

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIÁS**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL
PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL
6X4 OPERANDO COMO GERADOR**

RICARDO TIRONE FIDELIS

DEZEMBRO

2015

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL
PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL
6X4 OPERANDO COMO GERADOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. **Ghunter Paulo Viajante**, Dr. (IFG) – Orientador

Prof. **Marcelo Escobar de Oliveira**, Dr. (IFG)

Prof. **Marcos Antônio Arantes de Freitas**, Dr. (IFG)



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Itumbiara

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
COORDENAÇÃO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4 OPERANDO COMO GERADOR

AUTOR: Ricardo Tirone Fidelis

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Itumbiara, 14 de dezembro de 2015.


Prof. Dr. GHUNTER PAULO VIAJANTE
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara


Prof. Dr. MARCELO ESCOBAR DE OLIVEIRA
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara


Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO ARANTES DE FREITAS
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Ficha Catalográfica

F451d Fidelis, Ricardo Tirone
Desenvolvimento de uma plataforma experimental para o
acionamento da máquina a relutância variável 6x4 operando
como gerador / Ricardo Tirone Fidelis. -- Itumbiara, 2015.
103 f. : il. color. ; 30 cm.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em engenharia
elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, *campus* Itumbiara, 2015.
Orientador: prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante.

1. Dínamos. 2. Máquinas elétricas. 3. Motores elétricos.
4. Motores elétricos - Controle eletrônico. I. Título. II.
Viajante, Ghunter Paulo.

CDD 621.313

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 ao amigo, professor e orientador **Ghunter Paulo Viajante**, que acreditou nas minhas capacidades e no meu potencial de desenvolver este projeto, e com sua experiência e paciência me guiou nos caminhos do conhecimento.

Agraço a **todos os amigos** e companheiros que tive o privilégio de conhecer durante todas as etapas do curso, terei o maior prazer em tê-los como colegas de profissão, em especial ao colega de classe e irmão na amizade **Fabício Ferreira Mendonça** pelo apoio em todos os momentos de dificuldade durante minha formação acadêmica, no desenvolvimento deste trabalho e na vida pessoal. Agradeço também sua Noiva e companheira **Kelly Deyse Ferreira da Silva** pelo apoio e compreensão.

Agradeço ao amigo e colega de pesquisa **Deivison Paulo Alves Silva**, que me acompanhou e auxiliou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários do IFG, por seu empenho e dedicação, e por suas incontáveis contribuições no meu desenvolvimento pessoal e profissional, Em especial, agradeço aos professores **Marcos Antônio Arantes de Freitas**, **Eric Nery Chaves**, **Marcelo Escobar de Oliveira**, **Ghunter Paulo viajante**, **Priscila Branquinho Xavier** e **Tatiana Pires Fleury Bezerra** por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas também na manifestação do caráter e afetividade, tornando-se referências e modelos a serem seguidos.

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** e **Juliano Marcelino Ribeiro** que contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por ter disponibilizado a Máquina a Relutância Variável utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

*“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. O objetivo principal é a construção de uma plataforma experimental capaz de realizar o acionamento da Máquina a Relutância como gerador, disponibilizando todos os circuitos, componentes e elementos necessários ao acionamento da Máquina. Foi desenvolvido um algoritmo para o acionamento utilizando DSP e FPGA, ambos conectados a um sistema supervisor. Também é apresentado o resultado de alguns ensaios realizados na Máquina a Relutância Variável operando como gerador. Sendo um com velocidade de acionamento constante e tensão de excitação e ângulo θ_{off} variável, e outro com tensão de excitação constante com a velocidade de acionamento e ângulo θ_{off} variável.

Palavras-chave: Máquina a Relutância Variável, Gerador, DSP, FPGA, Bancada de Acionamento.

ABSTRACT

This work presents a contribution to the study of the Switched Reluctance Machine. The main objective is the construction of an experimental platform capable of performing the drive of the Switched Reluctance Machine as a generator, providing all circuits, components and elements necessary to drive the machine. It was developed an algorithm using DSP and FPGA, both connected to a supervisory system. It also presented the results of some tests performed on the Switched Reluctance Machine operating as a generator. One with constant drive speed and excitation voltage and angle θ_{off} variable, and the other with constant excitation voltage with speed and angle θ_{off} variable.

Keywords: Switched Reluctance Machine, Generator, DSP, FPGA, Workbench for Drive.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - ESTRUTURA DE UMA MRV 6x4.....	22
FIGURA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DE UMA SOLENOIDE.	23
FIGURA 2.3 - PERFIL DE INDUTÂNCIA INCREMENTAL PARA DIFERENTES VALORES DE CORRENTE E POSIÇÃO [3].....	26
FIGURA 2.4 - PERFIL DE INDUTÂNCIA E PULSO DE ACIONAMENTO DE UMA FASE DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	27
FIGURA 2.5 CONVERSOR HALF-BRIDGE UTILIZADO PARA CIONAR O GRV [3].....	27
FIGURA 2.6 - CIRCUITO DE MAGNETIZAÇÃO DAS FASES DO GRV [3].....	28
FIGURA 2.7 - CIRCUITO DE DESMAGNETIZAÇÃO DO GRV [3].	28
FIGURA 2.8 - ELEVAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS [13], [14].....	30
FIGURA 2.9 - POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA POR TURBINAS EÓLICAS [13], [14].	30
FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO DO FPGA COM SISTEMAS BASEADOS EM PROCESSADORES.	36
FIGURA 3.2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM ENCODER ROTATIVO.	37
FIGURA 3.3 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS SINAIS A, B E Z DE UM ENCODER INCREMENTAL.....	38
FIGURA 3.4 - ZONA DE MÚLTIPLAS COMUTAÇÕES EM UM ENCODER ABSOLUTO.....	39
FIGURA 3.5 - DIFERENÇA CONSTRUTIVA DOS DISCOS ÓPTICOS UTILIZANDO CÓDIGO BINÁRIO E CÓDIGO GRAY (2 BITS).	40
FIGURA 3.6 - CONVERSOR DE POTÊNCIA ASSIMÉTRICO.	42
FIGURA 3.7 - CONVERSOR " <i>DEVICE CURRENT RATING</i> ".	43
FIGURA 3.8 - CONVERSOR "BIFILAR" (BC).....	44
FIGURA 3.9 - CONVERSOR " <i>SPLIT DC SUPPLY</i> ".	44
FIGURA 3.10 - CONVERSOR " <i>Q SWITCH AND 2Q DIODES</i> ".	45
FIGURA 3.11 - CONVERSOR " <i>C-DUMP</i> ".	46
FIGURA 3.12 - CONVERSOR " <i>MINIMUM SWITCH TOPOLOGY</i> ".	46
FIGURA 3.13 - CONVERSOR " <i>1,5Q SWITCHES AND DIODES</i> ".	47
FIGURA 4.1 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA BANCADA DE ACIONAMENTOS PARA A MRV.....	48
FIGURA 4.2 - FLUXO DE DADOS PARA OBTENÇÃO DO ÂNGULO RELATIVO DO EIXO DA MRV.	50
FIGURA 4.3 - CONVERSOR HALF-BRIDGE.	51
FIGURA 4.4 - ARRANJO NOS MÓDULOS IGBT.	52
FIGURA 4.5 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO CONVERSOR ASSÍNCRONO HB.....	53
FIGURA 4.6 – ARRANJO FÍSICO DO CONVERSOR ASSÍNCRONO HB.....	53

FIGURA 4.7 - FOTO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA COMPLETO.....	54
FIGURA 4.8 - COMPORTAMENTO DO ARRANJO DE IGBTs DURANTE O ACIONAMENTO.	55
FIGURA 4.9 - COMPORTAMENTO DO ARRANJO DE IGBTs, DURANTE A RODA LIVRE COMO MOTOR.	55
FIGURA 4.10 - COMPORTAMENTO DO ARRANJO DE IGBTs, DURANTE A RODA LIVRE COMO GERADOR.....	56
FIGURA 4.11 - CIRCUITO ISOLADOR DE SINAIS.	57
FIGURA 4.12 – GATE DRIVE COMPLETO.	57
FIGURA 4.13 - FONTE UTILIZADA PARA ALIMENTAR O GATE DRIVE.	58
FIGURA 4.14 - PROCESSADOR DE TEMPO REAL NI MYRIO 1900.	59
FIGURA 4.15 - PROCESSADOR DSP/FPGA JUNTAMENTE COM AS CONEXÕES.	60
FIGURA 4.16 - INTERFACE DE EXPANSÃO.....	60
FIGURA 4.17 - CONJUNTO DE CARGAS.....	61
FIGURA 4.18 - CIRCUITO ELETRÔNICO DA PLACA CONDICIONADORA DE SINAIS.....	62
FIGURA 4.19 - PLACA CONDICIONADORA DE SINAIS.	63
FIGURA 4.20 - INTERFACE DE CONEXÃO COM A MRV.	63
FIGURA 4.21 - FUNÇÃO PRINCIPAL DO PROGRAMA DE ACIONAMENTO E CONTROLE.	65
FIGURA 4.22 - CURVAS DE INDUTÂNCIA DAS TRÊS FASES DA MRV.....	66
FIGURA 4.23 - INSTANTES DE ACIONAMENTO PARA ACIONAMENTO COMO GERADOR.	66
FIGURA 4.24 - BANCADA CONSTRUÍDA FINALIZADA.....	68
FIGURA 4.25 - MRV, MIT E ENCODER.	68
FIGURA 4.26 - FORMA DE ONDA DA TENSÃO NA FASE A DA MRV DURANTE O ESTADO DE MOTORIZAÇÃO.	69
FIGURA 4.27 - FORMA DE ONDA DA CORRENTE (AUMENTADA 10 VEZES) DA FASE A DA MRV DURANTE O ESTADO DE MOTORIZAÇÃO.	69
FIGURA 4.28 - TENSÃO NA FASE DA MRV NO ACIONAMENTO COMO GERADOR.	70
FIGURA 4.29 - CORRENTE (AUMENTADA 10X) NA FASE DA MRV NO ACIONAMENTO COMO GERADOR.....	70
FIGURA 4.30 - TENSÃO GERADA NA CARGA.....	71
FIGURA 4.31 - TELA 01 ACIONAMENTOS.	72
FIGURA 4.32 - TELA 02 MEDIDAS.....	73
FIGURA 4.33 - TELA 03 CONTROLADOR PID.	73
FIGURA 5.1 - TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO E VARIAÇÃO DE θ_{OFF}	75

