x_{i+1}) \quad (3.21)$$

O polinômio de terceira ordem no intervalo i pode ser determinado integrando-se a equação duas vezes. A expressão resultante contém duas constantes de integração. Essas duas constantes podem ser determinadas a partir da condição que diz que os valores dos polinômios nos nós conhecidos são:

$$f_i(x_i) = y_i \quad (3.22)$$

$$f_i(x_{i+1}) = y_{i+1} \quad (3.23)$$

Uma vez determinada as constantes de integração é possível prosseguir com o desenvolvimento, através dos processos de integração e manipulação algébrica obtém se a expressão apresentada em 3.17 e 3.18.

$$\begin{aligned} f_i(x) = & \frac{f_i''(x_i)}{6 \cdot (x_{i+1} - x_i)} (x_{i+1} - x)^3 + \frac{f_{i+1}''(x_{i+1})}{6 \cdot (x_{i+1} - x_i)} (x - x_i)^3 \\ & + \left[\frac{y_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{f_i''(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i)}{6} \right] \cdot (x_{i+1} - x) \\ & + \left[\frac{y_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} - \frac{f_{i+1}''(x_{i+1}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}{6} \right] \cdot (x - x_i) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\text{para } x_i \leq x \leq x_{i+1} \quad e \quad i = 1, 2, 3, \dots, n - 1$$

E o sistema de equações que precisa ser resolvido para os termos $f_i''(x_i)$ é dado por:

$$\begin{aligned} & (x_{i+1} - x_i) \cdot f_i''(x_i) + 2 \cdot [(x_{i+1} - x_i) + (x_{i+2} - x_{i+1})] \cdot f_{i+1}''(x_{i+1}) \\ & + (x_{i+3} - x_{i+2}) \cdot f_{i+2}''(x_{i+2}) \\ & = 6 \cdot \left[\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{(x_{i+2} - x_{i+1})} - \frac{y_{i+1} - y_i}{(x_{i+1} - x_i)} \right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n - 2$$

3.1.3 Determinação das curvas de Indutância

A partir da modelagem por splines cúbicas, obteve-se os seguintes resultados.

$$L(i, \theta) = MAX_p \cdot l_p(i) \cdot [l_p(\theta) + MAX_r \cdot l_r(i) \cdot l_r(\theta)] \quad (3.26)$$

$$l_p(i) = [i^3 \quad i^2 \quad i \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = a.i^3 + b.i^2 + c.i + d \quad (3.27)$$

$$l_p(\theta) = \begin{bmatrix} \theta^3 \\ \theta^2 \\ \theta \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [e \ f \ g \ h] = e.\theta^3 + f.\theta^2 + g.\theta + h \quad (3.28)$$

$$l_r(i) = [i^3 \quad i^2 \quad i \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} I \\ j \\ k \\ l \end{bmatrix} = I.i^3 + j.i^2 + k.i + l \quad (3.29)$$

$$l_r(\theta) = \begin{bmatrix} m \\ n \\ o \\ p \end{bmatrix} \cdot [\theta^3 \quad \theta^2 \quad \theta \quad 1] = m.i^3 + n.i^2 + o.i + p \quad (3.30)$$

Sendo os coeficientes a,b,c,d,e,f,g,h,I,j,k,l,m,n,o,p obtidos através das splines, i e θ representam os valores instantâneos da corrente e posição angular.

Para a determinação dos coeficientes foram utilizados os pontos descritos na tabela 3.1, nesta tabela os valores apresentados como Ângulo Principal foram obtidos pela modelagem apresentada em 3.1.1 a partir da geometria da máquina, os demais valores da tabela foram retirados da curva obtida por elementos finitos.

Tabela 3.1 - Pontos utilizados para determinação dos coeficientes.

| <i>Ângulo</i> | <i>Principal</i> | <i>Residual</i> | <i>Corrente</i> | <i>Principal</i> | <i>Residual</i> |
|---------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1 | 0.1002 | 0.5781 | 1 | 0.9654 | 0 |
| 5 | 0.1207 | 0.6873 | 5 | 1 | 0 |
| 9 | 0.2544 | 0.9384 | 8 | 0.9667 | 0 |
| 15 | 0.4910 | 0.9372 | 15 | 0.6603 | 0.2422 |
| 20 | 0.6829 | 0.6885 | 20 | 0.5366 | 0.4187 |
| 28 | 0.9761 | 0.0594 | 30 | 0.4004 | 0.7399 |
| 30 | 1.0000 | 0.0000 | 39 | 0.3320 | 1 |
| 32** | 0.9760 | 0.0598 | 100* | 0.1 | 1 |
| 40** | 0.6827 | 0.6886 | | | |
| 45** | 0.4907 | 0.9381 | | | |
| 51** | 0.2541 | 0.9390 | | | |
| 55** | 0.1208 | 0.6873 | | | |
| 60** | 0.0996 | 0.5742 | | | |

*Valores Estimados.

**Opcionais, se considerar o espelhamento da curva de indutância

As tabelas 3.2 e 3.3 exibem os coeficientes obtidos e utilizados para as simulações, como a curva de indutância para os ângulos se espelha em 30 graus, o cálculo para os ângulos entre 30 e 60 graus pode ser feito aproveitando este espelhamento, desta forma reduzindo o número de coeficientes e o peso computacional necessário para armazenar e processar os cálculos e no caso de utilização destes coeficientes embarcados em um DSP redução da tabela embarcada. É importante observar que utilizando este fator de espelhamento, para determinação da derivada da curva é necessário corrigir o sinal da derivada. Apesar da indutância ser espelhada em 30 graus, sua derivada é negativa para o segundo intervalo do espelhamento. O código fonte para cálculo dos coeficientes está apresentado no apêndice A3.

Tabela 3.2 - Coeficientes utilizados para as curvas dependentes da posição angular.

| <i>Intervalo</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>m</i> | <i>n</i> | <i>o</i> | <i>p</i> |
|------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0<ângulo<=5 | 0,000444 | -0,00133 | -0,00064 | 0,10173 | 0,000773 | -0,00232 | 0,017256 | 0,56239 |
| 5<ângulo<=9 | -0,00045 | 0,012057 | -0,06758 | 0,21329 | -0,00165 | 0,033963 | -0,16415 | 0,86473 |
| 9<ângulo<=15 | -1,5E-05 | 0,000329 | 0,037972 | -0,10336 | 0,000431 | -0,02211 | 0,34046 | -0,64909 |
| 15<ângulo<=20 | 8,1E-05 | -0,00397 | 0,1025 | -0,42599 | -0,00016 | 0,004451 | -0,05788 | 1,3426 |
| 20<ângulo<=28 | -0,00018 | 0,011426 | -0,20548 | 1,6272 | 0,000527 | -0,03677 | 0,76655 | -4,1536 |
| 28<ângulo<=30 | -0,00067 | 0,052532 | -1,3564 | 12,37 | 0,001845 | -0,14741 | 3,8644 | -33,066 |
| 30<ângulo<=60 | Utilizar o mesmo coeficiente de (60-ângulo), para derivadas multiplicar o resultado por -1. | | | | | | | |

Tabela 3.3 - Coeficientes utilizados para as curvas dependente da corrente.

| <i>Intervalo</i> | <i>e</i> | <i>f</i> | <i>g</i> | <i>h</i> | <i>i</i> | <i>j</i> | <i>k</i> | <i>l</i> |
|------------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1< I <5 | -0,00025 | 0,000744 | 0,011874 | 0,95303 | -0,00011 | 0,000319 | 0,001383 | -0,0016 |
| 5< I <8 | -0,00032 | 0,001835 | 0,006419 | 0,96212 | 0,000804 | -0,01334 | 0,069659 | -0,11539 |
| 8< I <15 | 0,000471 | -0,01716 | 0,15838 | 0,55689 | -0,00036 | 0,014653 | -0,15425 | 0,48171 |
| 15< I <20 | -0,00025 | 0,015147 | -0,32623 | 2,9799 | 0,000109 | -0,00657 | 0,16414 | -1,1103 |
| 20< I <30 | 2,12E-06 | 0,000188 | -0,02705 | 0,9854 | -3,33E-06 | 0,000192 | 0,028835 | -0,20822 |
| 30< I <39 | -1,2E-05 | 0,001452 | -0,06495 | 1,3645 | -1,9E-05 | 0,001577 | -0,01271 | 0,20718 |
| 39< I <100 | -3,12E-07 | 9,35E-05 | -0,01199 | 0,67592 | 3,35E-06 | -0,001 | 0,08794 | -1,1012 |

Determinados todos os coeficientes, a construção da curva de indutância se deu através da composição das curvas individuais em seguida a formação da curva final, as Figuras 3.26, 3.27 e 3.28 apresentam as formas de onda individuais e a composição final da curva tridimensional.

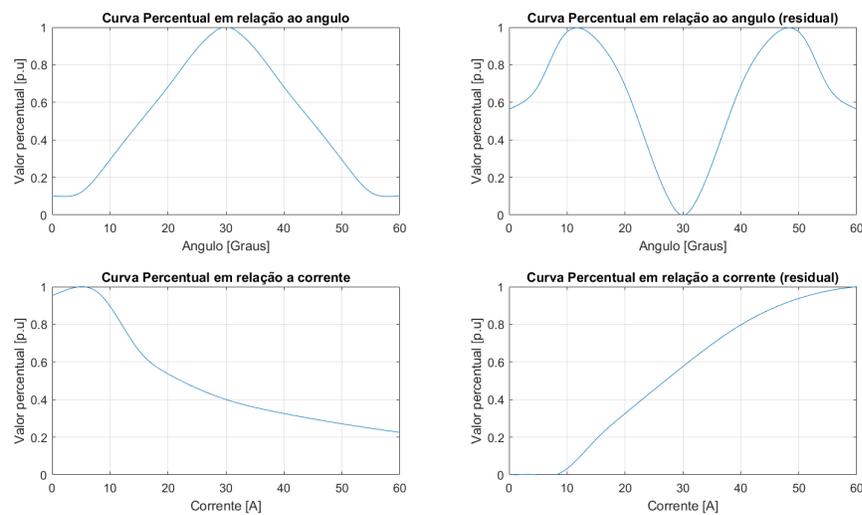


Figura 3.26 - Curvas geradoras da indutância, obtidas pelos coeficientes.

Na Figura 3.27 é apresentada a composição das curvas “principais” e “residuais”.

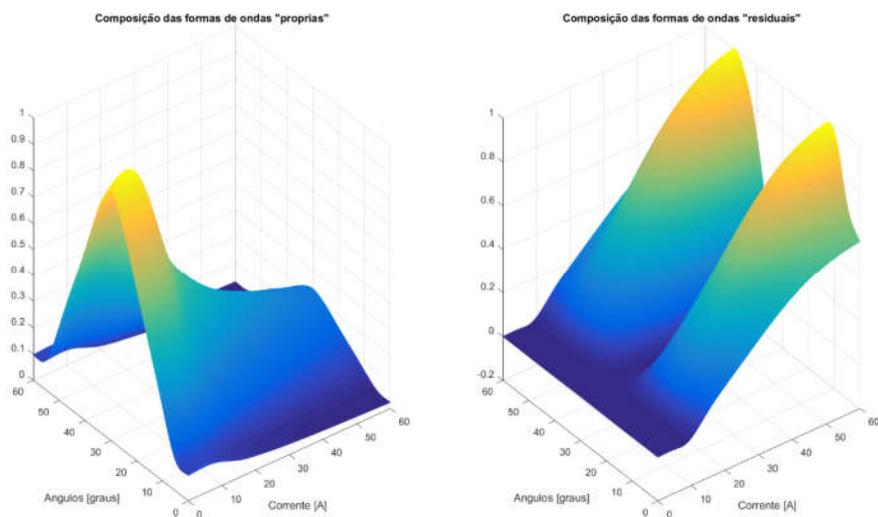


Figura 3.27 - Composição das curvas "principais" e "residuais".

Por fim, aplicando os valores de MAX_p e MAX_R e somando as curvas obteve-se a curva final de indutância utilizada para as simulações. A curva final está apresentada na Figura 3.28.

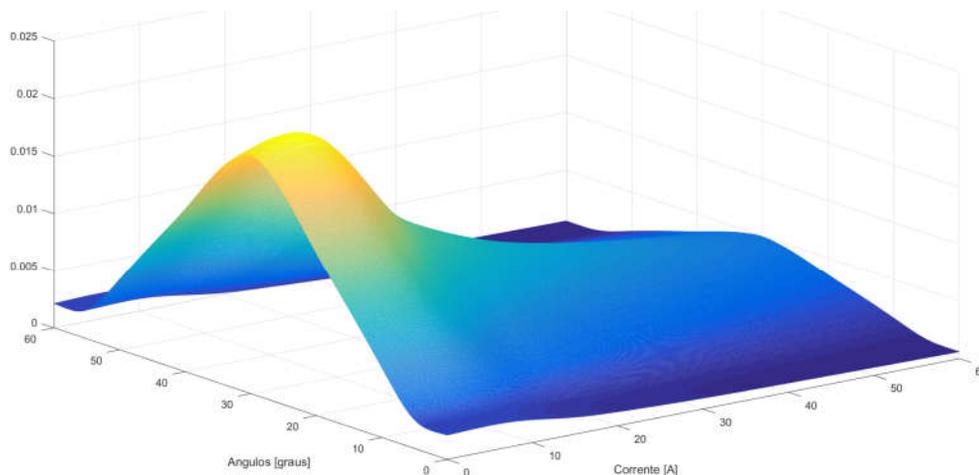


Figura 3.28 - Curva de indutância final gerada a partir dos coeficientes.

A Figura 3.29 apresenta uma comparação da curva original obtida por elementos finitos com a curva obtida pela resolução dos polinômios, apresentando as duas curvas tridimensionais e o resultado da subtração entre as duas curvas.

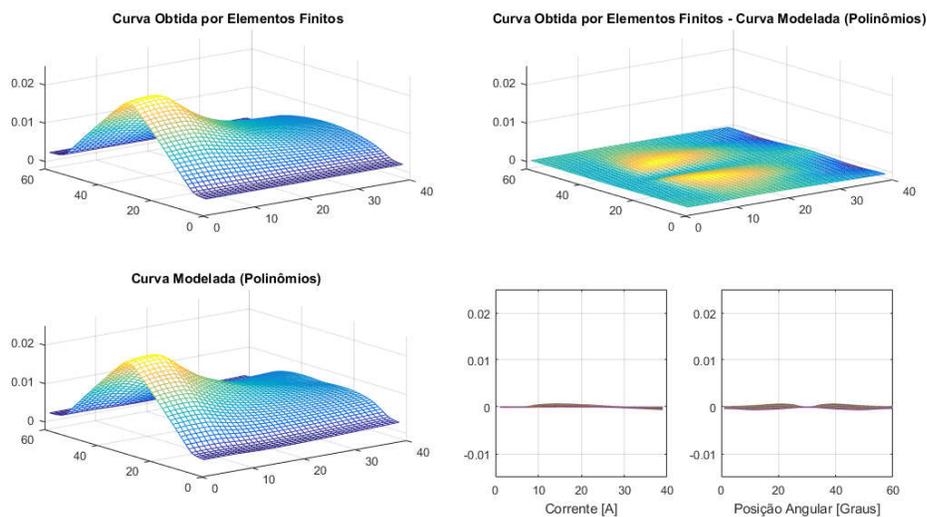


Figura 3.29 - Comparação entre a curva original e a curva modelada.

3.1.4 Simplificação do modelo

Uma vez determinadas as curvas $l_p(\theta)$, $l_p(i)$, $l_r(\theta)$, $l_r(i)$ é possível simplificar a solução matemática afim de exigir um menor esforço computacional, agrupando todos os coeficientes, reduzindo consideravelmente as tabelas a serem embarcadas ou consultadas.

Aplicando a propriedade distributiva na equação 3.26 obtém-se:

$$L(i, \theta) = MAX_p. l_p(i). l_p(\theta) + MAX_r MAX_p. l_p(i). l_r(i). l_r(\theta) \quad (3.31)$$

Escrevendo em termos matriciais a equação pode ser escrita conforme apresentado na equação 3.32.

$$L(i, \theta) = LP(i, \theta) + LR(i, \theta) \quad (3.32)$$

Onde:

$$LP(i, \theta) = [i_{1x4}] \cdot [A_{4x1}] \cdot [B_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.33)$$

$$LR(i, \theta) = [i_{1x4}] \cdot [A_{4x1}] \cdot [i_{1x4}] \cdot [C_{4x1}] \cdot [D_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.34)$$

$$[i_{1x4}] = [i^3 \quad i^2 \quad i \quad 1] \quad (3.35)$$

$$[A_{4x1}] = MAX_p. \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$[B_{1x4}] = [e \quad f \quad g \quad h] \quad (3.37)$$

$$[\theta_{4x1}] = \begin{bmatrix} \theta^3 \\ \theta^2 \\ \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$[C_{4x1}] = MAX_r. \begin{bmatrix} l \\ j \\ k \\ L \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$[D_{1x4}] = [m \quad n \quad o \quad p] \quad (3.40)$$

Desta forma segue o desenvolvimento:

$$L(i, \theta) = LP(i, \theta) + LR(i, \theta) \quad (3.41)$$

$$L(i, \theta) = [i_{1x4}] \cdot [A_{4x1}] \cdot [B_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.42)$$

$$+ [i_{1x4}] \cdot [A_{4x1}] \cdot [i_{1x4}] \cdot [C_{4x1}] \cdot [D_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}]$$

$$L(i, \theta) = [i_{1x4}] \cdot [A_{4x1}] \cdot ([B_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}] + [i_{1x4}] \cdot [C_{4x1}] \cdot [D_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}]) \quad (3.43)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot ([B_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}] + [i_{1x4}] \cdot [C_{4x1}] \cdot [D_{1x4}] \cdot [\theta_{4x1}]) \quad (3.44)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot ([B_{1x4}] + [i_{1x4}] \cdot [CD_{4x4}]) \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.45)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot ([B_{1x4}] + [i \cdot (C \cdot D)_{1x4}]) \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.46)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot ((B + i \cdot (C \cdot D))_{1x4}) \cdot [\theta_{4x1}] \quad (3.47)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot (((B + i \cdot (C \cdot D)) \cdot \theta)_{1x1}) \quad (3.48)$$

$$L(i, \theta) = [i \cdot A_{1x1}] \cdot (((B + i \cdot (C \cdot D)) \cdot \theta)_{1x1}) \quad (3.49)$$

Resolvendo os produtos das matrizes se obtém a forma reduzida para fins de economia de recursos computacionais:

$$L(i, \theta) = \delta \cdot (\gamma \cdot (p + o \cdot \theta + n \cdot \theta^2 + m \cdot \theta^3) + (h + g \cdot \theta + f \cdot \theta^2 + e \cdot \theta^3)) \quad (3.50)$$

$$\delta(i) = MAX_p(a \cdot i^3 + b \cdot i^2 + c \cdot i + d) \quad (3.51)$$

$$\gamma(\theta) = MAX_r(I \cdot i^3 + j \cdot i^2 + k \cdot i + L) \quad (3.52)$$

Sendo a, b, c, d, e, f, g, h, I, j, k, L, m, n, o e p os coeficientes apresentados na tabela 3.2 e 3.3.

Uma outra informação necessária é a derivada da indutância, parâmetro necessário para determinar o conjugado da máquina, por se tratar de um polinômio, é simples obter a derivada utilizando os mesmos coeficientes e como a modelagem foi feita baseada em curvas de terceira ordem, a derivada é contínua em todo intervalo, a equação 3.54 apresenta a equação para a derivada da indutância em relação à posição angular.

$$\frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial (MAX_p \cdot l_p(i) \cdot l_p(\theta))}{\partial \theta} + \frac{\partial (MAX_r MAX_p \cdot l_p(i) \cdot l_r(i) \cdot l_r(\theta))}{\partial \theta} \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} = MAX_p \cdot l_p(i) \cdot \frac{\partial l_p(\theta)}{\partial \theta} + MAX_r MAX_p \cdot l_p(i) \cdot l_r(i) \cdot \frac{\partial l_r(\theta)}{\partial \theta} \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial l_p(\theta)}{\partial \theta} = 3 \cdot e \cdot \theta^2 + 2f \cdot \theta + g \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial l_r(\theta)}{\partial \theta} = 3 \cdot m \cdot \theta^2 + 2n \cdot \theta + o \quad (3.56)$$

CAPÍTULO 4

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO

4.1 CIRCUITO ELÉTRICO - SOFTWARE PSIM

Para fazer a simulação da MRV foi utilizado o software PSIM versão 9.1.1.4 que disponibiliza um modelo da MRV, necessitando configurar os dados da máquina a ser simulada. A Figura 4.1 exibe a tela de configuração do bloco, onde o parâmetro *inductance Table File* requer um arquivo com as curvas de indutância da máquina, as curvas utilizadas foram geradas no MatLAB utilizando os polinômios desenvolvidos e apresentados, os demais parâmetros foram estimados ou coletados diretamente na máquina.

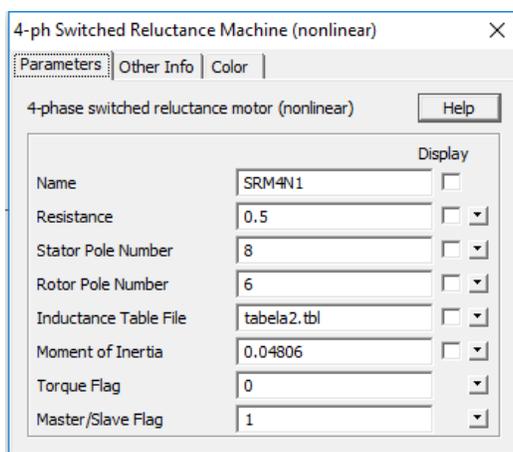


Figura 4.1 - Tela de configuração do modelo da MRV no PSIM.

Na Figura 4.2 é exibido a MRV juntamente com o encoder detector de posição na simulação.

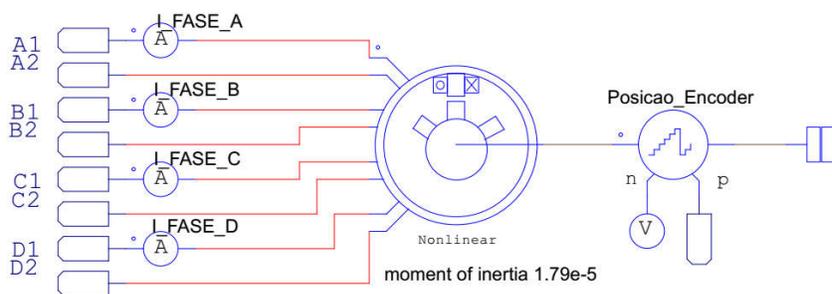


Figura 4.2 - Máquina a Relutância Variável na Simulação do PSIM.

Na Figura 4.3 é exibido o conversor Half-Bridge desenvolvido na simulação, juntamente com a fonte de excitação e algumas das cargas testadas durante a simulação.

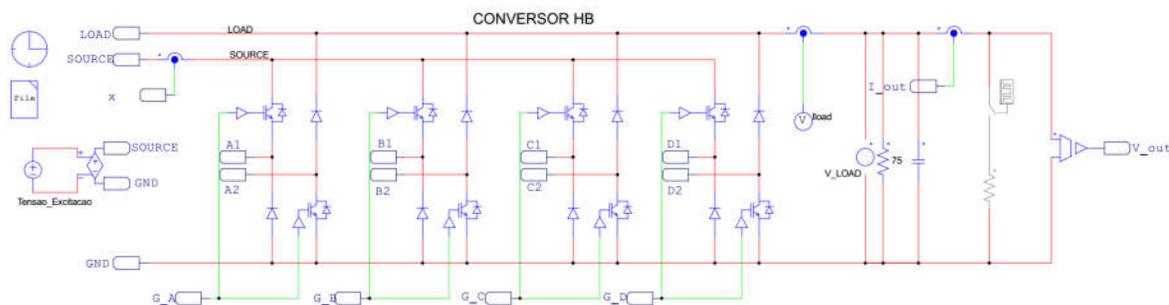


Figura 4.3 - Conversor de potência da simulação.

Para simular a máquina primária, foram desenvolvidas duas estratégias, a primeira exibida na Figura 4.4, consiste em um arranjo simulando a máquina de indução utilizada na bancada física. A segunda estratégia de acionamento foi simulando um gerador eólico exibida na Figura 4.5, para isso foi utilizado o bloco *Wind Turbine* disponibilizado no PSIM.

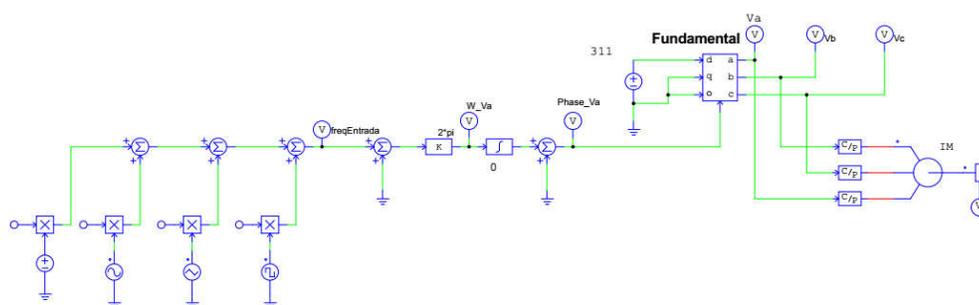


Figura 4.4 - Arranjo simulando uma máquina de indução com controle de velocidade.

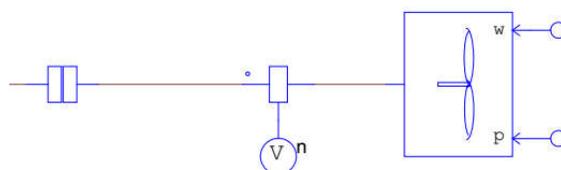


Figura 4.5 - Bloco "wind turbine" utilizado para simular turbina eólica.

O circuito responsável pela geração dos pulsos de disparo é exibido na Figura 4.6, neste circuito a posição coletada do encoder é fracionada em seguimentos de 60 graus que compreende o acionamento das quatro fases. Em seguida foi feita uma comparação do ângulo atual com os parâmetros de cada fase, gerando assim os pulsos de disparo.

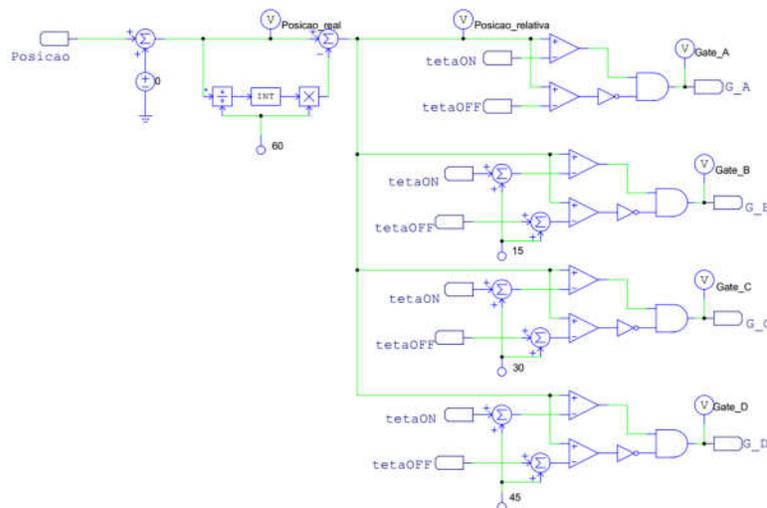


Figura 4.6 - Determinação dos pulsos de disparo na simulação.

4.1.1 Estimador de Indutância e estimador de conjugado

Afim de testar o comportamento dos polinômios desenvolvidos no capítulo 3, desenvolveu-se um algoritmo baseado nas equações apresentadas, determinando assim a indutância instantânea em função da corrente e da posição angular e a derivada parcial da indutância em relação à posição angular.

As Figuras 4.7 e 4.8 exibem respectivamente as funções que interpretam e determina os coeficientes a serem utilizados. Os códigos fontes em C das sub-funções estão apresentados no apêndice B10.

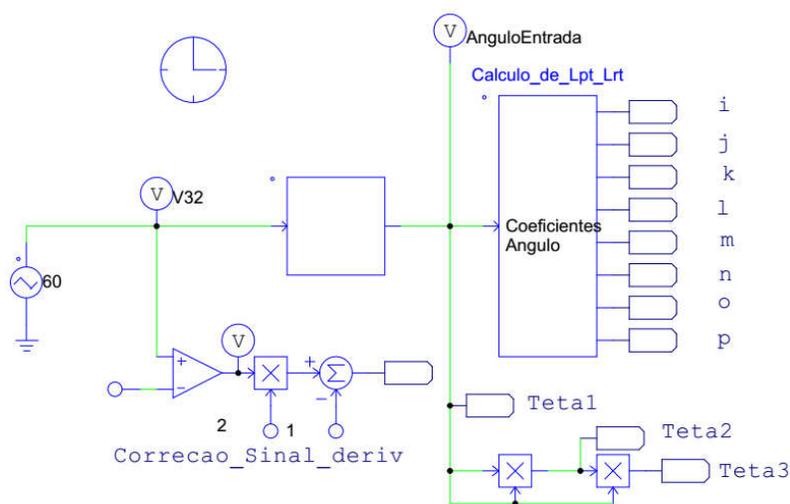


Figura 4.7 - Determinação dos coeficientes para funções dos ângulos

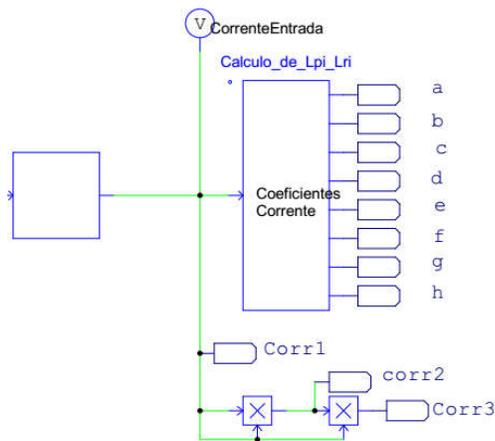


Figura 4.8 - Determinação dos coeficientes para as funções dependentes da corrente

Na Figura 4.9 é apresentado o código que calcula as quatro curvas que serão compostas para gerar a indutância final.

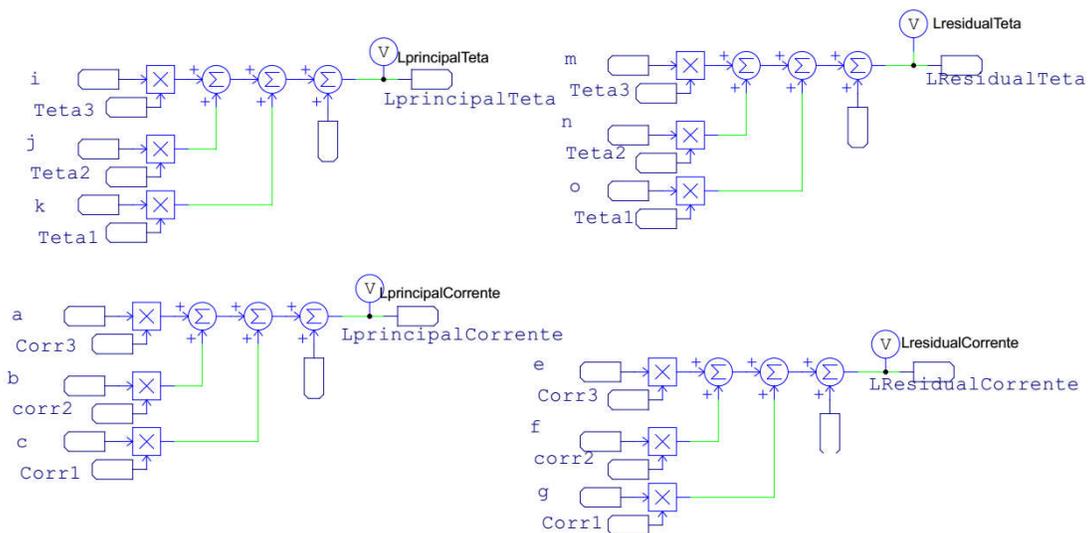


Figura 4.9 - Calculo das curvas formadoras da indutância

Na Figura 4.10 é apresentada a curva principal em função do ângulo e na Figura 4.11 a curva residual em função do ângulo.

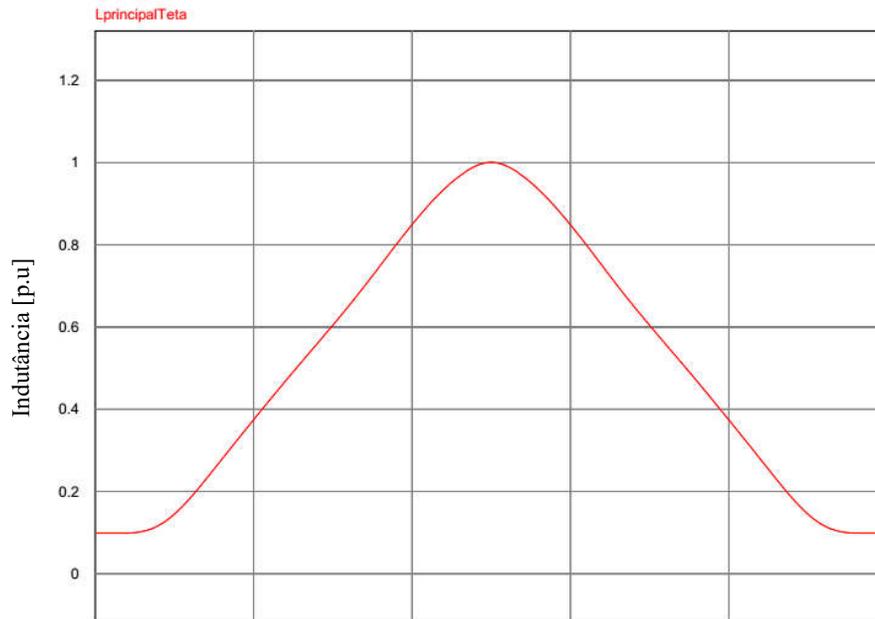


Figura 4.10 - Curva da indutância principal em função do ângulo

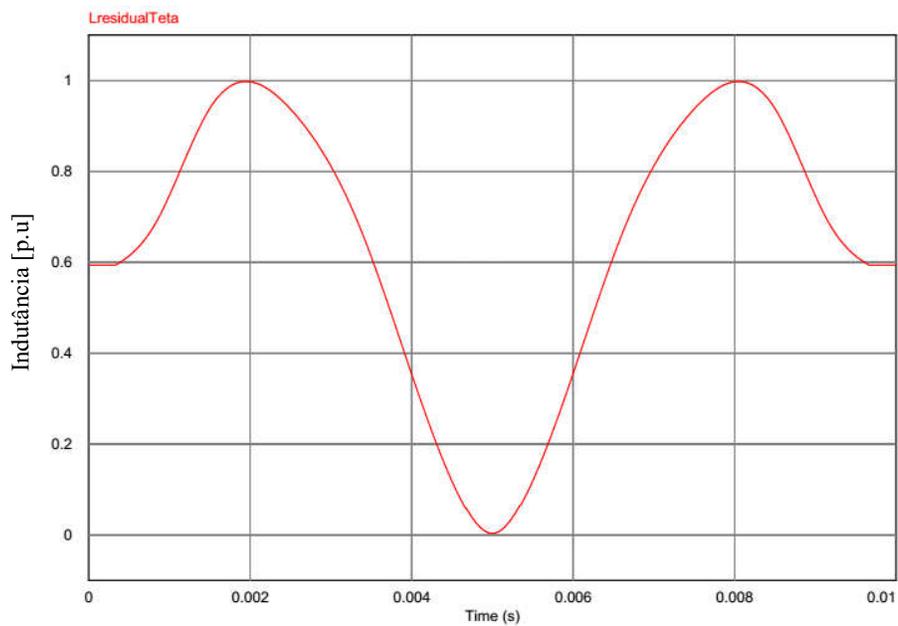


Figura 4.11 - Curva da indutância residual em função do ângulo

Na Figura 4.12 e 4.13 são apresentadas as curvas principais e resultantes em função da corrente respectivamente.

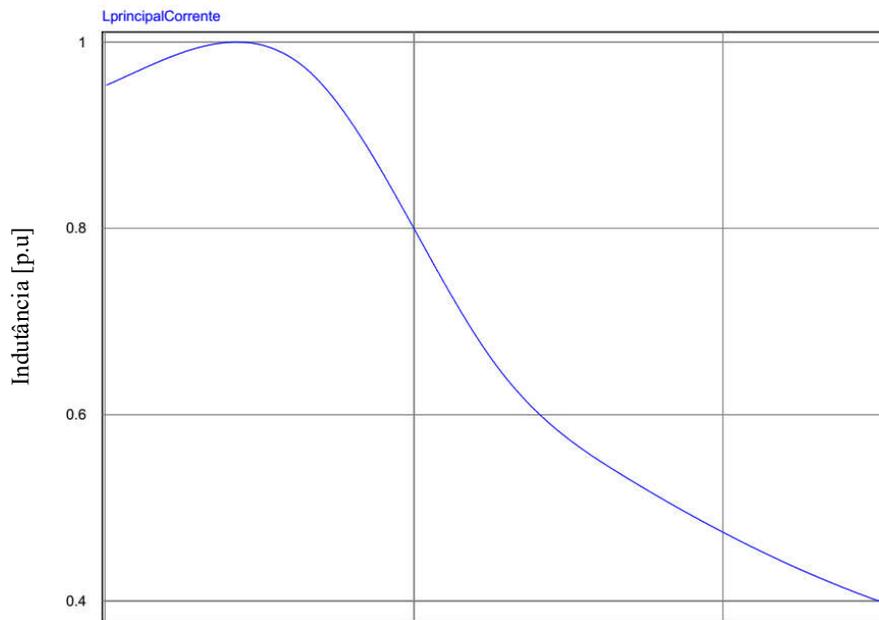


Figura 4.12 - Curva da indutância principal em função da corrente

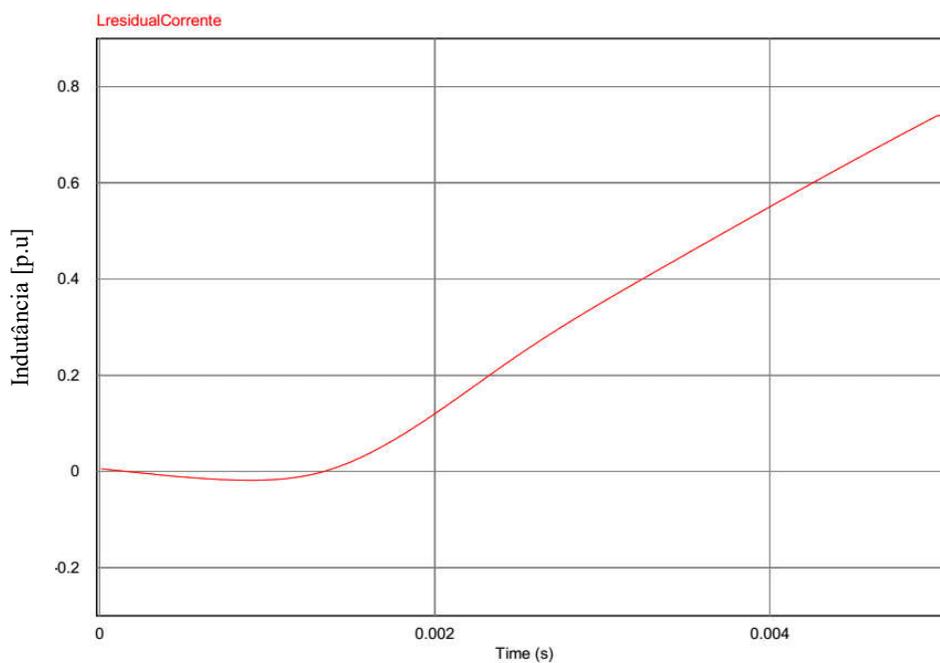


Figura 4.13 - Curva da indutância residual em função da corrente

Após obter as quatro curvas, foi feita uma composição e obtida a curva final de indutância, a Figura 4.14 apresenta a curva final de indutância na situação corrente de 2 Amperes e ângulos variando entre 0 e 60 graus, já com os valores de maxP e maxR atribuídos.

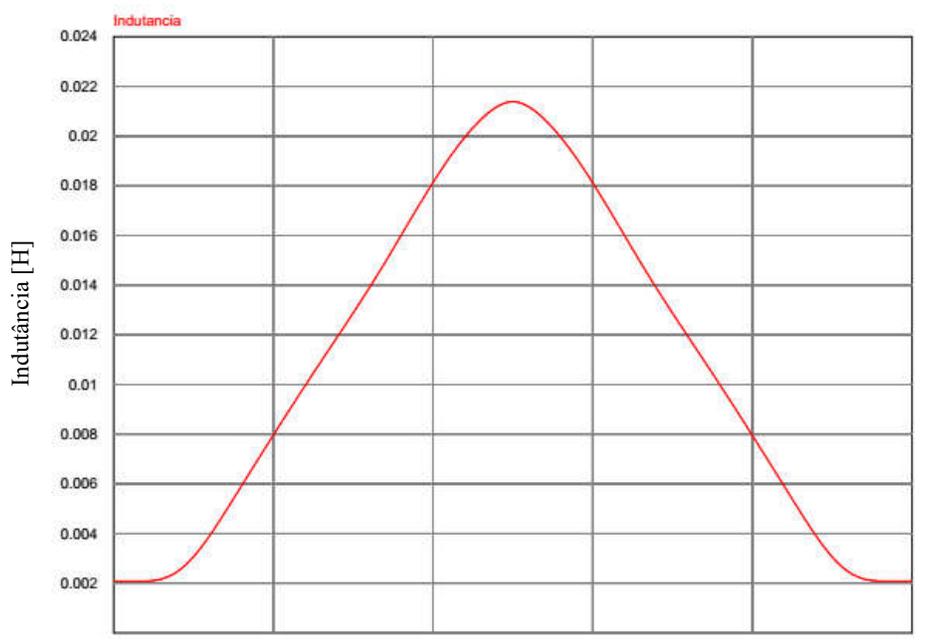


Figura 4.14 - Curva final da indutância dependente da posição angular e da corrente

Conforme apresentado é possível utilizando os mesmos coeficientes determinar a derivada da indutância em relação à posição rotórica. A Figura 4.15 apresenta o código que calcula a derivada, a forma de onda da derivada para uma variação angular de 0 a 60 graus com uma corrente constante de 2 Ampères é apresentada na Figura 4.16.