FIGURA 5.2 - TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA DIFERENTES VALORES DE θ_{OFF}	76
FIGURA 5.3 - TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DE θ_{OFF} PARA DIFERENTES VALORES DE TENSÃO DE EXCITAÇÃO.....	76
FIGURA 5.4 - POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO E VARIAÇÃO DE θ_{OFF}	77
FIGURA 5.5 - POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA DIFERENTES VALORES DE θ_{OFF}	77
FIGURA 5.6 - POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DE θ_{OFF} PARA DIFERENTES VALORES DE TENSÃO DE EXCITAÇÃO.....	78
FIGURA 5.7 - CORRENTE MÉDIA NA FONTE DE EXCITAÇÃO.	78
FIGURA 5.8 - POTÊNCIA MÉDIA NA FONTE DE EXCITAÇÃO.	79
FIGURA 5.9 - SUPERFÍCIE 3D DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE E DO ÂNGULO θ_{OFF}	80
FIGURA 5.10 - TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ACIONAMENTO DA MRV PARA DIFERENTES VALORES DE θ_{OFF}	80
FIGURA 5.11 - SUPERFÍCIE 3D DA POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE E DO ÂNGULO θ_{OFF}	81
FIGURA 5.12 - POTÊNCIA GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE ACIONAMENTO DA MRV PARA DIFERENTES VALORES DE θ_{OFF}	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - CÓDIGO GRAY. -----	40
TABELA 3.2 - RESOLUÇÕES PARA ENCODERS ABSOLUTOS.-----	41
TABELA 3.3 - ESPECIFICAÇÕES DE ENCODERS ABSOLUTOS QUANTO AO NÚMERO DE VOLTAS. -----	41
TABELA 3.4 - COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA [2].-----	47
TABELA 4.1 - ENTRADAS E SAÍDAS UTILIZADAS NO MYRIO. -----	61
TABELA 4.2 - RECURSOS DISPONÍVEIS NA INTERFACE FPGA DO NI MYRIO. -----	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
MRV	Máquina a Relutância Variável
GRV	Gerador a Relutância Variável
Fmm	Forma magnetomotriz
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PI	Proporcional, Integral
CPU	<i>Central Processament Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i> (Arranjo de portas programáveis em campo)
ASIC	<i>Applicationa specific Integrated Circuits</i> (Circuitos integrados para aplicações específicas)
CLB	<i>Configurable Logic Blocks</i> (Blocos lógicos configuráveis)
LUT	<i>LookUp tables</i>
RAM	<i>Random Access memory</i> (Memória de acesso aleatório)
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente alternada)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente contínua)
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
NC	<i>Numeric Control</i> (Controle Numérico)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
HB	<i>Half-Bridge</i>
DCR	<i>Device Current Ratting</i>
BC	<i>Bifilar Converter</i>

NI	<i>National Instruments</i>
RIO	<i>Recordable Input Output</i>
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do ponto de potência máxima_
RT	Real Time
θ_{on}	Ângulo inicial de magnetização
θ_{off}	Ângulo final de magnetização

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
INTRODUÇÃO	18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2 <i>Objetivos Específico</i>	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
CAPÍTULO 2	21
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	21
2.1 GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	26
2.2 APLICAÇÕES DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	28
2.2.1 <i>Aplicações em Geração Eólica</i>	29
2.2.2 <i>Aplicações Aeronáutica e Espacial</i>	31
2.2.3 <i>Aplicações Automotivas</i>	32
CAPÍTULO 3	33
TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	33
3.1 PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL	33
3.1.1 <i>Tecnologia FPGA</i>	35
3.2 ENCODER	36
3.2.1 <i>Encoders Incrementais</i>	37
3.2.2 <i>Encoders Absolutos</i>	38
3.3 CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA	42
3.3.1 <i>Conversor Assimétrico ou Half-Bridge</i>	42
3.3.2 <i>Conversor “Device Current Rating” (DCR)</i>	43
3.3.3 <i>Conversor “Bifilar” (BC)</i>	43
3.3.4 <i>Conversor “Split DC Supply”</i>	44
3.3.5 <i>Conversor “q Switch and 2q Diodes”</i>	45
3.3.6 <i>Conversor C-Dump</i>	45
3.3.7 <i>Conversor “Minimum Switch Topology”</i>	46
3.3.8 <i>Conversor “1,5q Switches and Diodes”</i>	46
CAPÍTULO 4	48
BANCADA DE ACIONAMENTO	48
4.1 DISPOSITIVOS ELETROMECAÂNICOS DE ACIONAMENTO	49

4.2 DISPOSITIVOS ELETROELETRÔNICOS DE ACIONAMENTO	50
4.2.1 <i>Conversor de Potência</i>	50
4.2.2 <i>Circuito Isolador de Sinal - Gate Drive</i>	56
4.2.3 <i>Dispositivo de processamento DSP/FPGA</i>	58
4.2.4 <i>Conjunto de Cargas</i>	61
4.2.5 <i>Transdutor de sinais</i>	62
4.2.6 <i>Interface de conexão com a MRV</i>	63
4.3 ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO	64
4.4 RESULTADOS	67
4.4.1 <i>Plataforma Experimental</i>	67
4.4.2 <i>Software de Supervisão e Controle</i>	71
CAPÍTULO 5	75
ENSAIOS	75
5.1 ENSAIO COM VELOCIDADE CONSTANTE, TENSÃO DE EXCITAÇÃO E θ_{OFF} VARIÁVEL	75
5.2 ENSAIO COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO CONSTANTE, VELOCIDADE E θ_{OFF} VARIÁVEL	79
CAPÍTULO 6	83
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	83
APENDICE A – CÓDIGO FONTE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO <i>REAL TIME</i>	85
APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO FPGA	93
APENDICE C – INTERLIGAÇÃO ENTRE OS CIRCUITOS	98
APENDICE D – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO ENSAIO DE VELOCIDADE CONSTANTE ..	99
APENDICE E – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO ENSAIO DE VELOCIDADE VARIÁVEL ...	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 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.

Este trabalho busca o estudo do funcionamento da MRV, suas diversas áreas de aplicação, especialmente na geração eólica. Busca também o desenvolvimento de um protótipo de uma plataforma experimental para o acionamento de uma Máquina a Relutância 6x4, disponibilizando de forma didática e fácil utilização, todos os dispositivos, circuitos e recursos necessários ao acionamento e controle da Máquina a Relutância.

1.2 OBJETIVOS

Este projeto envolve assuntos multidisciplinares em diversas áreas dentro da engenharia elétrica, como: máquinas elétricas, eletrônica digital, analógica e de potência, sistemas micro controlados, sistemas de controle, programação de computadores, dentre outros.

Assim, espera-se que o protótipo desenvolvido resulte em uma ferramenta para o ensino das disciplinas ligadas à área de máquinas e acionamentos elétricos, servindo também, como base para o desenvolvimento de futuros trabalhos na área, permitindo que novos trabalhos sejam desenvolvidos.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar o funcionamento Máquinas a Relutância Variável, seus métodos de acionamento e controle. Objetiva ainda a construção de uma bancada para o acionamento de Máquinas a Relutância Variável acionada como gerador.

1.2.2 Objetivos Específico

- Estudo da Máquina a Relutância Variável operando como gerador.
 - Estudo das formas de acionamento e estratégias de controle de máquinas de indutância.
 - Desenvolver uma bancada para acionamento da máquina, construindo, instalando e conectando todos os circuitos necessário ao seu acionamento e controle.
 - Desenvolver um algoritmo para o acionamento da máquina como gerador.
 - Acionar a Máquina a Relutância como gerador, operando em malha aberta e interpretando a influência das principais variáveis presente em seu acionamento.
 - Estudar o comportamento da Máquina a Relutância frente a oscilação e variação de alguns parâmetros, como ângulos de magnetização, velocidade e tensão de excitação.
 - Contribuir cientificamente, publicando o trabalho em conferencias e periódicos.
 - Propor novas pesquisas a partir do trabalho proposto.
-

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

O **capítulo 2** Apresenta a Máquina a Relutância, 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 o acionamento da MRV como gerador e apresentadas algumas aplicações.

O **capítulo 3** Apresenta um referencial teórico, descrevendo algumas tecnologias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Também são apresentados os conversores eletrônicos de potência mais comuns utilizados no acionamento da Máquina a Relutância.

O **capítulo 4** 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 5** Apresenta os resultados obtidos em dois ensaios realizados utilizando a plataforma experimental desenvolvida, sendo um ensaio com velocidade de acionamento constante e outro com velocidade de acionamento variável. Todos resultados são apresentados e discutidos

O **capítulo 6** apresenta considerações sobre a bancada desenvolvida 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 desde os anos 1980 tem estimulado universidades e indústrias a trabalharem em pesquisas e desenvolvimento principalmente no Reino Unido, Estados Unidos, e em alguns outros países [2]. Esse interesse deve-se principalmente ao 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.