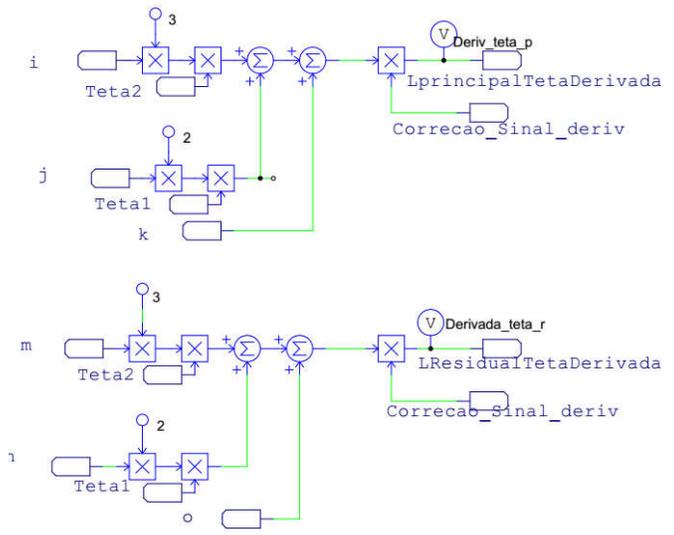


Figura 4.15 - Função que calcula a derivada parcial da indutância

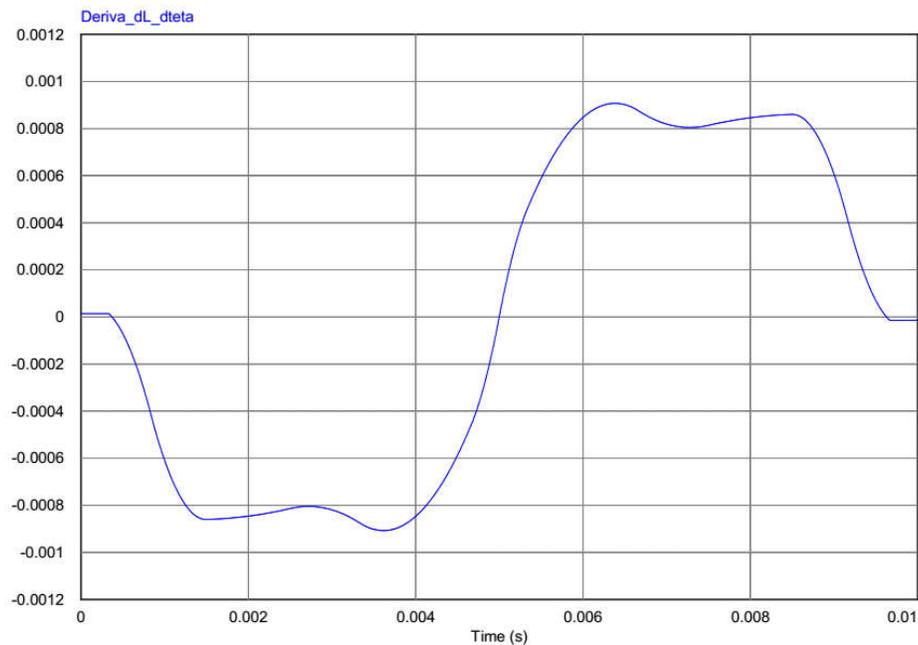


Figura 4.16 - Derivada Parcial da Indutância em relação à posição rotórica

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam as formas de ondas do estimador de indutância durante uma simulação com tensão de alimentação na excitação de 30 V, largura do pulso de acionamento de 15 graus. A Figura 4.17 exibe as quatro curvas formadoras da indutância juntamente com a corrente medida para o cálculo, a Figura 4.18-a apresenta a indutância estimada na fase B da máquina simulada juntamente com a corrente na Figura 4.18-b. É perceptível que com o aumento da corrente ocorre a redução da indutância na fase da máquina.

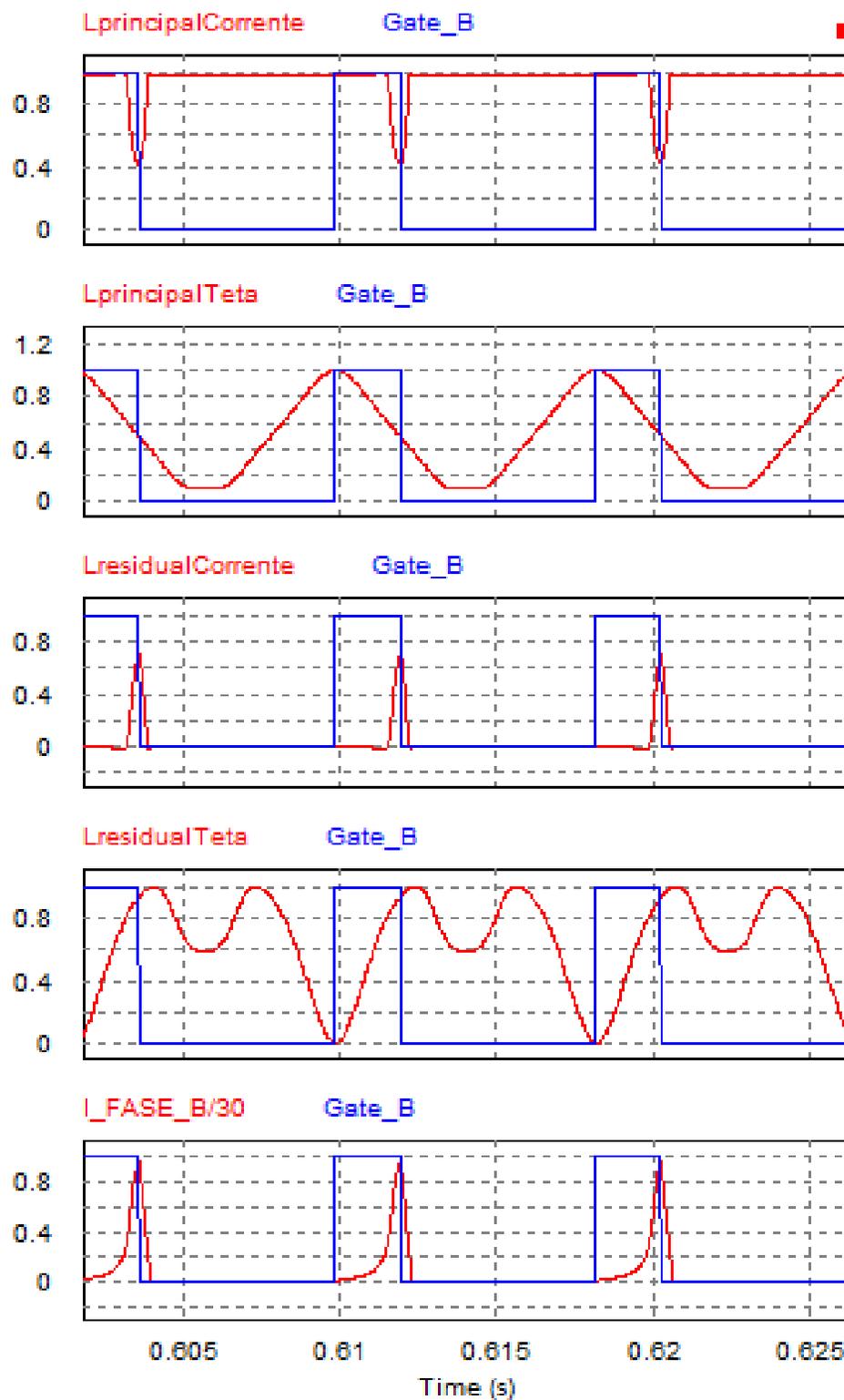


Figura 4.17 - Curvas formadoras da indutância estimadas durante a simulação.

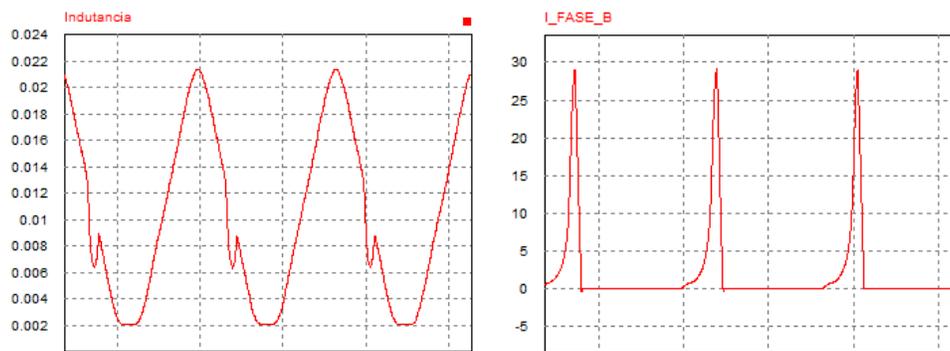


Figura 4.18 - Indutância estimada e corrente medida na fase da máquina.

Na Figura 4.19 estão apresentadas as correntes e tensões nas fases da máquina e a tensão na carga.

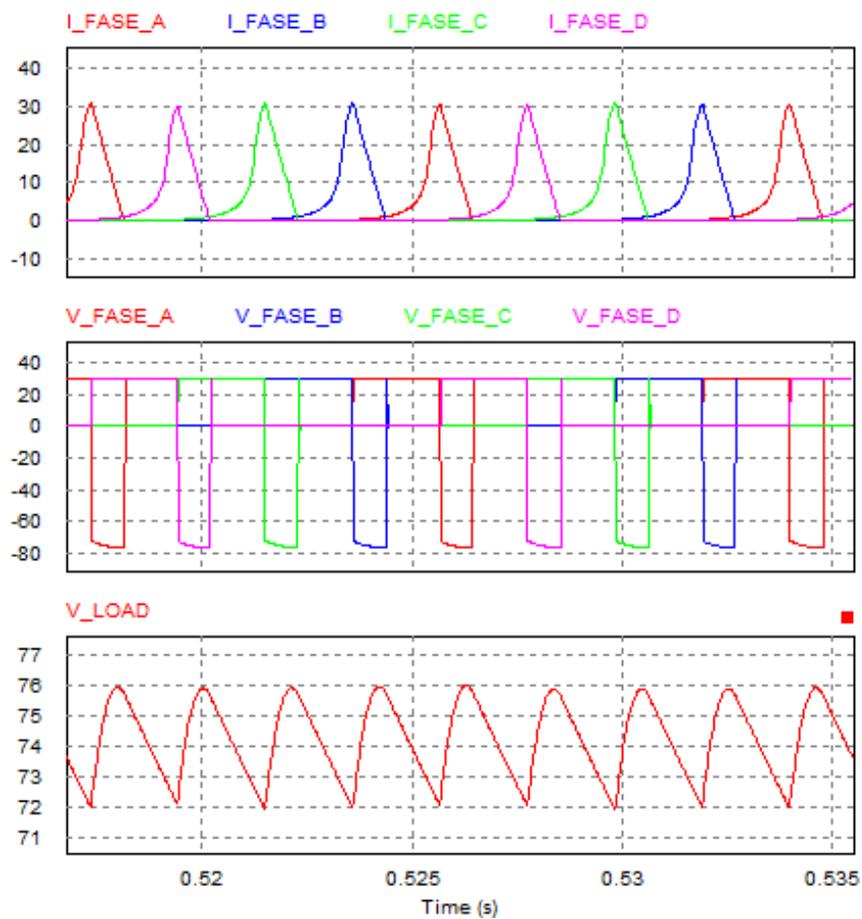


Figura 4.19 - Corrente e tensão nas fases, tensão na carga.

Na Figura 4.20 é possível visualizar a tensão e corrente de cada fase.

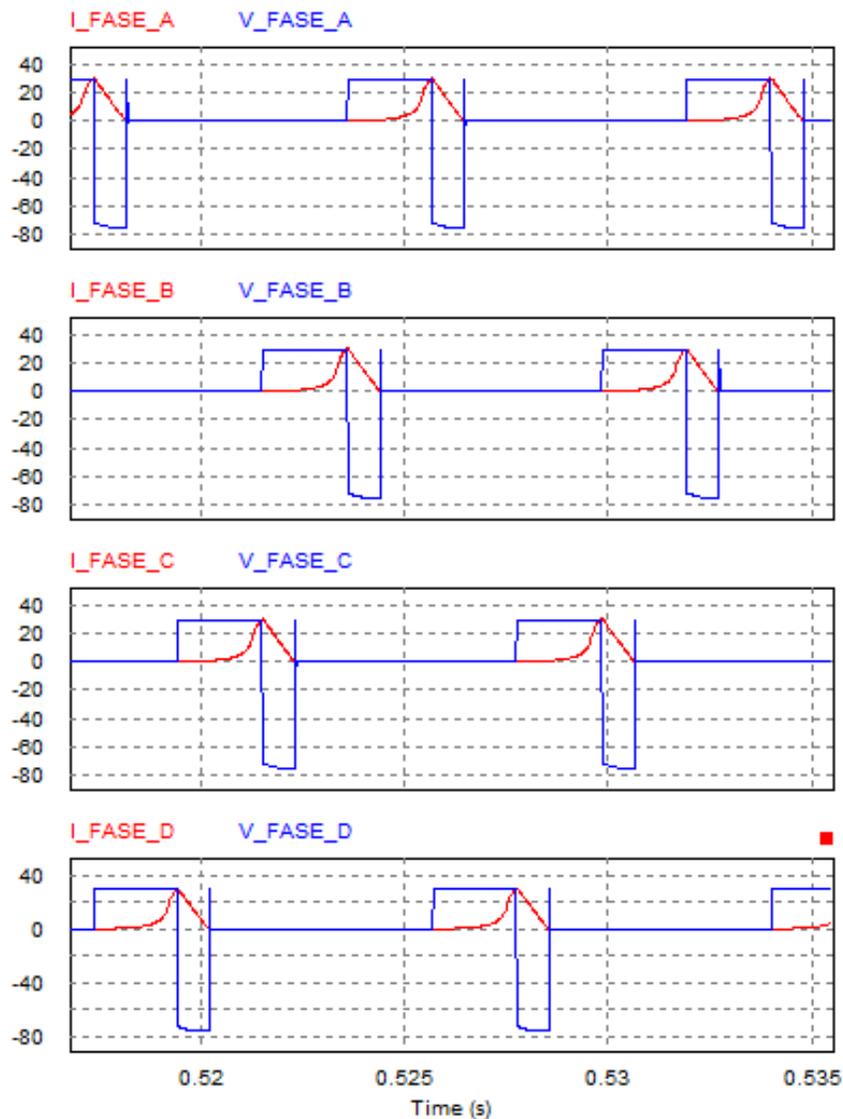


Figura 4.20 - Correntes e tensões nas fases da máquina durante a simulação.

Na Figura 4.21 estão apresentadas as formas de onda tensão na fase B, corrente na fase B, a resolução de uma parcela da expressão do conjugado eletromagnético, a derivada instantânea da indutância e a indutância.

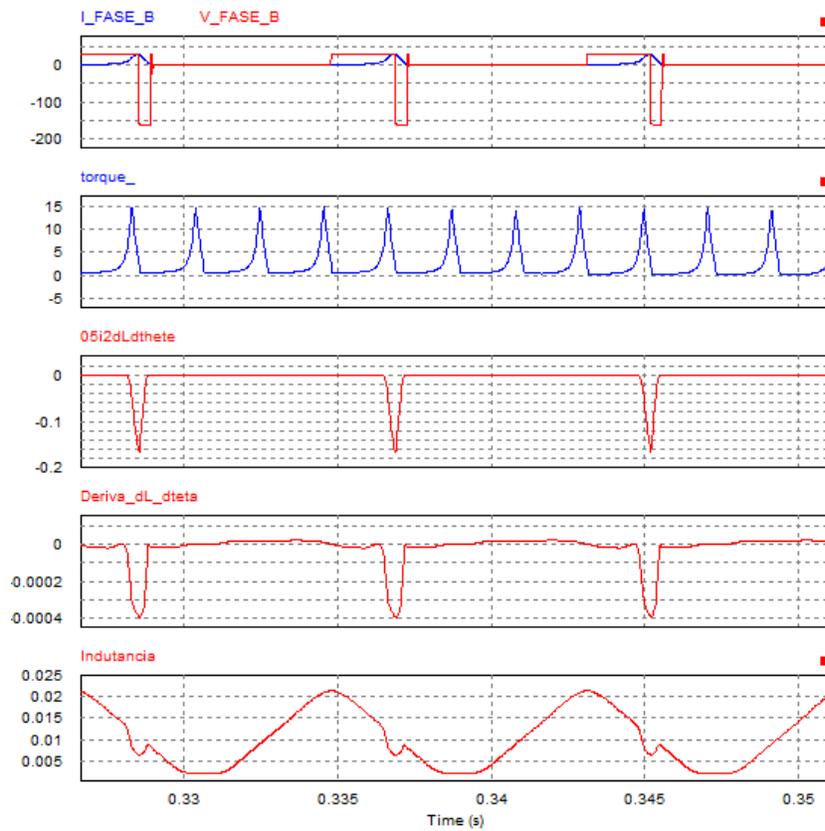


Figura 4.21 - Derivada da indutância, Corrente e tensão na fase C e Conjugado medido.

A Figura 4.22 apresenta o conjugado medido com o bloco *Torque Sensor* do Psim.

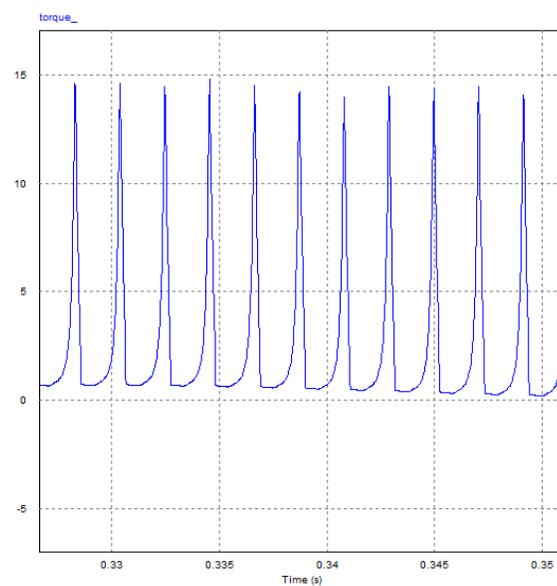


Figura 4.22 - Conjugado

Na Figura 4.23 está apresentado o rendimento estimado para um dos acionamentos durante a simulação. A equação utilizada para o cálculo do rendimento está apresentada na equação 4.1.

$$\eta = \frac{\text{Potência na Carga}}{\text{Potência na excitação} + \text{Potência Mecânica}} \quad (4.1)$$

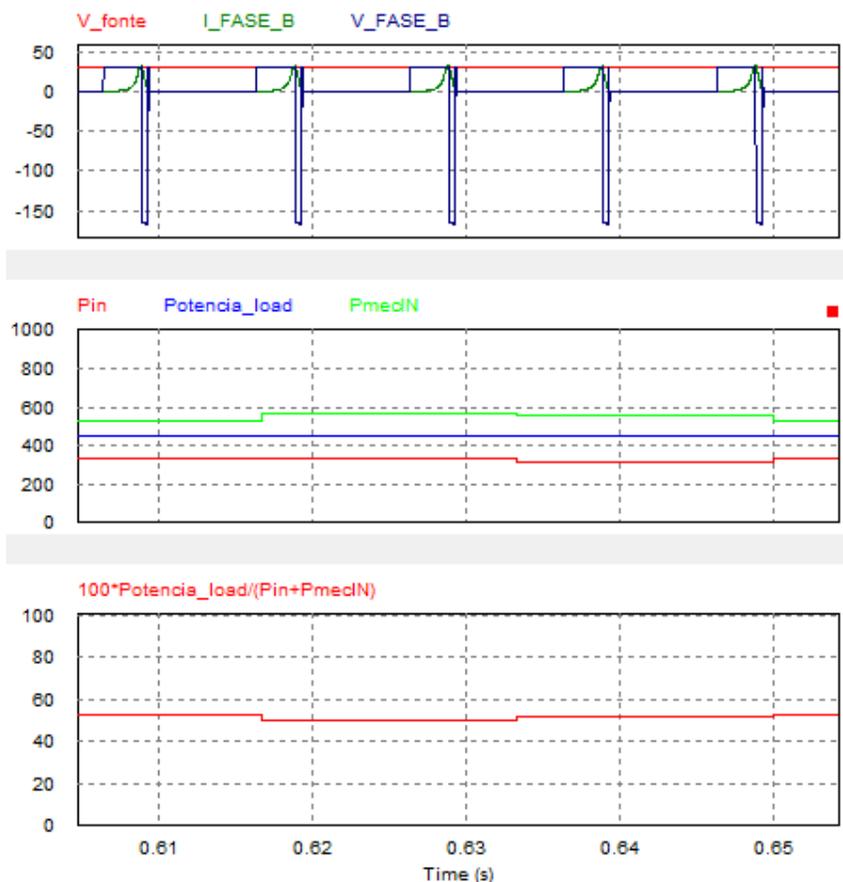


Figura 4.23 - Rendimento estimado.

4.2.1 Controle da tensão gerada

Foi desenvolvido uma estratégia de controle da tensão gerada utilizando o controlador PI disponível no PSIM, as Figuras 4.24 e 4.25 apresentam a estratégia de controle adotada, sendo a Figura 4.25 o diagrama desenvolvido no PSIM. Na Figura 4.26 são apresentadas as formas de ondas obtidas na simulação, sendo tensão gerada, corrente em uma das fases da máquina e conjugado.

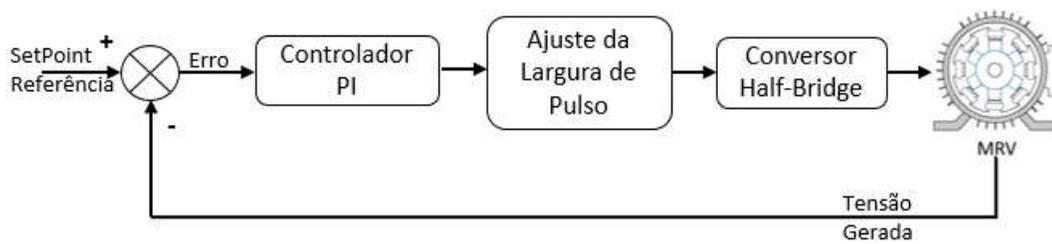


Figura 4.24 - Estratégia de controle para a tensão gerada.

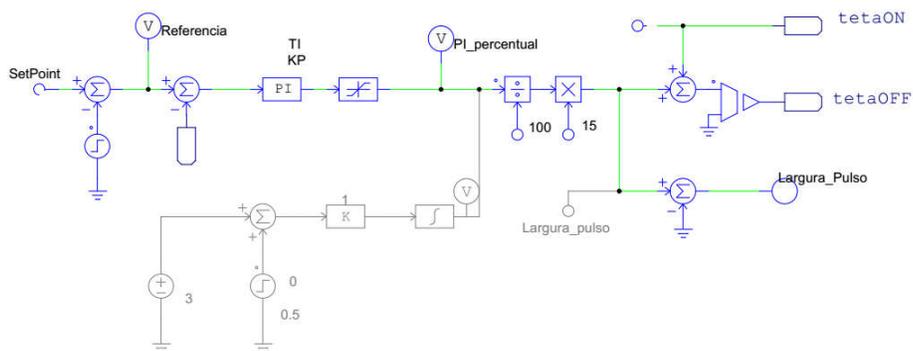


Figura 4.25 - Malha de Controle da tensão gerada

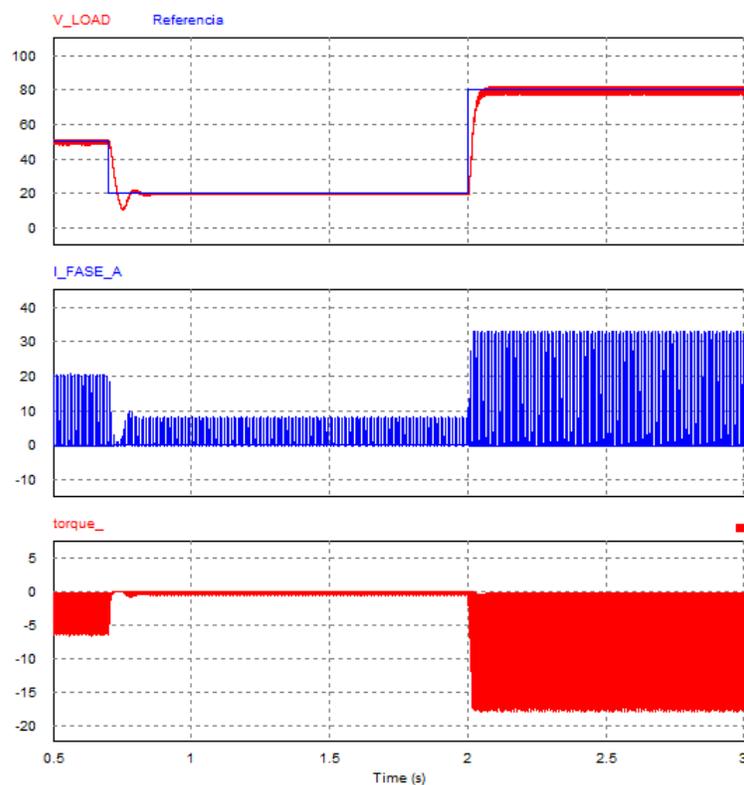


Figura 4.26 - Formas de onda obtidas

CAPÍTULO 5

BANCADA DE ACIONAMENTO

O processo de ensaio e acionamento da MRV, juntamente com o seu controle pode se tornar complexo e confuso, pois, se faz necessário a interligação de vários dispositivos e circuitos diferentes, grande parte das vezes com referências (terras) distintos e isolados.

Afim de facilitar os testes e ensaios realizados e deixar o acionamento da MRV de forma didática e simplificada, foi desenvolvida uma bancada para acionamento da MRV, permitindo seu acionamento como motor, gerador auto excitado e gerador com excitação independente. A Figura 5.1 exibe um diagrama simplificado da bancada desenvolvida.

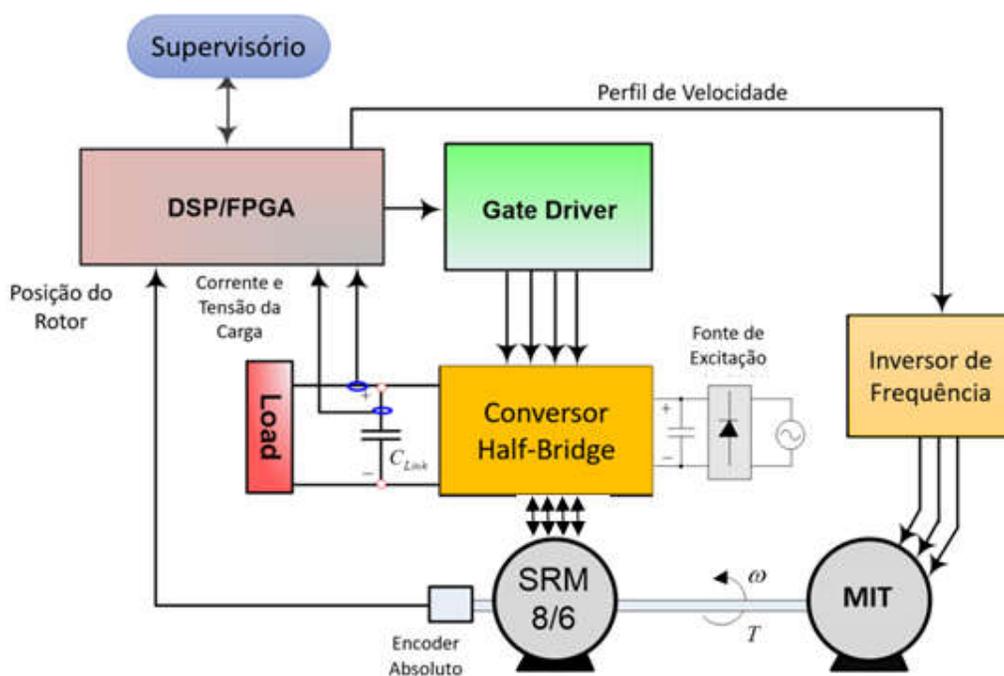


Figura 5.1 - Diagrama simplificado de acionamentos para a MRV

5.1 DISPOSITIVOS ELETROMECAÂNICOS E ELETROELETRÔNICOS DE ACIONAMENTO

A Máquina a Relutância Variável utilizada foi do tipo 8/6 com potência nominal de 3CV, podendo ser acionada como motor ou gerador sem a necessidade de modificação das ligações físicas da bancada, bastando para isso acionar um relé comandado diretamente pelo controlador DSP/FPGA. Tornando simples a reconfiguração do tipo de acionamento, desta forma possibilitando acionar a MRV também como moto-gerador, uma condição de operação desejável para diversas aplicações [2], [20], e [21].

Para atuar como máquina primária durante as operações como gerador foi utilizado um motor de indução trifásico 4 polos de 3 CV, acionado por um inversor de frequência controlado diretamente pelo DSP/FPGA através da saída analógica [22], permitindo acionar e controlar a velocidade da máquina primária conforme a necessidade do ensaio. Podendo simular perfis de velocidade das mais diferentes fontes, como por exemplo a variação da velocidade dos ventos para simulações como gerador eólico, ou geração de degraus/rampas de velocidade para verificar a performance e estabilidade do controle de tensão gerada.

Para a detecção da posição rotórica foi utilizado um encoder absoluto, fornecendo um sinal digital equivalente à posição atual do eixo em código *gray*. O encoder utilizado possui uma resolução de 10 *bits*, permitindo detectar 1024 posições diferentes do eixo ao longo de uma volta, com uma resolução de aproximadamente 0,35 graus, valor suficientemente satisfatório para o estudo do controle e operação da MRV.

Uma vez conhecida a posição angular atual no eixo do encoder, é necessário um ajuste para que a posição zero do encoder coincida com o alinhamento da posição em que uma das fases tenha impedância máxima. Apesar de ser possível ajustar diretamente no acoplamento do encoder com a MRV, essa tarefa seria de dificuldade relativamente alta dada a resolução do encoder. Para solucionar esse problema foi implementado um ajuste no algoritmo para que seja possível transladar a referência do encoder, inclusive durante a operação da máquina, deslocando assim a sua posição zero para qualquer posição desejada ao longo de uma volta, permitindo que novas possibilidades de controle e ajuste dos pulsos de acionamento sejam realizadas.

O acoplamento entre o motor de indução, a Máquina a Relutância Variável e o encoder foi feita sobre um suporte desenvolvido especificamente para possibilitar uma fácil montagem e alinhamento, a Figura 5.2 exhibe o conjunto montado e alinhado.

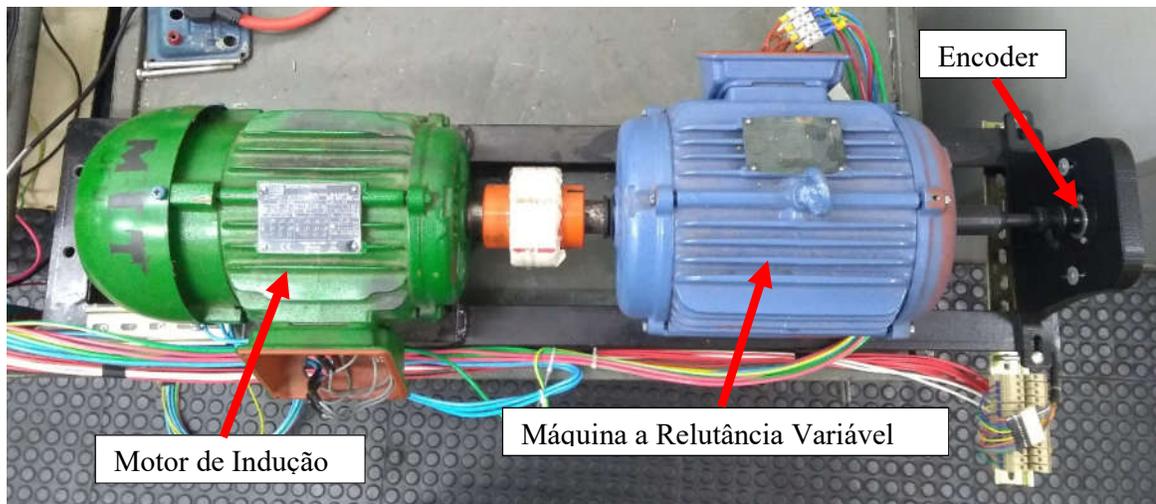


Figura 5.2 - Conjunto MIT-MRV-Encoder montado e alinhado.

A bancada foi construída visando ter todos componentes disponibilizados de forma didática e de fácil acesso, sendo assim optou-se por disponibilizar todos componentes em uma placa de madeira presa a um suporte metálico, deixando assim todos componentes a vista e possibilitando uma rápida e fácil reconfiguração ou ajustes quando necessário.

A Figura 5.3 exibe uma foto da bancada finalizada, todos os componentes presente na bancada estão listados na tabela 5.1.

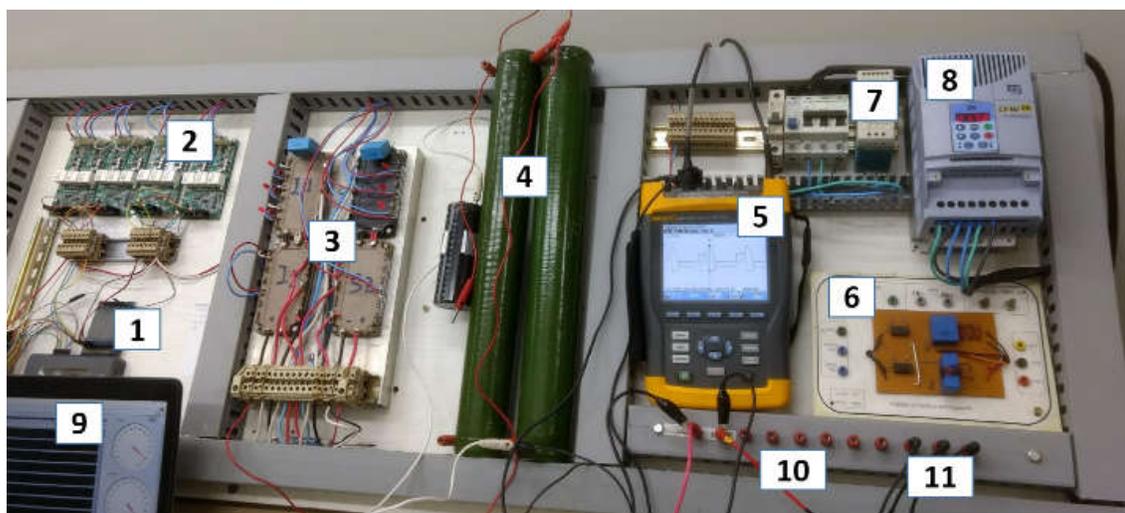


Figura 5.3 - Bancada Finalizada.

Tabela 5.1 - Componentes da bancada.

| ID | Componentes da Bancada | | |
|----|------------------------|------------------------------------|---------------|
| | QTDE | Descrição | |
| 1 | 1 | DSP / FPGA | NY MyRIO 1901 |
| 2 | 4 | Drive isolado Supplier | DRM100D80A |
| 3 | 1 | Conversor Half-Bridge | 6MBI100S060 |
| 4 | 3 | Capacitores e Resistores | |
| 5 | 1 | Analisador de Qualidade de Energia | Fluke 435 |
| 6 | 1 | Condicionador de sinais | |
| 7 | 1 | Fonte para os periféricos | MPC 303 DI |
| 8 | 1 | Inversor de Frequencia | WEG CFW 08 |
| 9 | 1 | Computador / Supervisório | Labview |
| 10 | 8 | Pinos MRV | |
| 11 | 3 | Pinos MIT | |
| - | 1 | Osciloscópio Digital minipa | MO 2204 |
| - | 1 | Osciloscópio Digital tektronix | TDS 2024 |
| - | 1 | Osciloscópio Digital minipa | |
| - | 1 | Variador de tensão trifásico | |
| - | 1 | Ponte Retificadora trifásica | |
| - | 2 | Contatores industriais Siemens | 3TF40 |
| - | 1 | Disjuntor Tripolar (retificador) | K32E |
| - | 1 | Disjuntor Tripolar (inversor) | K32E |
| - | 2 | Disjuntor Unipolar (Periféricos) | B10 |

5.1.1 Máquina a Relutância

O protótipo utilizado neste trabalho é uma Máquina a Relutância Variável com a configuração 8/6, com potência nominal de 2,2KW, o protótipo foi desenvolvido em uma parceria dos laboratórios Lacc da Universidade Federal de Uberlândia com o Nupse do Instituto Federal de Goiás, desde as etapas de definição das medidas, materiais, modelagem, circuitos elétricos e magnéticos e confecção final da máquina.

A Figura 5.4 apresenta um croqui com as principais dimensões do protótipo, medidas lineares em milímetros e angulares em graus.

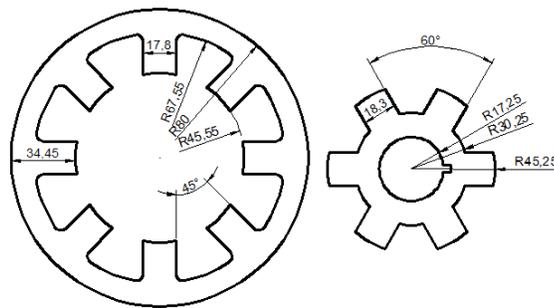


Figura 5.4 - Croqui com as dimensões do protótipo construído.

Para a confecção da máquina real, foi utilizada uma carcaça de uma máquina de indução para acomodar o estator. Na Figura 5.5 é possível visualizar o estator da máquina finalizada, sendo possível identificar os oito polos, cada um com um enrolamento, nesta configuração os dois enrolamentos imediatamente opostos formam uma fase da máquina, compondo assim as quatro fases.



Figura 5.5 - Estator da máquina construída.

Na Figura 5.6 e 5.7 é apresentado o rotor da máquina projetada, construído a partir de lamina prensada formando seis polos, na Figura 5.7 é exibido ambos, rotor e estator, sendo possível notar a relação entre ambos formando a combinação 8/6, tendo os polos do estator deslocados de 45° e do rotor deslocados de 60 graus.

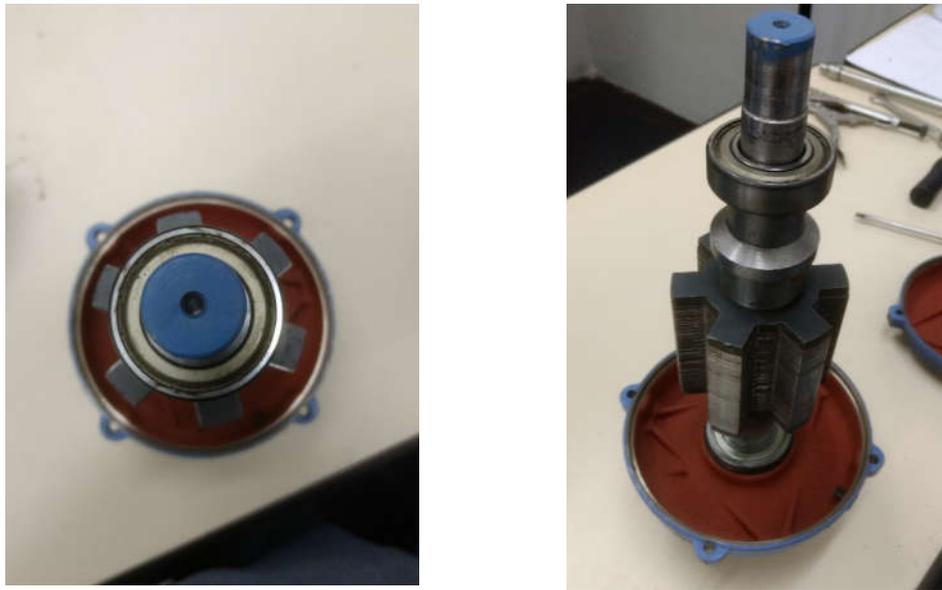


Figura 5.6 - Rotor do protótipo construído.

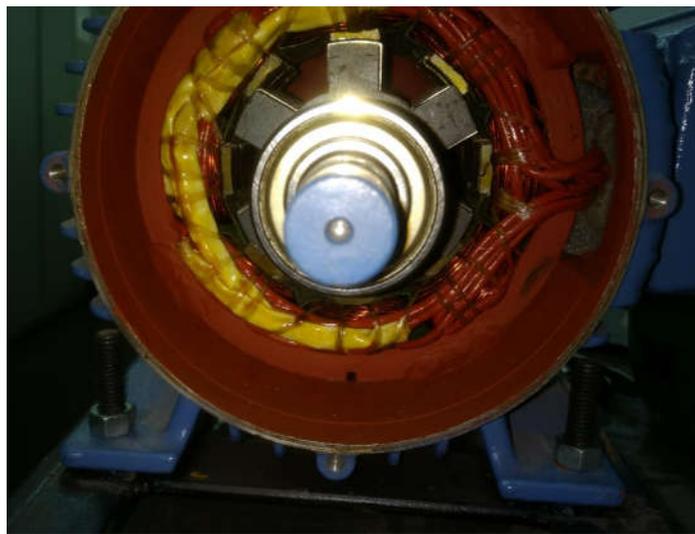


Figura 5.7 - Rotor do protótipo construído montado junto ao estator.

Na Figura 5.8 estão apresentadas e identificadas todas as partes do protótipo construído, evidenciando a simplicidade construtiva da máquina.

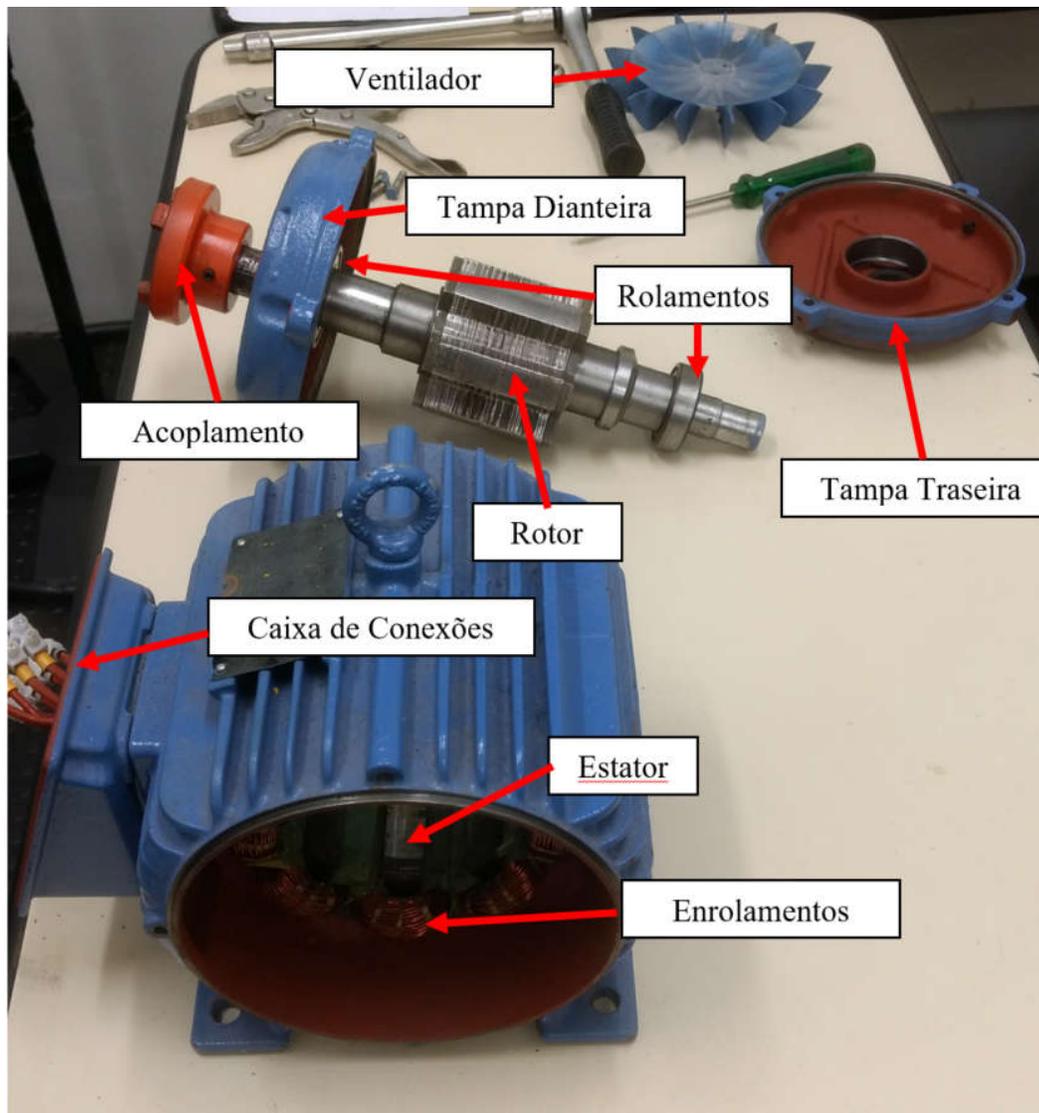


Figura 5.8 - Protótipo desmontado - Identificação das partes.

5.1.1.1 Problemas do protótipo

O protótipo desenvolvido apresenta algumas características construtivas não desejáveis, por se tratar de um protótipo desenvolvido de forma artesanal, totalmente projetado dimensionado e construído para este trabalho. O protótipo apresenta um acabamento pouco uniforme no rotor, conforme visualizado na Figura 5.9.



Figura 5.9 - Imperfeições no acabamento do rotor.

Uma outra característica percebida é a não uniformidade no alinhamento das fases, através de medidas sucessivas do alinhamento entre os polos do rotor e estator, percebeu se que o espaço angular decorrente de um alinhamento para o próximo não é constante, porém apresenta desvios pequenos. A tabela 5.2 apresenta uma média feita entre 10 medidas sucessivas para cada alinhamento.

Com base nos valores da tabela 5.1, foi feita uma análise dos desvios, na Figura 5.10 é apresentado um histograma e curva normal dos desvios, sendo possível visualizar a classificar os desvios em função de seus valores e frequência em que ocorrem.

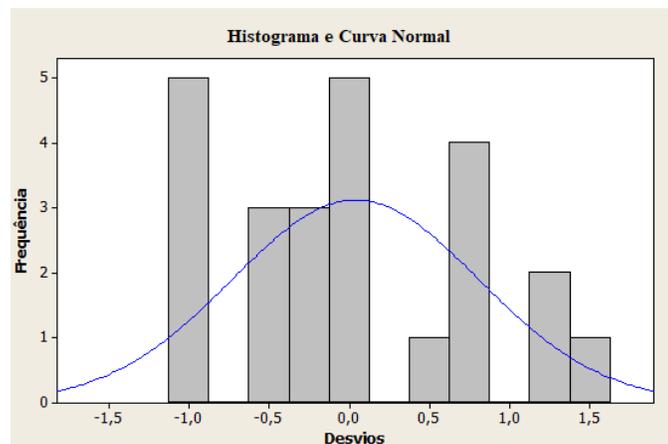


Figura 5.10 - Histograma e curva normal dos desvios encontrados

Tabela 5.2 - Posições de alinhamento entre o rotor e estator no protótipo.

| <i>Fase</i> | <i>Ângulo Absoluto (Graus)</i> | <i>Passo Angular Medido</i> | <i>Passo Angular Projetado</i> | <i>Desvio</i> |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|
| C | 3,5156 | Referência | Referência | 0 |
| D | 19,3359 | 15,8203 | 15,0000 | 0,8203 |
| A | 35,1562 | 15,8203 | 15,0000 | 0,8203 |
| B | 49,5700 | 14,4138 | 15,0000 | -0,5862 |
| C | 63,6328 | 14,0628 | 15,0000 | -0,9372 |
| D | 79,8047 | 16,1719 | 15,0000 | 1,1719 |
| A | 94,9219 | 15,1172 | 15,0000 | 0,1172 |
| B | 108,9840 | 14,0621 | 15,0000 | -0,9379 |
| C | 123,7500 | 14,7660 | 15,0000 | -0,2340 |
| D | 139,5700 | 15,8200 | 15,0000 | 0,8200 |
| A | 154,6870 | 15,1170 | 15,0000 | 0,1170 |
| B | 169,1020 | 14,4150 | 15,0000 | -0,5850 |
| C | 183,5160 | 14,4140 | 15,0000 | -0,5860 |
| D | 199,6870 | 16,1710 | 15,0000 | 1,1710 |
| A | 215,1560 | 15,4690 | 15,0000 | 0,4690 |
| B | 229,2190 | 14,0630 | 15,0000 | -0,9370 |
| C | 243,2810 | 14,0620 | 15,0000 | -0,9380 |
| D | 259,8050 | 16,5240 | 15,0000 | 1,5240 |
| A | 274,9220 | 15,1170 | 15,0000 | 0,1170 |
| B | 288,9840 | 14,0620 | 15,0000 | -0,9380 |
| C | 303,7500 | 14,7660 | 15,0000 | -0,2340 |
| D | 319,5700 | 15,8200 | 15,0000 | 0,8200 |
| A | 334,6870 | 15,1170 | 15,0000 | 0,1170 |
| B | 349,4530 | 14,7660 | 15,0000 | -0,2340 |

Interpretando os valores coletados, entende-se que tais desvios não impactam significativamente o acionamento, pois o desvio padrão está muito abaixo da precisão do encoder, e considerando os valores médios a detecção estaria atrasada ou adiantada de 0,35 graus. Já nos piores casos, dentro dos 24 alinhamentos resultantes de uma volta do eixo, 5 acionamentos ocorrem adiantados de 1,0547 graus (motorização) e um acionamento corre atrasado em um 1,7578 graus (menor largura do pulso de acionamento). Todos os resultados apresentados no capítulo 6 foram obtidos sob essas condições de funcionamento.

5.1.2 Conversor de Potência

Em sua operação a MRV necessita de um conversor que forneça excitação para a mesma. Na literatura são apresentadas várias topologias de conversores utilizados para operação da máquina. Entre eles, o conversor meia ponte assimétrico conhecido como conversor clássico ou *Half-Bridge*(HB) tem tido um bom desempenho para o acionamento da MRV [3] [16] [23]. Embora nenhum conversor foi ainda definido como padrão para operação da MRV, o conversor HB tem sido o muito utilizado em várias publicações, principalmente por suas características operacionais [3]. A Figura 5.11 apresenta o circuito simplificado das conexões dos barramentos para o acionamento da MRV na função gerador e motor ou Gerador excitado.

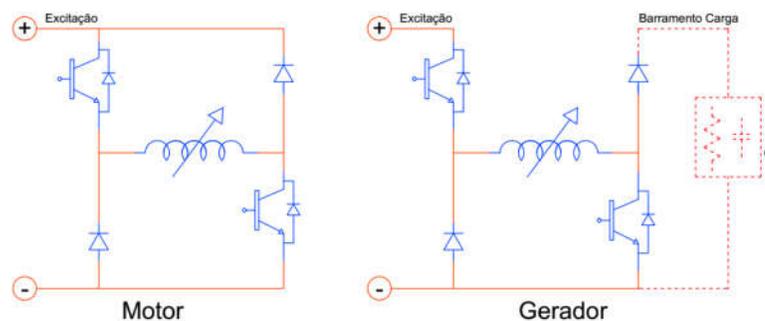


Figura 5.11 - circuito simplificado das conexões dos barramentos para o acionamento da MRV na função gerador e motor ou Gerador excitado.

A Figura 5.12 apresenta um esquemático completo do conversor utilizado para o acionamento da MRV 8/6 juntamente com os relés para selecionar o tipo de acionamento, gerador ou motor.

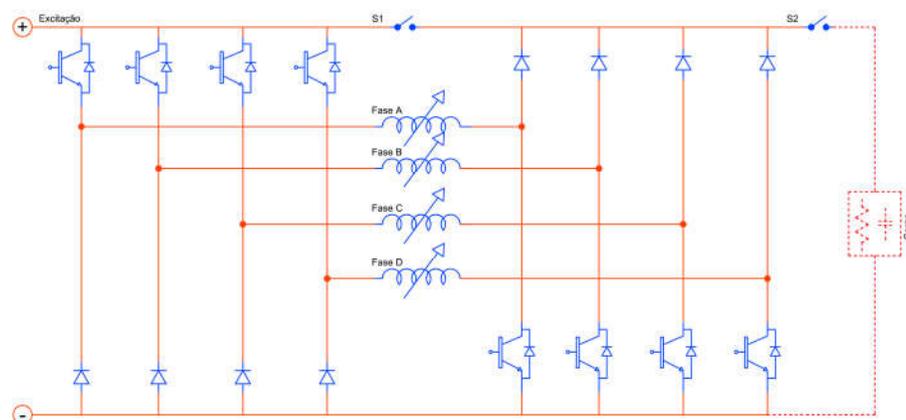


Figura 5.12 - esquemático completo do conversor utilizado para o acionamento da MRV.

A tabela 5.3 apresenta a configuração dos relés para cada tipo de acionamento, sendo estes relés comandados diretamente pelo DSP, sendo assim é possível mudar o modo de operação enquanto a máquina já está em funcionamento. Como não há intenção de acionar a máquina em uma configuração auto-excitada, para os acionamentos realizados foi incluído uma função lógica do tipo ou exclusivo (XOR) para comandar as saídas digitais correspondentes aos relés, garantindo assim que a máquina nunca esteja em um estado auto-excitado.

Tabela 5.3 - Configuração dos relés para cada tipo de acionamento.

| <i>Operação</i> | <i>Relé 1</i> | <i>Relé 2</i> |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| Fora de Operação | Desligado | Desligado |
| Motor | Ligado | Desligado |
| Gerador Excitação Independente | Desligado | Ligado |
| Gerador Auto Excitado | Ligado | Ligado |

Para construção do conversor HB foram utilizados quatro módulos IGBT 6MBI100S-060, sendo cada módulo composto por seis chaves do tipo IGBT conectadas a seis diodos de potência de ação rápida, suportando uma corrente de até 100A e tensão de 600V. Foi feito um arranjo entre os módulos de forma que em cada modulo foram utilizadas três chaves IGBT e três diodos para as etapas de roda livre. A Figura 5.13 mostra o arranjo feito entre os módulos IGBTs.

O uso deste tipo de arranjo demonstrou uma boa solução frente as oscilações e possíveis sobrecorrentes durante os testes e ensaios, evitando assim a queima dos diodos ou IGBTs.

A Figura 5.14 apresenta a fotografia do módulo finalizado, o módulo foi montado sobre um dissipador de temperatura de alumínio, para possibilitar uma boa refrigeração e dissipação da temperatura durante o acionamento da MRV.

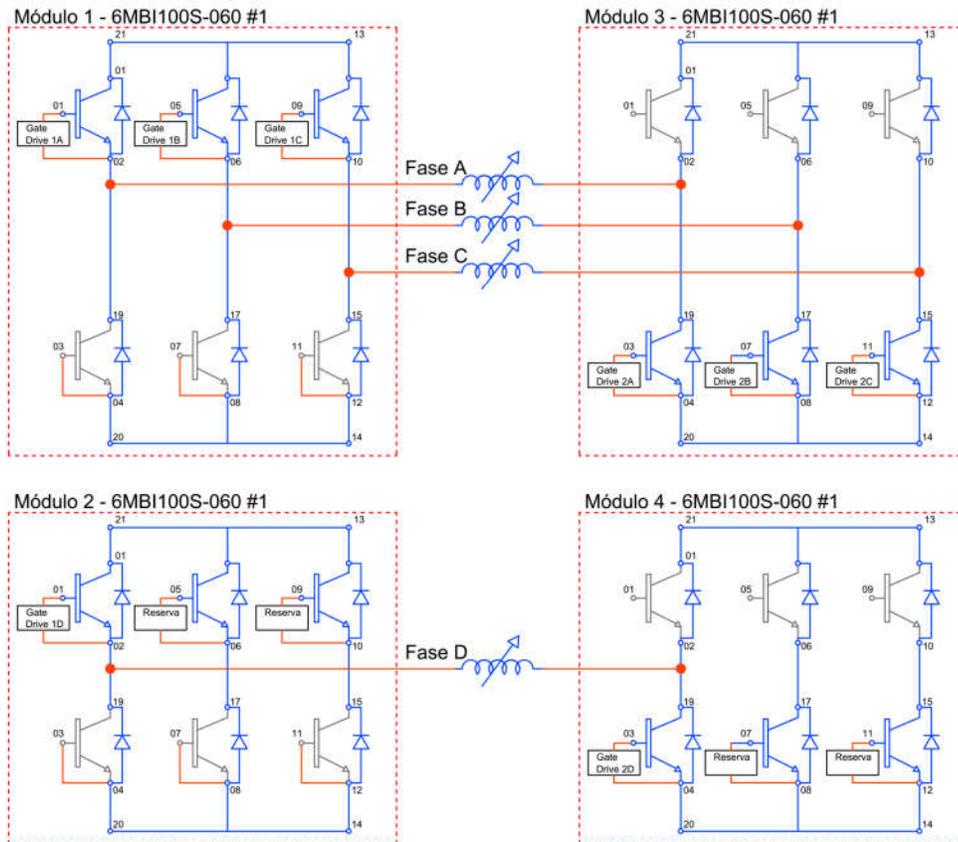


Figura 5.13 - Arranjo feito entre os módulos IGBT.

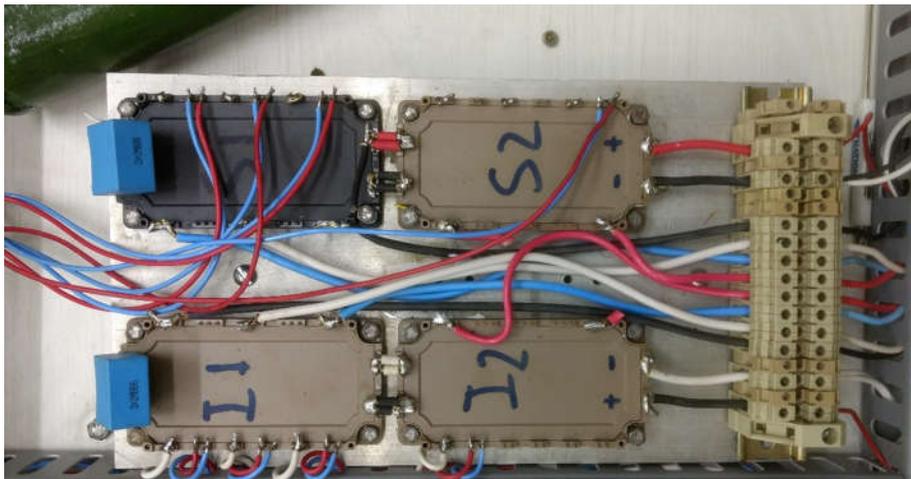


Figura 5.14 - Módulos montados e interligados.

Durante a etapa de acionamento da fase A da MRV, as chaves 1A e 2A serão fechadas, enquanto as demais chaves permanecem abertas e os diodos polarizados reversamente, de forma que a corrente irá circular pelas chaves 1A e 1B e assim acionar a bobina da MRV, conforme demonstrado pela Figura 5.15.

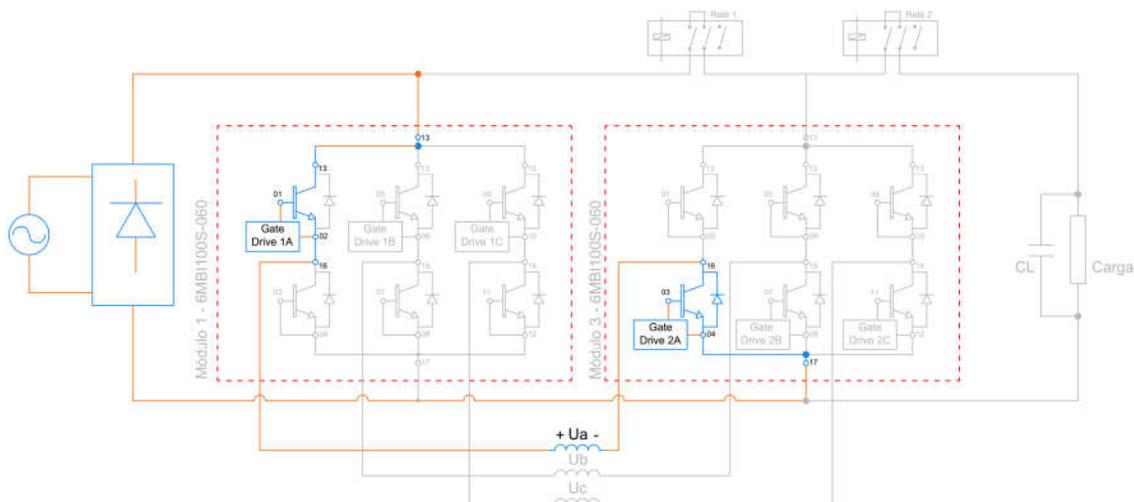


Figura 5.15 - Representação do momento de excitação no arranjo.

Durante a etapa de roda livre como motor, os dois diodos correspondente à fase acionada ficarão polarizados diretamente e o relé estará acionado para direcionar a energia armazenada na fase do motor para a fonte. A Figura 5.16 apresenta o circuito durante esta etapa.

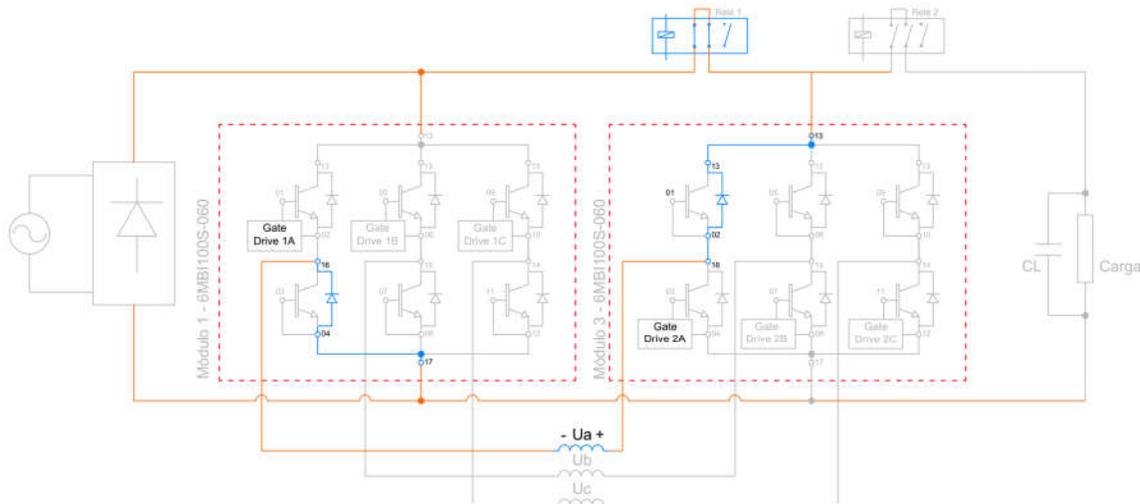


Figura 5.16 - Representação da etapa de roda livre para o acionamento como motor.

Caso o relé seja acionado para a posição “gerador”, o fluxo armazenado é direcionado para uma carga em paralelo com um capacitor para reduzir as oscilações, conforme exibido na Figura 5.17.

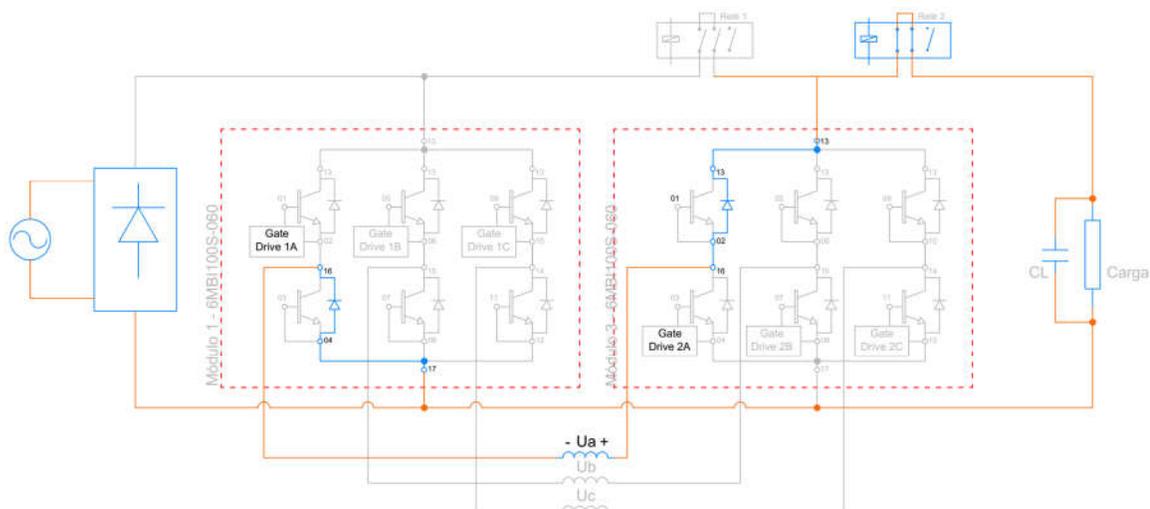


Figura 5.17 - Representação da etapa de roda livre para o acionamento como gerador.

O acionamento das demais fases da MRV segue funcionamento semelhante.

5.1.3 Circuito Isolador de Sinal - Gate Drive

O acionamento de cada uma das fases da MRV é obtido acionando simultaneamente as duas chaves correspondentes a essa fase. Para isso deve se ter um sinal de acionamento isolado para cada chave IGBT com referências (terras) distintos, pois os pulsos de disparo devem estar referenciados ao emissor de cada uma das chaves. Para solucionar esse problema foi utilizado um circuito isolador de sinais através de opto-acopladores. A Figura 5.18 apresenta um diagrama de blocos do driver utilizado.

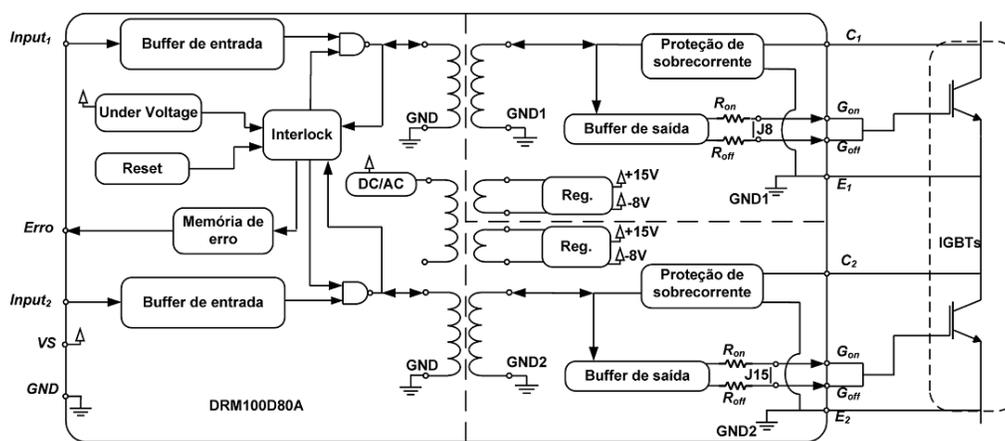


Figura 5.18 - Diagrama do circuito isolador de sinais.

Ao todo foram necessários quatro circuitos isoladores duplos, um para cada fase da máquina. A Figura 5.19 exibe as placas utilizadas contendo os circuitos isoladores.

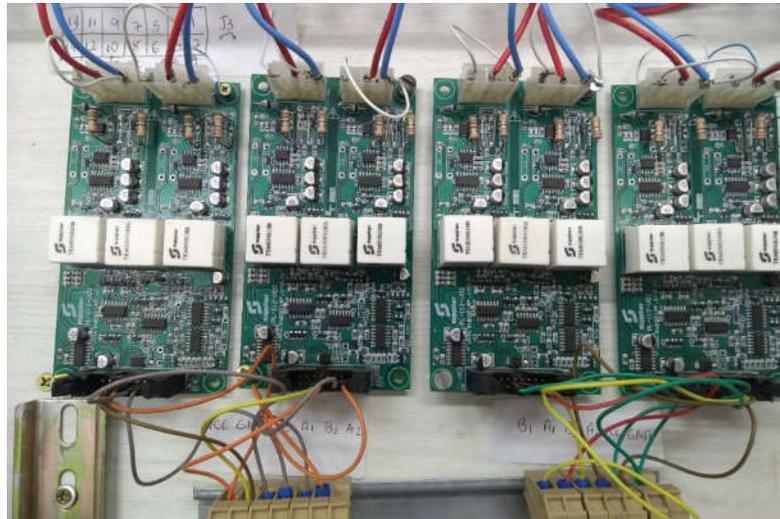


Figura 5.19 - Gate Drive completo.

O isolamento é feito de forma galvânica utilizando transformadores de pulso, garantindo assim o isolamento galvânico do sinal. Por se tratar de um drive de uso comercial para aplicações genéricas, alguns jumpers, resistores e ajustes foram feitos para deixá-lo em conformidade com o projeto. A Figura 5.20 exibe uma medida simultânea dos quatro pulsos, medidos na saída do DPS e na saída do drive, mostrando a baixa latência entre o sinal de comando e o sinal isolado.

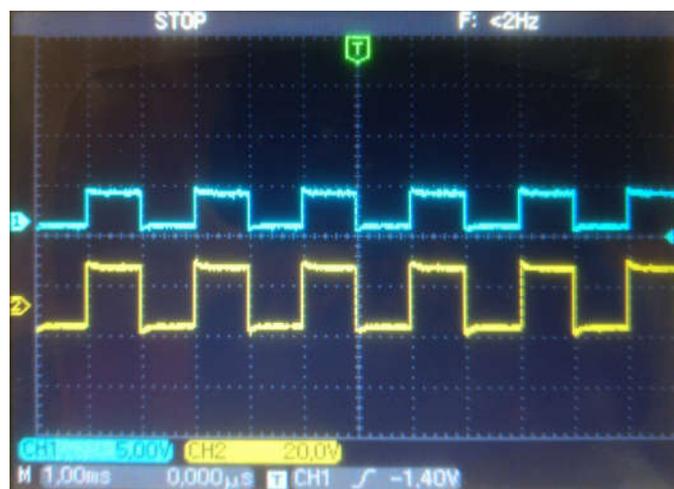


Figura 5.20 - Medição dos pulsos na entrada e saída do Gate Drive.

A Figura 5.21 exibe as formas de ondas do sinal de comando das quatro fases da máquina.

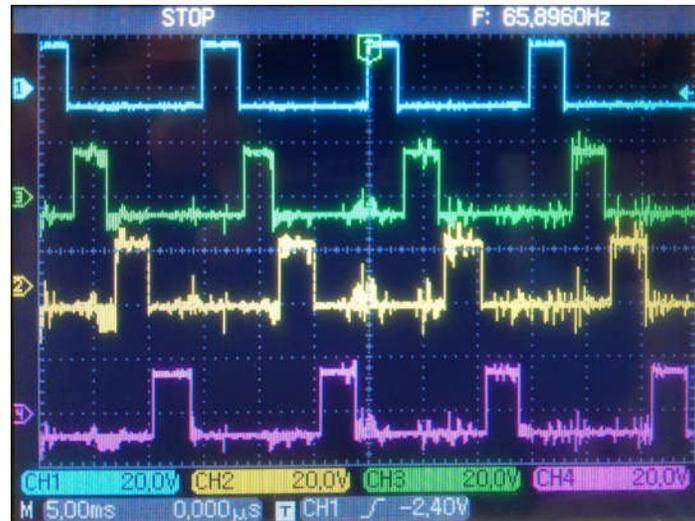


Figura 5.21 - Pulso de comando das quatro fases da máquina [Largura 15 Graus].

5.1.4 Dispositivo de processamento DSP/FPGA

Para o processamento do acionamento e controle da MRV foi utilizada uma placa de aquisição de sinais de alta performance e baixo custo modelo “NI MyRIO 1900” disponibilizada e comercializada pela empresa *National Instruments* (NI). A placa de aquisição é dotada de um processador de tempo real *ARM Cortex A9 dual core 667MHZ/512MB*, um módulo FPGA integrado *Xilinx Zynq 7 Series* com um *Clock onboard de 40 a 76MHz*, 10 Entradas analógicas operando a 500KS/s, 06 saídas analógicas operando a 345KS/s e 40 Linhas de entrada e saída digital operando a 50MS/s. A Figura 5.22 exhibe uma foto da placa de aquisição juntamente com a configuração interna.

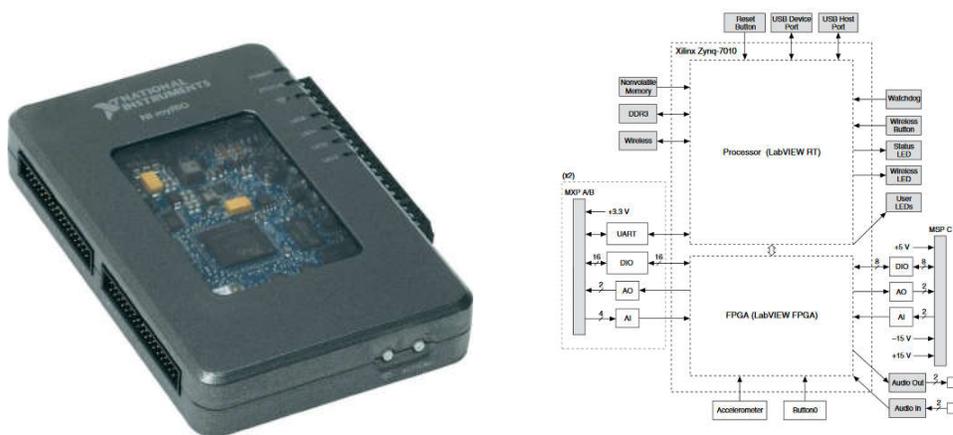


Figura 5.22 - NI MyRIO - Dispositivo de aquisição e processamento de sinais.

Na tabela 5.4 estão identificadas as entradas e saídas utilizadas e disponíveis no MyRIO.

Tabela 5.4 - Identificação das entradas e saídas utilizadas/disponíveis.

| | <i>Digital I/O</i> | <i>AI</i> | <i>AO</i> | <i>USB</i> | <i>Wireless</i> |
|--------------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------|-----------------|
| <i>Encoder</i> | 10 | | | | |
| <i>Gate Drive</i> | 8 | | | | |
| <i>Relé de Acionamento</i> | 1 | | | | |
| <i>Condicionador de Sinais</i> | | 2 | | | |
| <i>Inversor de Frequência</i> | 2 | | 1 | | |
| <i>Entrada Analógica</i> | | 1 | | | |
| <i>Saída Analógica</i> | | | 1 | | |
| <i>Supervisório</i> | | | | 1 | 1 |
| <i>Não Utilizado</i> | 19 | 7 | 4 | 1 | 0 |
| <i>Total Disponível</i> | 40 | 10 | 6 | 2 | 1 |

5.1.5 Conjunto de Cargas

Para o acionamento da MRV como gerador, foi disponibilizado um conjunto de carga composta por três resistências 150Ω 1000W, um conjunto de lâmpadas incandescentes/halógenas e um conjunto de capacitores $1000\mu\text{F}$. As cargas podem ser conectadas em série, paralela ou de forma mista, possibilitando a obtenção de diferentes valores de resistência na carga.

5.1.6 Transdutor de sinais

Para adquirir as formas de onda da corrente e tensão e assim possibilitar o fechamento da malha de controle, foi utilizado uma placa condicionadora de sinais construída a partir de dois sensores de efeito *hall*, sendo um para tensão e outro para corrente [3] [24]. A Figura 5.23 exhibe o circuito utilizado.

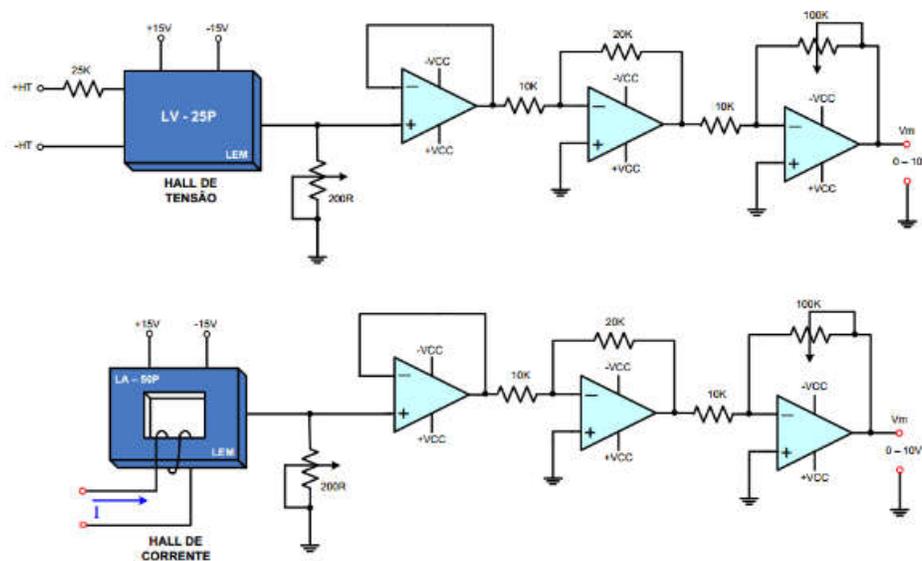


Figura 5.23 - Circuito esquemático do condicionador de sinais.

A placa condicionadora de sinais possui quatro potenciômetros que permitem ajustar o ganho da saída de acordo com a necessidade. A saída disponibiliza um sinal de 0 a 10V, correspondendo ao range ajustado para a entrada, que foi previamente ajustado para 0 a 250V no transdutor de tensão e 0 a 5A no transdutor de corrente. A Figura 5.24 exibe a placa condicionadora de sinais.

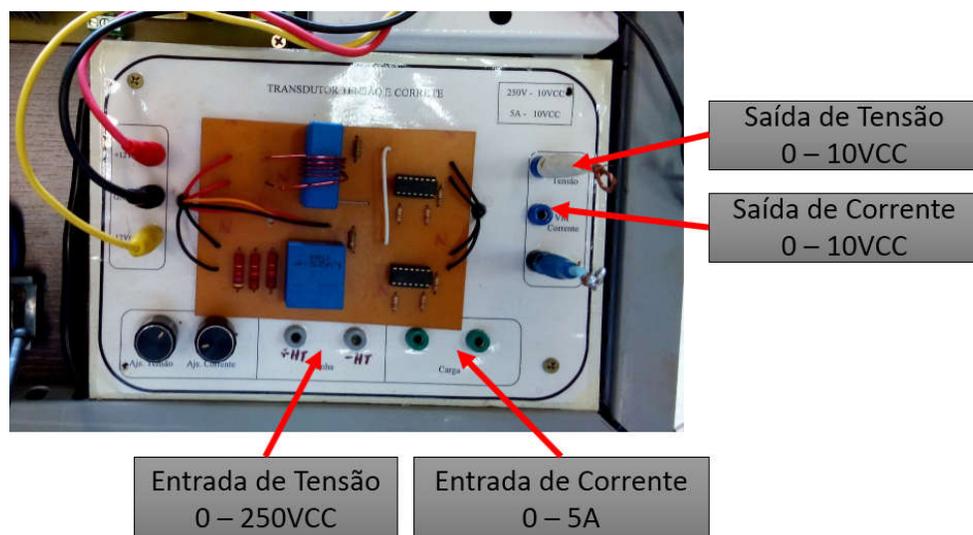


Figura 5.24 - Fotografia do condicionador de sinais.

5.2 ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO

O acionamento da MRV foi realizado utilizando um inversor de frequência juntamente com uma máquina de indução trifásica para simular uma máquina primária do gerador, controlando a velocidade de acionamento. Uma fonte de tensão variável com uma ponte retificadora trifásica foi utilizada para fornecer a corrente de magnetização da Máquina.

Toda a programação foi feita utilizando a linguagem gráfica Labview®, possuindo algumas funções executadas pela interface FPGA e outras implementadas diretamente no processador DSP.

Para tratamento das operações matemáticas foi necessário utilizar o sistema de numeração em ponto fixo nos testes utilizando FPGA, porém neste trabalho não houve a necessidade de otimizar os recursos do FPGA, dada a grande quantidade de registradores, *LUT* e blocos de *RAM* disponíveis.

A possibilidade de ter funções programadas em FPGA, torna-se um diferencial para aplicações que requerem uma velocidade de processamento extremamente alta, devido ao seu comportamento similar a circuitos físicos e seu tempo de latência extremamente baixo.

No entanto, estes recursos serão interessantes quando a bancada desenvolvida for utilizada para implementação de técnicas avançadas de controle, servindo como recurso adicional para as aplicações desenvolvidas no processador de tempo real, estes recursos não foram amplamente explorados neste trabalho, sendo o trabalho desenvolvido utilizando baseado principalmente o processador de tempo real.

A Figura 5.25 apresenta a função principal embarcada no DSP, que está dividida em várias sub-funções, sendo uma para a leitura e conversão do código GRAY recebido do encoder, uma para geração dos ângulos de acionamento das fases da MRV, uma para processamento e controle do acionamento das fases da MRV e por fim uma função para escrever nas saídas digitais que estão interligadas ao circuito de chaveamento. A aplicação embarcada está apresentada no apêndice C.

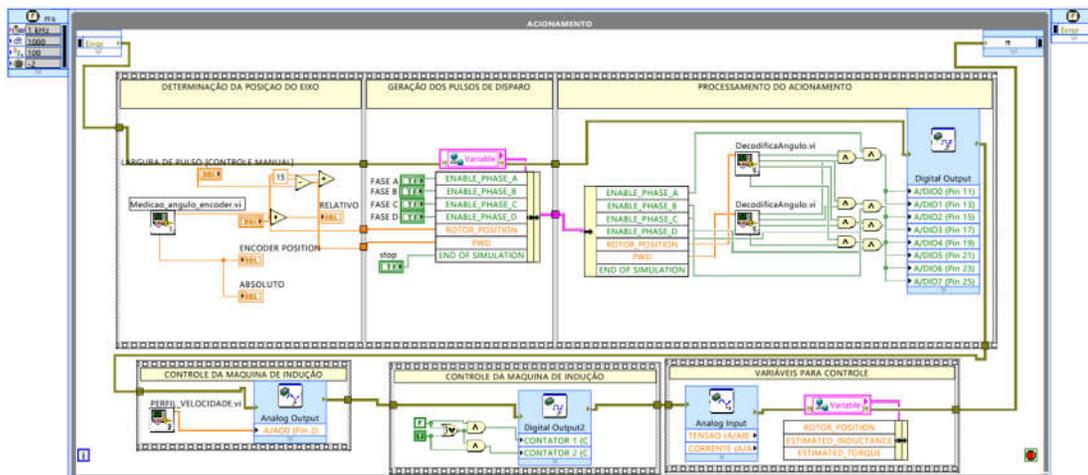


Figura 5.25 - Função principal embarcada no DSP.

O chaveamento da MRV como gerador deve ser realizado no instante em que a indutância da fase a qual se deseja excitar estiver decrescendo, neste trabalho a largura do pulso (ângulos de magnetização) foi sempre inferior a 15 graus, afim de se evitar sombreamento das fases. A Figura 5.26 apresenta a curva de indutância para as quatro fases da MRV juntamente com os momentos em que cada uma das fases será acionada.

O algoritmo programado foi idealizado a partir das informações dispostas na Figura 5.26, porém ao se acoplar o encoder ao gerador, não é possível garantir que a posição medida como zero graus no encoder coincida com o instante máximo de indução da fase A, existindo duas referências angulares no sistema. Para solucionar esse problema, uma sub função foi desenvolvida deslocando a posição lida do encoder, ajustando à referência da indutância, unificando as duas referências angulares.

Cada fase terá o acionamento compreendido entre 0 e 15 graus, existindo duas possibilidades de manipulação dos ângulos de magnetização:

- Controlado pela saída do controlador, realimentado pela tensão de saída, quando estiver operando em malha fechada controlando a tensão gerada.
- Controlado manualmente pelo usuário através de controle disponível na aplicação de supervisão desenvolvida, quando estiver operando em malha aberta, permitindo avaliar o comportamento da MRV frente a variação dos ângulos de magnetização.

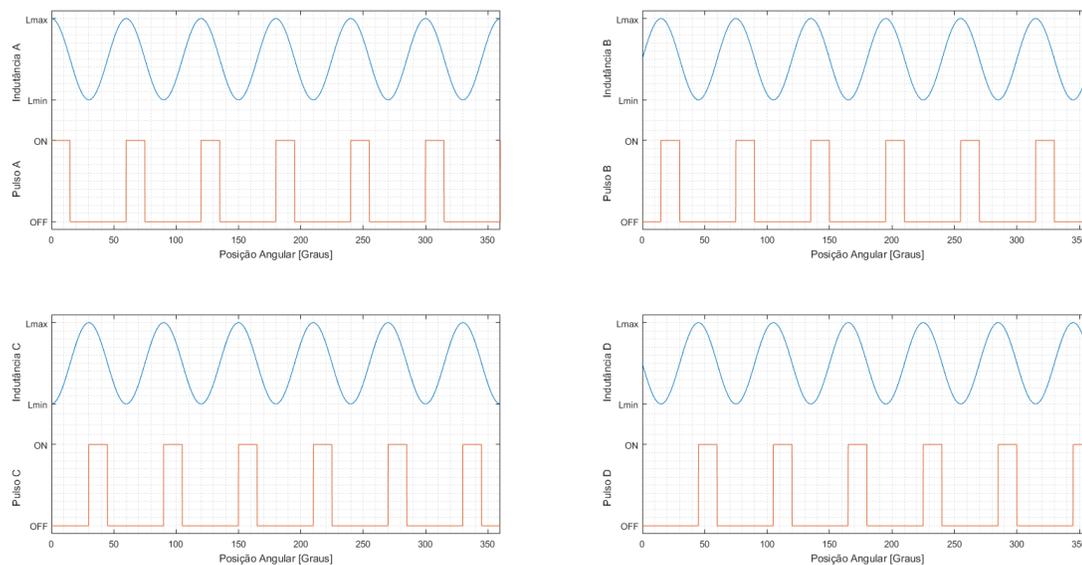


Figura 5.26 - Referência para os momentos de acionamento de cada uma das fases.

Por ter uma largura de pulsos máxima definida e quatro fases, o ciclo de acionamento se repete a cada 60 graus, sendo assim para economizar recursos computacionais o ângulo obtido através da leitura do encoder foi dividido em ciclos de 60 graus, simplificando assim o acionamento, dividindo em 4 ciclos de 15 graus e em seguida comparando com a largura do pulso de chaveamento desejado “*PWD*” do cluster principal. A Figura 5.27 exibe a função responsável por determinar os pulsos de acionamento no software desenvolvido

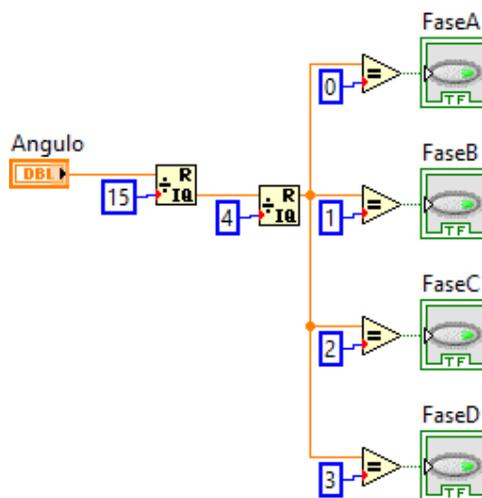


Figura 5.27 - Função para determinar os pulsos de acionamentos.

5.3 TESTE DA BANCADA

A bancada de acionamento e controle da MRV foi concluída, permitindo o acionamento e controle da Máquina a Relutância como Gerador, podendo ainda ser utilizada para outras aplicações, como:

- Acionamento como motor, operando em malha aberta;
- Acionamento como gerador, operando em malha aberta;
- Controle da velocidade no acionamento da MRV como motor;
- Controle da tensão gerada no acionamento como gerador;
- Acionamento e controle como gerador auto excitado;
- Acionamento como moto-gerador;
- Controle de velocidade e tensão gerada no acionamento como moto-gerador;
- Estudo dos melhores pontos de operação e rendimento do acionamento da MRV;
- Utilização do acionamento da MRV para o estudo de técnicas de injeção na rede;
- Outros.

5.3.1 Comissionamento e Testes Iniciais

Foram feitas uma série de acionamentos afim de validar e comprovar o perfeito funcionamento dos componentes e dispositivos. As formas de ondas obtidas para corrente e tensão na fase da MRV durante o estado de motorização são apresentadas nas Figuras 5.28 e 5.29.