De forma geral, Máquinas a Relutância Variável são propostas para aplicações envolvendo velocidades variáveis desde 1969, tendo sua origem em meados de 1942 [2]. Sua “reinvenção” só foi possível com o desenvolvimento de sistemas de acionamentos capaz de satisfazer seus requisitos de operação, que exigem a rápida comutação de corrente entre as fases da máquina, além da necessidade de conhecimento da posição instantânea do eixo da mesma [3].

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, ou também conhecida como configuração polifásica. Dentre as configurações polifásicas a topologia 6×4 é a mais usual no meio científico e apresentada neste trabalho. A figura 2.1 apresenta a estrutura de uma máquina trifásica com seis polos no estator e quatro polos no rotor.

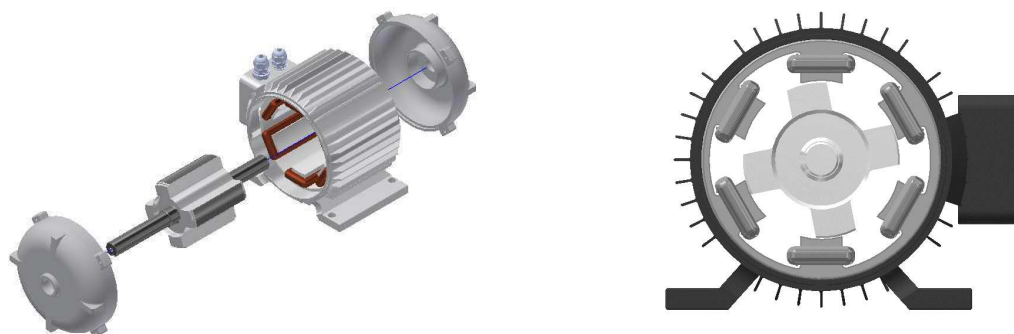


Figura 2.1 - Estrutura de uma MRV 6x4.

A MRV consiste em uma estrutura em dupla saliência e apresenta bobinas somente nos polos [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].

A produção de conjugado nas Máquinas a Relutância Variável pode ser explicada 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.

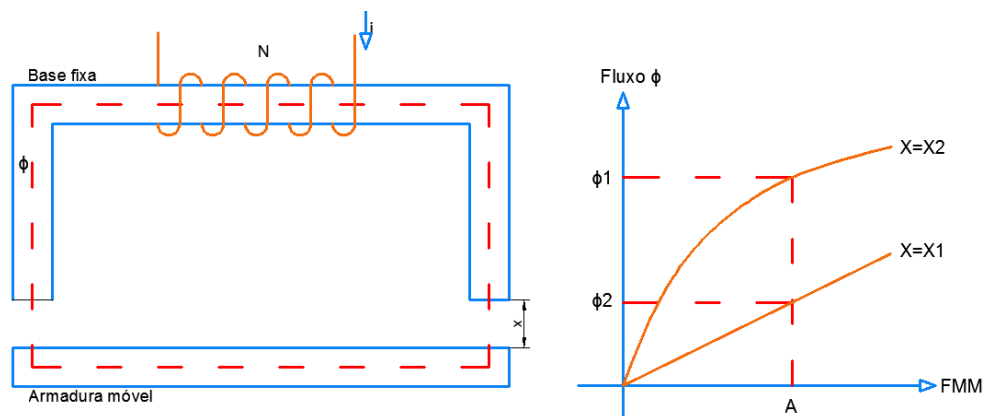


Figura 2.2 - Características de uma Solenoide.

A figura 2.2 ainda apresenta um gráfico do fluxo x força magnetomotriz (fmm) para duas situações diferentes, considerando os limites do gap, x_1 e x_2 , onde $x_1 > x_2$. Para a posição x_1 existe uma relação linear devido a relutância do gap de ar ser dominante sobre as demais relutâncias presentes no circuito magnético.

A energia elétrica do circuito pode ser escrita como apresentado na equação 2.1.

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int Ni d\Phi = \int F d\Phi \quad (2.1)$$

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 2.2.

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.2)$$

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 $W'F$, que pode ser deduzida como complemento da energia de campo [2], chegando ao incremento de força mecânica ilustrado pela equação 2.3 e 2.4.

$$\delta W_m = \delta W'_f \quad (2.3)$$

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.

$$W'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int N\Phi di = \int \lambda(\theta, i)i di = \int L(\theta, i)i di \quad (2.4)$$

Dessa forma a indutância, e as linhas de fluxo são funções dependentes da posição do rotor e da corrente. Assim as variações na coenergia ocorrerá entre dois valores distintos da posição angular, θ_2 e θ_1 . Por questões de simplificação considerando a indutância variando linearmente com a posição do rotor para uma dada corrente [2], o conjugado pode ser escrito conforme equação 2.5 e 2.6.

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (2.5)$$

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (2.6)$$

Sendo assim, o diferencial da indutância pode ser considerado como 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 torque 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.

- O torque constante será dado pelo declive da indutância em função da posição do rotor. 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 decréscimo da indutância.
- 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.
- 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 unida 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 onde se faz necessária o acionamento em 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 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.

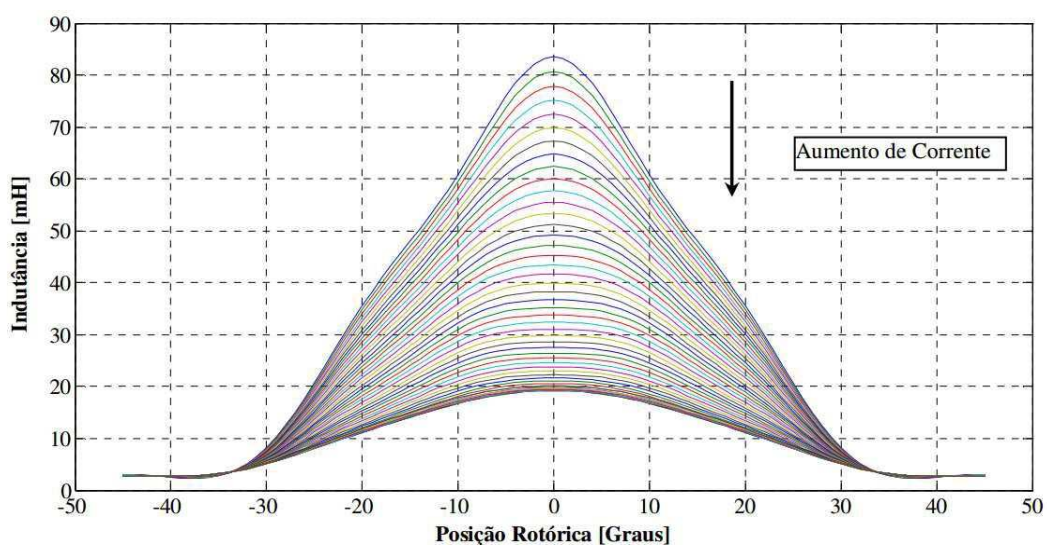


Figura 2.3 - Perfil de indutância incremental para diferentes valores de corrente e posição [3].

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 que a fase deixará de ser magnetizada.

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.

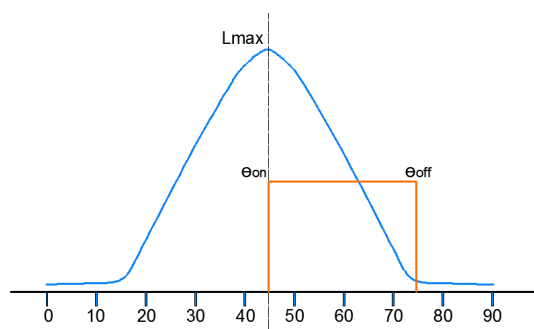


Figura 2.4 - Perfil de indutância e pulso de acionamento de uma fase do Gerador a Relutância Variável.

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.

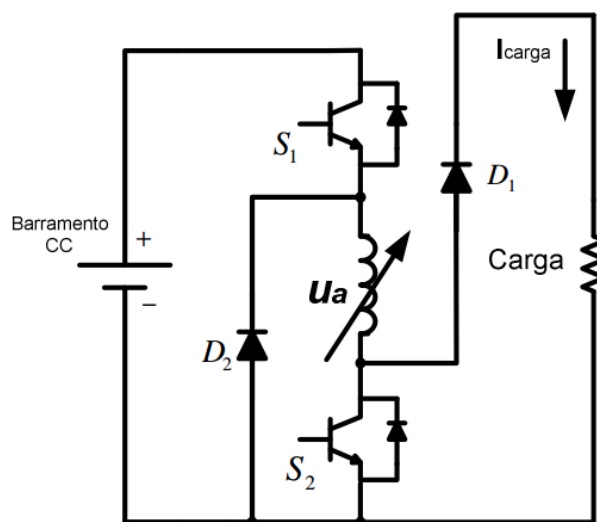


Figura 2.5 Conversor half-bridge utilizado para cionar o GRV [3].

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

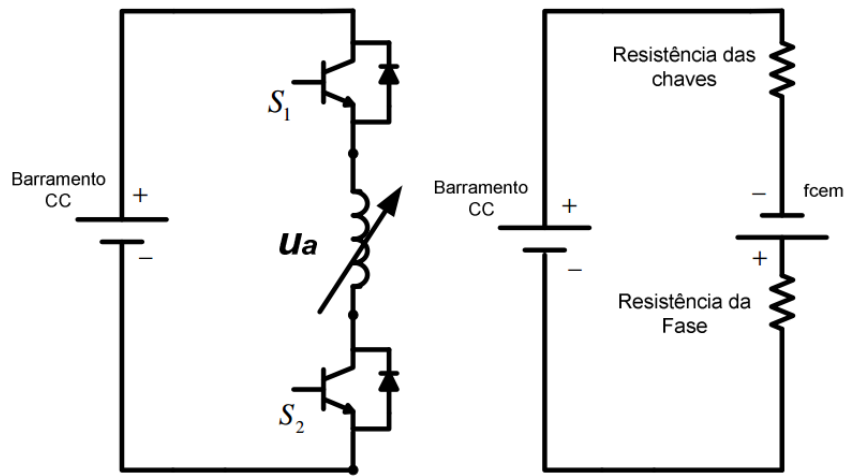


Figura 2.6 - Circuito de magnetização das fases do GRV [3].