Durante o estado de motorização, a MRV foi acionada como gerador, porém sem o acionamento da máquina primária. Durante o estado de motorização a MRV apresenta um comportamento semelhante a um motor mesmo estando com o barramento da carga conectado.

Com o acionamento da máquina primária através do inversor de frequência o processo de geração foi iniciado.

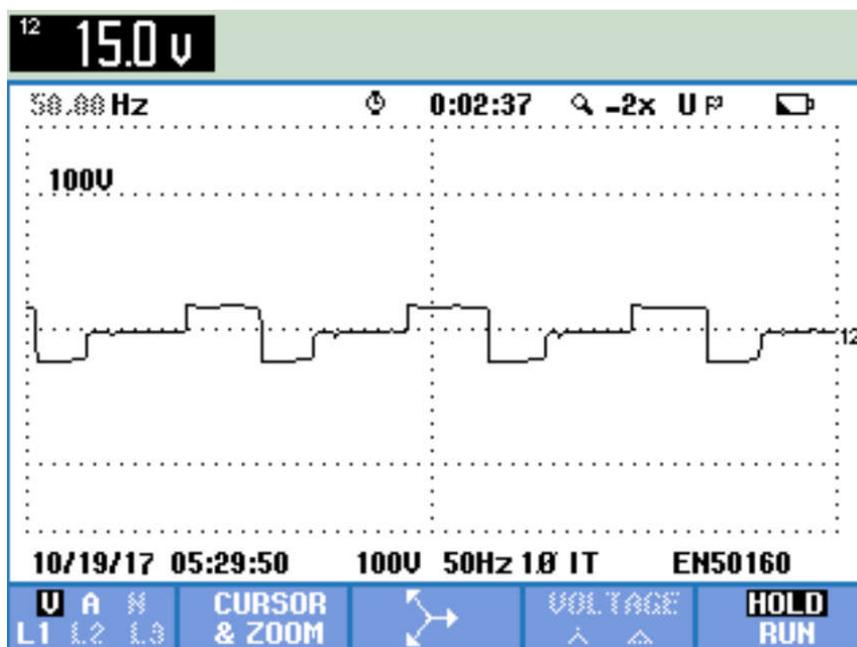


Figura 5.28 - Forma de onda da tensão durante o estado de motorização da MRV.

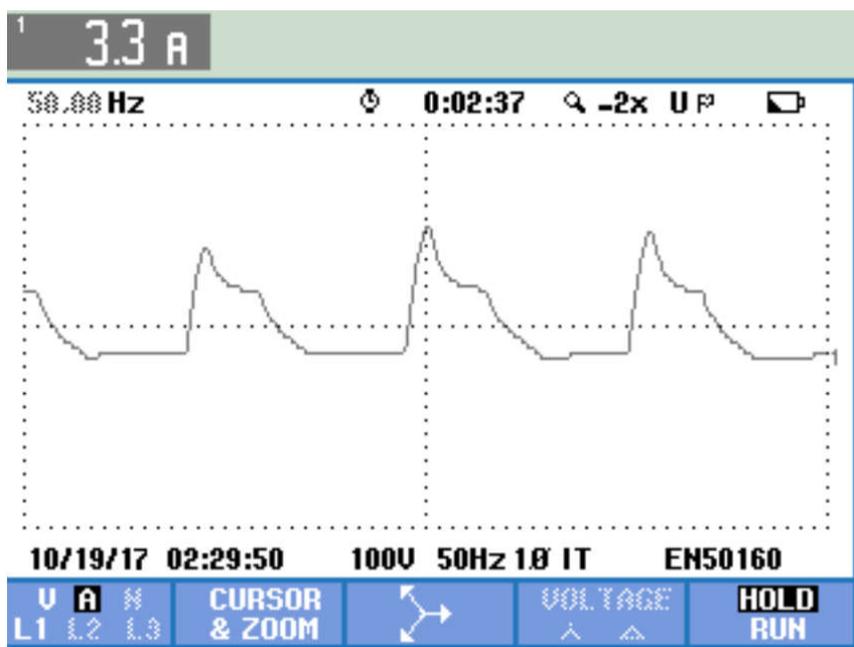


Figura 5.29 - Corrente durante o estado de motorização da MRV.

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam a forma de onda da tensão e corrente obtidas durante o acionamento como gerador, após o acionamento da máquina primária.

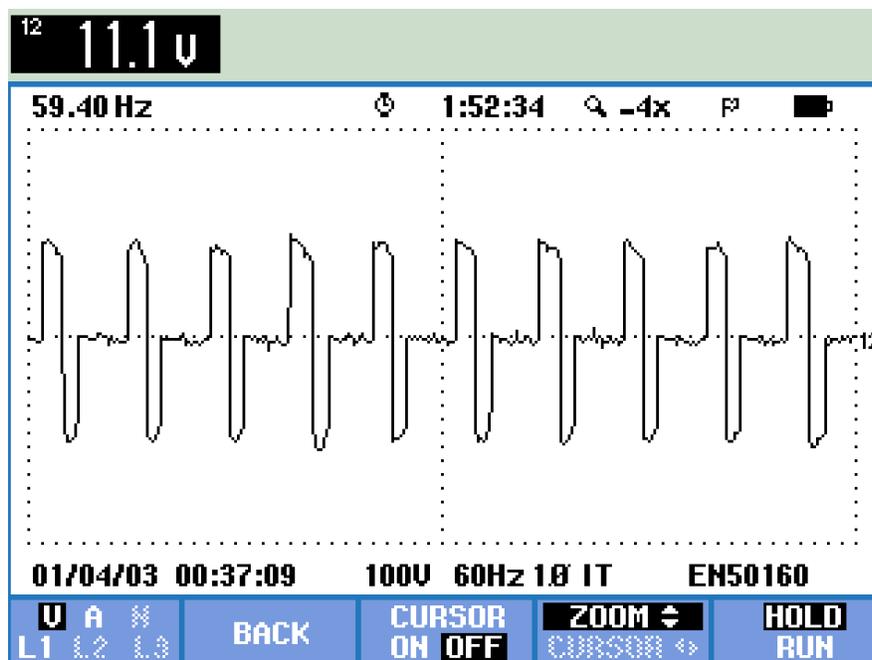


Figura 5.30 - Forma de onda da tensão na fase A da MRV durante o acionamento como Gerador.

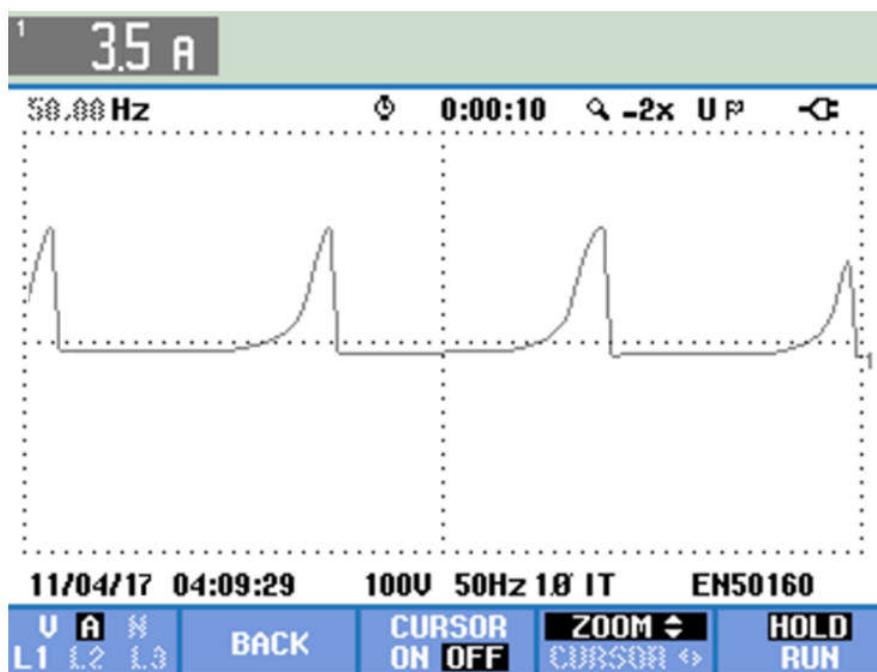


Figura 5.31 - Forma de onda da corrente na fase A da MRV durante o acionamento com gerador.

A Figura 5.32 exibe a forma de onda da tensão obtida na carga.

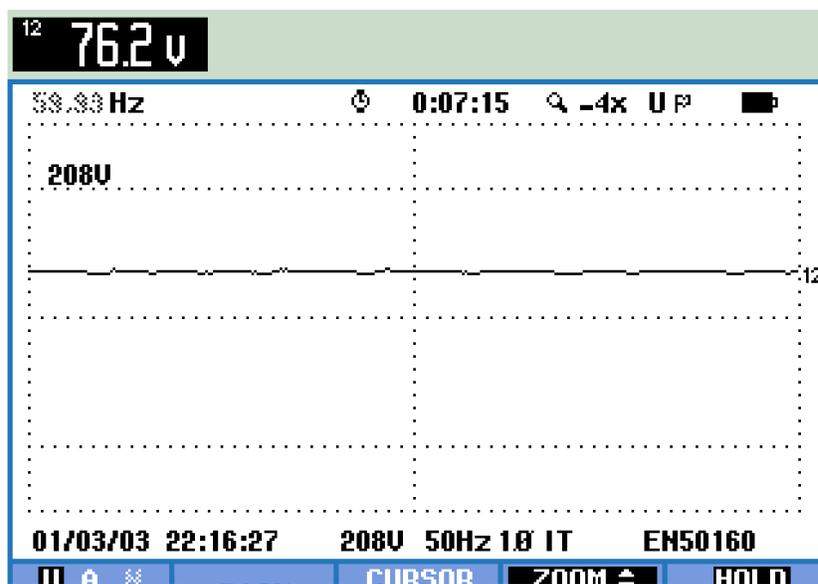


Figura 5.32 - forma de onda da tensão na carga durante o acionamento como gerador.

5.3.2 Software de Supervisão e Controle

Uma interface de supervisão foi desenvolvida na linguagem Labview® para o acionamento do GRV. A interface visa auxiliar o controle da MRV, possibilitando alterar *set-points* e parâmetros de controle em tempo real. A Figura 5.33 apresenta a tela principal da interface de supervisão.

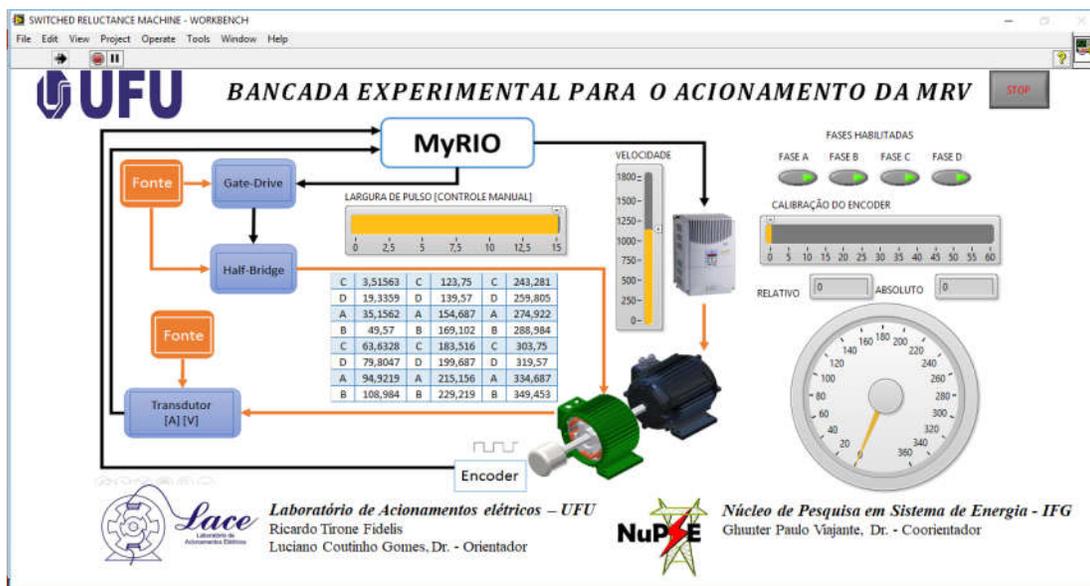


Figura 5.33 - Tela principal da supervisão do acionamento.

Por ser desenvolvido na linguagem LabView, mesma linguagem utilizada na programação do DSP/FPGA, o supervisor se torna uma ferramenta fácil de ser programada e fundamental para o acionamento e controle, sendo totalmente configurável e flexível frente à necessidade de mudanças no algoritmo de acionamento, tornando-se uma vantagem significativa no estudo, interpretação e registro dos eventos ocorridos durante os ensaios realizados, com o adicional de ser utilizado pela conexão *wireless* disponibilizada pelo myRIO, evitando assim necessidade de cabos e possibilitando a monitorização remota.

CAPÍTULO 6

ENSAIOS

6.1 ENSAIO COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO VARIÁVEL E LARGURA DE PULSO VARIÁVEL

O objetivo deste experimento é verificar o comportamento do GRV em função da variação da tensão de excitação e a variação da largura do pulso de excitação. Neste caso, a velocidade da máquina primária foi ajustada em 1200RPM e a carga resistiva instalada na saída do gerador foi de 75Ω . Os ensaios foram feitos com uma variação na tensão de excitação de 5 a 30V e a largura do pulso de excitação entre 3 e 15 graus. Neste ensaio a máquina foi operada em malha aberta, nenhuma forma de controle foi aplicada afim de se perceber as respostas naturais da máquina às variações impostas. A Figura 6.1 apresenta o resultado obtido.

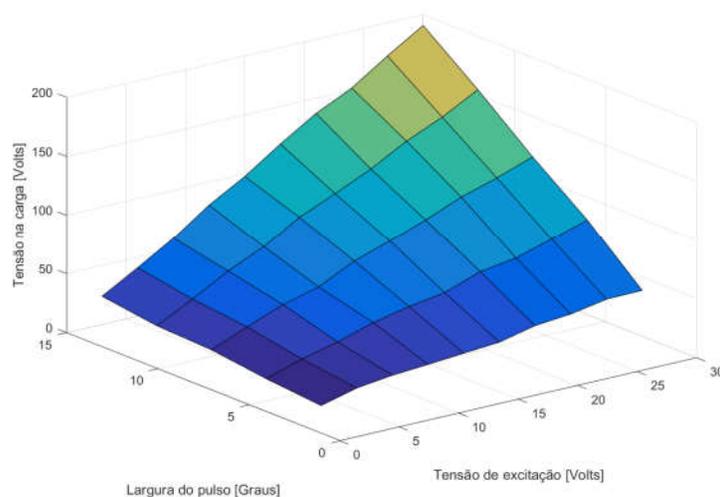


Figura 6.1 - Tensão gerada em função da tensão de excitação e largura do pulso de acionamento.

Percebe-se que com o aumento da tensão de excitação houve um aumento da tensão gerada, esse comportamento pode ser visto nas Figuras 6.2 e 6.3, apresentando curvas da tensão gerada em função da excitação para diferentes valores de largura de pulso na

excitação. A variação da largura do pulso de excitação também implicou em uma significativa variação na tensão gerada. Essa variação pode ser vista na Figura 6.3.

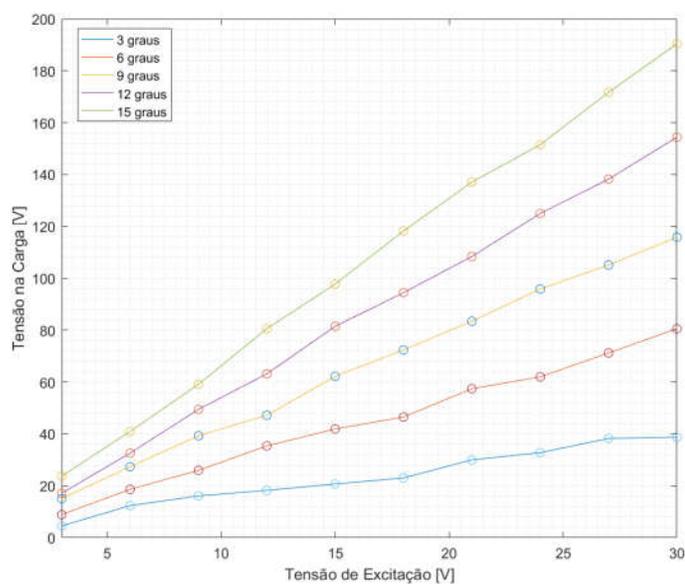


Figura 6.2 - Tensão gerada em função da tensão de excitação para diferentes valores largura de pulsos

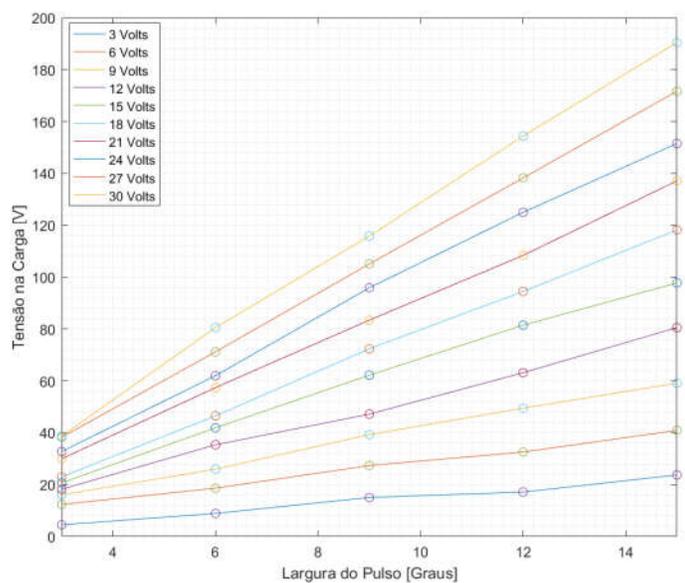


Figura 6.3 - Tensão gerada em função da largura de pulso para diferentes valores de tensão de excitação.

Durante este ensaio, também foi observado o comportamento da potência gerada. A Figura 6.4 exibe o comportamento da potência na carga em função da variação da excitação e largura do pulso de excitação.

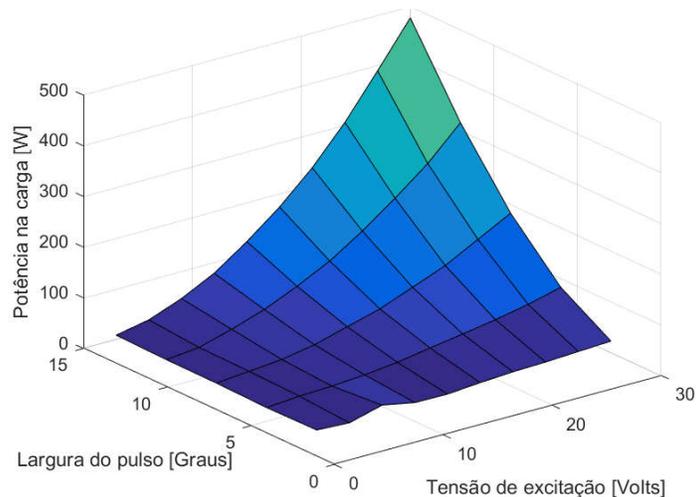


Figura 6.4 -Potência gerada em função da tensão de excitação e variação do pulso de acionamento.

Percebe se que com o aumento da tensão de excitação, há uma elevação rápida da potência gerada, efeito visto na Figura 6.5, que apresenta curvas de potência gerada em função da excitação para diferentes valores largura de pulso. O mesmo efeito ocorre na variação da excitação exibido na Figura 6.6.

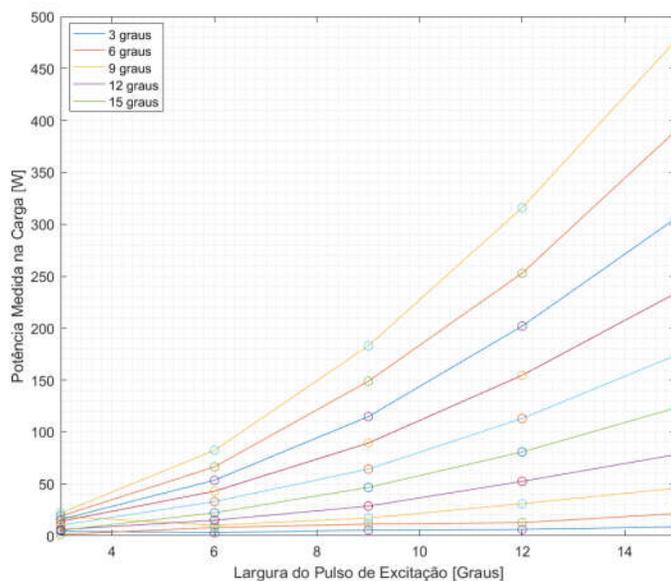


Figura 6.5 - Potência gerada em função da tensão de excitação para diferentes larguras de pulsos de acionamento.

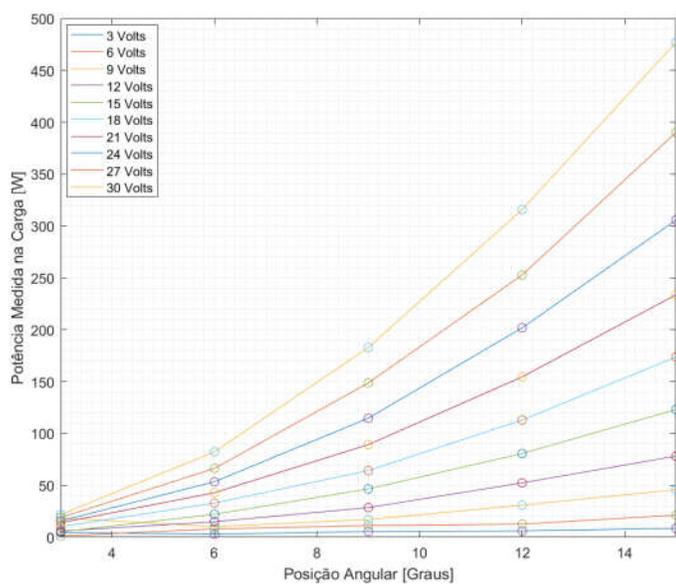


Figura 6.6 - Potência gerada em função da largura de pulso para diferentes valores de tensão de excitação.

Além da tensão e potência gerada, também foi estimada a potência solicitada à fonte de excitação. Os resultados obtidos para a potência da fonte de excitação estão apresentados nas Figuras 6.7 e 6.8.

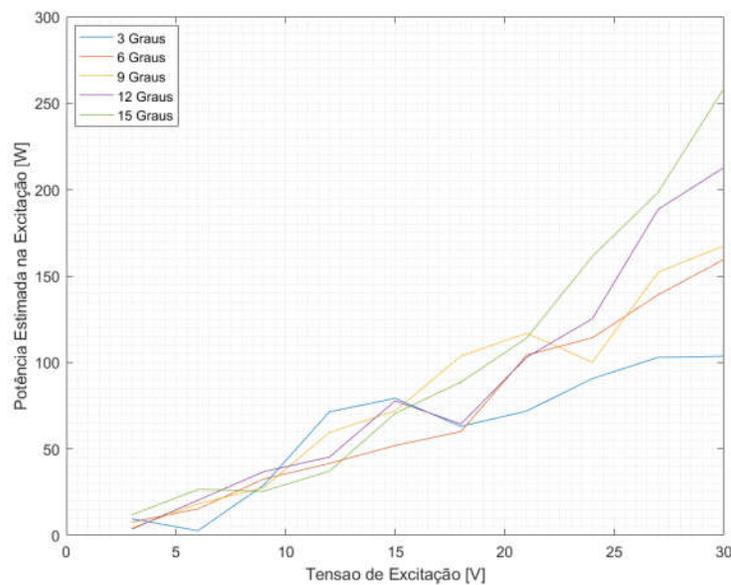


Figura 6.7 - Estimativa da potência drenada da excitação para diferentes larguras de pulso

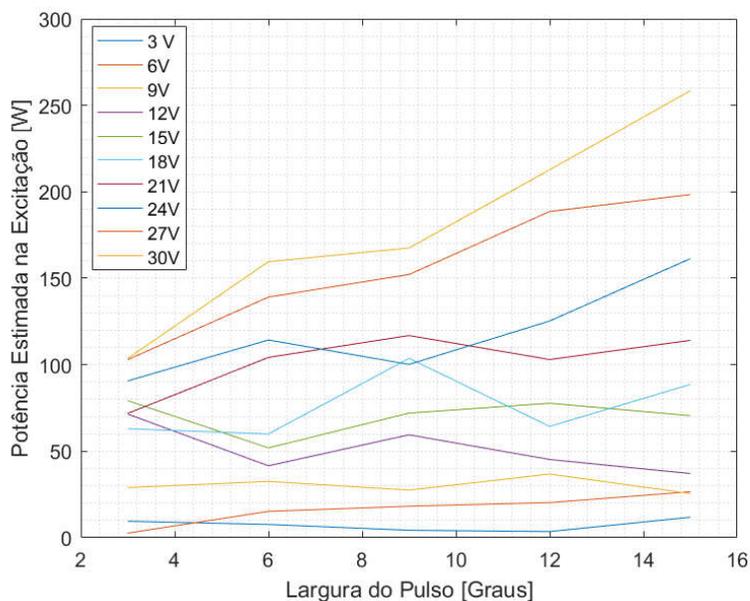


Figura 6.8 - Estimativa de potência drenada da fonte de excitação para diferentes tensões de excitação.

Através dos resultados coletados, foi possível perceber o comportamento da MRV e a influência que a largura do pulso de excitação e a tensão de excitação tem sobre a tensão gerada. Durante os ensaios a tensão gerada variou de 4,54V (3V/3graus) até 190,46V(30V/15Graus), mostrando que é possível ajustar a tensão gerada controlando a tensão de excitação, a largura do pulso ou ambos. Um resumo do ensaio pode ser visto na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resumo do ensaio de variação da excitação e pulsos de acionamento.

| | | Grandeza | Tensão de Excitação | | | | | | | | | |
|------------------|----|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| Largura do Pulso | 3 | Tensão Na Carga | 4,55 | 12,38 | 16,13 | 18,26 | 20,71 | 23,04 | 30,01 | 32,79 | 38,28 | 38,76 |
| | | Potência Na Carga | 4,59 | 1,32 | 18,61 | 6,02 | 5,23 | 10,26 | 14,00 | 15,78 | 19,02 | 22,00 |
| | | Potência Na Excitação | 9,52 | 2,65 | 28,98 | 71,45 | 79,24 | 63,00 | 71,89 | 90,68 | 102,96 | 103,65 |
| | 6 | Tensão Na Carga | 8,93 | 18,67 | 25,99 | 35,39 | 41,93 | 46,54 | 57,44 | 62,02 | 71,23 | 80,58 |
| | | Potência Na Carga | 3,02 | 8,07 | 10,32 | 15,01 | 22,21 | 33,01 | 43,00 | 53,56 | 66,39 | 82,40 |
| | | Potência Na Excitação | 7,68 | 15,24 | 32,56 | 41,60 | 51,95 | 59,99 | 104,24 | 114,31 | 139,12 | 159,63 |
| | 9 | Tensão Na Carga | 15,06 | 27,38 | 39,32 | 47,19 | 62,22 | 72,40 | 83,44 | 95,90 | 105,12 | 115,86 |
| | | Potência Na Carga | 5,56 | 11,34 | 17,15 | 28,63 | 46,64 | 64,30 | 89,32 | 114,80 | 148,84 | 182,95 |
| | | Potência Na Excitação | 4,30 | 18,21 | 27,53 | 59,49 | 72,04 | 103,69 | 116,91 | 100,20 | 152,21 | 167,54 |
| | 12 | Tensão Na Carga | 17,16 | 32,60 | 49,49 | 63,18 | 81,49 | 94,49 | 108,41 | 125,01 | 138,25 | 154,41 |
| | | Potência Na Carga | 23,76 | 40,95 | 59,12 | 80,56 | 97,79 | 118,23 | 137,12 | 151,52 | 171,69 | 190,47 |
| | | Potência Na Excitação | 6,13 | 12,72 | 30,97 | 52,47 | 80,77 | 113,01 | 154,63 | 201,93 | 252,81 | 315,88 |
| | 15 | Tensão Na Carga | 3,56 | 20,31 | 36,82 | 45,26 | 77,78 | 64,36 | 103,01 | 125,31 | 188,61 | 212,75 |
| | | Potência Na Carga | 8,68 | 21,37 | 45,88 | 78,23 | 123,17 | 173,82 | 233,71 | 305,70 | 390,13 | 477,04 |
| | | Potência Na Excitação | 11,84 | 26,59 | 25,53 | 37,10 | 70,52 | 88,64 | 114,10 | 161,37 | 198,45 | 258,47 |

6.2 ENSAIO DE VARIAÇÃO DA CARGA

O objetivo deste experimento é verificar o comportamento do GRV em função da variação da carga. Neste caso, a velocidade da máquina primária foi ajustada em 1200RPM e a carga resistiva instalada na saída do gerador foi alterada entre 150 Ω e 12,76 Ω . Os ensaios foram feitos com uma tensão de excitação constante de 25V e a largura do pulso de excitação em 15 graus. Neste ensaio a máquina foi operada em malha aberta, nenhuma forma de controle foi aplicada afim de se perceber as respostas naturais da máquina às variações impostas.

Para alterar a carga a máquina foi utilizado um conjunto de resistências contendo quatro resistências de 150 Ω , três lâmpadas incandescentes 100W/220 com uma resistência equivalente de 484 Ω cada, por fim foi utilizado um resistor de potência nominal 2200W/220V equivalendo a uma resistência de 22 Ω . A máquina foi acionada com a carga inicial de 150 Ω , após realizar a leitura dos valores de corrente na carga, tensão na carga, e corrente na excitação, a proxima carga foi ligada em paralelo com a primeira e novamente foram tomadas as medidas, este procedimento foi repetido até ter todas as cargas ligadas. As cargas utilizadas estão descritas na tabela 6.2,

Tabela 6.2 - Condições de cargas utilizadas para o ensaio.

| | <i>V Excitação</i> <i>Volts</i> | <i>Largura do Pulso</i> <i>Graus</i> | <i>Velocidade</i> <i>RPM</i> | <i>Resistência da Carga</i> <i>Ohm</i> |
|------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|---|
| <i>Medição 1</i> | 25 | 15 | 1200 | 150 |
| <i>Medição 2</i> | 25 | 15 | 1200 | 75 |
| <i>Medição 3</i> | 25 | 15 | 1200 | 50 |
| <i>Medição 4</i> | 25 | 15 | 1200 | 37,5 |
| <i>Medição 5</i> | 25 | 15 | 1200 | 34,8 |
| <i>Medição 6</i> | 25 | 15 | 1200 | 32,46 |
| <i>Medição 7</i> | 25 | 15 | 1200 | 30,42 |
| <i>Medição 8</i> | 25 | 15 | 1200 | 12,76 |

Na Figura 6.9-a é apresentada a correntes medidas na carga e na Figura 6.9-b a tensão medida na carga.

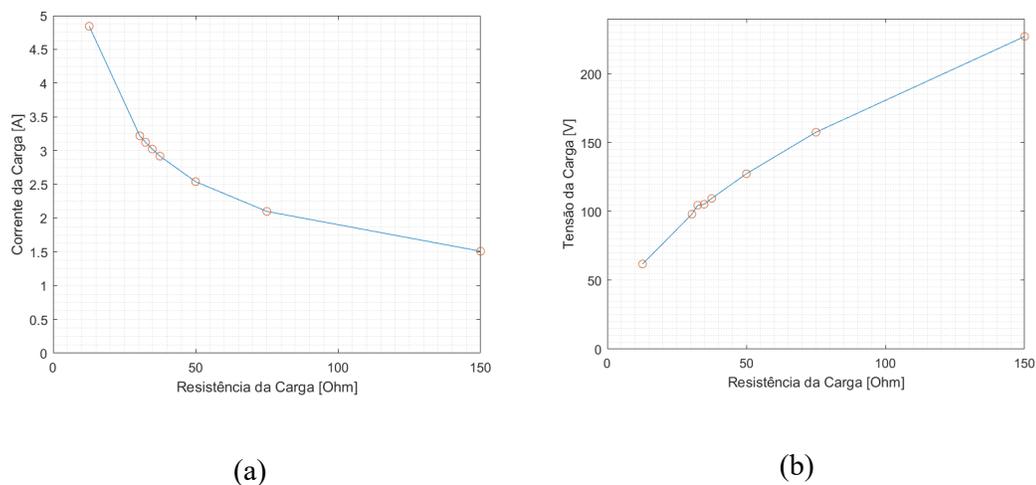


Figura 6.9 - Corrente e tensão medida para a variação da carga.

Neste experimento não houve nenhum tipo de controle implementado, portanto ao aumentar a carga (reduzir a resistência) percebe-se o aumento da corrente e redução da tensão gerada, desta forma a potência gerada não foi significativamente alterada.

Uma última condição foi analisada para este caso, na configuração de maior carga a tensão de excitação foi alterada visando elevar a tensão gerada e consequentemente a potência, permitindo assim ver a influência que um controle atuando na tensão de excitação pode ter sobre a potência gerada. Nesta acionamento limitou-se a tensão de excitação a um valor máximo de 50V para evitar estresse das chaves e do conversor half-bridge. A Figura 6.10 apresenta os valores obtidos com a potência chegando a 1240,3W.

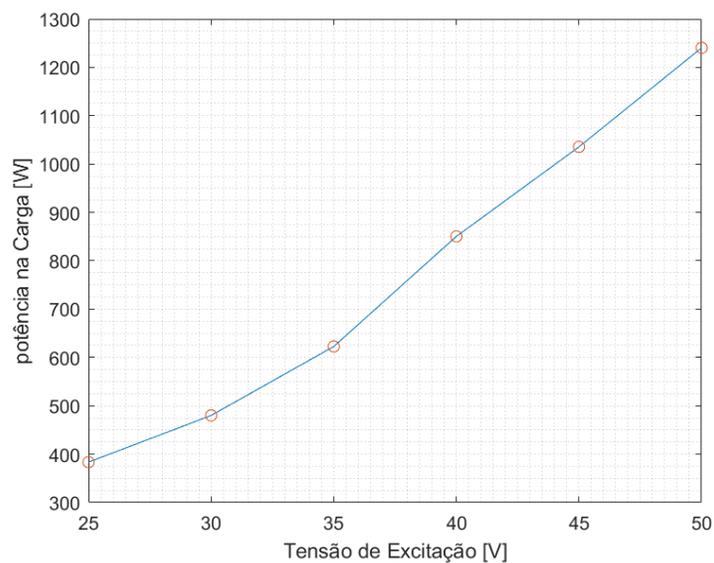


Figura 6.10 - Tensão medida para a condição de acionamento com maior carga.

As condições de corrente e potência para a fonte de excitação estão apresentadas na Figura 6.11.

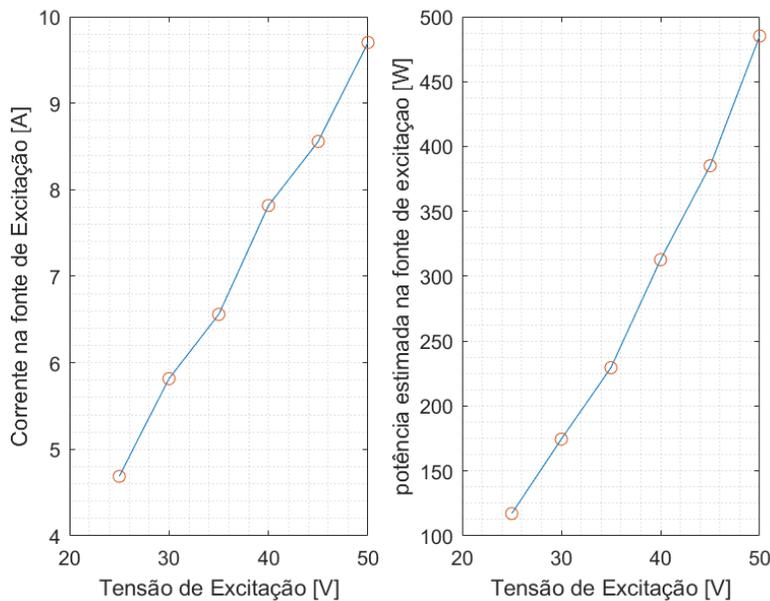


Figura 6.11 - Corrente e estimativa da potência drenada na fonte de excitação.

6.3 ENSAIO COM DIFERENTES PERFIS DE VELOCIDADES

O objetivo deste experimento é verificar o comportamento do GRV em função da variação da velocidade. Neste caso, a velocidade da máquina primária foi controlada através de um inversor de frequência por um sinal da saída analógica do DSP, controlando a velocidade na faixa de 600 a 1200 RPM, a carga resistiva instalada na saída do gerador foi de 75Ω . Os ensaios foram feitos com uma tensão de excitação constante de 25V e a largura do pulso de excitação em 15 graus. Neste ensaio a máquina foi operada em malha aberta, nenhuma forma de controle foi aplicada afim de se perceber as respostas naturais da máquina às variações impostas.

Para o controle da velocidade da máquina de indução foi gerado um sinal interno ao DSP com o perfil de velocidade desejado, este sinal foi transmitido ao inversor de frequência como set-point de velocidade. A Figura 6.12 apresenta um esquema simplificado desta ligação.

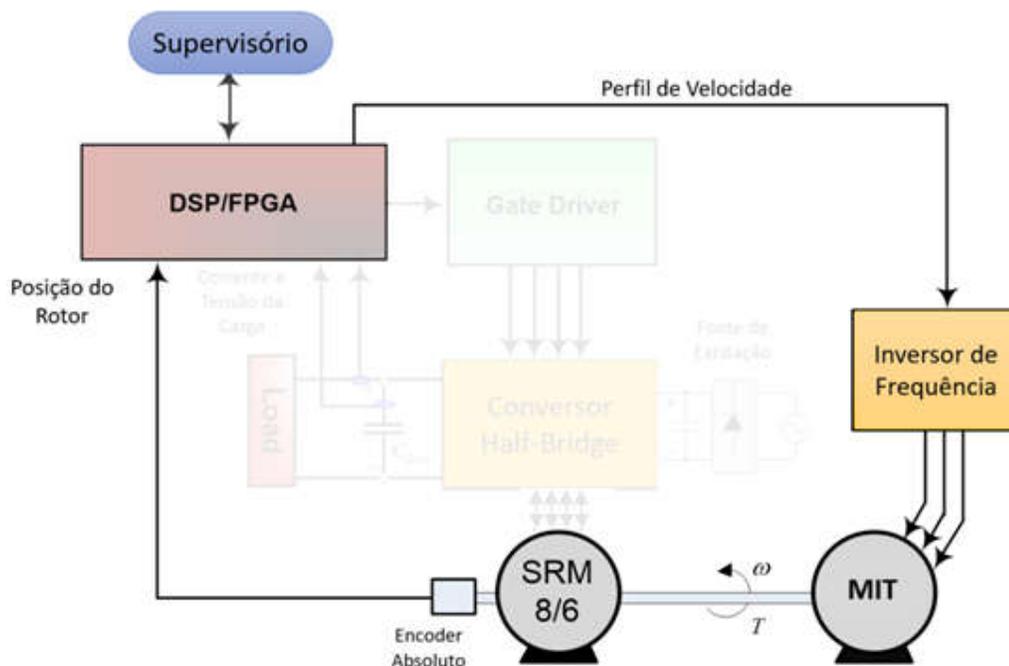


Figura 6.12 - Esquema simplificado do controle da velocidade da máquina de indução.

O principal fator observado durante o teste de acionamento em diferentes perfis de velocidade é que quanto menor a velocidade do acionamento, maior foi a tensão gerada. Isto pode ser explicado devido a excitação da máquina ser feita considerando as posições angulares do rotor, menores velocidades implicam em um maior tempo para o mesmo deslocamento angular, desta forma fazendo com que a fase da máquina permaneça excitada por um tempo maior.

Na Figura 6.13 está apresentada as formas de onda da tensão gerada para um perfil de velocidade senoidal, o canal 2 (CH2) exhibe a tensão medida na carga, para este teste variando entre 156,92V e 200,78V. No canal 1 (CH1) está apresentado o perfil de velocidade imposto na máquina de indução pelo inversor de frequência. O sinal foi enviado com um range de 0 a 10 VCC, sendo o inversor de frequência calibrado para operar com 0 RPM para um sinal de 0VCC e 1200RPM para um sinal de 10VCC.

Apesar de uma aumento da velocidade em 100% (600 para 1200RPM) a tensão gerada teve uma elevação de aproximadamente 28%. Com a redução da velocidade em 50% (1200 para 600RPM) a tensão gerada teve uma redução de aproximadamente 22%, evidenciando assim a pouca influência da velocidade para a tensão gerada. Considerando os ensaios apresentados é possível afirmar que um controle atuando diretamente na tensão de

excitação ou na largura do pulso de excitação é capaz de controlar a tensão compensando os distúrbios provocados pela mudança das velocidades.

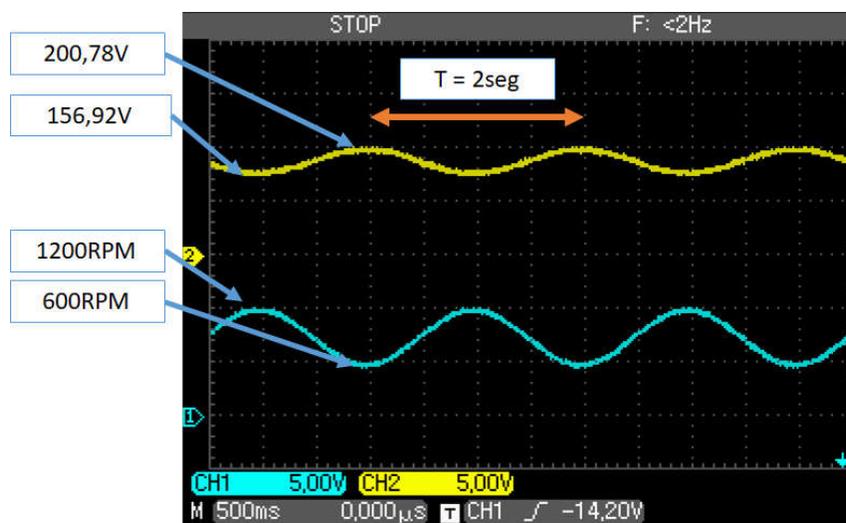


Figura 6.13 - Tensão registrada para um perfil de velocidade senoidal.

A Figura 6.14 apresenta a forma de onda da tensão gerada para um perfil de velocidade do tipo “triangular”, para este acionamento as condições foram tensão de excitação constante em 25V, velocidade excursionando entre 600 e 1200RPM, largura do pulso de acionamento em 15 graus e carga fixa em 75 Ohms.

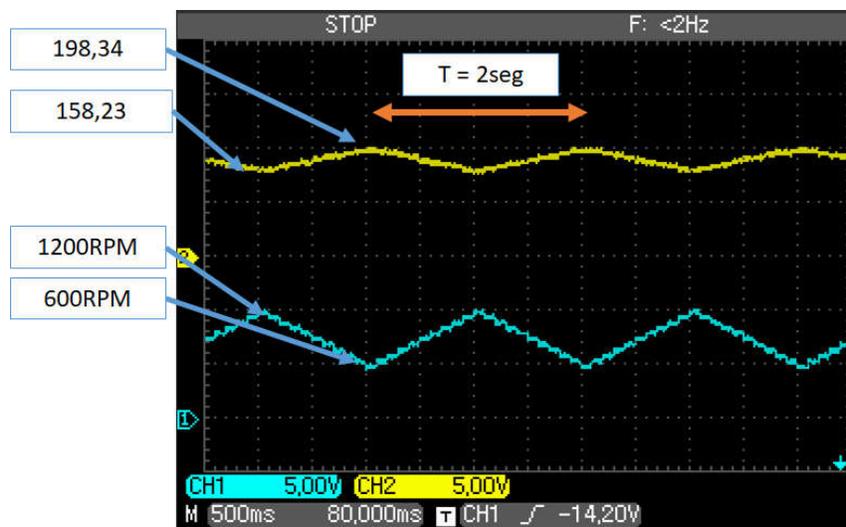


Figura 6.14 - Tensão registrada para um perfil de velocidade triangular.