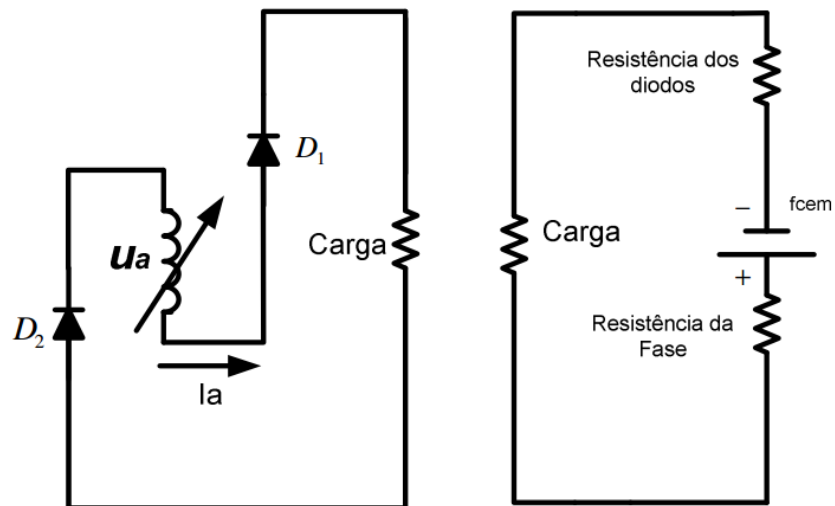


Figura 2.7 - Circuito de desmagnetização do GRV [3].

2.2 APLICAÇÕES DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Os estudos das MRV hoje se concentram principalmente em aplicações de velocidade variável e onde se faz necessária a utilização da eletrônica de potência, pois para estas aplicações o GRV se torna interessante [13]. As aplicações em velocidades variáveis exigem a utilização de conversores eletrônicos não só nas MRVs, outras máquinas elétricas como as de indução também

necessitam de componentes eletrônicos para o seu funcionamento, tornando assim a MRV competitiva.

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 num futuro próximo, 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. As figuras 2.8 e 2.9 apresentam o desenvolvimento das turbinas Eólicas de 1980 a 2003 apresentado por [13] e [14]. Estas figuras apresentam também, que no ano de 2003 já era possível utilizar aero gerador com capacidade de 5MW de potência.

De acordo com as figuras 2.8 e 2.9, pode ser observado que o aumento da potência elétrica gerada pelas turbinas eólicas acompanha o desenvolvimento da eletrônica de potência, o desenvolvimento das técnicas de controle empregadas e ainda a elevação da turbinas a maiores altitudes.

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.

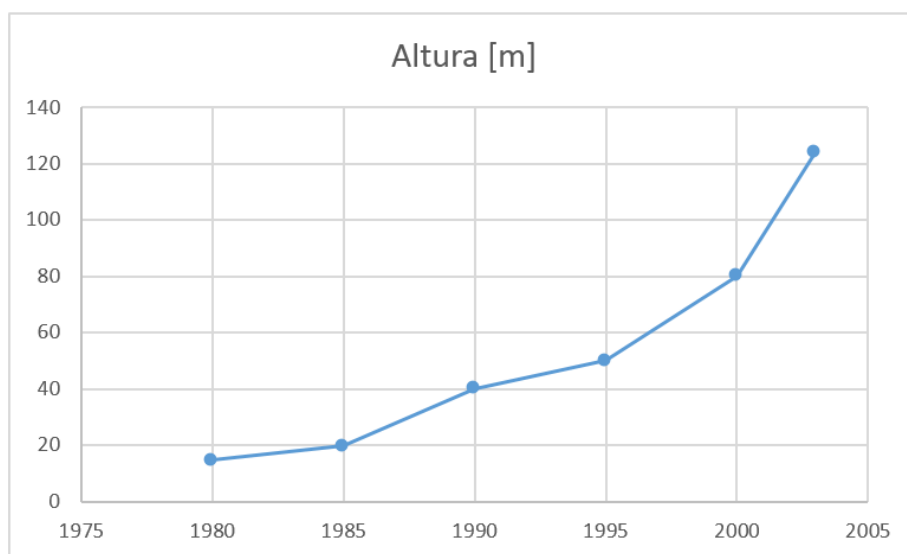


Figura 2.8 - Elevação das turbinas eólicas [13], [14].

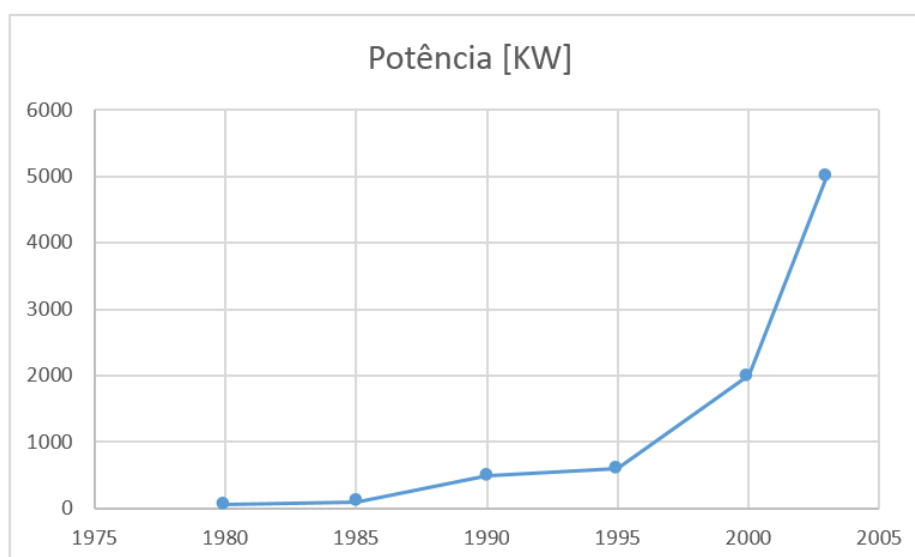


Figura 2.9 - Potência elétrica gerada por turbinas eólicas [13], [14].

O Gerador a Relutância se tornou uma máquina promissora para aplicação eólica, pois o fato de ser uma máquina com um bom desempenho em velocidades variáveis, confiável, robusta, além de outras qualidades, e estabelece se cada vez mais competitiva para este tipo de aplicação, pois as máquinas geradoras de indução utilizadas atualmente necessitam de um conversor eletrônico de potência e um sistema de câmbio para regular a velocidade, enquanto as Máquinas a Relutância não necessitam de nenhum sistema de câmbio para ajuste da velocidade.

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, nome este que é a tradução livre do inglês *starter/generator* feita por [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, porém é importante um conhecimento de como realizar a excitação neste tipo de máquina, para conhecer suas limitações de operação [15].

A MRV desempenha tanto o papel de Motor a Relutância quanto o papel de Gerador a Relutância. Nesta aplicação como motor pode substituir sistemas hidráulicos, sendo esta substituição um dos principais objetivos estabelecidos pela MEA, além da diminuição de peso e volume.

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. Dessa forma a rotação das turbinas ocorrida com a queima de combustível é aproveitada, possibilitando assim que os aviões se tornem cada vez mais elétricos, pois desta forma é possível pensar no armazenamento desta energia gerada em baterias, para utilização do sistema elétrico dos aviões.

2.2.3 Aplicações Automotivas

A aplicação automobilística da MRV se parece com a aplicação aeronáutica, pois aqui a MRV também trabalha como “motogerador”, sendo a intenção fazer com que os carros possam se tornar mais elétricos.

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.

CAPÍTULO 3

TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Este capítulo apresenta algumas tecnologias específicas que foram utilizadas no desenvolvimento da bancada experimental construída. Sendo o acionamento realizado através de um processador digital de sinais “DSP” de tempo real que trabalha integrado a uma interface FPGA (*field-programmable gate arrays*), possibilitando a execução paralela de rotinas de acionamento e controle. A detecção da posição do eixo para determinação dos momentos de excitação da MRV foi feita utilizando um encoder absoluto. Por fim são apresentados alguns conversores eletrônicos de potência utilizados para o acionamento da MRV.

3.1 PROCESSAMENTO EM TEMPO REAL

Um sistema é classificado de tempo real quando a execução de toda e qualquer tarefa ocorre dentro de uma faixa de tempo estipulada a priori. Isto é importante para que o sistema possa realizar tarefas periódicas ou reagir a estímulos do meio, sempre dentro de um intervalo de tempo previsível. Esse tempo deve ser estabelecido em função da escala de tempo dos processos e ambientes com os quais o sistema deve interagir.

Esse intervalo depende das constantes de tempo do processo a ser controlado. Uma vez ocorrido um evento, o sistema tem que reagir e calcular uma saída apropriada para atuar no processo. Se o tempo limite for ultrapassado, a ação pode perder sua efetividade.

Um sistema ainda poderá receber a denominação de “*hard real time*” se não for permitido que um limite de tempo especificado (*deadline*) seja ultrapassado em nenhuma situação. Caso esse *deadline* não seja respeitado, a atuação do sistema seria de prejudicial ou de grave consequências para a segurança das pessoas envolvidas no processo, aos equipamentos e para o meio ambiente. Existem ainda sistemas que não possuem restrições tão severas. Se o sistema falhar em responder

dentro do tempo estipulado, o seu desempenho cairá, mas os serão considerados toleráveis, como sistemas de transmissão de vídeo e som por exemplo. Estes são chamados de "*soft real time*".