Mesmo com as grandes variações de velocidade a variação da tensão gerada excursionou entre 158,23 e 198,34V. Apresentando uma variação próxima dos 20%. Este padrão de comportamento se apresentou em todos os testes realizados com velocidade variável. Desta forma foi possível evidenciar o comportamento da tensão gerada frente a oscilações na velocidade.

A Figura 6.15 apresenta o resultado obtido para um perfil do tipo dente de serra.

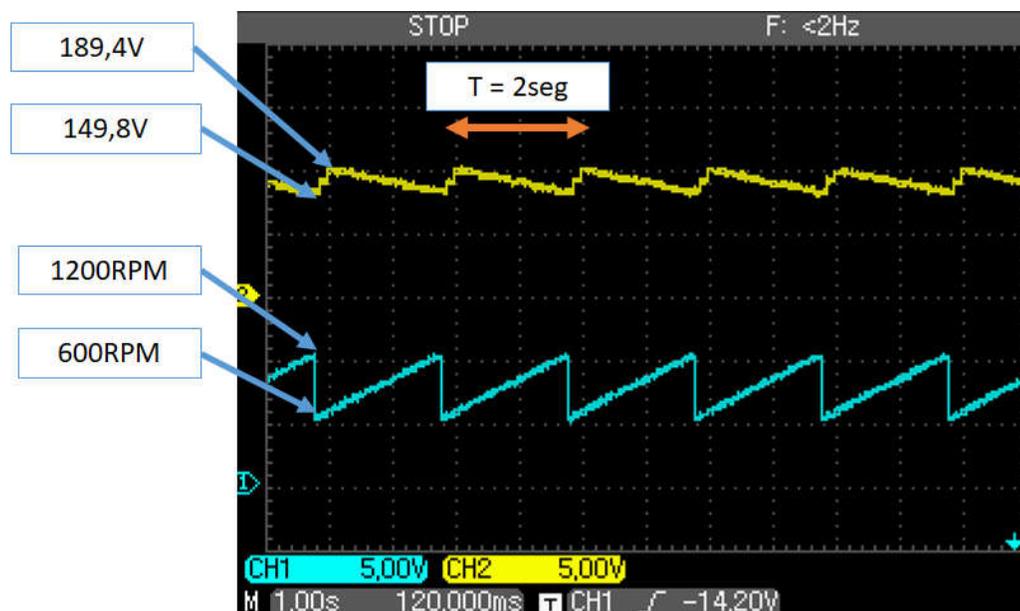


Figura 6.15 - Tensão registrada para um perfil de velocidade do tipo dente de serra.

A Figura 6.16 exibe a forma de onda gerada para um perfil com mudanças bruscas de velocidade com degraus, o mesmo padrão dos outros testes foi percebido. Neste acionamento utilizou-se as mesmas condições de excitação, largura de pulso e carga dos demais testes, é possível perceber que a tensão gerada não corresponde exatamente à forma de onda da referência de velocidade, mas está próxima. Isto ocorre pois para a máquina real não é possível impor uma variação de velocidade em degrau devido a dinâmica da máquina de indução e do inversor de frequência.

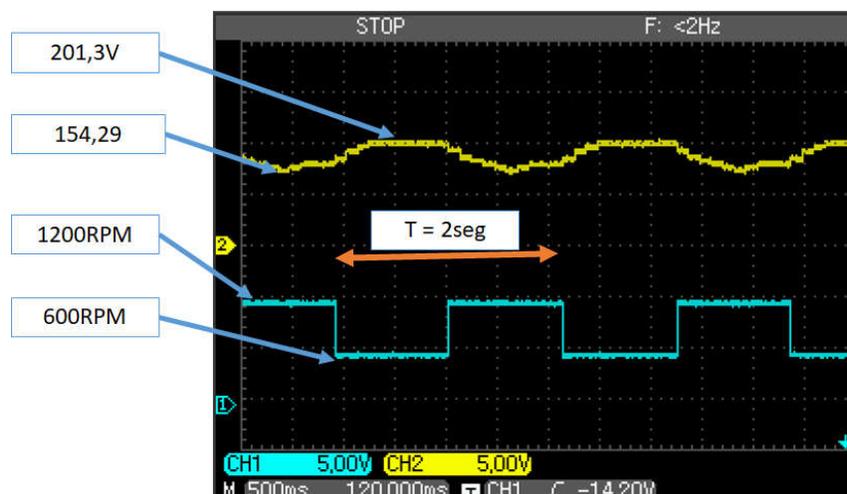


Figura 6.16 - Perfil de tensão registrado para variações em degraus na velocidade.

Por estar operando em malha aberta, optou-se por não aplicar velocidades extremamente baixas, pois poderia danificar as chaves IGBT do conversor de potência, visto que velocidades menores implicam maior tempo de excitação, provocando assim picos elevados de corrente na excitação. Por razão semelhante optou-se por não acionar em velocidades muito elevadas que poderiam prejudicar o conjunto eletromecânico e acoplamentos.

6.4 ENSAIO COM A FALTA DE UMA FASE

O objetivo deste teste é verificar o comportamento do gerador na falha ou perda de uma das fases. Como este ensaio foi feito em uma data posterior ao ensaio inicial apresentado em 6.1, tendo a bancada sofrido reajuste no leiaute e conseqüentemente ajustes nas conexões, na calibração do encoder e otimização do software e supervisor, decidiu-se repetir os ensaios de variação da excitação e variação da largura do pulso de acionamento com as mesmas condições no acionamento da máquina com as quatro fases operando e em seguida desconectar uma das fases e repetir os mesmos testes com as mesmas condições. Isto não invalida os testes já apresentados, apenas é uma forma de garantir que o acionamento com a falta de uma das fases, as condições da máquina sejam as mesmas da condição do acionamento com as quatro fases. Dando assim condições de comparar um acionamento com o outro.

Todos os acionamentos apresentados neste ensaio utilizaram como referência uma velocidade de acionamento constante em 700RPM, uma carga resistiva constante de 75

Ohms, a tensão de excitação excursionada entre 5 e 24V e a largura do pulso de acionamento entre 1,5 e 15 graus.

A Figura 6.17 e 6.18 exibe os resultados para o ensaio com as quatro fases. Na Figura 6.17 é apresentado os resultados para diferentes larguras de pulsos na excitação, na Figura 6.18 os resultados para diferentes tensões de excitação.

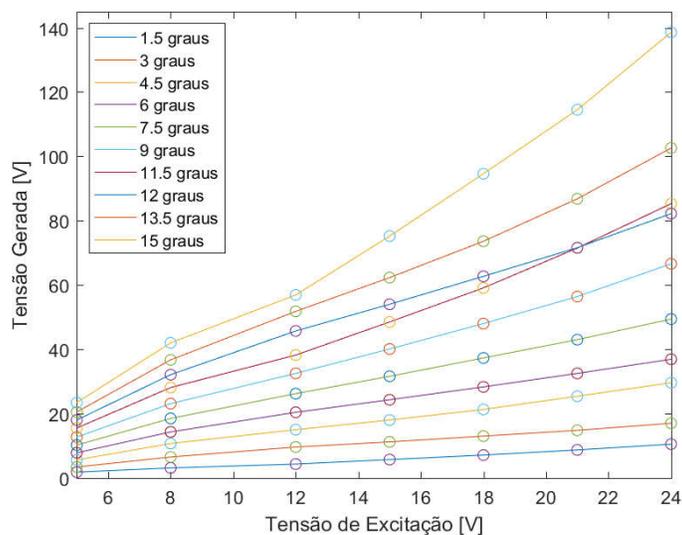


Figura 6.17 - Ensaio de referência com as quatro fases acionadas, V_{gerada} x Tensão de excitação.

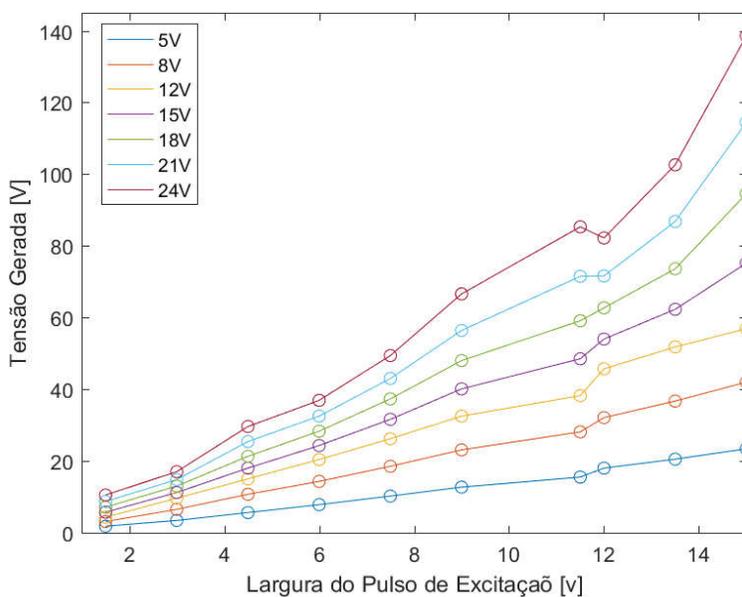


Figura 6.18 - Ensaio de referência com as quatro fases acionadas, V_{gerada} x Largura do pulso de acionamento.

As Figuras 6.19 e 6.20 apresentam os resultados com as mesmas condições de acionamento das Figuras 6.17 e 6.18, porém a fase “D” da máquina foi desconectada, ficando a geração somente com as três fases restantes. Nenhuma outra modificação foi feita no software ou estratégia de acionamento.

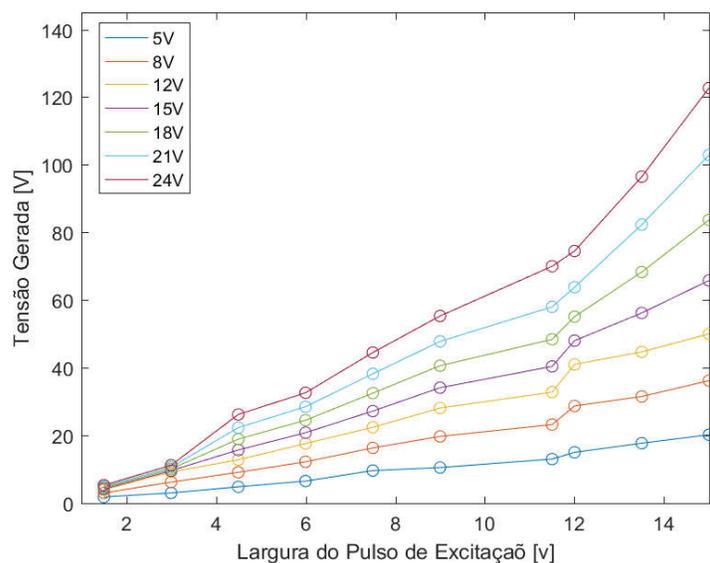


Figura 6.19 - Registro das medições com o acionamento com 3 fases. Vgerada x Largura do pulso de excitação.

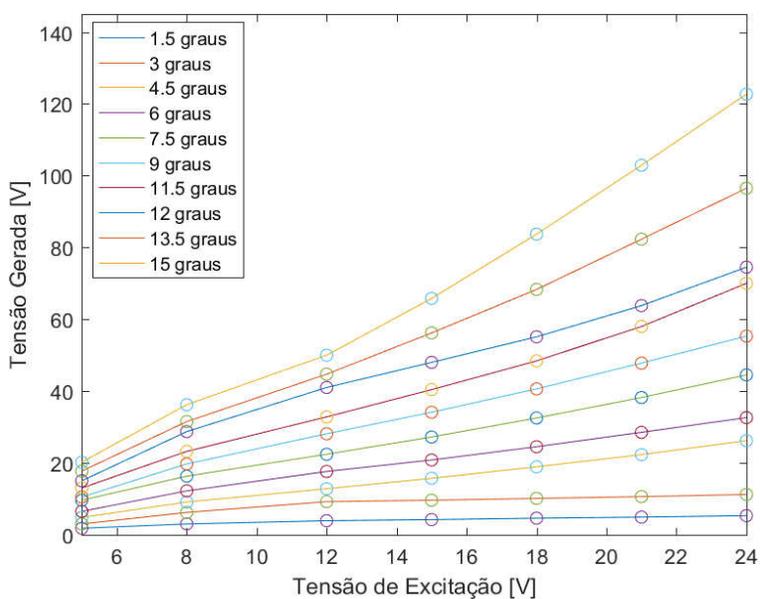


Figura 6.20 - Registro do acionamento com 3 fases, Vgerada x Tensão de excitação.

Tendo o acionamento das duas situações ocorrido com a mesma base de parâmetros, isso facilita a comparação dos resultados. A Figura 6.21 apresenta a comparação para cada uma condição de funcionamento analisada, permitindo observar que mesmo sem uma das fases contribuindo na geração, a tensão gerada reduzida foi pouco expressiva.

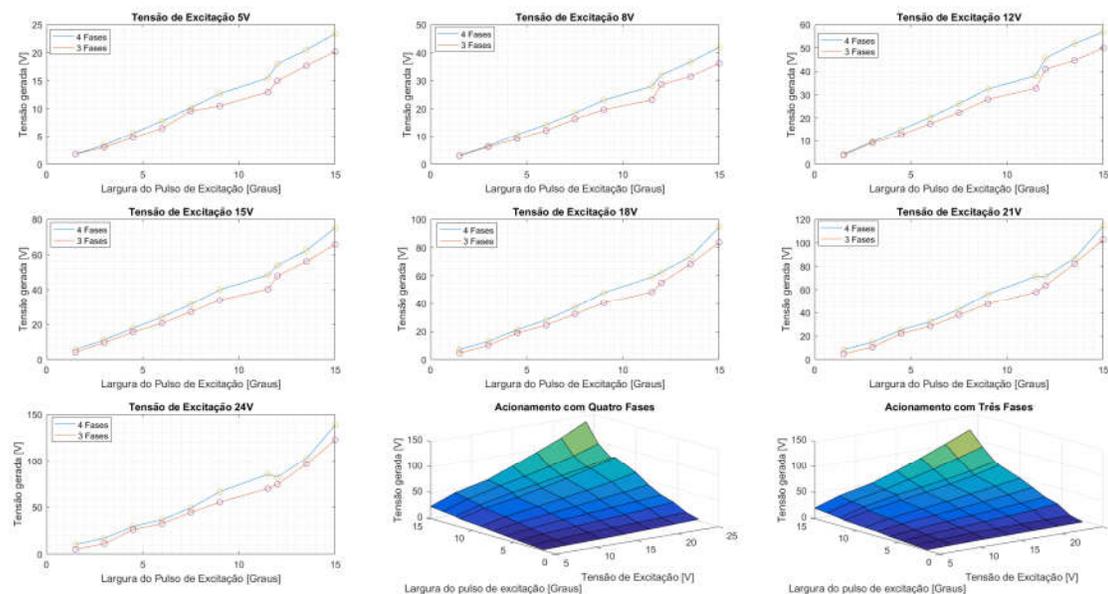


Figura 6.21 - Comparação para cada uma condição de funcionamento analisada.

Conforme mencionado em [1], [2], [3], [28], [29], [30] e [31] a falta de uma das fases tem um impacto pequeno no funcionamento do gerador, este ensaio evidenciou tal afirmação.

6.5 SINTESE DOS ENSAIOS

Utilizando como referência os testes realizados é possível perceber a real influência de cada um dos parâmetros analisados sobre a tensão gerada, a tabela 6.3 apresenta um resumo dos resultados coletados. A tabela 6.3 considera apenas os resultados coletados, dentro dos limites estabelecidos nos ensaios, os valores identificado como “taxa” na tabela são apenas uma referência à real influência de cada parâmetro analisado para as condições de operação adotadas.

É importante ressaltar que tais valores não servem de referência para extrapolação de outras condições de funcionamentos. De toda forma, estes valores são interessante para se ter uma percepção mensurável do impacto de cada parâmetro na tensão gerada. Desta forma

fica fácil identificar o alto impacto provocado pela tensão de excitação e largura de pulso, tornando estas características interessantes para serem manipuladas em estratégias de controle, também fica evidente o baixo impacto provocado pela alteração das velocidades de acionamentos indicando a não necessidade de se ter mecanismos para controle da velocidade, característica muito relevante para aplicações eólicas.

Tabela 6.3 - Síntese dos resultados.

| <i>Característica</i> | <i>Comportamento</i> | <i>Impacto</i> | <i>Taxa de variação média</i> | |
|--|---------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------------|
| <i>Tensão de Excitação</i> | Diretamente Proporcional | Alto | 6 a 7,4 | $\frac{V_{Gerada}}{V_{Excitação}}$ |
| <i>Largura do Pulso de Acionamento</i> | Diretamente Proporcional | Alto | 12,2 a 13,3 | $\frac{V_{Gerada}}{Grau}$ |
| <i>Velocidade</i> | Inversamente Proporcional | Baixo | -0,07 | $\frac{V_{Gerada}}{RPM}$ |
| <i>Resistência da Carga</i> | Diretamente Proporcional | Médio | -1,203 | $\frac{V_{Gerada}}{\Omega}$ |
| <i>Falta de uma Fase</i> | Diretamente Proporcional | Baixo | -14,10% | $\frac{V_{3Fases}}{V_{4Fases}}$ |

6.6 CONTROLE DA TENSÃO

Para fins de comprovação da controlabilidade da tensão gerada através da manipulação da largura do pulso de acionamento foi desenvolvido um controlador PI, o controle implementado foi satisfatório e conseguiu-se controlar a tensão para degraus no set-point. Neste controle não foram analisado melhores ganhos para um rápido tempo de assentamento, redução do *overshoot* e outras características de controle, sendo necessário um estudo aprofundado das melhores estratégias de controle da tensão gerada.

A Figura 6.22 apresenta um esquema simplificado da estratégia de controle adotada, na Figura 6.23 está apresentado o código fonte em labview utilizado para o controle.

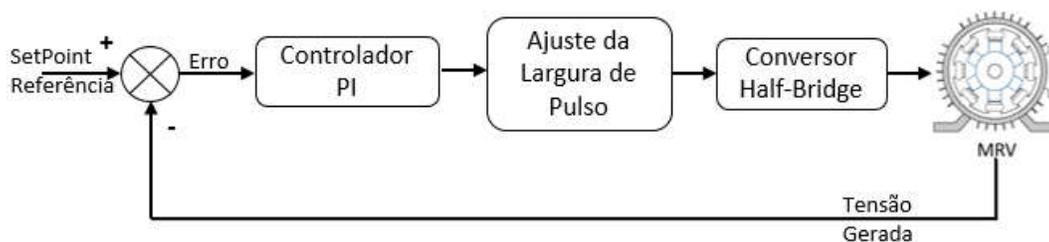


Figura 6.22 - Estratégia de controle implementada.

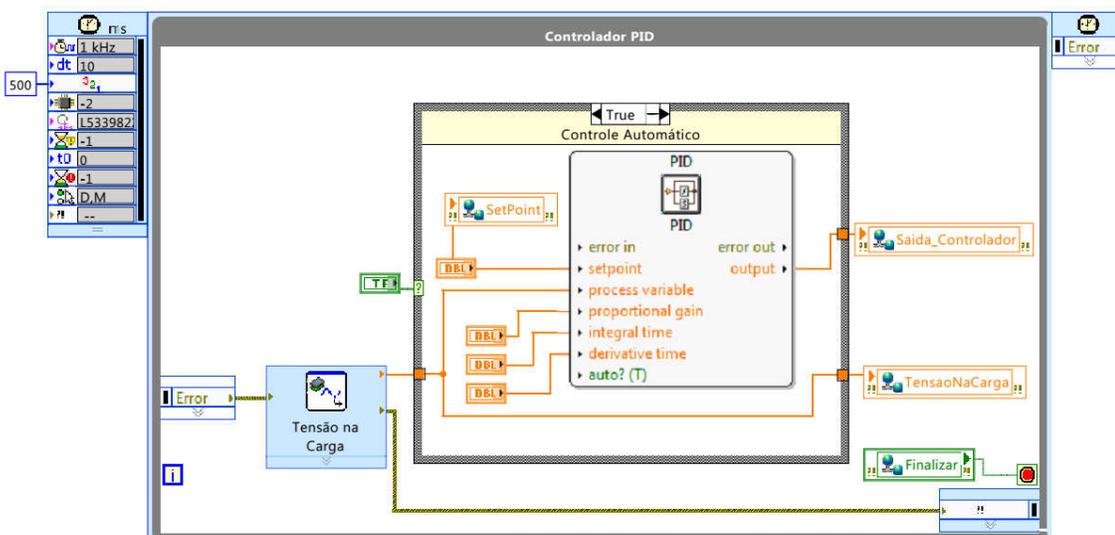


Figura 6.23 - Código fonte do controle (LabVIEW)

Os resultados obtidos no teste estão apresentados nas Figuras 6.24 e 6.25. Sendo apresentado na Figura 6.24 as formas de onda da tensão gerada e referência de tensão.

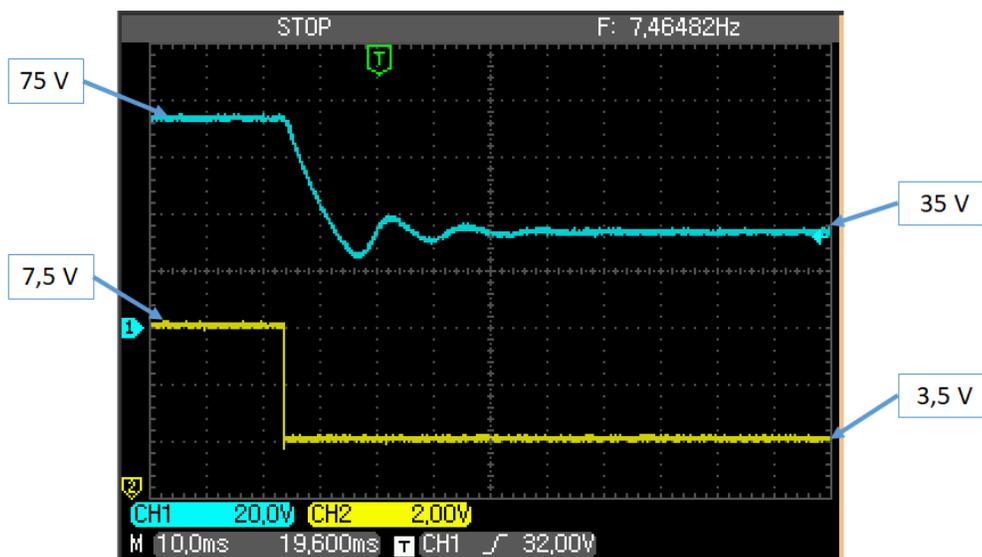


Figura 6.24 - Tensão Gerada e sinal de referência

Neste caso, para coletar o sinal de referência, foi escrito na saída analógica C1 do DSP/FPGA o sinal correspondente à referência (*SetPoint*) variando de 0 a 10V para uma referência de 0 a 100V.

A Figura 6.25 apresenta a resposta do controlador à largura do pulso de acionamento, sendo escrito na saída analógica C2 do DSP/FPGA com a resolução de 0 a 10V para as larguras de ângulos correspondentes entre 0 e 15 graus.

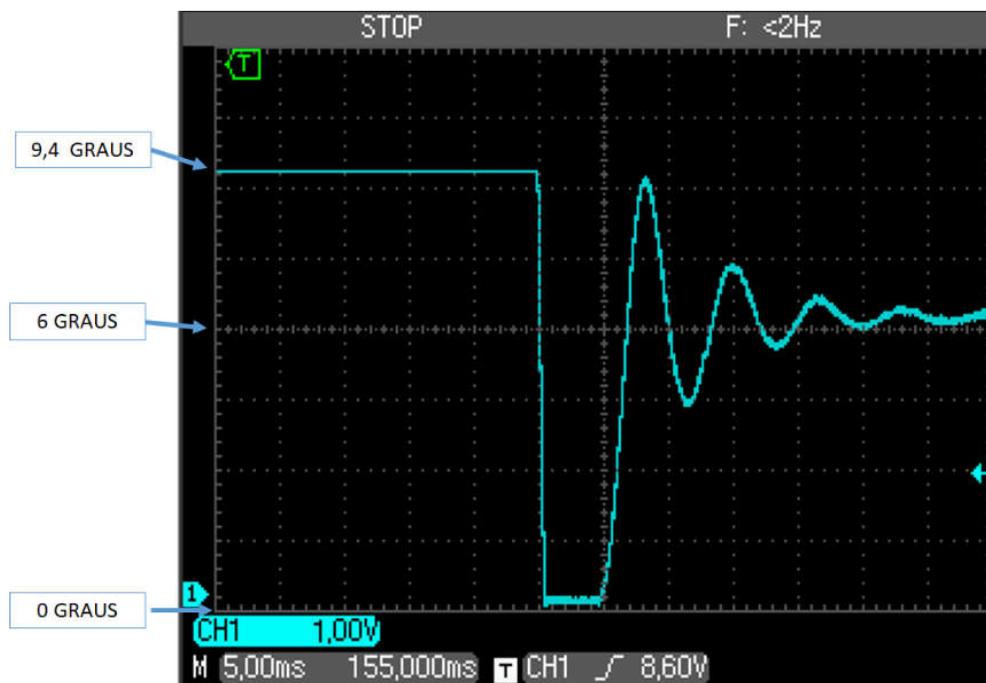


Figura 6.25 - Sinal de controle (Largura do Pulso de Acionamento)

A estrutura montada e construída na bancada não permite uma manipulação direta da tensão de excitação pelo DSP sendo necessária uma fonte controlável para excitação, desta forma limitou-se a testar o controle apenas alterando a largura do pulso de acionamento, mas conforme apresentado na tabela 6.3, a máquina pode ser controlável também através da tensão de excitação.

CAPÍTULO 7

ESTIMADOR DE INDUTÂNCIA

Afim de avaliar as equações desenvolvidas no capítulo 3 foi feito um acionamento simples da máquina, criando um buffer interno na memória do DSP/FPGA para armazenar uma amostra dos valores e posteriormente através do bloco “*FIFO*” (*First in, First Out*) reproduzir os sinais internos utilizando as saídas analógicas disponíveis. Para isso foram armazenadas na memória interna as variáveis internas de indutância, conjugado, derivada da indutância e outros parâmetros modelados no capítulo 3, escrevendo-os nas saídas analógicas do DSP/FPGA e coletadas através de um osciloscópio. Estudos mais aprofundados devem ser realizados afim de refinar a metodologia empregada, validá-la através de medições físicas com um torquímetro e outros instrumentos, com a possibilidade de emprega-las em estratégias de controle.

7.1.1 Ensaio da Indutância

Um ensaio da máquina a relutância foi feito com o intuito de estimar a sua real indutância máxima, visto que as curvas apresentadas em [27] considera uma máquina ideal, existindo no protótipo real características não consideradas na simulação por elementos finitos como tolerâncias geométricas, tolerâncias de superfícies (acabamento), imperfeições nos enrolamentos, qualidade do material utilizado (cobre/ferro), etc.

Uma vez que a modelagem foi realizada em valores percentuais, é possível utilizar a mesma modelagem para máquinas de construção similar, entende-se que os perfis de indutância são os mesmos considerando a curva expressa em p.u. Bastando identificar seus valores de indutâncias máxima e utilizar como parâmetro para os vetores bases.

Com este intuito foi preparada uma bancada para o ensaio da indutância e análise das fases da máquina, a tabela 7.1 exhibe os componentes interligados no ensaio, vários instrumentos foram utilizados para coletar a mesma grandeza, optou-se por fazer desta forma pois os instrumentos estavam disponíveis no laboratório no momento do ensaio e permitiu identificar possíveis erros de medida em algum dos instrumentos, podendo comparar as leituras e detectar medidas imprecisas. Para cada valor adotado neste ensaio (tabela 7.2 e

tabela 7.5) foram feitas 5 medidas consecutivas e apurada uma média simples dos valores, sendo apresentados e utilizados os valores médios obtidos.

Tabela 7.1 - Instrumentos utilizados para ensaio.

| <i>Id</i> | <i>Instrumento</i> | <i>Grandeza Medida</i> | <i>Marca/Modelo</i> |
|------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Multímetro Digital | Corrente na Fase | Minipa ET-2042D |
| 2 | Multímetro Digital | Tensão na Fase | Minipa ET-1104DMM |
| 3 | Voltímetro Analógico | Tensão na Fase | - |
| 4 | Amperímetro Analógico | Corrente na Fase | - |
| 5 | Power Logic PM700 | Corrente na Fase | Schneider PM700 |
| | | Tensão na Fase | |
| | | Potência Ativa | |
| | | Potência Reativa | |
| | | Potência Aparente | |
| | | Ângulo de Fase | |
| 6 | Analisador de Qualidade | Corrente na Fase | Power Quality Analyser – Fluke 435 |
| | | Tensão na Fase | |
| | | Potência Ativa | |
| | | Potência Reativa | |
| | | Potência Aparente | |
| | | Ângulo de Fase | |
| | | Fator de Potência | |
| 7 | Wattímetro Analógico | Potência Ativa | - |

A Figura 7.1 apresenta uma foto da bancada preparada para os ensaios.

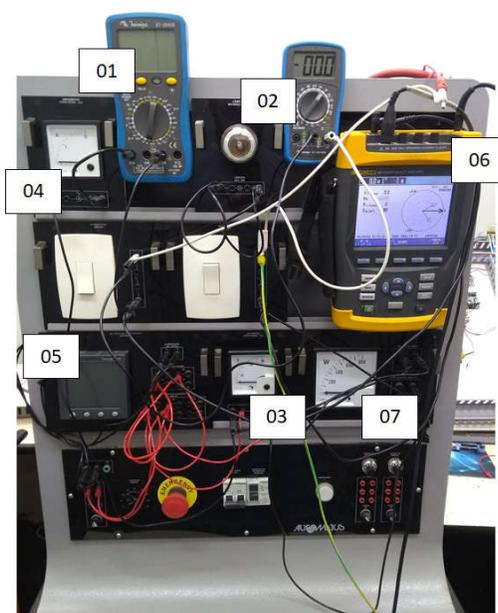


Figura 7.1 - Fotografia da bancada de medição.

Os instrumentos de medição foram conectados a uma fase por vez, deixando as demais fases desconectadas e com circuito aberto, afim de minimizar o efeito das mutuas. O eixo da máquina foi bloqueado na posição de alinhamento da fase utilizando como referência a tabela 5.2 do capítulo 5 e o aplicativo supervisorio desenvolvido, de forma a manter o eixo travado na posição de indutância máxima. A Figura 7.2 apresenta um esquema simplificado da ligação feita.

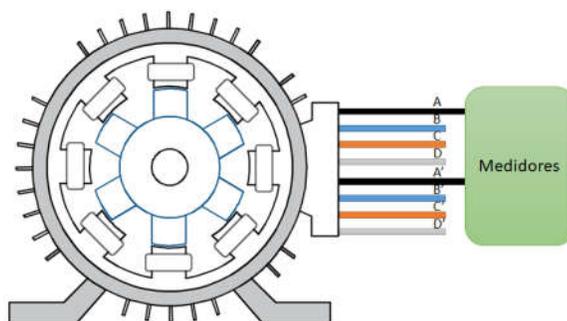


Figura 7.2 - Esquema de conexão dos medidores.

Na tabela 7.2 estão identificados os valores coletados no ensaio.

Tabela 7.2 - Valores Medidos no ensaio.

| | <i>Media dos Valores Medidos nos instrumentos</i> $\frac{\sum_1^5(\text{Leitura})}{5}$ | | | | |
|---------------|--|-------------|----------|--------------|-------------------|
| | <i>VRMS</i> | <i>IRMS</i> | <i>R</i> | <i>Theta</i> | <i>Frequência</i> |
| Fase A | 5,7 | 1,0000 | 0,6500 | -83,0000 | 60,0100 |
| | 17,5 | 3,1000 | 0,6880 | -83,0000 | 59,9990 |
| | 23,2 | 4,1000 | 0,6896 | -83,0000 | 60,0000 |
| | 28,8 | 5,2000 | 0,6750 | -83,0000 | 60,0100 |
| | 34,7 | 6,4000 | 0,5667 | -84,0000 | 60,0000 |
| Fase B | 5,7 | 1,0000 | 0,6947 | -83,0000 | 59,9500 |
| | 11,5 | 2,1000 | 0,6674 | -83,0000 | 60,0000 |
| | 17,2 | 3,2000 | 0,6550 | -83,0000 | 60,0000 |
| | 22,9 | 4,2000 | 0,6645 | -83,0000 | 59,9900 |
| | 28,5 | 5,3000 | 0,5621 | -84,0000 | 59,9900 |
| 34,1 | 6,5000 | 0,5484 | 84,0000 | 59,9900 | |
| Fase C | 5,8 | 1,0000 | 0,7068 | -83,0000 | 60,0200 |
| | 11,6 | 2,1000 | 0,6732 | -83,0000 | 60,0100 |
| | 17,3 | 3,1000 | 0,6801 | -83,0000 | 60,0100 |
| | 23,1 | 4,2000 | 0,6703 | -83,0000 | 60,0100 |
| | 28,7 | 5,3000 | 0,6599 | -83,0000 | 60,0100 |
| 34,2 | 6,4000 | 0,6512 | -83,0000 | 60,0100 | |
| Fase D | 5,8 | 0,9000 | 1,0081 | -81,0000 | 59,9800 |
| | 11,7 | 1,9000 | 0,7505 | -83,0000 | 59,9700 |
| | 17,6 | 2,8000 | 0,7660 | -83,0000 | 60,0100 |

| | | | | | |
|--|------|--------|--------|----------|---------|
| | 23,4 | 3,8000 | 0,7505 | -83,0000 | 60,0200 |
| | 29,1 | 4,8000 | 0,6337 | -84,0000 | 60,0200 |
| | 34,7 | 5,9000 | 0,6148 | -84,0000 | 60,0200 |

Na tabela 7.3 estão apresentados os valores apurados e calculados.

Tabela 7.3 - Valores apurados e calculados.

| | <i>Valores Calculados</i> | | | | | | <i>L médio</i> |
|---------------|---------------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|
| | <i>P</i> | <i>Q</i> | <i>S</i> | <i>FP</i> | <i>w</i> | <i>L</i> | |
| <i>Fase A</i> | 0,6947 | 5,6575 | 5,7000 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0150 | 14,7mH |
| | 6,6114 | 53,8456 | 54,2500 | 0,1219 | 376,9848 | 0,0149 | |
| | 11,5922 | 94,4110 | 95,1200 | 0,1219 | 376,9911 | 0,0149 | |
| | 18,2512 | 148,6437 | 149,7600 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0146 | |
| | 23,2137 | 220,8634 | 222,0800 | 0,1045 | 376,9911 | 0,0143 | |
| <i>Fase B</i> | 0,6947 | 5,6575 | 5,7000 | 0,1219 | 376,6770 | 0,0150 | 14,3mH |
| | 2,9431 | 23,9700 | 24,1500 | 0,1219 | 376,9911 | 0,0144 | |
| | 6,7077 | 54,6297 | 55,0400 | 0,1219 | 376,9911 | 0,0142 | |
| | 11,7214 | 95,4631 | 96,1800 | 0,1219 | 376,9283 | 0,0144 | |
| | 15,7890 | 150,2225 | 151,0500 | 0,1045 | 376,9283 | 0,0142 | |
| | 23,1687 | 220,4358 | 221,6500 | 0,1045 | 376,9283 | 0,0138 | |
| <i>Fase C</i> | 0,7068 | 5,7568 | 5,8000 | 0,1219 | 377,1168 | 0,0153 | 14,6mH |
| | 2,9687 | 24,1784 | 24,3600 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0145 | |
| | 6,5359 | 53,2303 | 53,6300 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0147 | |
| | 11,8238 | 96,2968 | 97,0200 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0145 | |
| | 18,5375 | 150,9762 | 152,1100 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0143 | |
| | 26,6748 | 217,2485 | 218,8800 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0141 | |
| <i>Fase D</i> | 0,8166 | 5,1557 | 5,2200 | 0,1564 | 376,8655 | 0,0169 | 16,2mH |
| | 2,7092 | 22,0643 | 22,2300 | 0,1219 | 376,8026 | 0,0162 | |
| | 6,0057 | 48,9127 | 49,2800 | 0,1219 | 377,0540 | 0,0165 | |
| | 10,8366 | 88,2572 | 88,9200 | 0,1219 | 377,1168 | 0,0162 | |
| | 14,6005 | 138,9148 | 139,6800 | 0,1045 | 377,1168 | 0,0160 | |
| | 21,4001 | 203,6085 | 204,7300 | 0,1045 | 377,1168 | 0,0155 | |

A Figura 7.3 apresenta a tela do analisador de energia durante uma das medições identificando o ângulo de fase e apresentando o diagrama fasorial da medição, na medida realizada a corrente está apresentada com um valor 10 vezes superior, pois foram feitas 10 voltas no TC de medição por se tratar de correntes de valor baixo.

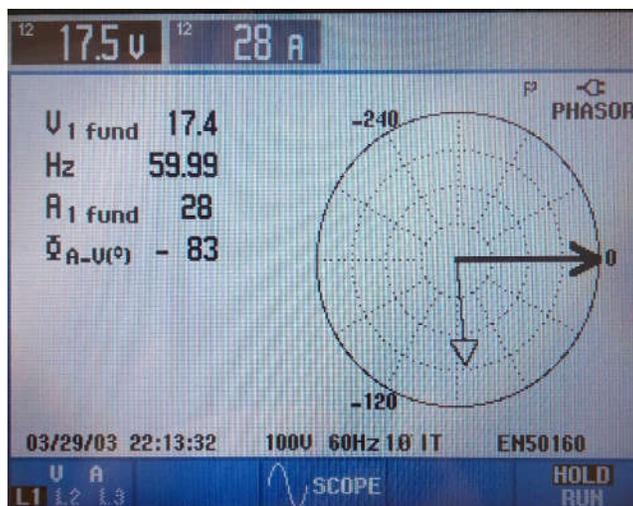


Figura 7.3 - Tela do analisador durante uma das medições

Em seguida foi feito um novo ensaio com as fases da máquina em um circuito série, conforme apresentado na Figura 7.4.

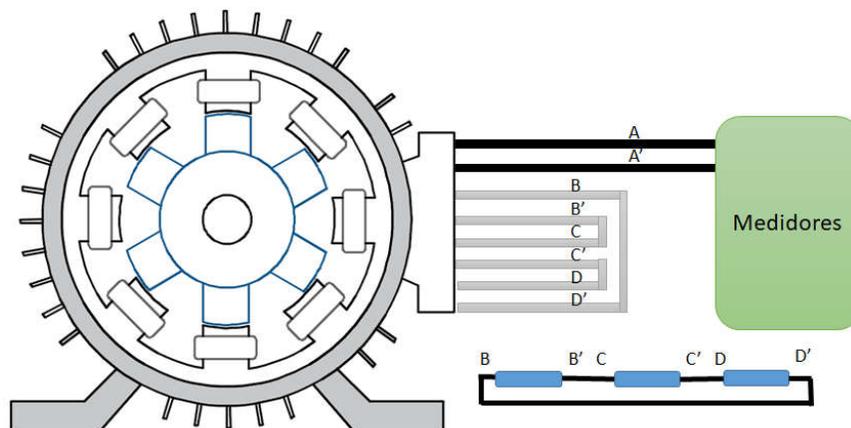


Figura 7.4 - Conexão das fases da máquina no segundo teste.

Os resultados das medições nesta configuração estão apresentados na tabela 7.4 e 7.5.

Tabela 7.4 - Valores medidos no segundo ensaio

| | <i>Media dos Valores Medidos nos instrumentos</i> | | | | |
|--|---|-------------|----------|--------------|----------|
| | <i>VRMS</i> | <i>IRMS</i> | <i>R</i> | <i>Theta</i> | <i>F</i> |
| <i>Medição na Fase A com as demais fases conectadas em série</i> | 5,8 | 0,9000 | 0,3373 | -87,0000 | 60,0000 |
| | 11,6 | 1,9000 | 0,3195 | -87,0000 | 60,0000 |
| | 17,4 | 2,8000 | 0,3252 | -87,0000 | 60,0100 |
| | 23,2 | 3,8000 | 0,3195 | -87,0000 | 60,0100 |
| | 28,9 | 4,8000 | 0,4200 | -86,0000 | 60,0100 |
| | 34,5 | 5,9000 | 0,4079 | -86,0000 | 60,0000 |

Tabela 7.5 - Valores calculados no segundo ensaio.

| | <i>Valores Calculados</i> | | | | | | <i>L médio</i> |
|--|---------------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------------|
| | <i>P</i> | <i>Q</i> | <i>S</i> | <i>FP</i> | <i>w</i> | <i>L</i> | |
| <i>Medição na Fase A com as demais fases conectadas em série</i> | 0,2732 | 5,2128 | 5,2200 | 0,0523 | 376,9911 | 0,0171 | 16,3mH |
| | 1,1535 | 22,0098 | 22,0400 | 0,0523 | 376,9911 | 0,0162 | |
| | 2,5498 | 48,6532 | 48,7200 | 0,0523 | 377,0540 | 0,0165 | |
| | 4,6139 | 88,0392 | 88,1600 | 0,0523 | 377,0540 | 0,0162 | |
| | 9,6766 | 138,3821 | 138,7200 | 0,0698 | 377,0540 | 0,0159 | |
| | 14,1989 | 203,0542 | 203,5500 | 0,0698 | 376,9911 | 0,0155 | |

O mesmo procedimento foi realizado para todas as fases da máquina, os dados resumidos de todas medições e cálculos estão apresentados na tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Resumo dos resultados do ensaio.

| | <i>Medição de uma fase com as outras fases desconectadas</i> | <i>Medição de uma fase com as outras fases conectadas em série</i> |
|---------------|--|--|
| <i>Fase A</i> | 14,7mH | 16,30 mH |
| <i>Fase B</i> | 14,3 mH | 16,55 mH |
| <i>Fase C</i> | 14,6 mH | 17,79 mH |
| <i>Fase D</i> | 16,2 mH | 20,21 mH |
| <i>Média</i> | 14,95 mH | 17,71 mH |

Observou-se uma pequena elevação da indutância apurada. Com o circuito das demais fases fechado espera-se que haja indução e portanto a influência das indutâncias mutuas se torna mais significativa.

Foram feitas medições no circuito das fases conectadas em série em que algumas características interessantes foram observadas como forma de onda induzida não senoidal apesar da fonte ser senoidal, apresentando grandes distorções harmônicas e o fator de potência nas fases induzidas foi capacitivo conforme exibido na Figura 7.5.

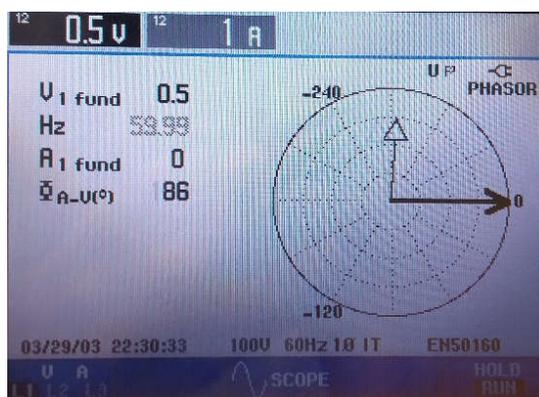


Figura 7.5 - Fasor para as fases conectadas em série.

Com os dados obtidos neste ensaio, estima-se que a indutância máxima de cada fase seja aproximadamente 18mH em comparação com a indutância simuladas com o método dos elementos finitos que é aproximadamente 21mH. Como os ensaios foram feitos em corrente alternada e com valores baixos de corrente, estima-se que o efeito da saturação do material ferromagnético seja desprezível ou mínimo, desta forma adotou-se o valor apurado como valor máximo da indutância.