Para o controle da tensão gerada na MRV será considerado um sistema do tipo "*hard real time*" para fins de aprendizado e estudo das técnicas de acionamento, embora dependendo do sistema a ser alimentado pela MRV, poderia ser definido como *soft-real-time*. A norma internacional IEC61131 define algumas restrições e características a serem atendidas para que um sistema seja considerado real-time [17]:

- Ser multitarefa e *multithreading* e também ter suporte para multiprocessamento nas arquiteturas mais avançadas que farão uso de diversos processadores.
- Possuir um escalonador preemptivo, baseado num mecanismo de prioridades.
- Possuir um grande número de prioridades (>128), a fim de que threads diferentes não tenham que executar em uma mesma prioridade.
- Possuir objetos para implementar a exclusão mútua.
- Possuir primitivas de sincronismo entre as thread como eventos, temporizadores e filas.
- Possuir diretivas para a comunicação síncrona e assíncrona entre threads e entre processos.
- Possuir filas organizadas por prioridade nos objetos de sincronização, em vez de FIFO's.
- Possuir temporizadores precisos na casa de 0,1 ms assíncronos com o relógio do processador.
- Possuir mecanismos para impedir que haja inversão de prioridades.
- Possuir baixo tempo de latência de interrupção, que é o tempo que o processador leva para escalonar uma rotina de serviço de interrupção.
- Possuir mecanismos de interrupção aninhadas que em uma rotina de serviço de interrupção consiga "*preemptar*" outras rotinas de menor prioridade.

Em sistemas de controle convencional, todo o código a ser executado pela aplicação está em um grande laço de repetição. Neste caso, o tempo de execução do loop é denominado tempo de *scan*. O tempo de *scan* é variável, cada loop consome um tempo de execução diferente, uma vez que as instruções dependem de variáveis de decisão em instruções de desvio (*if..them*) e de repetição.

Num controle moderno, cada tarefa pode ser executada de forma periódica e, neste caso, estipula-se o tempo de ciclo da tarefa ou de resposta a algum evento. Ao contrário do caso anterior, deve-se gerenciar se haverá disponibilidade de CPU para executar todas as tarefas a serem cumpridas.

Se a tarefa ocorre como resposta ao disparo de um evento ou gatilho (tarefa assíncrona), ela irá acontecer no meio de um ciclo normal de atividades periódicas e será escalonada de acordo com sua prioridade. Neste caso, o tempo de execução da atividade e a frequência de ocorrência do evento que dispara a tarefa são os fatores mais importantes a serem considerados.

3.1.1 Tecnologia FPGA

Arranjos de portas programáveis em campo (FPGA) são chips de silício reprogramáveis. Ross Freeman, o cofundador da empresa Xilinx inventou o primeiro FPGA em 1985. A adoção do chip FPGA pela indústria é conduzida pelo fato de que o FPGA combina os melhores recursos dos Circuitos Integrados Construídos para Tarefas Específicas (ASICs - *application-specific integrated circuits*) e sistemas baseados em processadores. Os FPGAs fornecem velocidade temporizada por hardware e alta confiabilidade, não necessitando de compra em altos volumes para justificar a grande despesa de um projeto de ASIC customizado [18].

As pastilhas de silício reprogramáveis possuem a mesma flexibilidade de software de um sistema baseado em processadores, mas não é limitado pelo número de núcleos do processador. Diferentemente dos processadores, os FPGAs são verdadeiramente paralelos por natureza, então diferentes operações de processamento não têm que competir pelos mesmos recursos. Cada tarefa de processamento é enviada para uma seção dedicada do *chip* e pode funcionar de modo autônomo sem nenhuma influência de outros blocos lógicos. Como resultado, o desempenho de uma parte da aplicação não é afetada quando você adiciona mais tarefas. A figura 3.1 apresenta um dos benefícios dos FPGAs em comparação a sistemas baseados em processadores, onde a lógica da aplicação é implementada em circuitos físicos em vez de executados em um sistema operacional, drives ou softwares aplicativos.

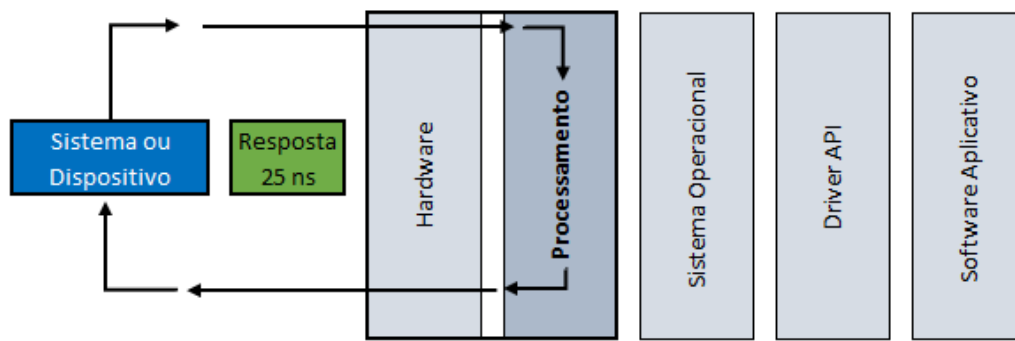


Figura 3.1 - Comparação do FPGA com sistemas baseados em processadores.

Todo *chip* FPGA é constituído de um número finito de recursos de hardware predefinidos, com interconexões programáveis por softwares e implementadas em hardware. Também possui blocos de E/S que permitem que o circuito acesse o mundo externo [18].

As especificações de um FPGA geralmente incluem o número de blocos lógicos configuráveis, número de blocos lógicos de funções fixas como multiplicadores e blocos de RAM (tamanho de memória). Entre todas as partes de um chip FPGA, estas geralmente são mais as importantes para uma aplicação.

Os blocos lógicos configuráveis (CLBs – *configurable logic blocks*) são a unidade lógica básica de uma FPGA. Algumas vezes referido como células lógicas, os CLBs são feitos de dois componentes básicos: *flip-flops* e *lookup tables* (LUTs). [18].

3.2 ENCODER

O encoder é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais elétricos. Esses pulsos gerados podem ser usados para determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção [19].

As principais aplicações dos encoders são:

- Em eixos de Máquinas Ferramentas NC e CNC;
- Em eixos de Robôs;
- Controle de velocidade e posicionamento de motores elétricos;
- Posicionamento de antenas parabólicas, telescópios e radares;
- Mesas rotativas; e

- Medição das grandezas acima mencionadas de forma direta ou indireta.

O sistema de leitura é baseado em um disco (encoder rotativo), formado por janelas radiais transparentes e opacas alternadas. Este é iluminado perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, quando então, as imagens das janelas transparentes são projetadas no receptor [19]. O receptor converte essas janelas de luz em pulsos elétricos. A figura 3.2 exibe um desenho esquemático do funcionamento de um encoder rotativo.

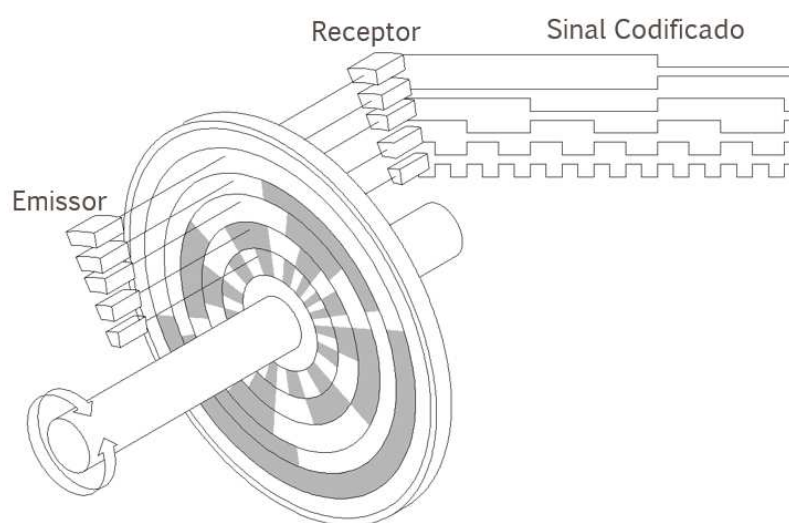


Figura 3.2 - Princípio de funcionamento de um encoder rotativo.

3.2.1 Encoders Incrementais

O encoder incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90° , que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de somente um canal fornece apenas a velocidade, enquanto que a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento.

Um outro sinal chamado de Z ou zero também está disponível e ele dá a posição absoluta "zero" do encoder. Este sinal é um pulso quadrado em que a fase e a largura são as mesmas do canal A. A figura 3.3 representa os sinais A, B e Z de um encoder

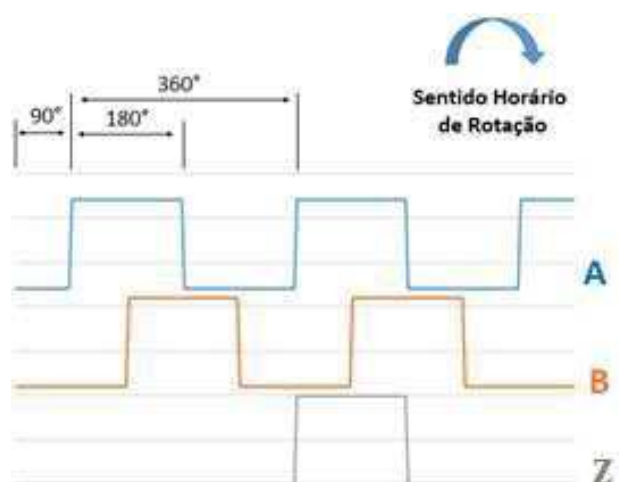


Figura 3.3 - Representação gráfica dos sinais A, B e Z de um encoder incremental.