7.1.2 Estimador da indutância instantânea

A máquina foi acionada com baixa potência na carga (75 ohms), velocidade, tensão de excitação e largura de pulso constantes. As Figuras 7.6 e 7.7 apresentam as formas de onda da tensão e corrente medidas.



Figura 7.6 - Tensão e Corrente Medidas na fase A da MRV

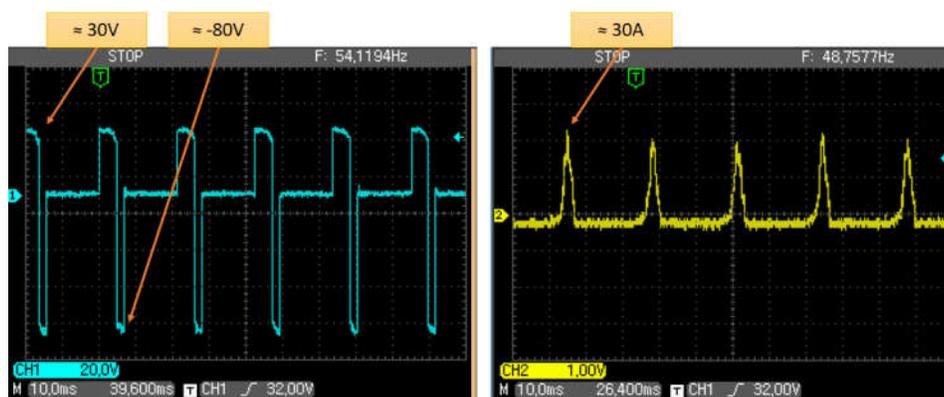


Figura 7.7 - Corrente e tensões medidas.

O estimador de indutância foi configurado com o valor de indutância máxima obtida por elementos finitos e também com a indutância máxima obtidas pelo ensaio apresentando, obtendo resultados semelhantes em ambos acionamentos, diferenciando apenas os valores máximos e mínimos das curvas, com as mesmas formas de onda. A tabela 7.7 apresenta e compara os resultados para ambos valores máximos de indutância.

Tabela 7.7 – Resultado para estimador com diferentes valores de indutância máxima.

| | <i>LMAX (Aprox. 22mH) Elementos Finitos</i> | | <i>LMAX (18mH) Ensaio</i> | |
|---|---|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| | <i>Valor mínimo</i> | <i>Valor Máximo</i> | <i>Valor Mínimo</i> | <i>Valor Máximo</i> |
| <i>Indutância</i> | 0,9 mH | 20,4 mH | 0,78 mH | 17,91 mH |
| <i>Derivada em relação à posição angular</i> | -0,00039 | 0,0002 | -0,00041 | 0,00018 |
| <i>Contribuição da fase para o conjugado (eq 7.1)</i> | 0 | -0,16 | 0 | -0,14 |

Utilizando os pontos salvos no DSP/FPGA foi possível analisar os dados processados durante o acionamento em tempo real. Como os recursos de memórias são limitados, foi salvo um vetor contendo 3000 amostras (12kb aproximadamente), sendo posteriormente disponibilizados para leitura com um osciloscópio através da interface de saída analógica através da função *FIFO* disponível no LabVIEW.

A Figura 7.8 exibe uma tela estática registrada durante um dos acionamentos realizados.

Apesar de processar todos os pontos de indutância e curvas em tempo real, não é possível animar e atualizar a tela do supervisor em tempo real, sendo mais eficiente utilizar as saídas analógicas. No processo de acionamento em tempo real, a atualização de gráficos e a comunicação entre o processador e o supervisor consome tempo de processamento, portanto não é recomendado utilizar a monitoração de muitas variáveis em tempo real simultaneamente por gráficos, podendo ocorrer o estouro do tempo de interrupção da função e perda da comunicação entre o sistema de supervisão e o DSP/FPGA.

Quando ocorre a perda de comunicação o sistema de tempo real (LabviewRT) garante que o DSP/FPGA continue a execução das funções nele programada, porém toda a conexão com o supervisor é perdida até que o sistema seja reiniciado.

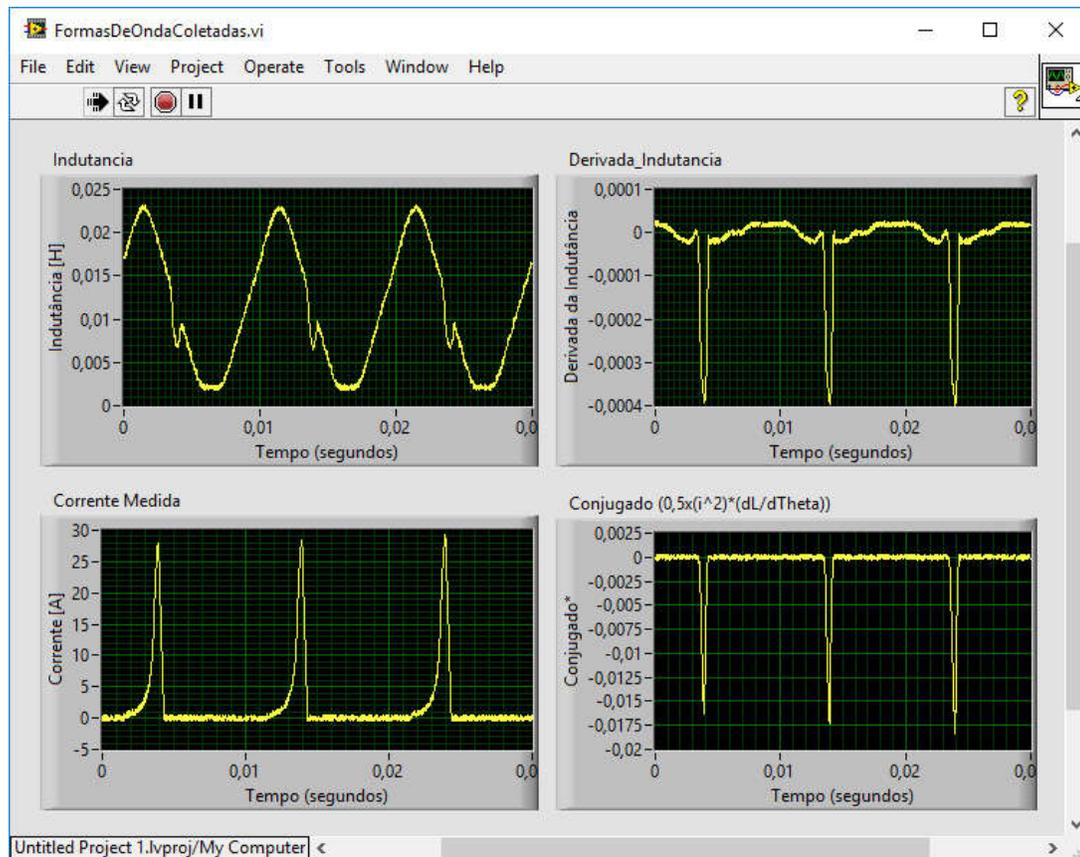


Figura 7.8 - Tela de supervisão dos valores estimados.

Existe a possibilidade de centralizar todo processamento do acionamento através da interface FPGA, permitindo que a interface DSP se ocupe somente com a supervisão dos dados, porém decidiu-se reservar os recursos FPGA para funções críticas do acionamento e controle.

Sendo assim decidiu-se analisar as formas de onda diretamente pelas saídas analógicas, evitando assim a perda de comunicação com o sistema de supervisão ou consumo desnecessário dos recursos da interface FPGA, possibilitando atualizar os dados no osciloscópio no tempo ocioso do DSP, uma vez coletados os dados no osciloscópio as formas de ondas podem ser salvas e analisadas posteriormente, ou importadas no Excel ou MatLAB através da exportação de dados disponibilizada nos osciloscópios digitais.

Na Figura 7.9 é exibido o trecho do código em LabVIEW responsável por receber o cluster de dados armazenados, retirar as amostras do barramento “FIFO” e enviar para as saídas analógicas.

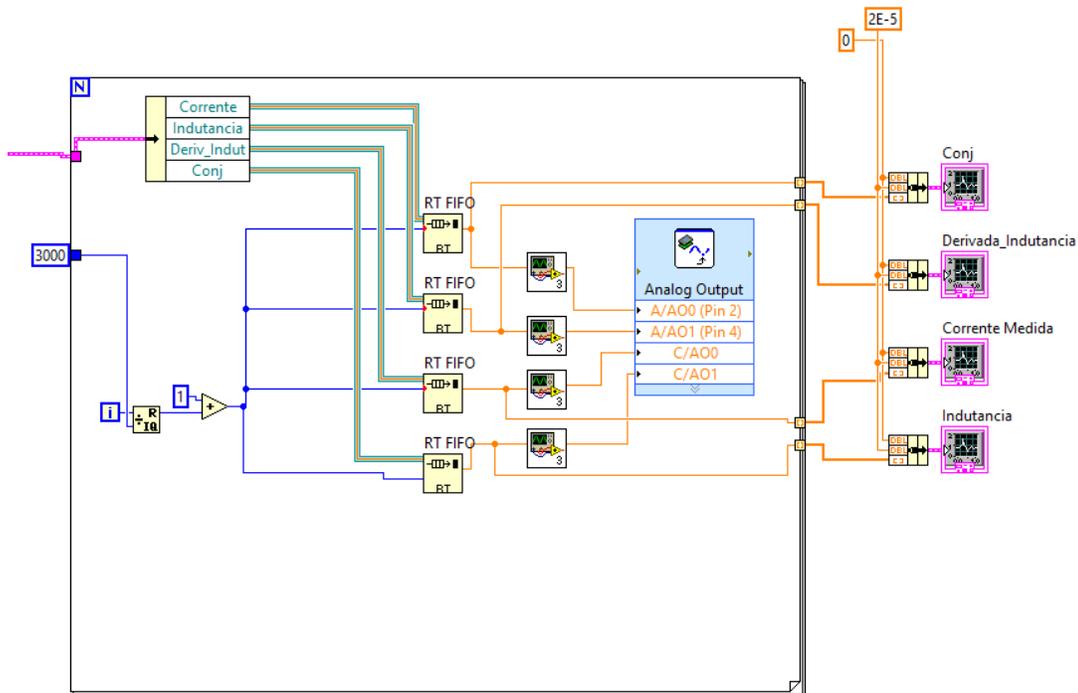


Figura 7.9 - Código para envio dos dados armazenados para as saídas analógicas.

A Figura 7.10 apresenta o sinal correspondente a um dos termos necessário para determinar o conjugado conforme apresentado nas equações 2.14 e 2.20, e derivada instantânea da indutância em relação à posição angular (CH2).

A equação 7.1 exibe a expressão considerada para a forma de onda apresentada no (CH1). A bancada dispõe de apenas um transdutor de corrente, desta forma não é possível calcular o conjugado completo apresentado em 2.14 e 2.20, porém pode se considerar que a contribuição de todas as fases seja a mesma, chegando assim a um resultado aproximado.

No entanto limitou-se a apenas estimar a indutância e sua derivada, ficando a estimativa de conjugado e rendimento como proposta de trabalhos futuros.

$$CH1 = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (7.1)$$

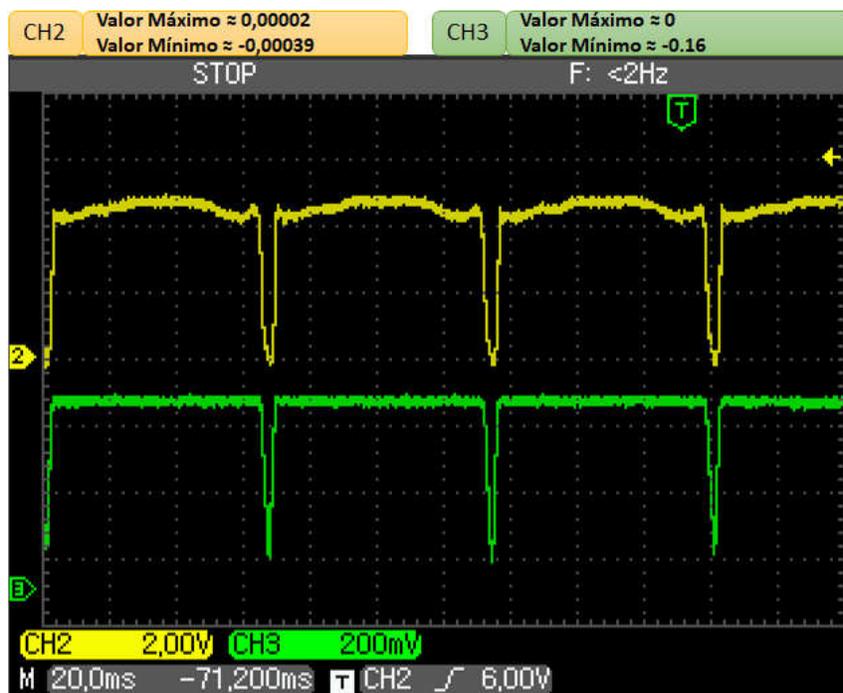


Figura 7.10 - Derivada da indutância e conjugado estimado.

A Figura 7.11 apresenta as formas de onda da corrente e da indutância estimada na fase B da máquina.

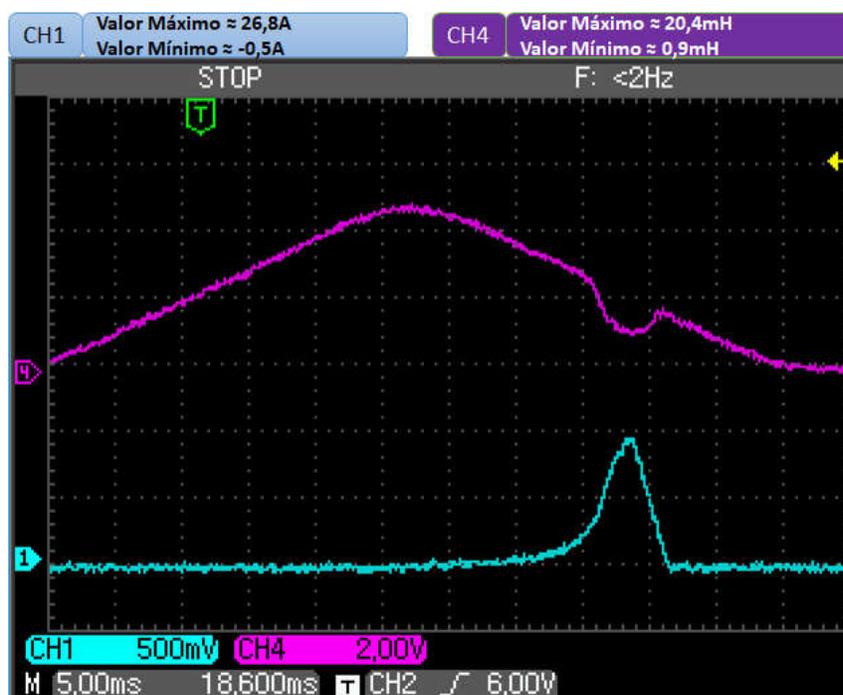


Figura 7.11 - Corrente e indutância estimada para a fase B.

A Figura 7.12-a apresenta a indutância instantânea estimada (CH3) para o acionamento e a corrente medida na fase(CH4), na Figura 7.12-b as mesmas curvas obtidas com a simulação realizada.

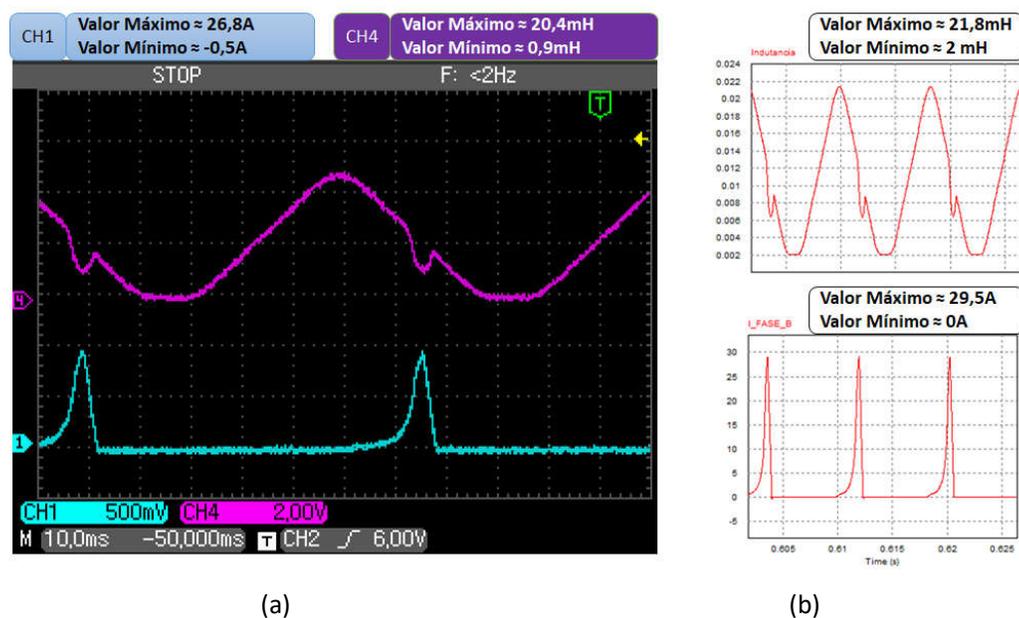


Figura 7.12 - Indutância Instantânea e Corrente.

A Figura 7.13 apresenta a forma estimada para a derivada da indutância.

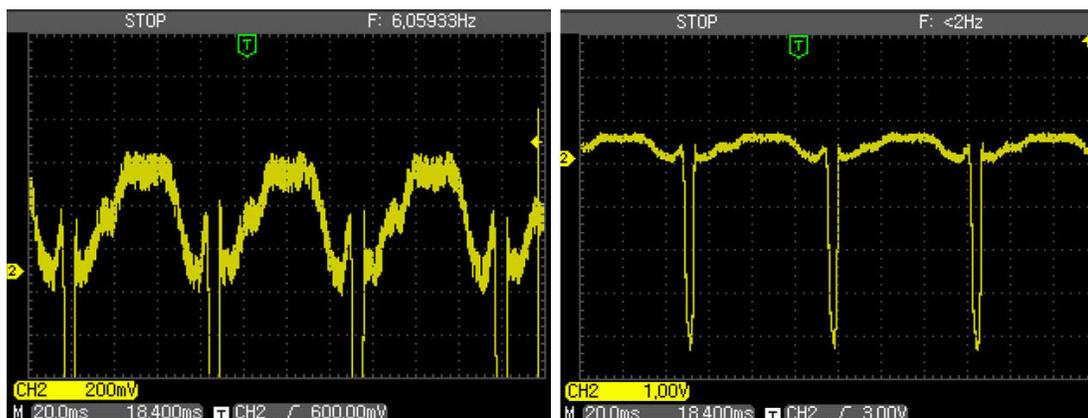


Figura 7.13 - Derivada da indutância

A Figura 7.14 apresenta as curvas de indutância estimada (CH3) e curva da derivada da indutância (CH2).

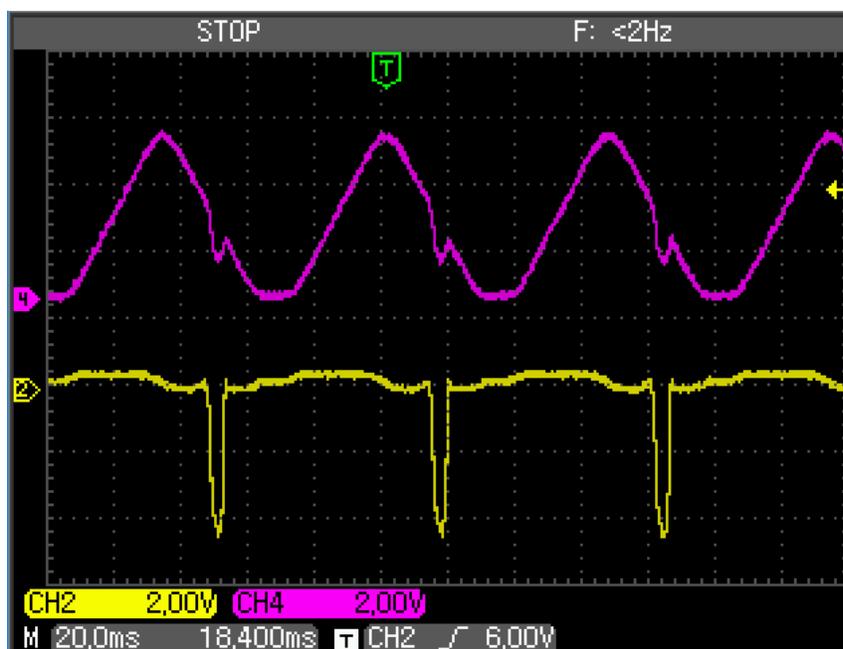


Figura 7.14 - Curvas de Indutância e a derivada em relação à posição angular.

A Figura 7.15 compara a indutância estimada (CH4) com a derivada da indutância (CH2) e o sinal correspondente à equação 7.1 (CH3), sendo a Figura 7.15-a para o sinal coletado no acionamento físico e a Figura 7.15-b para o resultado obtido em simulação.

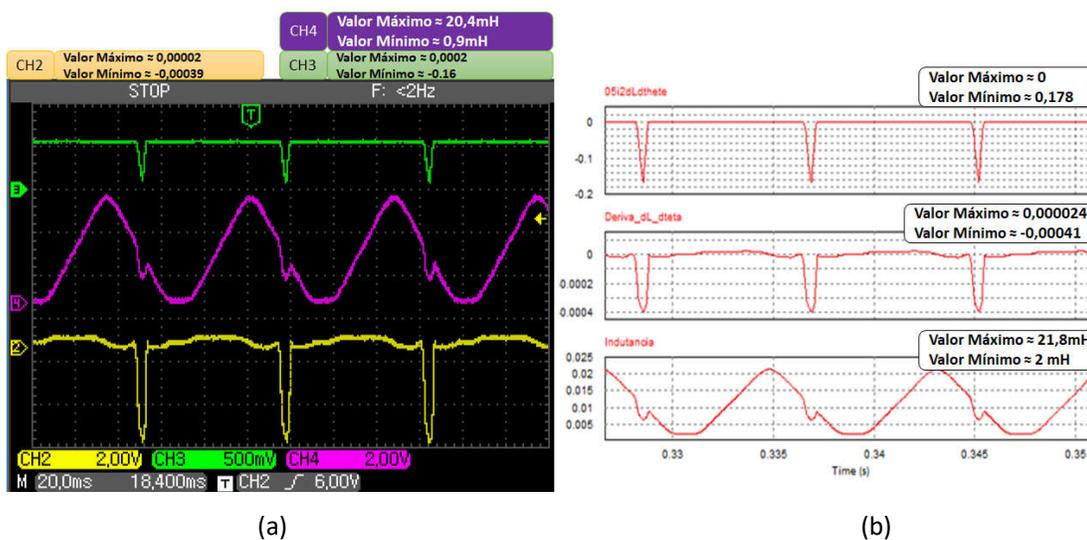


Figura 7.15 – Comparação entre valores estimados e simulados.

Por fim, a Figura 7.16 apresenta as quatro formas de onda coletadas simultaneamente, permitindo assim uma comparação entre ambas, no CH3 está o sinal calculado na equação 7.1, no CH2 a derivada da indutância, no CH4 a indutância estimada e no CH1 a corrente na fase da máquina.

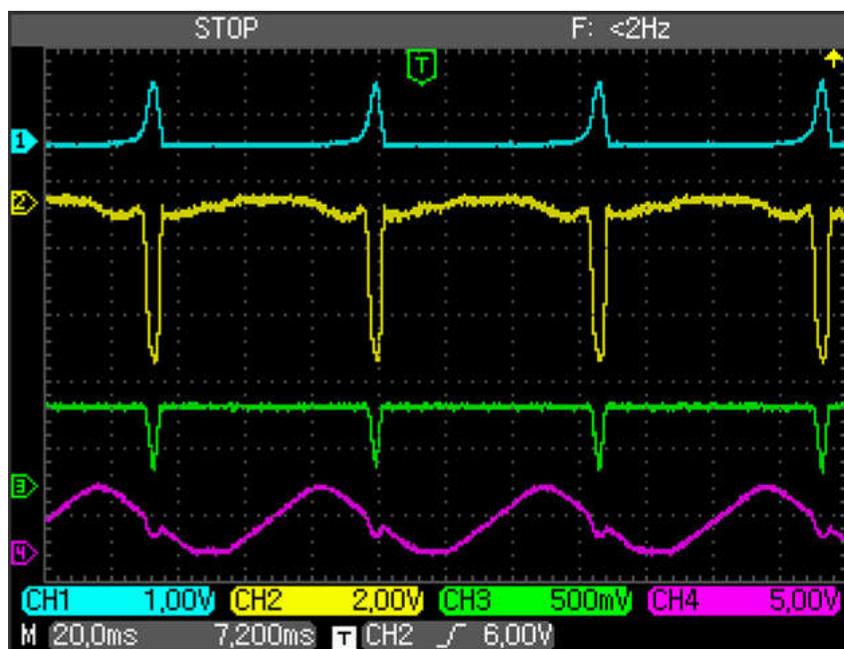


Figura 7.16 - Curvas coletadas.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi realizado um estudo sobre o funcionamento da MRV, suas diversas áreas de aplicação, principalmente no que se refere a aplicação em geradores eólicos. Foi feito ainda um estudo sobre as suas vantagens e desvantagens em relação às outras máquinas elétricas disponíveis atualmente.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional para simulação e estudo da máquina a relutância variável no software PSIM, simulação esta que está detalhada, explicada e comentada no capítulo 3 e apresentada no apêndice A.

Foram identificados, projetados, construídos e interligados todos os elementos e circuitos necessário ao funcionamento da MRV. O conjunto de circuitos e dispositivos foram montados em uma bancada dando um aspecto mais didático e intuitivo ao usuário, sendo a bancada após finalizada disponibilizada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás para uso em projetos de pesquisa e ensino/extensão através do núcleo de pesquisa em sistemas de energia.

Os resultados do acionamento experimental da MRV foram apresentados e discutidos, demonstrando assim o perfeito funcionamento da bancada e sua flexibilidade para os diversos ensaios possíveis de serem realizados, sendo ainda apresentado alguns ensaios e acionamentos realizados com o intuito de interpretar e conhecer o comportamento da máquina frente as principais variáveis que influenciem no seu funcionamento.

Também foi desenvolvido um estimador para a indutância instantânea da máquina, possibilitando a determinação do conjugado e estudo de técnicas de controle do conjugado da MRV.

As dificuldades encontradas no desenvolvimento deste projeto devem-se principalmente à quantidade de assuntos envolvidos, dada a natureza multidisciplinar do circuito de acionamento.

Espera-se que a partir deste trabalho, possam surgir muitos outros projetos nesta área de conhecimento, que poderão investigar diversos assuntos que não foram englobados neste projeto.

Baseado no desenvolvimento da bancada experimental para acionamento da Máquina a Relutância 8/6 operando como Gerador, seguem algumas sugestões de temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Ensaios acerca dos melhores pontos de operação e rendimento, operando como gerador ou como motor.
 - Estudo de técnicas de controle para velocidade, conjugado e tensão gerada.
 - Utilização do acionamento da MRV para o estudo de técnicas de injeção da tensão gerada na rede.
 - Investigação do comportamento da tensão gerada para grandes velocidades de acionamento e velocidades muito baixas.
 - Estudo comparativo entre a performance do acionamento da MRV quando acionada por FPGA e pelo controlador em tempo real (DSP).
 - Estudo comparativo entre os diferentes conversores eletrônicos de potência.
 - Estudo e implementação de técnicas de acionamento sensorless.
 - Estudo das equações para estimar a indutância instantânea e investigar formas de aprimorar o controle utilizando os valores estimados.
-

RELAÇÃO DE PRODUTIVIDADE OBTIDA COM O TRABALHO

PERIÓDICOS

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; L.C. Gomes ; D.A. Andrade ; CHAVES, E. N. ; M.A.A.Freitas .
Proposal of a Test Bench for Switched Reluctance Machine 8/6 for Wind Energy Application. RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL (RE&PQJ), v. 1, p. 487-492, 2018.

M.A.A.Freitas ; VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; CHAVES, E. N. ; QUEIROZ, C. A. ; Luis Gustavo Wesz ; **TIRONE, R.** ; VAGNER, R. ; J. L. Domingos . **Comparative Analysis of the 6/4 and 8/6 Switched Reluctance Generator in Different Operating Conditions.** RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL (RE&PQJ), v. 1, p. 493-498, 2018.

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P.; L.C. Gomes ; CHAVES, E. N. ; MENDONCA, F. ; OLIVEIRA, M. E. ; SILVA, S. B. ; MIRANDA, L. C. . **Voltage Behavior in the Switched Reluctance Generator Due to Different Speed Profiles Aimed at Use in Small Wind Turbines.** RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL (RE&PQJ), v. 1, p. 438-442, 2017.

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; SILVA, D. P. A. ; MENDONCA, F. ; D.A. Andrade ; SOUTO, O. ; L.C. Gomes ; SILVA, L. G. W. . **Development of an Experimental Platform to Drive the Switched Reluctance Machine.** Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ), v. 14, p. 10-16, 2016.

CONFERÊNCIAS

TIRONE, R. T. ; L. C. GOMES; D.A. ANDRADE; G.P VIAJANTE; E. N. CHAVES, M. A. A. FREITAS; J. L DOMINGOS; **Study and Dynamic Performance Analysis of a Switched Reluctance Generator for Wind Energy Application.** In: IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2018,

Palermo - Itália, 2018, Palermo. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2018., 2018.

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; L.C. Gomes ; D.A. Andrade ; CHAVES, E. N. ; M.A.A.Freitas . Proposal of a Test Bench for Switched Reluctance Machine 8/6 for Wind Energy Application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2018, Salamanca - Espanha. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2018.

M.A.A.Freitas ; VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; CHAVES, E. N. ; QUEIROZ, C. A. ; Luis Gustavo Wesz ; VAGNER, R. ; **TIRONE, R. ; J. L. Domingos . Comparative Analysis of the 6/4 and 8/6 Switched Reluctance Generator in Different Operating Conditions.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2018, Salamanca - Espanha. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2018.

VIAJANTE, G. P.; CHAVES, E. N. ; QUEIROZ, C. A. ; M.A.A.Freitas ; MIRANDA, L. C. ; SILVA, D. P. A. ; SILVA, S. B. ; **TIRONE, R. ; L.C. Gomes . A Grid Connection Scheme of a Switched Reluctance Generator using P+Resonant Controller.** In: IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2017, Milão - Itália, 2017, Milão. IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2017., 2017.

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; L.C. Gomes ; CHAVES, E. N. ; MENDONCA, F. ; OLIVEIRA, M. E. ; MIRANDA, L. C. . Voltage Behavior in the Switched Reluctance Generator Due to Different Speed Profiles Aimed at Use in Small Wind Turbines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'17), 2017, Malaga - Espanha. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'17), 2017.

TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; SILVA, D. P. A. ; MENDONCA, F. ; D.A. Andrade ; SOUTO, O. ; L.C. Gomes ; Luis Gustavo Wesz . Development of an Experimental Platform to Drive the Switched Reluctance Machine. Renewable Energy & Power Quality Jour. In:

International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2016, Madri.
International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2016.

APENDICE A – CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO

APENDICE A1 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA EXTRAIR AS CURVAS DE INDUTÂNCIA

```

L86 = Curva_de_Indutanca; %Obtida por elementos finitos
[Iprincipal Oprincipal PROPRIA MUTUA] = extrairBase(L86);
[Oresidual Iresidual z1 b1] = extrairBase(MUTUA);
subplot(2,2,1)
plot(Iprincipal./max(Iprincipal)); title 'Lprincipal(i)'
subplot(2,2,2)
plot(Oprincipal);title 'Lprincipal(teta)'
subplot(2,2,3)
plot(Oresidual./max(Oresidual)); title 'Lresidual(teta)'
subplot(2,2,4)
plot(Iresidual); title 'Lresidual(i)'
MaxMutua = max(Oresidual);
Oresidual = Oresidual./MaxMutua;
MaxPropria = max(Iprincipal);
Iprincipal = Iprincipal/MaxPropria;

%%-----Função extrairBase.m
function [ CURVA_BASE CURVA_PRINCIPAL MATRIZ_PRINCIPAL MATRIZ_RESIDUAL ] =
extrairBase( MATRIZ_ORIGINAL )
a , b] = size (MATRIZ_ORIGINAL);
for i=1:b
    CURVA_BASE(i) = max(MATRIZ_ORIGINAL(:,i));
    MATRIZ_ORIGINAL(:,i) = MATRIZ_ORIGINAL(:,i)/CURVA_BASE(i);
end
%curva PRINCIPAL
CURVA_PRINCIPAL = MATRIZ_ORIGINAL(:,1);
for i=1:b
    MATRIZ_PRINCIPAL(:,i) = CURVA_PRINCIPAL;
end
MATRIZ_RESIDUAL = MATRIZ_ORIGINAL - MATRIZ_PRINCIPAL;
end

```

APENDICE A2 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA GERAR AS CURVAS A PARTIR DAS DIMENSÕES FÍSICA DA MRV

```

clear
numeroDentesRotor=6;
numeroDentesEstator=8;
% Índice de inclinação da indutância em função
da saturação
K_m_i = 20/100; %coeficiente da reta da residual
só para efeitos de gráfico
K2 = 100; %referente a exponencial
LMaxPrincipal = 50e-3; %Indutancia Máxima
LMaxResidual = LMaxPrincipal*10/100;
%Dimensões físicas para rotor
A =0;B =15;
E=0;H=E+6;I=H+23;J=I+6;K=J+25;
%Dimensões físicas para estator
C=0;D=22;E=J;
F=E+22;F=E;F=0;
G=F+23;%****
%Estator
m = 1;
t = [0+1/m:1/m:360];
r = ones(1,360);
estator = C+(D-C)*(heaviside(t-F)-heaviside(t-
G));
%Rotor
rotor=0;
for ii=1:1
E=(ii-1)*60+2;H=E+6;I=H+23;J=I+6;K=J+25;
inclinacao = ((B-A)/(H-E));
reta1 = inclinacao*(t-E);
reta2 = -inclinacao*(t-I)
rotor = rotor+A+reta1.*(heaviside(t-E)-
heaviside(t-H))+ (B-A)*(heaviside(t-H)-
heaviside(t-J))+reta2.*(heaviside(t-I)-heaviside(t-
J))
end
% % % %
subplot(2,2,1)
plot(t,rotor,t,estator)
axis([0 K 0 D])
grid
legend ('Rotor','Estator')
title 'Geometrias Consideradas'
% %
area = (conv(estator,rotor));

area(2*length(t))=0;
aux = [0+1/m:1/m:360*2]*0.5;
% %
principal_angulo=area/max(area);
t=aux;
residual_angulo=(t/7.5).*(heaviside(t)-
heaviside(t-7.5))+ (2-t/7.5).*(heaviside(t-7.5)-
heaviside(t-15))+ ((t-15)/7.5).*(heaviside(t-15)-
heaviside(t-22.5))+ (4-t/7.5).*(heaviside(t-22.5)-
heaviside(t-30))
subplot(2,2,2)
plot(t*2,principal_angulo,t*2,residual_angulo)
axis([0 60 -0.1 1.05])
grid
legend ('Perfil Própria','Perfil Residual')
title 'Perfil em função do angulo'
subplot (2,2,3)
SatPrincipal=exp(-t/K2);
SatResidual = (t/max(t))*K_m_i;
plot(t,SatPrincipal,t,SatResidual)
legend('Saturação da Própria', 'Saturação
Residual')
title 'Perfil em função da corrente'
% % % % %
% testes
subplot(2,2,4)
indutPrincipal=0*t;%indutPrincipal=zeros(length(
t),length(t));
for i=1:60

indutPrincipal(i,:)=LMaxPrincipal*SatPrincipal*p
rincipal_angulo(i);
end
indutResidual=0*t;%
indutPrincipal=zeros(length(t),length(t));
for i=1:60

indutResidual(i,:)=LMaxResidual*SatResidual*re
sidual_angulo(i);
end
mesh(indutResidual+indutPrincipal)

```

APENDICE A3 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA GERAR OS COEFICIENTES

%Essa função utiliza a toolbox symbolic do MatLAB, a resolução analítica das splines cúbicas no modelo de Lagrange é muito extensa e trabalhosa, sendo assim optou-se por utilizar o MatLAB para solucionar os sistemas de equações, por ser uma análise off-line o tempo de resposta não é problemático, uma vez que somente os coeficientes resultantes desta função serão utilizados nos polinômios.

```
function [ sucesso ] = spline_cubica( x , y )
clear h;clear a;clear b; %Caso exista alguma variável não simbólica com mesmo nome
for i=1:length(x)-1
h(i) = x(i+1)-x(i);
end
for i=1:length(x)-2
a(i,i) = h(i);
a(i,i+1)= 2*(h(i)+h(i+1));
a(i,i+2)= h(i+1);
b(i) = 6*(((y(i+2)-y(i+1))/h(i+1))-((y(i+1)-y(i))/h(i))));
end
a(:,1)=[];
a(:,length(x)-1)=[];
c=a\b';
c=[0;c;0];
syms X

for i=1:length(x)-1
fprintf('função para %d < X < %d \n',x(i),x(i+1))
a1=c(i); a2=c(i+1); h1=h(i); y1=y(i); y2=y(i+1);x1=x(i);x2=x(i+1);
r=((a1)/(6*h1));
r=r*((x2-X)^3);
s=((a2)/(6*h1));
s=s*((X-x1)^3);
t=(y1/h1 - (a1*h1/6));
t=t*(x2-X);
u=(y2/h1 - (a2*h1/6));
u=u*(X-x1);
pretty((vpa(simplify(collect(r+s+t+u)),5)))
end
sucesso=1;
```

APENDICE A4 – CÓDIGO FONTE DA FUNÇÃO PARA RECOMPOR A FORMA DE ONDA TRIDIMENSIONAL A PARTIR DOS COEFICIENTES

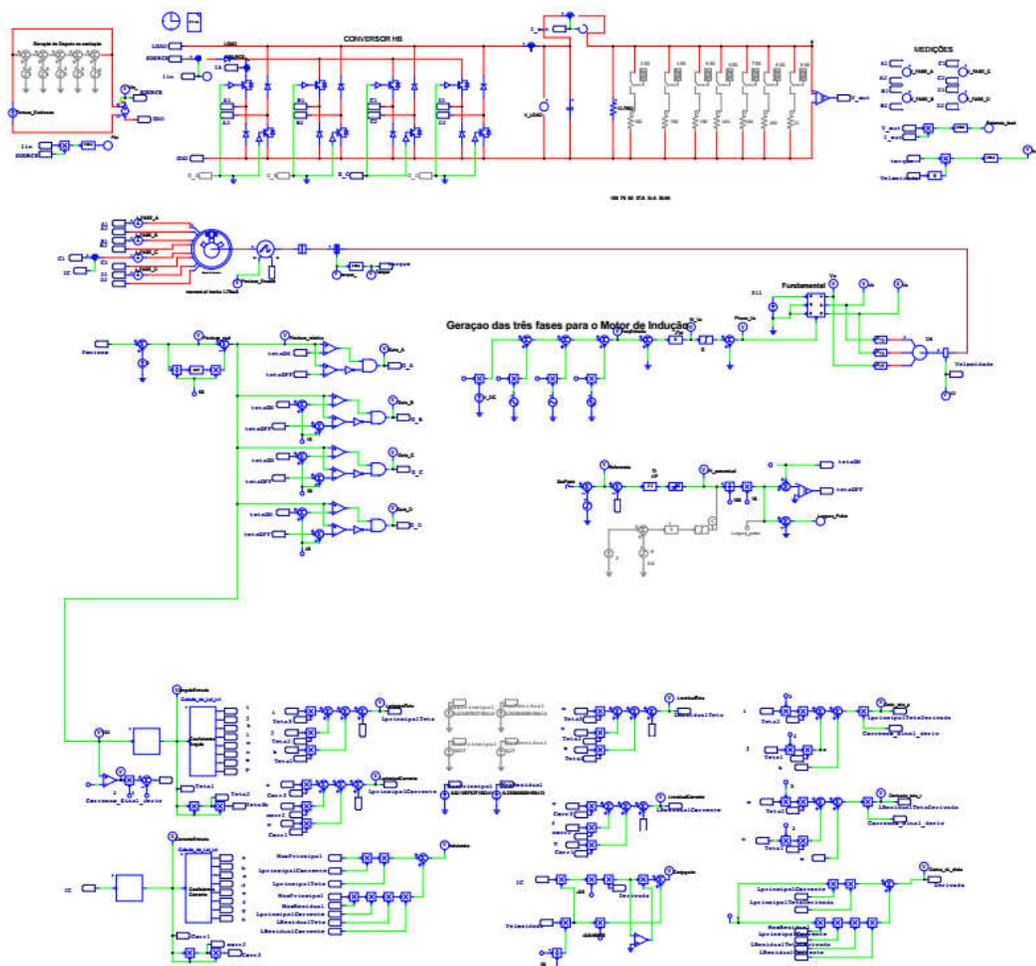
```

%para fins de exemplo, existem outras formas otimizadas de reconstruir as curvas,
clear
% close all
coeficiente_corrente = [...];
coeficiente_angulos = [...];
angulo = [...];
corrente = [...];
pos=0;
for i=0:1/10:60
    x=i;
    if(i>=30)
        x=60-i;
    end
    indice=0; pos = pos+1;
    coef = [x^3 x^2 x 1];
    if (x>=0 && x<=5)
        indice = 1;
    end
    if (x>5 && x<=9)
        indice = 2;
    end
    if (x>9 && x<=15)
        indice = 3;
    end
    if (x>15 && x<=20)
        indice = 4;
    end
    if (x>20 && x<=28)
        indice = 5;
    end
    if (x>28 && x<=30)
        indice = 6;
    end
    angulo_propria(pos,:) =
dot(coef,coeficiente_angulos(indice,1:4));
    angulo_residual(pos,:) =
dot(coef,coeficiente_angulos(indice,5:8));
end
subplot(2,2,1)
plot([0:1/10:60],angulo_propria)
xlabel 'Angulo [Graus]'
ylabel 'Valor percentual [p.u]'
title 'Curva Percentual em relação ao angulo'
grid
axis([0 60 0 1]);
subplot(2,2,2)
plot([0:1/10:60],angulo_residual)
title 'Curva Percentual em relação ao angulo
(residual)'
xlabel 'Angulo [Graus]'
ylabel 'Valor percentual [p.u]'
grid
axis([0 60 0 1]);
ylabel 'Valor percentual [p.u]'
grid
axis([0 60 0 1]);
pos=0;maximo=60;
for i=0:1/10:maximo
    x=i;
    indice=0; pos = pos+1;
    coef = [x^3 x^2 x 1];
    if (x>=0 && x<=5)
        indice = 1;
    end
    if (x>5 && x<=8)
        indice = 2;
    end
    if (x>8 && x<=15)
        indice = 3;
    end
    if (x>15 && x<=20)
        indice = 4;
    end
    if (x>20 && x<=30)
        indice = 5;
    end
    if (x>30 && x<=39)
        indice = 6;
    end
    if (x>39 && x<=100)
        indice = 7;
    end
    corrente_propria(pos,:) =
dot(coef,coeficiente_corrente(indice,1:4));
    corrente_residual(pos,:) =
dot(coef,coeficiente_corrente(indice,5:8));
end
subplot(2,2,3)
plot([0:1/10:maximo],corrente_propria)
xlabel 'Corrente [A]'
ylabel 'Valor percentual [p.u]'
title 'Curva Percentual em relação a corrente'
grid
axis([0 maximo 0 1]);
subplot(2,2,4)
plot([0:1/10:maximo],corrente_residual)
xlabel 'Corrente [A]'
ylabel 'Valor percentual [p.u]'
title 'Curva Percentual em relação a corrente
(residual)'
grid
axis([0 maximo 0 1]);

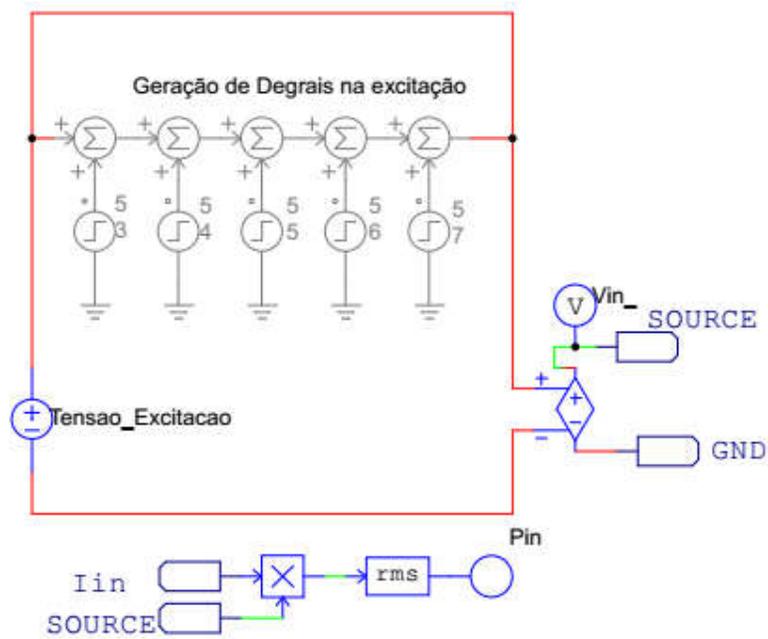
```