A resolução do encoder incremental é dada por pulsos/revolução (normalmente chamado de PPR), isto é, o encoder gera uma certa quantidade de pulsos elétricos por uma revolução dele próprio (no caso de um encoder rotativo). Para determinar a resolução basta dividir o número de pulsos por 360°, por exemplo, um encoder fornecendo 1024 pulsos/ revolução, geraria um pulso elétrico a cada 0,35° mecânicos.

A precisão do encoder incremental depende de fatores mecânicos, elétricos e ambientais, que são: erros na escala das janelas do disco, excentricidade do disco, excentricidade das janelas, erro introduzido na leitura eletrônica dos sinais, temperatura de operação e nos próprios componentes transmissores e receptores de luz. Normalmente, nos encoders incrementais são disponibilizados além dos sinais *A*, *B* e *Z*, também os sinais complementares, */A*, */B* e */Z*.

3.2.2 Encoders Absolutos

O princípio de funcionamento de um encoder absoluto e de um encoder incremental é bastante similar, isto é, ambos utilizam o princípio das janelas transparentes e opacas, com estas interrompendo um feixe de luz e transformando pulsos luminosos em pulsos elétricos.

O encoder absoluto possui um importante diferencial em relação ao encoder incremental: a posição do encoder incremental é dada por pulsos a partir do pulso zero, enquanto a posição do encoder absoluto é determinada pela leitura de um código e este é único para cada posição do seu

curso; consequentemente os encoders absolutos não perdem a real posição no caso de uma eventual queda da tensão de alimentação (até mesmo se deslocados). Quando voltar a energia ao sistema, a posição é atualizada e disponibilizada para o mesmo (devido ao código gravado no disco do encoder) e, com isso, não se precisa ir até a posição zero do encoder para saber a sua localização como é o caso do incremental [19].

O código de saída é utilizado para definir a posição absoluta do encoder. O código mais empregado é o binário, pois este é facilmente manipulado por um circuito relativamente simples e, com isso, não se faz necessário nenhum tipo de conversão para se obter a posição real do encoder. O código é extraído diretamente do disco (que está em rotação). O sincronismo e a aquisição da posição no momento da variação entre dois códigos tornam-se muito difíceis. Se comparados os códigos consecutivos binários como 7 (0111_2) e 8 (1000_2), notaremos que a variação de zero para um e um para zero ocorre em todos os bits, e uma leitura feita no momento da transição pode resultar em um valor completamente errado como exibido na figura 3.4.

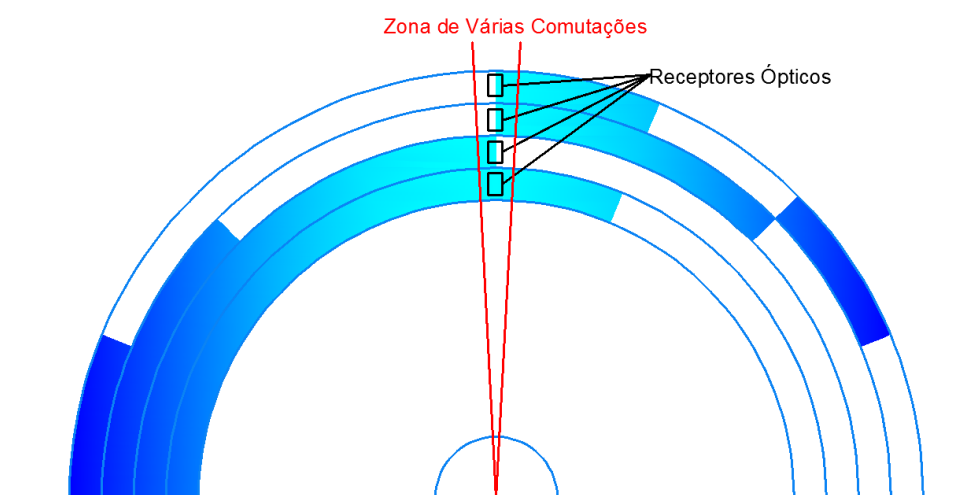


Figura 3.4 - Zona de múltiplas comutações em um encoder absoluto.

Para solucionar esse problema é utilizado um código binário chamado "Código Gray", que tem a particularidade de na comutação de um número para outro somente um bit ser alterado como apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Código GRAY.

Decimal	Binário	Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

A resolução do encoder absoluto é dada por contagem/revolução, isto é, se ele tiver no seu disco 12 faixas para o código Gray, então terá 212 combinações possíveis perfazendo um total de 4096 combinações. Podemos verificar outras resoluções para encoders absolutos na tabela 3.2.

Na figura 3.5 é possível visualizar dois discos óticos, um com código binário e outro em código Gray.

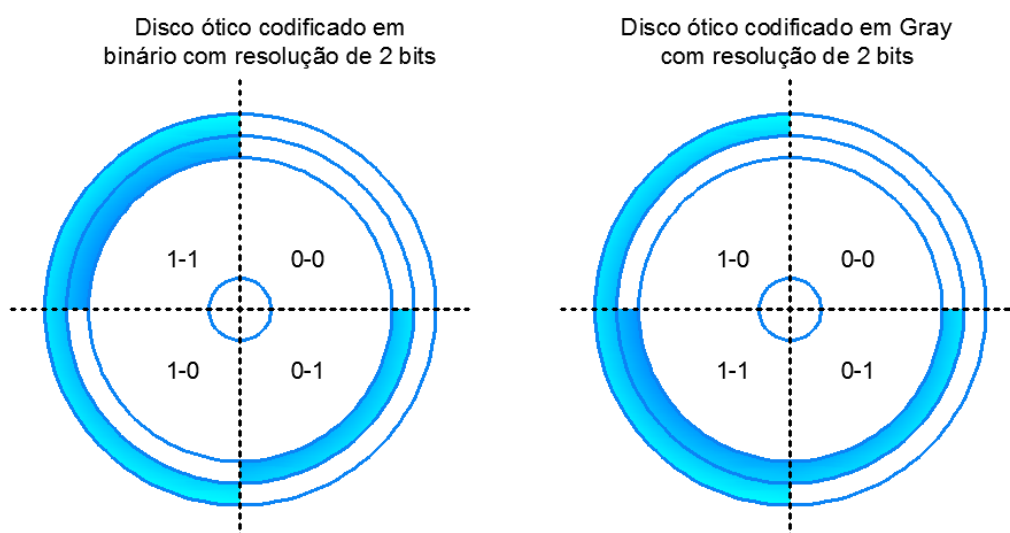


Figura 3.5 - Diferença construtiva dos discos óticos utilizando código binário e código Gray (2 bits).

Os encoders absolutos podem ter sua resolução definida em uma única revolução (*single turn*) ou em várias revoluções (*multi turn*), ou seja, se um encoder é para uma revolução, a cada revolução o valor da contagem é reinicializado, ao contrário de um encoder para várias revoluções onde seu valor só é reinicializado depois de um certo número de voltas. Seguem na tabela 3.3 algumas especificações de encoders absolutos.

Tabela 3.2 - Resoluções para encoders absolutos.

Nº Bits	2 ^N	Resolução	Unidade
1	2	180,00	Graus
2	4	90,00	Graus
3	8	45,00	Graus
4	16	22,50	Graus
5	32	11,25	Graus
6	64	5,63	Graus
7	128	2,81	Graus
8	256	1,41	Graus
9	512	42,19	Minutos
10	1024	21,09	Minutos
11	2048	10,55	Minutos
12	4096	5,27	Minutos

Tabela 3.3 - Especificações de encoders absolutos quanto ao número de voltas.

Tipo	Nº de Bits	Posições	Nº de Voltas
<i>Single Turn</i>	9	360	1
<i>Single Turn</i>	9	512	1
<i>Single Turn</i>	10	720	1
<i>Single Turn</i>	10	1024	1
<i>Single Turn</i>	12	3600	1
<i>Single Turn</i>	12	4096	1
<i>Muti turn</i>	16	4096	16
<i>Muti turn</i>	20	8192	20
<i>Muti turn</i>	24	16384	4096

3.3 CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA

Atualmente não há um modelo definido como padrão para ser utilizado como conversor eletrônico de potência no acionamento de uma MRV, existindo uma diversidade de circuitos conversores, cada um com suas particularidades e características. Nas seções a seguir são apresentados alguns conversores possíveis de serem usados no acionamento da MRV.

3.3.1 Conversor Assimétrico ou *Half-Bridge*

A figura 3.6 exibe o circuito conversor HB considerando uma única fase da MRV. As demais fases da MRV terão conexão similar, sendo necessárias duas chaves por fase e dois diodos de ação rápida para as etapas de roda livre. Durante a fase de excitação da MRV, as duas chaves T1 e T2 deverão ser acionadas simultaneamente, sendo desligadas durante a etapa de roda livre, quando a energia armazenada na fase da MRV será devolvida para a fonte (motor) ou transmitida a um carga (Gerador).

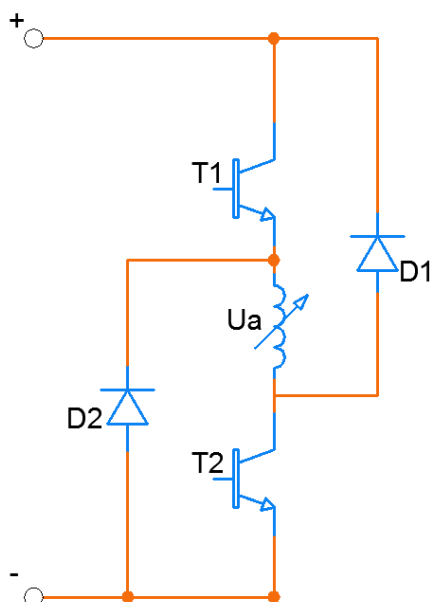


Figura 3.6 - Conversor de potência assimétrico.