APENDICE B – CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO

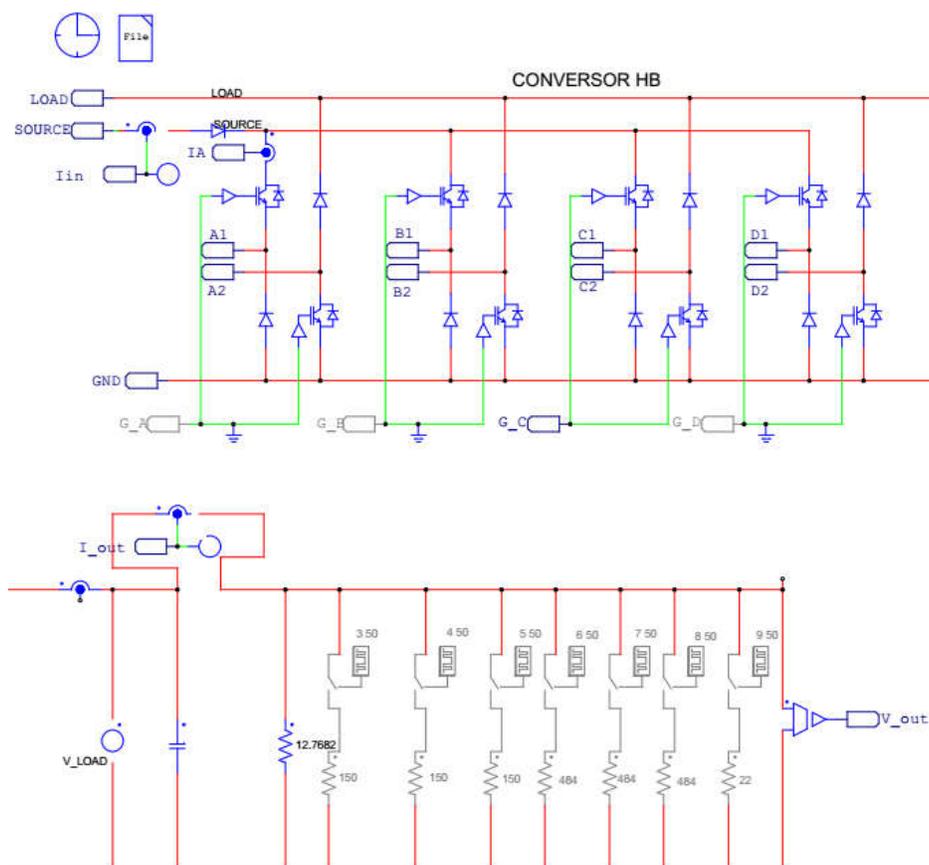
APENDICE B1 - VISÃO GERAL DA SIMULAÇÃO



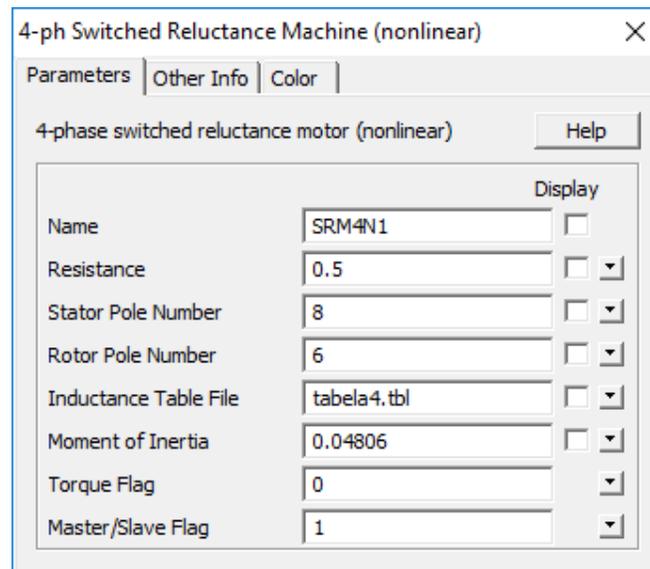
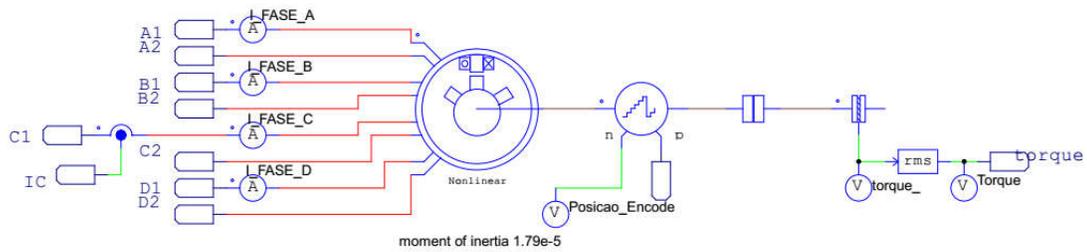
APENDICE B2 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO



APENDICE B3 – CONVERSOR HALF-BRIDGE E CARGAS



APENDICE B4 – MÁQUINA A RELUTÂNCIA E PARAMETROS UTILIZADOS



**APENDICE B5 – TABELA UTILIZADA PARA SIMULAÇÃO –
INDUTÂNCIA.**

60 39
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28
29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53
54 55 56 57 58 59 60
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28
29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39
0.0021149 0.00211499 0.00211511 0.00211502 0.00211525 0.00211567
0.00211583 0.00211619 0.0021167 0.00211725 0.0021176
0.00211824 0.00211866 0.00211897 0.00211954 0.00211973
0.00212036 0.00212075 0.00212112 0.00212124 0.00212179
0.0021221 0.00212217 0.00212265 0.00212292 0.00212294
0.00212317 0.00212337 0.00212377 0.00212396 0.0021239
0.00212427 0.0021244 0.00212429 0.00212439 0.00212455
0.00212454 0.00212468 0.00212471
0.00215521 0.00215529 0.00215544 0.00215563 0.00215583 0.00215614
0.00215655 0.0021569 0.00215726 0.00215776 0.00215822
0.00215868 0.00215913 0.00215953 0.00215997 0.00216041
0.00216083 0.00216122 0.00216156 0.0021619 0.0021623
0.00216262 0.00216295 0.00216317 0.00216348 0.00216361
0.00216382 0.002164 0.00216429 0.00216445 0.00216454
0.00216466 0.00216476 0.00216479 0.00216485 0.00216494
0.00216497 0.00216504 0.00216497
0.002231 0.00223113 0.00223131 0.00223155 0.00223185 0.00223219
0.00223259 0.00223304 0.00223352 0.00223401 0.0022344
0.00223489 0.00223539 0.0022359 0.00223638 0.00223684
0.0022373 0.0022377 0.00223811 0.00223845 0.0022388
0.00223908 0.00223936 0.00223961 0.00223982 0.00224002
0.0022402 0.00224033 0.00224045 0.00224053 0.00224061
0.00224063 0.00224064 0.00224064 0.0022406 0.00224051
0.00224043 0.0022403 0.00224016
0.00235094 0.00235111 0.00235135 0.00235166 0.00235205 0.0023525
0.002353 0.00235355 0.00235413 0.00235472 0.00235528
0.00235587 0.00235644 0.00235699 0.00235751 0.002358
0.00235845 0.00235885 0.00235921 0.00235951 0.00235977
0.00235999 0.00236017 0.00236032 0.00236043 0.00236048
0.00236048 0.00236044 0.00236035 0.00236022 0.00236003
0.00235981 0.00235954 0.00235923 0.00235888 0.00235849
0.00235804 0.00235756 0.00235704
0.00254757 0.00254784 0.00254822 0.00254869 0.00254926 0.0025499
0.00255058 0.0025513 0.00255202 0.00255271 0.00255332
0.00255395 0.00255451 0.002555 0.00255541 0.00255571
0.00255592 0.00255602 0.00255602 0.00255593 0.00255573
0.00255543 0.00255504 0.00255454 0.00255396 0.00255328
0.0025525 0.00255163 0.00255068 0.00254966 0.00254856
0.00254739 0.00254614 0.00254484 0.00254347 0.00254203
0.00254053 0.00253898 0.0025374
0.00292106 0.00292168 0.00292246 0.0029233 0.00292414 0.00292495
0.00292559 0.00292604 0.00292621 0.00292606 0.00292546
0.00292475 0.00292366 0.00292222 0.0029205 0.00291843
0.00291605 0.00291345 0.0029107 0.00290761 0.00290449
0.00290108 0.00289765 0.00289397 0.00289011 0.00288628

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.0028822 | 0.00287814 | 0.00287398 | 0.00286982 | 0.00286544 | |
| 0.00286113 | 0.0028569 | 0.00285253 | 0.0028482 | 0.00284381 | |
| 0.00283947 | 0.00283497 | 0.00283057 | | | |
| 0.00365349 | 0.00365536 | 0.00365705 | 0.00365813 | 0.00365786 | 0.00365527 |
| 0.00364984 | 0.00364187 | 0.00363174 | 0.00362019 | 0.00360798 | |
| 0.00359478 | 0.00358117 | 0.00356728 | 0.00355321 | 0.00353918 | |
| 0.00352522 | 0.00351141 | 0.0034978 | 0.00348415 | 0.0034707 | |
| 0.00345754 | 0.0034446 | 0.00343182 | 0.00341913 | 0.00340665 | |
| 0.00339444 | 0.00338253 | 0.0033709 | 0.00335946 | 0.00334816 | |
| 0.00333701 | 0.00332605 | 0.00331531 | 0.00330481 | 0.00329455 | |
| 0.00328447 | 0.00327454 | 0.00326476 | | | |
| 0.00451636 | 0.00452074 | 0.00452515 | 0.00452901 | 0.00453102 | 0.0045292 |
| 0.00451921 | 0.00449774 | 0.00446739 | 0.00443314 | 0.00439784 | |
| 0.00436216 | 0.00432699 | 0.00429269 | 0.00425896 | 0.00422647 | |
| 0.00419483 | 0.00416421 | 0.00413475 | 0.00410637 | 0.00407889 | |
| 0.00405224 | 0.00402642 | 0.00400144 | 0.00397731 | 0.00395397 | |
| 0.00393152 | 0.00390984 | 0.00388872 | 0.00386816 | 0.00384818 | |
| 0.00382876 | 0.00380981 | 0.00379126 | 0.0037731 | 0.00375545 | |
| 0.00373833 | 0.0037217 | 0.0037055 | | | |
| 0.00536748 | 0.00537553 | 0.00538398 | 0.00539165 | 0.00539724 | 0.00539856 |
| 0.00538875 | 0.00535757 | 0.00530513 | 0.00524338 | 0.00517988 | |
| 0.00511699 | 0.00505634 | 0.00499777 | 0.00494184 | 0.00488834 | |
| 0.00483785 | 0.00478976 | 0.00474359 | 0.00469928 | 0.00465727 | |
| 0.00461735 | 0.00457905 | 0.00454209 | 0.00450629 | 0.00447182 | |
| 0.00443873 | 0.00440677 | 0.00437594 | 0.00434621 | 0.00431744 | |
| 0.00428973 | 0.00426261 | 0.0042361 | 0.0042103 | 0.00418528 | |
| 0.00416113 | 0.0041375 | 0.00411441 | | | |
| 0.00619813 | 0.00621129 | 0.00622505 | 0.00623756 | 0.00624772 | 0.00625265 |
| 0.00624486 | 0.0062081 | 0.00613682 | 0.00604654 | 0.00595349 | |
| 0.00586186 | 0.005774 | 0.00569046 | 0.00561179 | 0.00553668 | |
| 0.0054655 | 0.00539833 | 0.00533438 | 0.00527321 | 0.00521502 | |
| 0.00515981 | 0.00510734 | 0.00505724 | 0.00500919 | 0.00496294 | |
| 0.00491849 | 0.00487585 | 0.00483495 | 0.00479556 | 0.00475752 | |
| 0.00472076 | 0.00468524 | 0.00465086 | 0.00461741 | 0.00458466 | |
| 0.00455246 | 0.0045207 | 0.0044892 | | | |
| 0.00703331 | 0.00705333 | 0.00707358 | 0.00709191 | 0.00710624 | 0.00711299 |
| 0.00710556 | 0.00706273 | 0.00697309 | 0.00685384 | 0.00672858 | |
| 0.00660561 | 0.00648772 | 0.00637614 | 0.00627114 | 0.00617216 | |
| 0.00607893 | 0.00599087 | 0.00590775 | 0.00582927 | 0.00575505 | |
| 0.00568453 | 0.00561738 | 0.00555341 | 0.00549231 | 0.00543396 | |
| 0.00537819 | 0.00532475 | 0.00527354 | 0.00522432 | 0.00517679 | |
| 0.00513078 | 0.00508606 | 0.00504222 | 0.00499893 | 0.00495583 | |
| 0.00491269 | 0.00486943 | 0.00482602 | | | |
| 0.00789418 | 0.00792323 | 0.00795183 | 0.00797719 | 0.00799641 | 0.00800597 |
| 0.00799674 | 0.00794336 | 0.0078309 | 0.00767808 | 0.00751432 | |
| 0.00735575 | 0.00720548 | 0.0070641 | 0.00693191 | 0.006808 | |
| 0.00669165 | 0.00658305 | 0.00648091 | 0.00638478 | 0.00629387 | |
| 0.00620779 | 0.00612583 | 0.0060482 | 0.00597413 | 0.00590334 | |
| 0.00583585 | 0.00577067 | 0.00570821 | 0.00564688 | 0.00558743 | |
| 0.00552851 | 0.0054711 | 0.00541361 | 0.00535681 | 0.00529946 | |
| 0.00524327 | 0.00518744 | 0.00513224 | | | |
| 0.00874085 | 0.0087808 | 0.00881916 | 0.0088523 | 0.00887658 | 0.00889011 |
| 0.00888215 | 0.00882047 | 0.00868297 | 0.00849512 | 0.00829401 | |
| 0.00809804 | 0.00791376 | 0.00774087 | 0.0075795 | 0.00742955 | |
| 0.00728922 | 0.00715756 | 0.0070346 | 0.00691969 | 0.00681172 | |
| 0.0067097 | 0.00661282 | 0.00652048 | 0.0064324 | 0.00634823 | |
| 0.00626724 | 0.00618867 | 0.0061119 | 0.0060363 | 0.0059614 | |
| 0.00588703 | 0.00581337 | 0.00574074 | 0.00566933 | 0.0055991 | |
| 0.00552978 | 0.00546115 | 0.00539315 | | | |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.00957129 | 0.00962381 | 0.00967327 | 0.00971356 | 0.00974282 | 0.00975983 |
| 0.00975429 | 0.00968854 | 0.00952963 | 0.00930735 | 0.00906624 | |
| 0.0088336 | 0.00861459 | 0.00841124 | 0.00822208 | 0.00804598 | |
| 0.00788242 | 0.00773006 | 0.00758783 | 0.00745389 | 0.00732732 | |
| 0.00720781 | 0.00709442 | 0.00698605 | 0.00688163 | 0.00678035 | |
| 0.0066814 | 0.00658407 | 0.00648806 | 0.00639358 | 0.00630099 | |
| 0.00621046 | 0.00612191 | 0.00603496 | 0.00594933 | 0.00586489 | |
| 0.00578197 | 0.00570127 | 0.00562338 | | | |
| 0.0103608 | 0.010427 | 0.0104881 | 0.0105354 | 0.0105696 | 0.0105896 |
| 0.0105872 | 0.0105221 | 0.010349 | 0.0100961 | 0.0098183 | |
| 0.00955019 | 0.0092979 | 0.0090638 | 0.00884711 | 0.00864515 | |
| 0.00845721 | 0.00828249 | 0.00811895 | 0.00796477 | 0.00781912 | |
| 0.00768048 | 0.00754786 | 0.0074197 | 0.00729436 | 0.00717172 | |
| 0.00705153 | 0.0069341 | 0.00681975 | 0.00670834 | 0.00659997 | |
| 0.00649334 | 0.00638863 | 0.00628624 | 0.00618723 | 0.00609183 | |
| 0.00600066 | 0.00591294 | 0.00582873 | | | |
| 0.011171 | 0.0112536 | 0.0113261 | 0.0113801 | 0.0114181 | 0.0114396 |
| 0.0114363 | 0.0113673 | 0.0111777 | 0.0108942 | 0.0105769 | |
| 0.0102685 | 0.00998031 | 0.00971248 | 0.0094637 | 0.00923425 | |
| 0.0090216 | 0.00882245 | 0.00863519 | 0.0084584 | 0.0082901 | |
| 0.0081284 | 0.00797124 | 0.00781743 | 0.00766727 | 0.00752171 | |
| 0.00738125 | 0.00724545 | 0.00711345 | 0.00698463 | 0.00685888 | |
| 0.00673705 | 0.00662008 | 0.00650816 | 0.00640122 | 0.00629894 | |
| 0.00620101 | 0.00610721 | 0.00601707 | | | |
| 0.0120308 | 0.0121298 | 0.0122145 | 0.0122796 | 0.0123187 | 0.012344 |
| 0.0123352 | 0.0122569 | 0.0120388 | 0.0117173 | 0.0113574 | |
| 0.0110083 | 0.010682 | 0.0103799 | 0.0100997 | 0.00983875 | |
| 0.00959741 | 0.00937039 | 0.00915478 | 0.00894995 | 0.00875129 | |
| 0.00855849 | 0.0083718 | 0.00819153 | 0.0080188 | 0.00785245 | |
| 0.00769095 | 0.00753385 | 0.00738233 | 0.00723683 | 0.00709814 | |
| 0.00696608 | 0.00684077 | 0.00672122 | 0.00660722 | 0.00649809 | |
| 0.00639366 | 0.00629343 | 0.00619738 | | | |
| 0.012859 | 0.0129819 | 0.0130795 | 0.0131486 | 0.0131948 | 0.0132205 |
| 0.0132152 | 0.0131253 | 0.0128803 | 0.012521 | 0.0121181 | |
| 0.0117256 | 0.0113595 | 0.0110209 | 0.010707 | 0.0104145 | |
| 0.0101398 | 0.00987873 | 0.00962817 | 0.00938666 | 0.00915444 | |
| 0.00893222 | 0.00872001 | 0.00851649 | 0.00832015 | 0.00813047 | |
| 0.00794818 | 0.00777483 | 0.00761063 | 0.00745524 | 0.00730801 | |
| 0.00716808 | 0.00703528 | 0.00690909 | 0.00678851 | 0.00667329 | |
| 0.00656301 | 0.00645723 | 0.00635561 | | | |
| 0.0136494 | 0.0137937 | 0.013903 | 0.0139787 | 0.0140284 | 0.0140566 |
| 0.0140533 | 0.0139617 | 0.0136971 | 0.013303 | 0.0128593 | |
| 0.0124253 | 0.01202 | 0.0116432 | 0.0112918 | 0.0109603 | |
| 0.0106444 | 0.010341 | 0.0100507 | 0.00977471 | 0.00951305 | |
| 0.00926375 | 0.00902476 | 0.00879529 | 0.00857617 | 0.00836887 | |
| 0.00817373 | 0.00799001 | 0.00781679 | 0.00765313 | 0.00749819 | |
| 0.0073512 | 0.00721147 | 0.00707836 | 0.00695131 | 0.0068298 | |
| 0.0067134 | 0.00660174 | 0.0064945 | | | |
| 0.0144109 | 0.0145768 | 0.0146979 | 0.0147795 | 0.0148326 | 0.0148627 |
| 0.0148606 | 0.0147709 | 0.0144945 | 0.0140717 | 0.0135862 | |
| 0.0131093 | 0.0126602 | 0.012238 | 0.0118395 | 0.0114587 | |
| 0.0110949 | 0.0107503 | 0.010426 | 0.0101198 | 0.00982868 | |
| 0.00955074 | 0.00928635 | 0.00903731 | 0.00880403 | 0.00858562 | |
| 0.00838073 | 0.00818818 | 0.0080067 | 0.0078353 | 0.00767296 | |
| 0.00751895 | 0.00737238 | 0.00723263 | 0.00709926 | 0.0069717 | |
| 0.00684959 | 0.00673264 | 0.00662053 | | | |
| 0.0152255 | 0.0154151 | 0.0155474 | 0.0156347 | 0.0156901 | 0.0157199 |
| 0.0157144 | 0.0156162 | 0.0153184 | 0.0148596 | 0.0143271 | |
| 0.0137972 | 0.0132915 | 0.0128094 | 0.0123494 | 0.0119138 | |
| 0.0115054 | 0.0111234 | 0.0107638 | 0.0104235 | 0.0101015 | |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 0.00979936 | 0.009518 | 0.00925618 | 0.00901206 | 0.0087839 | |
| 0.00857008 | 0.0083691 | 0.00817965 | 0.00800058 | 0.0078309 | |
| 0.0076698 | 0.00751657 | 0.00737066 | 0.00723157 | 0.00709882 | |
| 0.00697195 | 0.00685053 | 0.00673416 | | | |
| 0.0160651 | 0.0162784 | 0.0164242 | 0.0165163 | 0.0165747 | 0.0166049 |
| 0.0165947 | 0.0164763 | 0.0161399 | 0.0156296 | 0.015039 | |
| 0.0144415 | 0.0138631 | 0.0133122 | 0.0127947 | 0.012314 | |
| 0.0118657 | 0.0114462 | 0.0110511 | 0.0106815 | 0.0103386 | |
| 0.0100213 | 0.00972877 | 0.00945582 | 0.00920277 | 0.00896565 | |
| 0.00874257 | 0.00853331 | 0.00833592 | 0.00814926 | 0.00797261 | |
| 0.0078056 | 0.00764608 | 0.00749492 | 0.00735099 | 0.00721369 | |
| 0.00708282 | 0.00695702 | 0.00683679 | | | |
| 0.016873 | 0.0171111 | 0.0172674 | 0.017366 | 0.0174271 | 0.017458 |
| 0.0174443 | 0.0173118 | 0.0169365 | 0.0163637 | 0.015699 | |
| 0.0150181 | 0.0143617 | 0.0137494 | 0.0131847 | 0.0126604 | 0.012172 |
| 0.0117156 | 0.0112935 | 0.0109056 | 0.0105495 | 0.0102206 | |
| 0.0099167 | 0.00963455 | 0.00937171 | 0.00912566 | 0.00889501 | |
| 0.00867795 | 0.00847339 | 0.00828027 | 0.00809786 | 0.00792513 | |
| 0.0077613 | 0.0076056 | 0.00745735 | 0.00731603 | 0.00718101 | |
| 0.00705183 | 0.00692826 | | | | |
| 0.0176094 | 0.0178694 | 0.018036 | 0.0181392 | 0.0182026 | 0.0182339 |
| 0.0182178 | 0.0180755 | 0.0176619 | 0.0170143 | 0.0162626 | 0.015499 |
| 0.0147807 | 0.0141195 | 0.0135089 | 0.0129426 | 0.0124186 | |
| 0.0119379 | 0.0114994 | 0.0110987 | 0.0107312 | 0.0103925 | 0.010079 |
| 0.00978773 | 0.0095161 | 0.00926202 | 0.00902384 | 0.0088002 | |
| 0.00858989 | 0.00839173 | 0.00820462 | 0.00802754 | 0.0078596 | 0.0077 |
| 0.00754806 | 0.0074032 | 0.0072649 | 0.00713272 | 0.00700626 | |
| 0.0183392 | 0.0186206 | 0.0187969 | 0.0189041 | 0.0189688 | 0.0189979 |
| 0.0189741 | 0.0188113 | 0.0183342 | 0.0175865 | 0.0167428 | |
| 0.0159146 | 0.0151454 | 0.0144362 | 0.0137817 | 0.01318 | |
| 0.0126321 | 0.0121355 | 0.0116843 | 0.0112723 | 0.0108943 | |
| 0.0105459 | 0.0102232 | 0.00992334 | 0.00964377 | 0.00938265 | |
| 0.00913834 | 0.00890935 | 0.00869419 | 0.00849151 | 0.00830013 | |
| 0.00811899 | 0.0079472 | 0.00778398 | 0.00762865 | 0.00748064 | |
| 0.00733943 | 0.00720457 | 0.00707564 | | | |
| 0.0191247 | 0.0194291 | 0.0196153 | 0.0197267 | 0.0197923 | 0.0198172 |
| 0.0197751 | 0.0195553 | 0.0189546 | 0.0180769 | 0.0171507 | |
| 0.0162712 | 0.0154537 | 0.014699 | 0.0140081 | 0.0133824 | |
| 0.0128187 | 0.0123095 | 0.011847 | 0.0114246 | 0.0110369 | |
| 0.0106794 | 0.0103483 | 0.0100408 | 0.0097547 | 0.00948792 | |
| 0.00923862 | 0.00900503 | 0.00878559 | 0.00857887 | 0.00838367 | |
| 0.00819892 | 0.00802377 | 0.00785742 | 0.00769915 | 0.00754846 | |
| 0.00740472 | 0.00726758 | 0.00713649 | | | |
| 0.0199256 | 0.0202533 | 0.0204491 | 0.0205647 | 0.0206302 | 0.0206482 |
| 0.0205768 | 0.0202492 | 0.0194772 | 0.0184768 | 0.0174852 | |
| 0.0165586 | 0.0156991 | 0.0149099 | 0.0141955 | 0.0135547 | |
| 0.0129792 | 0.0124592 | 0.0119867 | 0.0115549 | 0.0111582 | |
| 0.0107925 | 0.0104541 | 0.0101405 | 0.00984921 | 0.00957794 | |
| 0.0093245 | 0.00908706 | 0.00886394 | 0.00865375 | 0.00845524 | |
| 0.00826743 | 0.00808939 | 0.00792034 | 0.00775964 | 0.00760664 | |
| 0.00746086 | 0.00732178 | 0.00718894 | | | |
| 0.0205969 | 0.0209442 | 0.021148 | 0.0212668 | 0.0213326 | 0.0213431 |
| 0.0212372 | 0.0207798 | 0.019851 | 0.0187674 | 0.0177276 | 0.016761 |
| 0.0158702 | 0.0150605 | 0.0143341 | 0.0136842 | 0.0131001 | |
| 0.0125721 | 0.0120918 | 0.0116525 | 0.0112489 | 0.0108769 | |
| 0.0105333 | 0.0102153 | 0.00992015 | 0.00964531 | 0.00938858 | |
| 0.00914803 | 0.00892201 | 0.00870911 | 0.0085081 | 0.00831793 | |
| 0.00813772 | 0.0079667 | 0.00780417 | 0.00764953 | 0.00750221 | |
| 0.0073617 | 0.00722755 | | | | |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 0.0210315 | 0.0213915 | 0.0216001 | 0.0217209 | 0.0217859 | 0.0217887 |
| 0.0216489 | 0.0210847 | 0.0200584 | 0.0189319 | 0.0178642 | |
| 0.0168731 | 0.0159646 | 0.0151452 | 0.0144137 | 0.0137601 | |
| 0.0131723 | 0.01264 | 0.0121552 | 0.0117113 | 0.0113033 | |
| 0.0109276 | 0.0105809 | 0.0102603 | 0.00996278 | 0.00968578 | |
| 0.00942704 | 0.00918462 | 0.00895685 | 0.00874232 | 0.00853978 | |
| 0.00834821 | 0.00816671 | 0.0079945 | 0.00783089 | 0.00767525 | |
| 0.00752701 | 0.00738566 | 0.0072507 | | | |
| 0.0211011 | 0.0214629 | 0.0216723 | 0.0217929 | 0.0218571 | 0.0218575 |
| 0.0217104 | 0.0211301 | 0.0200924 | 0.0189625 | 0.0178926 | |
| 0.0168979 | 0.0159863 | 0.0151652 | 0.0144332 | 0.0137795 | |
| 0.0131917 | 0.0126595 | 0.0121742 | 0.0117293 | 0.0113201 | |
| 0.0109431 | 0.0105953 | 0.0102738 | 0.0099755 | 0.00969778 | |
| 0.00943837 | 0.00919534 | 0.00896701 | 0.00875196 | 0.00854895 | |
| 0.00835695 | 0.00817506 | 0.0080025 | 0.00783857 | 0.00768263 | |
| 0.00753412 | 0.00739252 | 0.00725733 | | | |
| 0.02103 | 0.02139 | 0.021599 | 0.0217197 | 0.0217847 | 0.0217875 |
| 0.0216475 | 0.0210832 | 0.0200573 | 0.0189308 | 0.0178633 | |
| 0.0168725 | 0.0159641 | 0.0151447 | 0.0144131 | 0.0137594 | |
| 0.0131716 | 0.0126394 | 0.0121546 | 0.0117108 | 0.0113029 | |
| 0.0109273 | 0.0105807 | 0.0102601 | 0.00996263 | 0.00968567 | |
| 0.00942696 | 0.00918458 | 0.00895687 | 0.0087424 | 0.00853992 | |
| 0.0083484 | 0.00816694 | 0.00799477 | 0.00783119 | 0.00767558 | |
| 0.00752735 | 0.00738601 | 0.00725106 | | | |
| 0.020595 | 0.0209423 | 0.0211465 | 0.0212653 | 0.0213311 | 0.0213415 |
| 0.0212355 | 0.0207779 | 0.0198492 | 0.0187658 | 0.0177262 | |
| 0.0167598 | 0.0158692 | 0.0150597 | 0.0143333 | 0.0136834 | |
| 0.0130993 | 0.0125713 | 0.012091 | 0.0116519 | 0.0112484 | |
| 0.0108765 | 0.010533 | 0.0102151 | 0.00992001 | 0.00964517 | |
| 0.00938847 | 0.00914796 | 0.00892204 | 0.00870917 | 0.00850822 | |
| 0.00831812 | 0.00813796 | 0.00796697 | 0.00780448 | 0.00764986 | |
| 0.00750255 | 0.00736209 | 0.0072279 | | | |
| 0.0199218 | 0.0202497 | 0.020446 | 0.0205614 | 0.0206272 | 0.0206453 |
| 0.0205742 | 0.0202473 | 0.0194764 | 0.0184767 | 0.0174856 | |
| 0.0165592 | 0.0156997 | 0.0149105 | 0.0141962 | 0.0135555 | |
| 0.0129799 | 0.01246 | 0.0119875 | 0.0115557 | 0.0111591 | |
| 0.0107934 | 0.010455 | 0.0101413 | 0.00985002 | 0.00957867 | |
| 0.00932518 | 0.00908765 | 0.00886448 | 0.00865422 | 0.00845569 | |
| 0.00826784 | 0.00808976 | 0.00792068 | 0.00775995 | 0.00760696 | |
| 0.00746115 | 0.00732206 | 0.00718921 | | | |
| 0.0191168 | 0.0194213 | 0.0196078 | 0.0197195 | 0.0197853 | 0.0198108 |
| 0.0197695 | 0.019551 | 0.0189519 | 0.0180752 | 0.0171494 | |
| 0.0162704 | 0.0154533 | 0.014699 | 0.0140081 | 0.0133825 | |
| 0.0128189 | 0.0123096 | 0.0118473 | 0.0114249 | 0.0110372 | |
| 0.0106796 | 0.0103484 | 0.010041 | 0.00975499 | 0.00948828 | |
| 0.00923905 | 0.00900554 | 0.0087861 | 0.00857939 | 0.00838419 | |
| 0.00819946 | 0.00802436 | 0.00785797 | 0.00769964 | 0.00754889 | |
| 0.00740517 | 0.007268 | 0.00713693 | | | |
| 0.0183354 | 0.0186169 | 0.0187935 | 0.0189009 | 0.0189657 | 0.0189954 |
| 0.0189719 | 0.0188093 | 0.0183318 | 0.0175838 | 0.01674 | |
| 0.0159122 | 0.0151426 | 0.0144338 | 0.0137802 | 0.0131788 | |
| 0.0126311 | 0.0121344 | 0.0116831 | 0.011271 | 0.0108932 | |
| 0.0105449 | 0.0102224 | 0.00992258 | 0.00964318 | 0.00938219 | |
| 0.00913803 | 0.0089091 | 0.00869397 | 0.00849128 | 0.00829996 | |
| 0.00811899 | 0.00794725 | 0.00778404 | 0.00762879 | 0.00748068 | |
| 0.00733953 | 0.00720476 | 0.00707575 | | | |
| 0.0176116 | 0.0178718 | 0.0180387 | 0.0181419 | 0.0182052 | 0.0182365 |
| 0.0182205 | 0.0180779 | 0.0176639 | 0.0170158 | 0.0162627 | |
| 0.0154991 | 0.0147808 | 0.0141193 | 0.013509 | 0.0129431 | |
| 0.0124192 | 0.0119386 | 0.0114999 | 0.0110989 | 0.0107313 | |

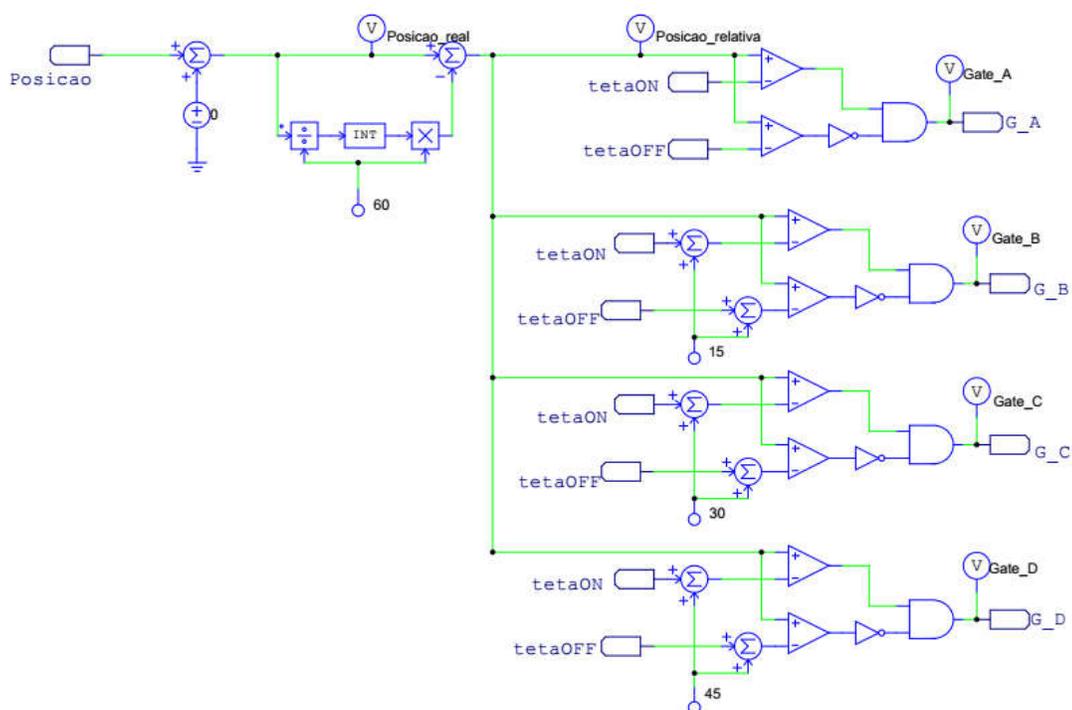
| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 0.0103925 | 0.0100793 | 0.00978815 | 0.00951664 | 0.00926274 | |
| 0.00902469 | 0.00880114 | 0.00859085 | 0.00839266 | 0.0082055 | |
| 0.00802834 | 0.00786032 | 0.00770064 | 0.00754863 | 0.00740374 | |
| 0.00726536 | 0.00713316 | 0.00700666 | | | |
| 0.0168735 | 0.017112 | 0.0172685 | 0.0173672 | 0.0174283 | 0.0174597 |
| 0.017446 | 0.0173136 | 0.0169382 | 0.0163658 | 0.0157003 | |
| 0.0150187 | 0.0143627 | 0.0137501 | 0.0131847 | 0.0126607 | |
| 0.0121717 | 0.0117155 | 0.0112932 | 0.0109054 | 0.0105485 | 0.01022 |
| 0.00991611 | 0.00963401 | 0.0093711 | 0.00912511 | 0.00889438 | |
| 0.0086776 | 0.00847323 | 0.00827978 | 0.00809738 | 0.0079247 | |
| 0.0077609 | 0.00760523 | 0.00745725 | 0.00731566 | 0.0071806 | |
| 0.00705151 | 0.00692791 | | | | |
| 0.0160667 | 0.0162817 | 0.0164268 | 0.0165196 | 0.0165784 | 0.0166086 |
| 0.0165975 | 0.0164801 | 0.0161437 | 0.0156331 | 0.0150419 | 0.014443 |
| 0.0138648 | 0.0133131 | 0.0127949 | 0.0123144 | 0.0118669 | |
| 0.0114471 | 0.0110513 | 0.0106819 | 0.0103396 | 0.0100223 | |
| 0.00972848 | 0.00945631 | 0.00920252 | 0.00896521 | 0.00874285 | |
| 0.00853357 | 0.0083366 | 0.0081501 | 0.00797338 | 0.00780594 | |
| 0.00764704 | 0.00749547 | 0.00735154 | 0.00721437 | 0.00708296 | |
| 0.00695758 | 0.00683741 | | | | |
| 0.0152119 | 0.0154012 | 0.0155337 | 0.0156211 | 0.0156771 | 0.0157072 |
| 0.0157022 | 0.0156046 | 0.015307 | 0.0148487 | 0.0143169 | 0.013788 |
| 0.0132826 | 0.0128012 | 0.0123421 | 0.0119077 | 0.0114997 | |
| 0.0111182 | 0.010759 | 0.0104191 | 0.0100979 | 0.00979626 | |
| 0.00951487 | 0.00925361 | 0.0090093 | 0.00878119 | 0.00856746 | |
| 0.00836691 | 0.00817715 | 0.0079982 | 0.00782913 | 0.00766821 | |
| 0.00751472 | 0.00736935 | 0.00723045 | 0.00709777 | 0.00697102 | |
| 0.00684963 | 0.00673329 | | | | |
| 0.0144067 | 0.0145725 | 0.0146932 | 0.014775 | 0.014828 | 0.0148581 |
| 0.0148568 | 0.0147675 | 0.0144917 | 0.0140692 | 0.0135845 | |
| 0.0131089 | 0.0126604 | 0.0122389 | 0.0118403 | 0.0114599 | |
| 0.0110964 | 0.0107515 | 0.0104267 | 0.0101201 | 0.00982807 | |
| 0.00954989 | 0.00928521 | 0.00903628 | 0.00880305 | 0.00858459 | |
| 0.00837946 | 0.00818672 | 0.00800526 | 0.00783376 | 0.00767137 | |
| 0.00751728 | 0.00737068 | 0.00723107 | 0.00709774 | 0.00697023 | |
| 0.00684823 | 0.00673139 | 0.00661929 | | | |
| 0.0136418 | 0.0137859 | 0.0138952 | 0.013971 | 0.0140208 | 0.0140491 |
| 0.0140462 | 0.0139554 | 0.0136922 | 0.0132994 | 0.0128538 | |
| 0.0124199 | 0.0120144 | 0.0116374 | 0.0112854 | 0.0109541 | |
| 0.0106383 | 0.0103358 | 0.0100464 | 0.00977089 | 0.00950967 | |
| 0.00926156 | 0.00902278 | 0.00879427 | 0.00857544 | 0.00836807 | |
| 0.00817346 | 0.00798953 | 0.00781664 | 0.00765294 | 0.00749779 | |
| 0.00735107 | 0.00721127 | 0.00707849 | 0.00695157 | 0.00683018 | |
| 0.00671386 | 0.00660226 | 0.006495 | | | |
| 0.0128579 | 0.0129808 | 0.0130786 | 0.0131479 | 0.0131942 | 0.0132202 |
| 0.0132149 | 0.0131255 | 0.0128812 | 0.0125226 | 0.0121188 | |
| 0.0117269 | 0.0113604 | 0.0110216 | 0.0107078 | 0.0104147 | |
| 0.0101389 | 0.00987772 | 0.00962723 | 0.00938549 | 0.00915278 | |
| 0.00893028 | 0.00871809 | 0.00851465 | 0.00831867 | 0.00812933 | |
| 0.00794749 | 0.00777432 | 0.00761006 | 0.00745475 | 0.00730752 | |
| 0.0071681 | 0.00703526 | 0.00690877 | 0.00678808 | 0.00667288 | |
| 0.00656261 | 0.00645674 | 0.00635476 | | | |
| 0.0120247 | 0.0121266 | 0.0122111 | 0.0122738 | 0.012316 | 0.0123392 |
| 0.0123333 | 0.0122526 | 0.0120355 | 0.0117144 | 0.0113534 | |
| 0.0110028 | 0.0106759 | 0.0103731 | 0.010093 | 0.00983348 | |
| 0.00959179 | 0.00936517 | 0.00915068 | 0.00894544 | 0.00874669 | |
| 0.00855333 | 0.00836633 | 0.00818661 | 0.00801427 | 0.00784809 | |
| 0.00768702 | 0.00753051 | 0.00737896 | 0.00723362 | 0.00709521 | |
| 0.00696358 | 0.00683816 | 0.00671863 | 0.00660457 | 0.00649559 | |
| 0.00639135 | 0.00629143 | 0.00619552 | | | |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.0111703 | 0.0112529 | 0.0113256 | 0.0113797 | 0.0114178 | 0.0114395 |
| 0.0114365 | 0.0113679 | 0.0111782 | 0.0108953 | 0.0105786 | |
| 0.0102709 | 0.00998296 | 0.00971521 | 0.00946712 | 0.00923741 | |
| 0.00902391 | 0.00882426 | 0.00863665 | 0.00845986 | 0.00829165 | |
| 0.00813003 | 0.00797317 | 0.00781976 | 0.00766988 | 0.00752436 | |
| 0.00738384 | 0.00724796 | 0.00711578 | 0.00698674 | 0.00686074 | |
| 0.00673866 | 0.00662148 | 0.0065095 | 0.00640252 | 0.00630022 | |
| 0.00620228 | 0.00610839 | 0.0060183 | | | |
| 0.0103548 | 0.0104211 | 0.0104818 | 0.0105291 | 0.0105631 | 0.0105834 |
| 0.0105811 | 0.0105166 | 0.0103446 | 0.0100929 | 0.00981528 | |
| 0.00954657 | 0.00929501 | 0.00906097 | 0.00884346 | 0.00864168 | |
| 0.00845419 | 0.00827906 | 0.00811505 | 0.00796081 | 0.00781526 | |
| 0.00767692 | 0.00754434 | 0.0074162 | 0.00729116 | 0.00716865 | |
| 0.00704847 | 0.00693137 | 0.0068173 | 0.00670647 | 0.00659831 | |
| 0.00649215 | 0.00638795 | 0.0062859 | 0.00618703 | 0.00609194 | |
| 0.00600067 | 0.0059131 | 0.00582893 | | | |
| 0.00956345 | 0.00961586 | 0.00966533 | 0.00970561 | 0.00973491 | 0.00975199 |
| 0.00974671 | 0.00968159 | 0.00952339 | 0.00930161 | 0.00906139 | |
| 0.0088284 | 0.00860987 | 0.00840637 | 0.00821665 | 0.0080407 | |
| 0.00787673 | 0.00772346 | 0.00758011 | 0.00744554 | 0.00731934 | |
| 0.00720041 | 0.00708736 | 0.00697908 | 0.00687484 | 0.00677404 | |
| 0.00667586 | 0.00657946 | 0.00648421 | 0.00639025 | 0.00629792 | |
| 0.00620766 | 0.00611938 | 0.00603266 | 0.00594718 | 0.00586283 | |
| 0.00577997 | 0.00569933 | 0.00562137 | | | |
| 0.00873886 | 0.00877877 | 0.00881722 | 0.00885033 | 0.0088746 | 0.00888818 |
| 0.00888017 | 0.00881865 | 0.00868166 | 0.00849421 | 0.00829292 | |
| 0.0080985 | 0.00791314 | 0.00774105 | 0.00758142 | 0.00743048 | |
| 0.00728917 | 0.00715898 | 0.0070372 | 0.0069218 | 0.00681189 | |
| 0.00671096 | 0.00661116 | 0.00651891 | 0.00643101 | 0.0063483 | |
| 0.00626761 | 0.00618964 | 0.00611443 | 0.00603879 | 0.00596397 | |
| 0.00588868 | 0.00581447 | 0.00574364 | 0.00567088 | 0.00560153 | |
| 0.00553233 | 0.00546307 | 0.00539506 | | | |
| 0.00789088 | 0.00791992 | 0.00794849 | 0.00797408 | 0.00799339 | 0.00800332 |
| 0.00799422 | 0.00794143 | 0.0078294 | 0.0076772 | 0.00751393 | |
| 0.0073553 | 0.00720498 | 0.00706381 | 0.0069314 | 0.00680753 | |
| 0.0066914 | 0.00658229 | 0.00647966 | 0.00638323 | 0.00629196 | |
| 0.00620534 | 0.00612326 | 0.00604543 | 0.00597147 | 0.00590092 | |
| 0.00583334 | 0.0057684 | 0.00570578 | 0.00564505 | 0.0055858 | |
| 0.00552762 | 0.00547002 | 0.00541263 | 0.00535527 | 0.00529807 | |
| 0.0052413 | 0.0051852 | 0.00512986 | | | |
| 0.00703207 | 0.00705207 | 0.0070724 | 0.00709075 | 0.00710525 | 0.00711247 |
| 0.00710468 | 0.00706118 | 0.00697062 | 0.00685073 | 0.00672464 | |
| 0.0066014 | 0.00648391 | 0.00637303 | 0.00626831 | 0.00616946 | |
| 0.00607685 | 0.00598968 | 0.00590716 | 0.00582879 | 0.00575467 | |
| 0.00568452 | 0.00561776 | 0.00555411 | 0.00549338 | 0.00543535 | |
| 0.00537975 | 0.0053263 | 0.00527477 | 0.00522513 | 0.00517732 | |
| 0.0051312 | 0.00508647 | 0.00504272 | 0.00499953 | 0.00495654 | |
| 0.00491353 | 0.00487034 | 0.00482696 | | | |
| 0.00619578 | 0.00620897 | 0.00622264 | 0.00623512 | 0.00624512 | 0.00624989 |
| 0.00624186 | 0.00620451 | 0.00613242 | 0.00604219 | 0.00594859 | |
| 0.00585703 | 0.00576965 | 0.0056861 | 0.00560737 | 0.00553261 | |
| 0.00546168 | 0.00539438 | 0.0053303 | 0.0052693 | 0.0052115 | |
| 0.00515647 | 0.00510373 | 0.00505317 | 0.00500468 | 0.00495833 | |
| 0.0049141 | 0.00487179 | 0.00483109 | 0.00479183 | 0.00475389 | |
| 0.00471712 | 0.00468138 | 0.00464667 | 0.00461289 | 0.00457992 | |
| 0.00454763 | 0.0045159 | 0.00448454 | | | |
| 0.00536213 | 0.00537019 | 0.00537861 | 0.00538639 | 0.00539211 | 0.00539366 |
| 0.00538423 | 0.00535333 | 0.00530136 | 0.0052402 | 0.00517741 | |
| 0.00511542 | 0.00505491 | 0.00499692 | 0.00494138 | 0.0048883 | |
| 0.00483772 | 0.00478944 | 0.0047434 | 0.00469958 | 0.00465749 | |

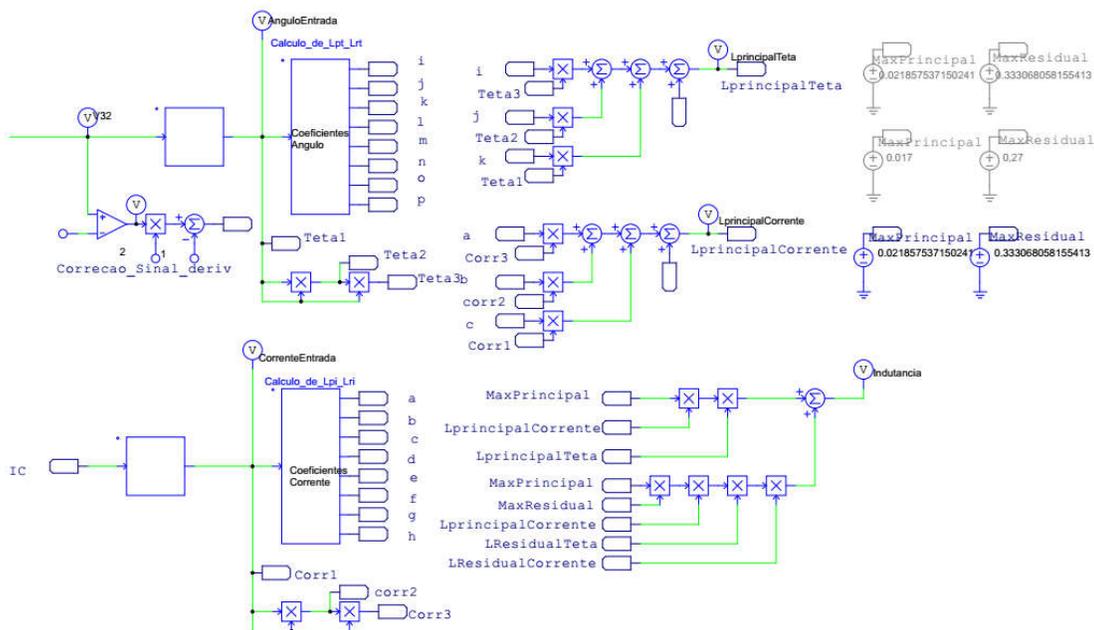
| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.00461695 | 0.00457804 | 0.00454073 | 0.00450498 | 0.00447063 | |
| 0.00443757 | 0.0044056 | 0.00437456 | 0.00434459 | 0.00431579 | |
| 0.00428789 | 0.00426089 | 0.00423473 | 0.00420929 | 0.00418451 | |
| 0.0041604 | 0.00413679 | 0.00411392 | | | |
| 0.0045204 | 0.00452478 | 0.00452931 | 0.00453323 | 0.0045353 | 0.00453358 |
| 0.00452383 | 0.00450235 | 0.00447201 | 0.00443791 | 0.00440272 | |
| 0.00436692 | 0.00433153 | 0.00429686 | 0.00426286 | 0.00422984 | |
| 0.00419837 | 0.00416787 | 0.00413823 | 0.00410964 | 0.00408229 | |
| 0.00405589 | 0.00403021 | 0.00400552 | 0.00398166 | 0.00395853 | |
| 0.0039362 | 0.00391457 | 0.00389346 | 0.00387294 | 0.00385296 | |
| 0.00383352 | 0.00381456 | 0.003796 | 0.00377771 | 0.00375984 | |
| 0.0037425 | 0.00372565 | 0.00370925 | | | |
| 0.00365163 | 0.00365348 | 0.00365525 | 0.00365716 | 0.00365763 | 0.00365335 |
| 0.0036478 | 0.00363965 | 0.00363095 | 0.00361921 | 0.00360511 | |
| 0.00359201 | 0.00357852 | 0.00356487 | 0.00355262 | 0.00353879 | |
| 0.00352416 | 0.0035112 | 0.00349757 | 0.00348409 | 0.0034708 | |
| 0.00345766 | 0.00344397 | 0.00343206 | 0.00341868 | 0.00340714 | |
| 0.00339437 | 0.00338257 | 0.0033709 | 0.00335857 | 0.00334872 | |
| 0.00333617 | 0.00332535 | 0.0033148 | 0.00330442 | 0.00329565 | |
| 0.00328406 | 0.00327401 | 0.00326418 | | | |
| 0.00292007 | 0.00292063 | 0.0029214 | 0.00292228 | 0.00292316 | 0.00292397 |
| 0.00292462 | 0.00292508 | 0.00292532 | 0.00292518 | 0.00292485 | |
| 0.00292414 | 0.00292311 | 0.00292162 | 0.00291992 | 0.00291782 | |
| 0.0029154 | 0.00291283 | 0.00290991 | 0.00290691 | 0.00290359 | |
| 0.00290016 | 0.00289658 | 0.0028929 | 0.00288912 | 0.00288528 | |
| 0.00288129 | 0.00287726 | 0.00287318 | 0.00286894 | 0.00286469 | |
| 0.00286044 | 0.00285621 | 0.00285194 | 0.00284765 | 0.00284316 | |
| 0.00283875 | 0.00283439 | 0.00283005 | | | |
| 0.00254855 | 0.00254883 | 0.00254921 | 0.00254993 | 0.00255038 | 0.00255114 |
| 0.00255157 | 0.00255228 | 0.00255325 | 0.00255394 | 0.00255391 | |
| 0.00255496 | 0.00255522 | 0.00255559 | 0.002556 | 0.00255706 | |
| 0.00255677 | 0.00255687 | 0.00255687 | 0.00255678 | 0.00255657 | |
| 0.00255602 | 0.00255574 | 0.00255523 | 0.00255464 | 0.00255382 | |
| 0.00255316 | 0.0025524 | 0.00255143 | 0.00255012 | 0.00254925 | |
| 0.00254792 | 0.00254652 | 0.00254544 | 0.00254404 | 0.00254259 | |
| 0.00254109 | 0.00253941 | 0.00253793 | | | |
| 0.00235092 | 0.0023511 | 0.00235134 | 0.00235165 | 0.00235204 | 0.00235248 |
| 0.00235299 | 0.00235354 | 0.00235412 | 0.00235471 | 0.00235483 | |
| 0.00235542 | 0.00235599 | 0.00235654 | 0.00235706 | 0.00235755 | 0.002358 |
| 0.0023584 | 0.00235875 | 0.00235906 | 0.00235933 | 0.00235955 | |
| 0.00235973 | 0.00235987 | 0.00235996 | 0.00236001 | 0.00236001 | |
| 0.00235996 | 0.00235987 | 0.00235974 | 0.00235956 | 0.00235933 | |
| 0.00235907 | 0.00235876 | 0.00235841 | 0.00235802 | 0.00235759 | |
| 0.00235712 | 0.0023566 | | | | |
| 0.00222998 | 0.00223011 | 0.00223045 | 0.00223054 | 0.00223098 | 0.00223133 |
| 0.00223173 | 0.00223217 | 0.00223249 | 0.002233 | 0.00223303 | |
| 0.00223354 | 0.00223403 | 0.00223454 | 0.00223503 | 0.00223549 | |
| 0.00223593 | 0.00223635 | 0.00223674 | 0.0022371 | 0.00223743 | |
| 0.00223773 | 0.00223801 | 0.00223826 | 0.00223848 | 0.00223867 | |
| 0.00223884 | 0.00223898 | 0.0022391 | 0.00223919 | 0.00223925 | |
| 0.00223928 | 0.0022393 | 0.00223928 | 0.00223924 | 0.00223918 | |
| 0.00223908 | 0.00223896 | 0.00223882 | | | |
| 0.00215526 | 0.00215537 | 0.00215552 | 0.00215572 | 0.00215597 | 0.00215627 |
| 0.00215661 | 0.00215699 | 0.00215741 | 0.00215784 | 0.00215827 | |
| 0.00215872 | 0.00215918 | 0.00215964 | 0.00216008 | 0.00216051 | |
| 0.00216093 | 0.00216133 | 0.00216171 | 0.00216207 | 0.00216241 | |
| 0.00216272 | 0.00216302 | 0.00216329 | 0.00216354 | 0.00216377 | |
| 0.00216398 | 0.00216416 | 0.00216434 | 0.0021645 | 0.00216463 | |
| 0.00216474 | 0.00216484 | 0.00216493 | 0.00216499 | 0.00216503 | |
| 0.00216506 | 0.00216507 | 0.00216507 | | | |

0.00211422 0.00211432 0.00211445 0.00211463 0.00211486 0.00211513
0.00211545 0.00211579 0.00211618 0.00211658 0.00211709
0.00211753 0.00211796 0.00211839 0.00211881 0.00211922
0.00211963 0.00212002 0.00212038 0.00212074 0.00212107
0.00212138 0.00212167 0.00212195 0.0021222 0.00212244
0.00212266 0.00212287 0.00212307 0.00212324 0.0021234
0.00212355 0.00212368 0.00212379 0.0021239 0.00212398
0.00212405 0.00212411 0.00212416
0.00210105 0.00210142 0.00210128 0.00210174 0.00210195 0.00210248
0.00210223 0.00210284 0.00210323 0.00210361 0.00210377
0.00210447 0.00210462 0.00210504 0.00210546 0.00210586
0.00210628 0.00210666 0.00210701 0.00210737 0.00210795 0.002108
0.00210856 0.00210855 0.00210909 0.00210877 0.00210957
0.00210921 0.00210941 0.00211015 0.00211004 0.00211018
0.00211004 0.00211072 0.00211055 0.00211091 0.00211071
0.00211079 0.00211058

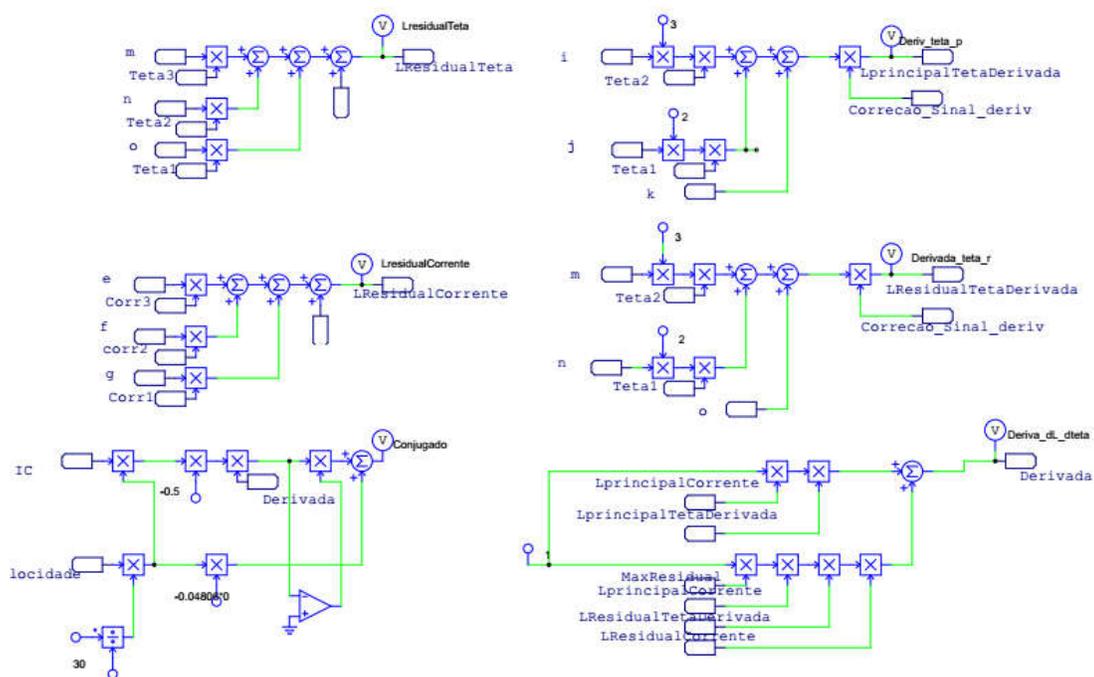
APENDICE B7 – LÓGICA DE DISPARO



APENDICE B8 – ESTIMADOR DE INDUTÂNCIA



APENDICE B9 – CÁLCULO DA INDUTÂNCIA E DAS DERIVADAS



APENDICE B10 – CÓDIGO FONTE DAS SUB-FUNÇÕES EM C

Código para o espelhamento da curva em 30 graus.

```

if(x1>30)
{ y1=60-x1;} //espelhamento
else
{y1=x1;}
if(x1<2) //primeira spline / ângulo negativo
{y1=2;}
if(x1>58)
{y1=2;}

```

Código para ajuste da curva de corrente

```

if(x1>30) // só existe uma spline para I>30;
{ y1=30;}
else
{y1=x1;}

if(x1<2) // primeira spline / corrente negativa (corrente mínima considerada)
{y1=2;}

```

Código para interpretar o coeficiente angular

```

if((x1<5) && (x1>=0))
{
y1=0.00044319;
y2=-0.0013296;
y3=-0.00063536;
y4=0.10175;
y5=0.00077323;
y6=-0.0023197;
y7=0.01724;
y8=0.56239;
}

if((x1<9) && (x1>=5))
{
y1=-0.00044824;
y2=0.012042;
}

if(x1<28 && x1>=20)
{
y1=-0.00017554;
y2=0.011418;
y3=-0.20528;
y4=1.6257;
y5=0.00052711;
}

y3=-0.067493;
y4=0.21318;
y5=-0.0016472;
y6=0.033987;
y7=-0.16429;
y8=0.86495;
}

if(x1<15 && x1>=9)
{
y1=-0.000014869;
y2=0.00034084;
y3=0.037817;
y4=-0.10275;
y5=0.00043105;
y6=-0.022126;
y6=-0.036751;
y7=0.76614;
y8=-4.1508;
}

if(x1<30 && x1>=28)
{
y1=-0.00066472;
y2=0.052509;
}

y7=0.34073;
y8=-0.65011;
}

if(x1<20 && x1>=15)
{
y1=0.000080936;
y2=-0.0039704;
y3=0.10249;
y4=-0.42609;
y5=-0.0001597;
y6=0.0044573;
y7=-0.058026;
y8=1.3436;
}

y3=-1.3558;
y4=12.364;
y5=0.0018481;
y6=-0.14771;
y7=3.8731;
y8=-33.149;
}

```

Código para interpretar o coeficiente para corrente

```
if((x1<5) && (x1>=0))
{
y1=-0.00024763;
y2=0.00074289;
y3=0.011866;
y4=0.95303;
y5=0.00010265;
y6=-0.00030795;
y7=-0.0058144;
y8=0.0060197;
}
```

```
if((x1<15) && (x1>=8))
{
y1=0.00047098;
y2=-0.017169;
y3=0.15849;
y4=0.55649;
y5=-0.00027698;
y6=0.01122;
y7=-0.11012;
y8=0.30431;
}
```

```
if((x1<30) && (x1>=20))
{
y1=0.0000028122;
y2=0.00014097;
y3=-0.026013;
y4=0.97801;
y5=-0.0000071674;
y6=0.00039944;
y7=0.025761;
y8=-0.19894;
}
```

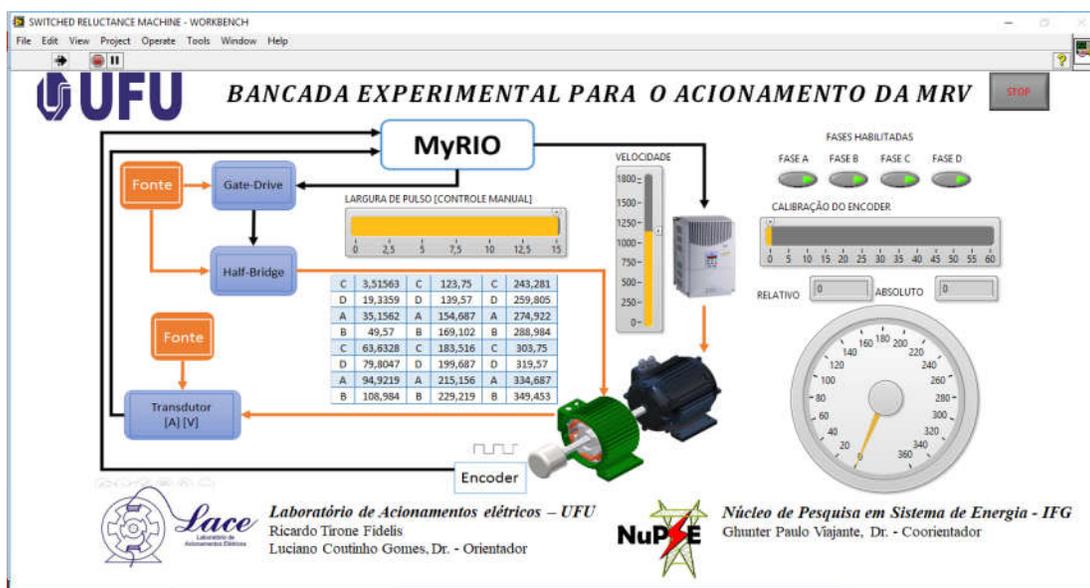
```
if((x1<8) && (x1>=5))
{
y1=-0.00032153;
y2=0.0018518;
y3=0.0063211;
y4=0.96227;
y5=0.00037116;
y6=-0.0043357;
y7=0.014324;
y8=-0.027545;
}
```

```
if((x1<20) && (x1>=15))
{
y1=-0.00024769;
y2=0.015171;
y3=-0.32661;
y4=2.982;
y5=0.000080914;
y6=-0.0048854;
y7=0.13146;
y8=-0.90359;
}
```

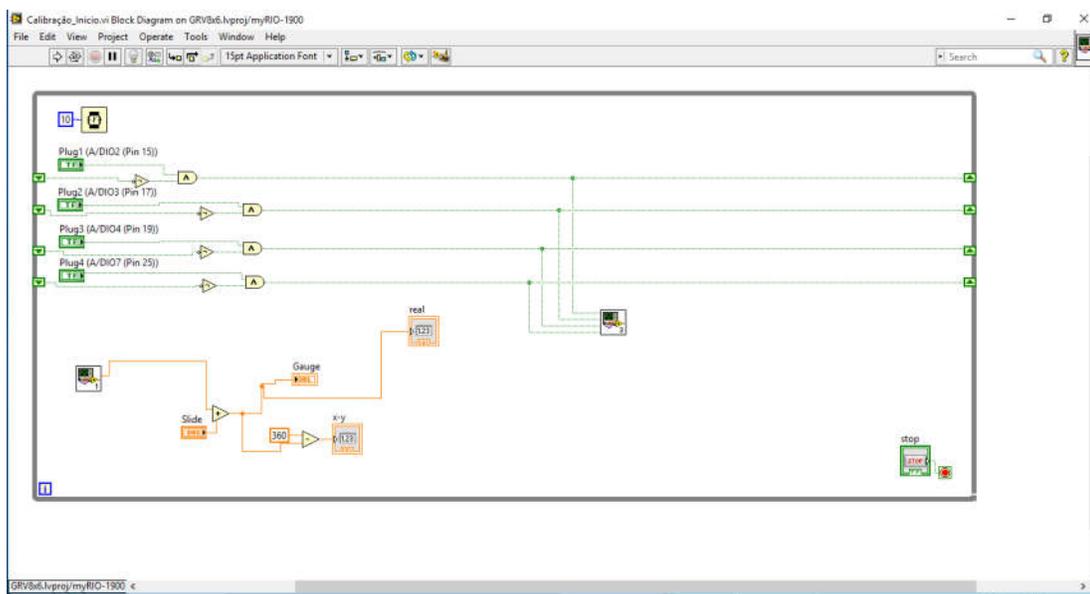
```
if((x1<1000) && (x1>=30))
{
y1=-0.000014595;
y2=0.0017076;
y3=-0.073013;
y4=1.448;
y5=0.0000090971;
y6=-0.0010644;
y7=0.069675;
y8=-0.63808;
}
```

APENDICE C – CÓDIGO FONTE DA APLICAÇÃO EMBARCADA

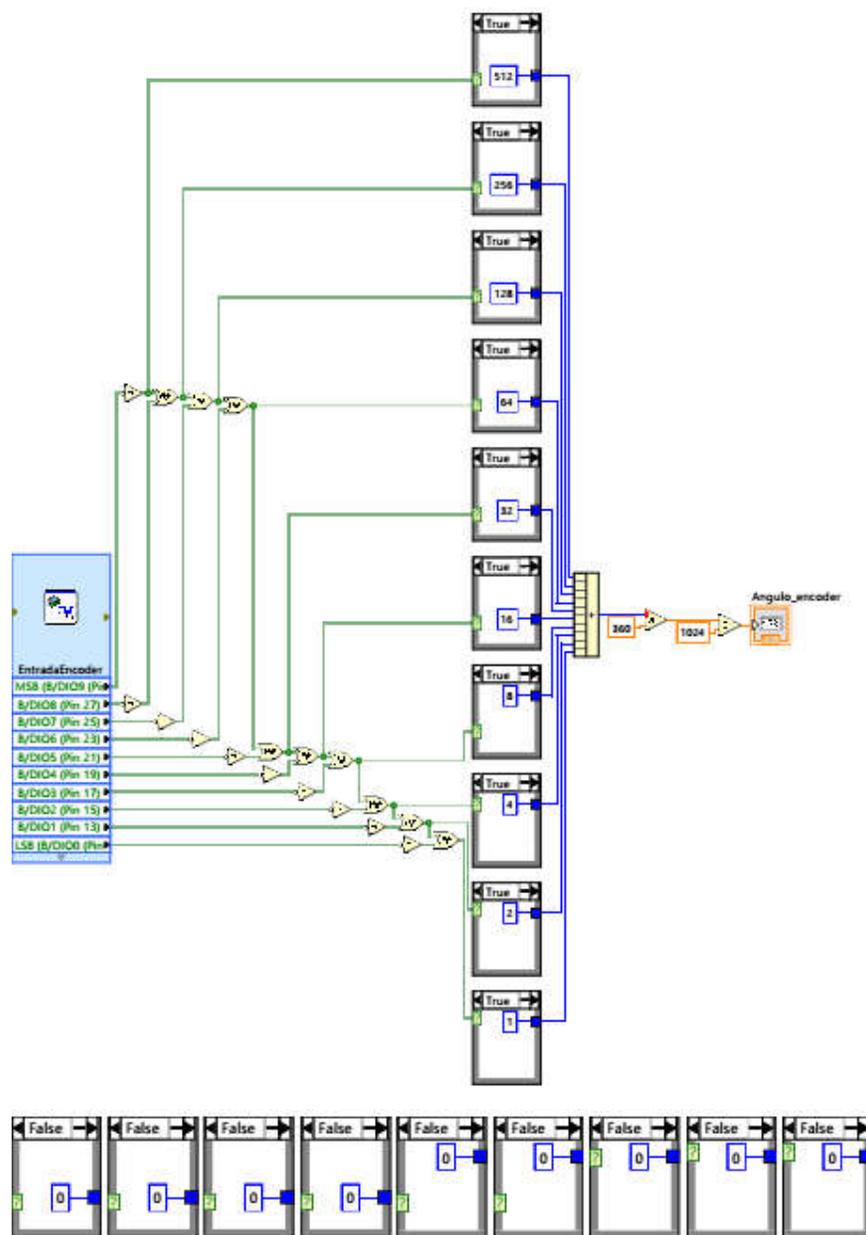
APENDICE C1 – TELA DE SUPERVISÃO E CONTROLE



APENDICE C2 – FUNÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DO ENCODER

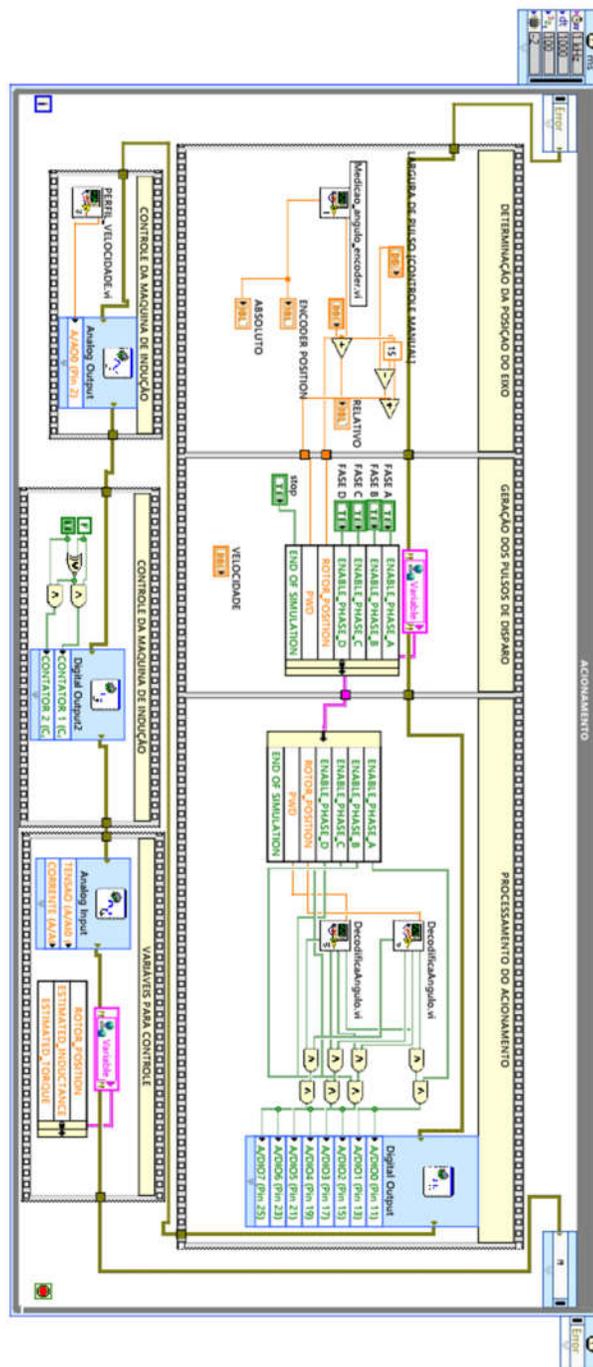


APENDICE C3 – LEITURA DO ENCODER E DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO ATUAL



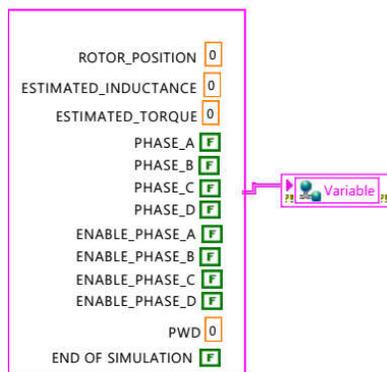
APENDICE C4 – VISÃO GERAL DA FUNÇÃO PRINCIPAL REAL TIME

Visão geral da função principal, os blocos estão apresentados individualmente no apêndice 5.

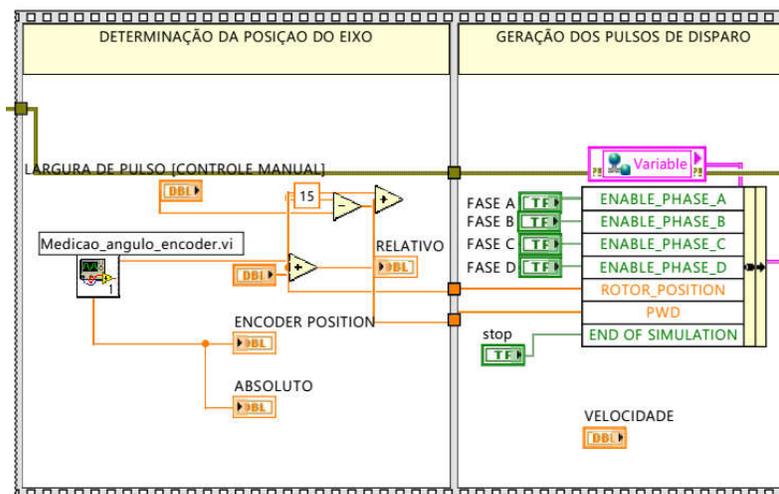


APENDICE C5 – BLOCOS DA FUNÇÃO PRINCIPAL

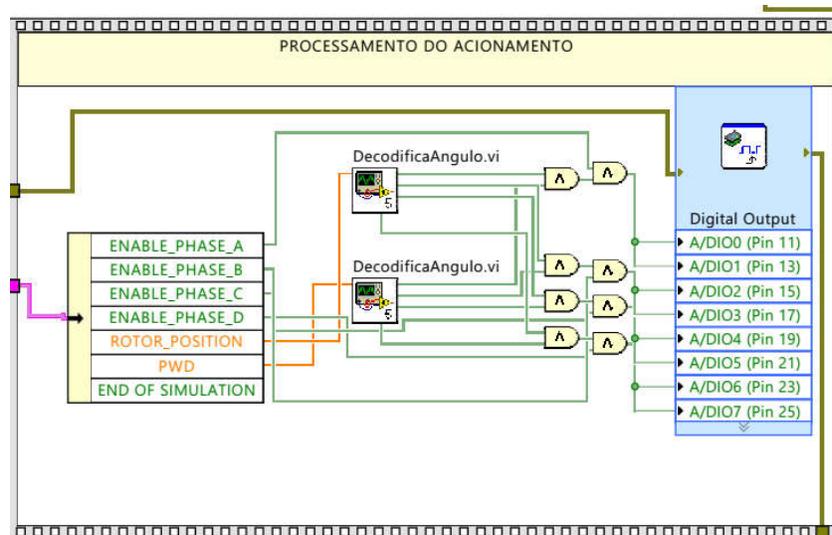
Criação do Cluster de dados da programação



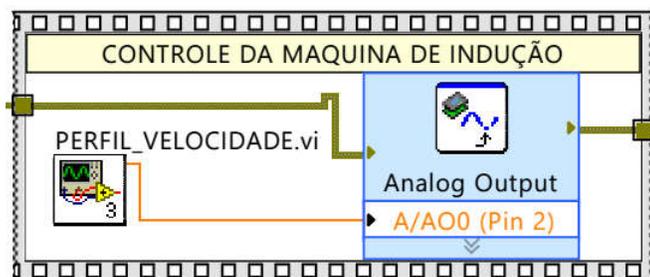
Determinação da posição rotórica do eixo da máquina a relutância, Habilitação das fases.



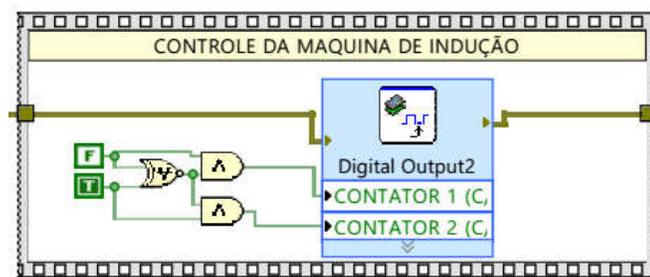
Processamento do acionamento e determinação de qual fase deve ser acionada, escrita na saída digital



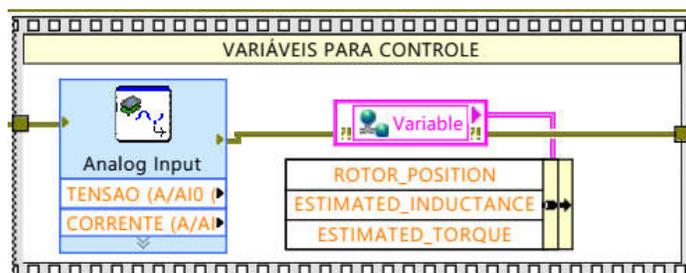
Controle da máquina de indução através de uma saída analógica (referência de velocidade).



Controle da máquina de indução (Liga/Desliga/Sentido de rotação)



Leitura das entradas analógicas (tensão e corrente), realimentação do buffer para disponibilizar os dados para implementação do controle.



REFERÊNCIAS

- [1] Bernadeli, V. R. *Controle de conjugado em motores a relutância variável*. Uberlândia - MG : Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [2] Ramu, K. *Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, simulation, Analysis, Design, and Applications*. New York : Boca Raton, 2001. ISBN 0-8493-0838-0.
- [3] Viajante, G. P. *Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede elétrica para Injeção de Potência Ativa*. Uberlândia - MG : Universidade Federal de Uberlândia, 2013. CDU: 621.3.
- [4] Miller, T. J. E. *Electronic control of switching reluctance machines*. s.l. : Newness Power Engineering Series, 2001. 272 pp.
- [5] Chang, Y. C. e M., Liaw C. **Establishment of a switched reluctance generator beased common DC micro-grid system**. *Journal IEEE*. 2005.
- [6] Sawata, T., et al. **Fault-tolerant operation of single phase SR generator**. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Agosto de 1999, Vol. Volume 35, pp. 774-781.
- [7] Radimov, N, Ben-Hail, N. e Rabinovici, R. **Simple model of switched-reluctance machine based only on aligned and unaligned position data**. *IEEE Transactions on Magnetics*. Issue 3, Maio de 2004, Vol. Volume 40, pp. 1562-1572.
- [8] Fleury, A. **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um Gerador a Relutância chaveado**. *Tese*. Universidade Federal de Uberlândia, 2008, p. 258.
- [9] Corda, M. e M.R. *Analytical estimation of the minimum and maximum inductances of a double-saliente motor*. Stephenson. 1979. [ed.] Leeds. 1979, pp. 50-59.
-

-
- [10] Takayoshi M., Jian L., Eugene P. H., Thomas A. L. *Self Excited Variable Reluctance Generator*. 1997. 5-9, Louisiana : IEE Industry Application Society, 1997, Vol. October.
- [11] Silva, D. P. A., et al. *Desenvolvimento De Uma Ferramenta Didática De Simulação Computacional Para Aplicação Em Máquinas Elétricas Especiais: Aplicação No Aproveitamento Da Energia Eólica*. 2014. Juiz de Fora : s.n., 2014.
- [12] Rajib M., Iqbal H., Mohammad I. R. *Finite Element Based Analytical Model for Controller Development of Switched Reluctance Machines*. North Carolina State university.
- [13] Coelho, A. A., Manoel L. *Simulação, Projeto e Teste de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6x4*. São Carlos : USP, 2001.
- [14] Blaabjerg, F., et al. 2006. *Power electronics in wind turbine system*. s.l. : IPMEC-IEEE, 2006.
- [15] Radum, A. 1994. *Generating with the switched reluctance motor*. s.l. : 9th Annual Applied Power Electronic Conference and Exposition - APEC, 1994. pp. 41-47. Vol. Volume 1.
- [16] Silveira, A. W. F. V., et al. 2009. *Control of the SRM operating as a motor/gerador*. s.l. : IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. ISIE.
- [17] Fonseca M. O., Filho C. S., Filho J. A. B. *Aplicando a norma IEC 61131 na Automação de Processos*. São Paulo : ISA - Sociedade de instrumentação, sistemas e automação/distrito 4, 2008. ISBN 978-85-61793-00-5.
- [18] National Instruments. www.ni.com. *National Instruments*. [Online] 21 de 12 de 2011. [Citado em: 2015.] www.ni.com.
- [19] Mecatrônica Atual. *Mecatrônica Atual*. [Online] 09 de 08 de 2013. [Citado em: 26 de 01 de 2015.] <http://www.mecatronicaatual.com.br/>.
-

-
- [20] Saidani, S., Ghariani M. **Switched Reluctance Machine For a Starter-Alternator Micro-Hybrid-Car**. *International Conference on Control, Engineering & Information Tecnology*. 2014, ISSN 2356-5608.
- [21] Susitra, D. e Jebaseli, E. **Switched Reluctance Generator - Modeling Simulation, analysis and Control. A comprehensive Review**. *Internationa Journal of Computer Application*. 2010, Vol. 1 N° 2.
- [22] *WEG Brasil*. [Online] [Citado em: 25 de 02 de 2015.] <http://www.weg.net/br>.
- [23] Mohamed Z., Muthana T. A. **Robust Controllers For Variable Reluctance Motors**. s.l. : Hindawi Publishing Corporation, 2005, Vols. 195-214. DOI:10.1155/MPE.2005.195. <https://doi.org/10.1155/MPE.2005.195>
- [24] Almeida, J. L. A. **Dispositivos Semicondutores Tiristores, controle de potência em C.C. e C.A.** São Paulo : Érica, 1996. ISBN: 85-7194-298-6.
- [25] Ribeiro, F. S. L., Cabral, L. G. e Fleury, A.. **A Switched Reluctance Generator Behavior under Variable Speed and Variable Excitation**. 2010.
- [26] Minh C. Ta, Christian Dufour. **Real-Time Simulation and Control of Reluctance Motor Drives for High Speed Operation with Reduced Torque Ripple**. s.l. : IEEE, 2011. 978-1-61286-971-3/11.
- [27] Moraes, M. F.; Gomes, L. C. **Desenvolvimento de plataforma de acionamento digital para motor a relutância variável 8/6**. Uberlândia - MG : Universidade Federal de Uberlândia, 2013. CDU: 621.3.
- [28] TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; L.C. Gomes ; D.A. Andrade ; CHAVES, E. N. ; M.A.A.Freitas . **Proposal of a Test Bench for Switched Reluctance Machine 8/6 for Wind Energy Application**. RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL (RE&PQJ), v. 1, p. 487-492, 2018.
- [29] TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P.; L.C. Gomes ; CHAVES, E. N. ; MENDONCA, F. ; OLIVEIRA, M. E. ; SILVA, S. B. ; MIRANDA, L. C. . **Voltage Behavior in the Switched**
-

Reluctance Generator Due to Different Speed Profiles Aimed at Use in Small Wind Turbines. RENEWABLE ENERGY & POWER QUALITY JOURNAL (RE&PQJ), v. 1, p. 438-442, 2017.

[30] TIRONE, R. ; VIAJANTE, G. P. ; SILVA, D. P. A. ; MENDONCA, F. ; D.A. Andrade ; SOUTO, O. ; L.C. Gomes ; SILVA, L. G. W. . **Development of an Experimental Platform to Drive the Switched Reluctance Machine.** Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ), v. 14, p. 10-16, 2016.

[31] TIRONE, R. T. ; L. C. GOMES; D.A. ANDRADE; G.P VIAJANTE; E. N. CHAVES, M. A. A. FREITAS; J. L DOMINGOS; **Study and Dynamic Performance Analysis of a Switched Reluctance Generator for Wind Energy Application.** In: IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2018, Palermo - Itália, 2018, Palermo. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2018., 2018.

[32] Racewell, R. - **The Fourier Transform And Its Applications**, 3rd. Edition, New York: McGraw-Hill, 2000, Cap. 3, pp. 24-54,ISBN 978-0-1381-4757-0

[33] Oppenheim, Willsky e Young - **Signals and Systems**, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1983, Cap. 3, pp. 69-159, ISBN 978-0-1380-9731-8

[34] Gilat, Amos. **Métodos Numéricos para engenheiros e cientistas**, Bookman, 2008, Cap. 3, pp. 199-254, ISBN 978-85-7780-297-5.