3.3.2 Conversor “*Device Current Rating*” (DCR).

A figura 3.7 exibe o circuito do conversor DCR, que possui a característica de ter apenas uma chave e um diodo por fase da MRV, o que torna seu arranjo simples quando comparado aos demais tipos de conversores.

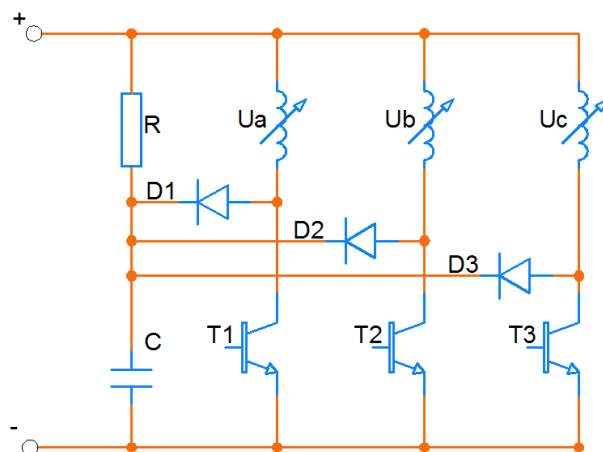


Figura 3.7 - Conversor “*Device Current Rating*”.

3.3.3 Conversor “*Bifilar*” (BC).

A figura 3.8 mostra a configuração do conversor BC com apenas um transistor e um diodo por fase, em que a etapa de roda livre é possível devido aos enrolamentos separados de cada fase, devendo ser ligados de forma que a polaridade esteja como mostrado na imagem. Quando a corrente da fase é interrompida pela abertura da chave T1, a força eletromotriz nos enrolamentos fará com que o diodo D1 esteja polarizado diretamente fazendo que a etapa de roda livre ocorra.

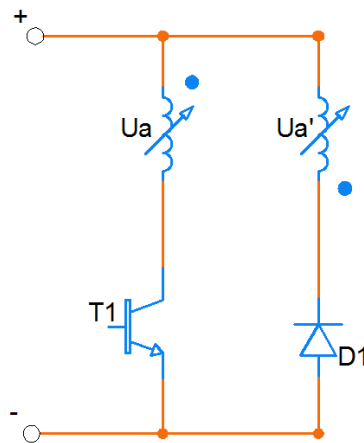


Figura 3.8 - Conversor "Bifilar" (BC).

3.3.4 Conversor "Split DC Supply"

Neste tipo de conversor quando a fase A é energizada pelo fechamento da chave T1, a corrente circulará pela chave T1, pela fase A e pelo capacitor C1. Quando a chave T1 é aberta a corrente continuará circulando pela fase A, pelo capacitor C2 e pelo diodo D2. Dessa forma C2 carregará enquanto a energia armazenada na fase A é rapidamente drenada. A figura 3.9 exhibe o conversor "Split-DC-Supply".

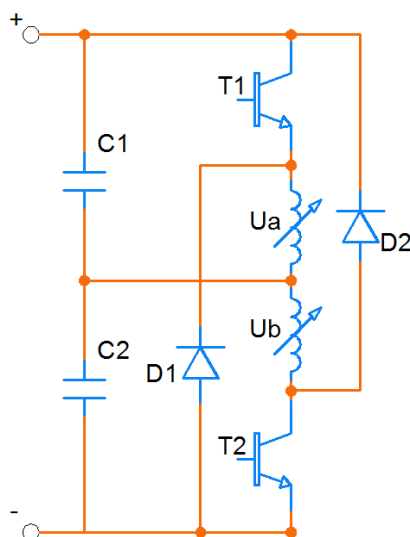


Figura 3.9 - Conversor "Split DC Suply".

3.3.5 Conversor “*q Switch and 2q Diodes*”

A figura 3.10 exibe o conversor que possui apenas uma chave por fase. Observe que *D1*, *D2*, *D3* e *D4* devem ser diodo de atuação rápida, enquanto os diodos *D5*, *D6*, *D7* e *D8* são de atuação lenta.

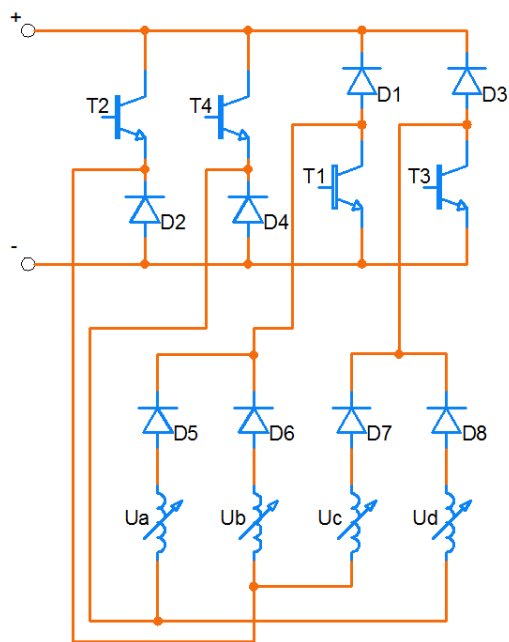


Figura 3.10 - Conversor "*q Switch and 2q Diodes*".

3.3.6 Conversor *C-Dump*

O circuito do conversor *C-Dump* é mostrado na figura 3.11, Neste tipo de conversor a energia magnética armazenada é parcialmente direcionada ao capacitor *Cd* e devolvida ao circuito através de *Tr*, *Lr* e *Dr*, sendo direcionada para a fonte no caso de motor, ou direcionada para a carga para aplicações como gerador.

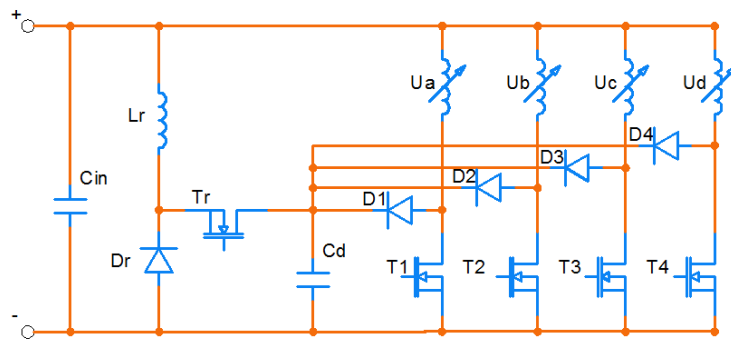


Figura 3.11 - Conversor "C-Dump".

3.3.7 Conversor "Minimum Switch Topology"

Essa topologia de conversor se caracteriza por minimizar o uso de dispositivos de chaveamento, sendo necessário $N+1$ chaves para o acionamento, sendo N o número de fases da MRV utilizada. A figura 3.12 apresenta esta topologia.

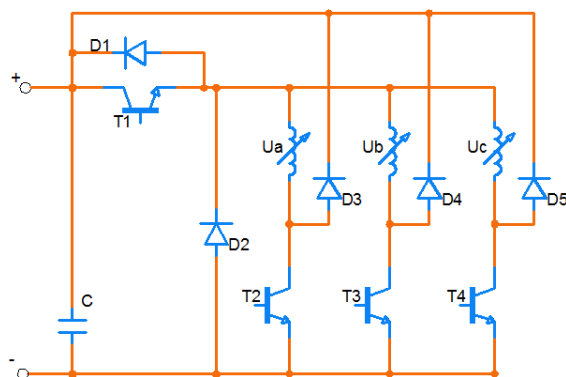


Figura 3.12 - Conversor "Minimum Switch Topology".

3.3.8 Conversor "1,5q Switches and Diodes"

A figura 3.13 mostra um outro tipo de variação para o controlado capaz de executar um controle independente da corrente de cada fase, necessitando 3 chaves para cada par de fases.

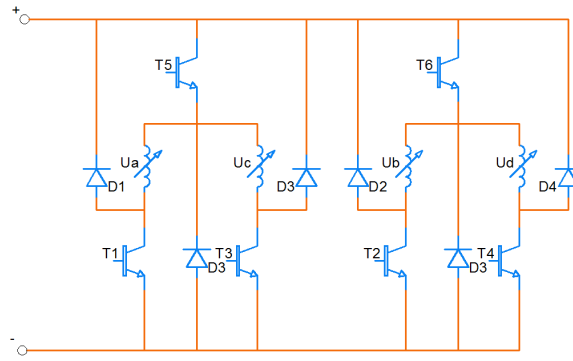


Figura 3.13 - Conversor "1,5q Switches and Diodes".

A tabela 3.4 compara os conversores citados acima ambos configurados para acionar uma MRV com 4 fases, identificando diversas características de cada um, como quantidade de chaves necessárias, quantidade de diodos, comportamento da corrente, tensão conjugado e potência nos diversos tipos de conversores.

Tabela 3.4 - Comparativo entre os conversores eletrônicos de potência [2].

	Número de Chaves	Número de Diodos	Corrente RMS	Tensão Máxima por Fase	Velocidade Máxima	Conjugado Máximo	Potência na Saída	Tensão no Dispositivo	Potência da Chave (VA)
Assíncrono (HB)	8	8	$\frac{I_p}{2}$	$\pm V_{CC}$	ω_M	T_m	P_O	V_{CC}	$4V_{CC}I_p$
Device Current Rating	4	4	$< \frac{I_p}{2}$	$V_{CC} - (I_p + \Delta_I)R$	ω_M	T_m	P_O	$V_{CC} - (I_p + \Delta_I)R$	$2V_{CC}I_p + 2I_p^2R$
Bifilar	4	4	$< \frac{I_p}{2}$	$> V_{CC}$	ω_M	T_m	P_O	$1,5V_{CC}$	$3V_{CC}I_p$
Split DC Supply	4	4	$\frac{I_p}{2}$	$\pm \frac{V_{CC}}{2}$	$\cong 0,5\omega_M$	T_m	$0,5P_O$	V_{CC}	$2V_{CC}I_p$
q Switch and 2q Diodes	4	8	$\frac{I_p}{\sqrt{2}}$	$\pm V_{CC}$	ω_M	T_m	P_O	V_{CC}	$2\sqrt{2}V_{CC}I_p$
C-Dump	4	5	$\frac{I_p}{2}$	$-(V_O - V_{CC})$	ω_M	T_m	P_O	V_O	$2,5EI_p$
Minimum Switch Topology with Variable DC Link	4	5	$\frac{I_p}{2}$	$\pm V_{CC}$	ω_M	T_m	P_O	V_{CC}	$\cong 2,7V_{CC}I_p^b$
1,5q Switches and Diodes Configuration	4	6	$\frac{I_p}{2}$	$\pm V_{CC}$	ω_M	T_m	P_O	V_{CC}	$\cong 3,414V_{CC}I_p^b$

CAPÍTULO 4

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 4.1 exibe um diagrama simplificado da bancada desenvolvida. Para efeito de estudo e classificação, os componentes foram distribuídos em dois grupos, sendo, dispositivos eletromecânicos de acionamento e dispositivos eletroeletrônicos de acionamento.

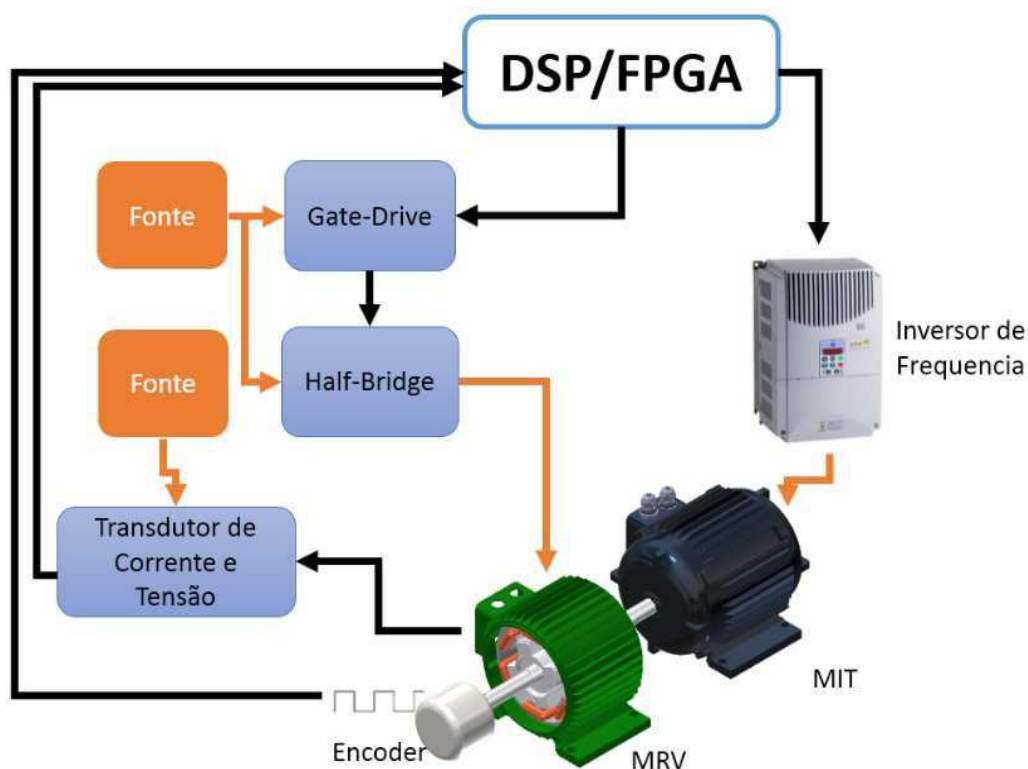


Figura 4.1 - Diagrama simplificado da bancada de acionamentos para a MRV.

4.1 DISPOSITIVOS ELETROMECAÂNICOS DE ACIONAMENTO

Os dispositivos eletromecânicos de acionamento utilizados foram uma Máquina a Relutância Variável, um motor de indução trifásico, um inversor de frequência e um encoder absoluto.

A Máquina a Relutância Variável utilizada foi do tipo 6x4 com potência nominal de 1,5CV, 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, possibilitando assim acionar a MRV também como moto-gerador, uma condição de operação desejável para aplicações automobilísticas [2], [20], e [21].

Para simular a máquina primária durante as operações como gerador foi utilizado um motor de indução trifásico 4 polos de 1,5 CV, acionado por um inversor de frequência e 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 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 8 *bits*, permitindo detectar 256 posições diferentes do eixo ao longo de uma volta, com uma resolução de aproximadamente 1,4 graus, valor suficientemente satisfatório para o estudo do controle e operação da MRV.

A figura 4.2 apresenta um diagrama de blocos mostrando o algoritmo utilizado para obter a posição angular do rotor da MRV, devendo realizar uma conversão do código *GRAY* em binário seguida da conversão do código binário em um valor decimal e finalmente um ajuste linear para ter uma resposta variando de 0 a 360, representando assim a posição absoluta do eixo do encoder.

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.

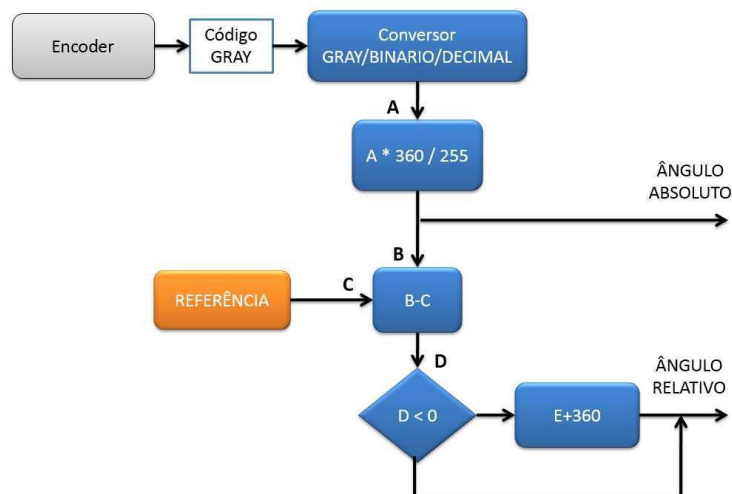


Figura 4.2 - Fluxo de dados para obtenção do ângulo relativo do eixo da MRV.

Todo o conjunto eletromecânico de acionamento foi montado sobre uma base construída com chapa #14 de aço-carbono 1045, para garantir o alinhamento e acoplamento perfeito entre as partes e reduzir as vibrações decorrentes do acionamento da MRV.

4.2 DISPOSITIVOS ELETROELETRÔNICOS DE ACIONAMENTO

4.2.1 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 4.3 apresenta o circuito deste conversor para acionamento de uma MRV 6x4 juntamente com os relés para selecionar o tipo de acionamento, gerador ou motor.

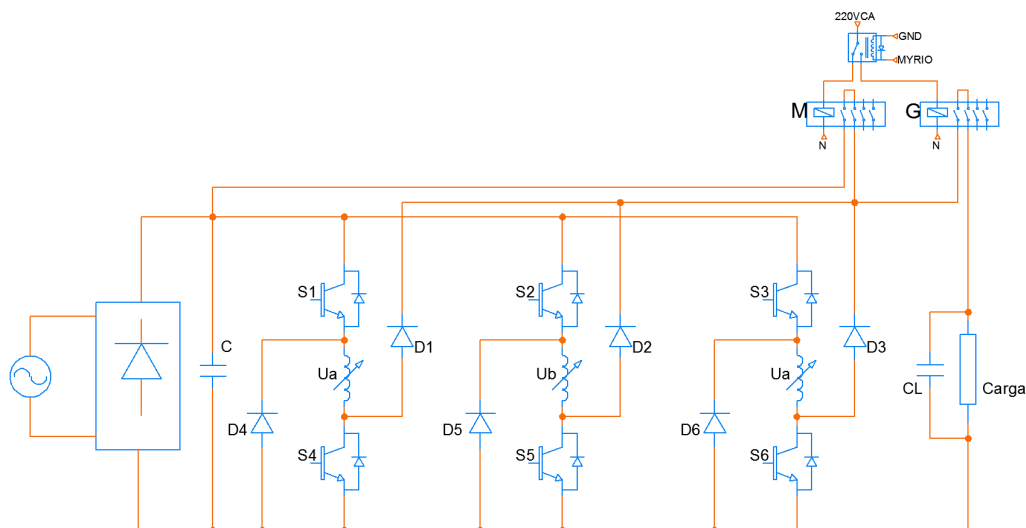


Figura 4.3 - Conversor Half-Bridge.

Para construção do conversor HB foram utilizados dois módulos IGBT BSM75GD 120DN2, sendo cada módulo composto por seis chaves do tipo IGBT conectadas a seis diodos de potência de ação rápida, suportando uma corrente de até 103A e tensão de 1200V. Foi feito um arranjo entre os dois módulos de forma que em cada modulo foram utilizados três chaves IGBT e três diodos para as etapas de roda livre. A figura 4.4 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.

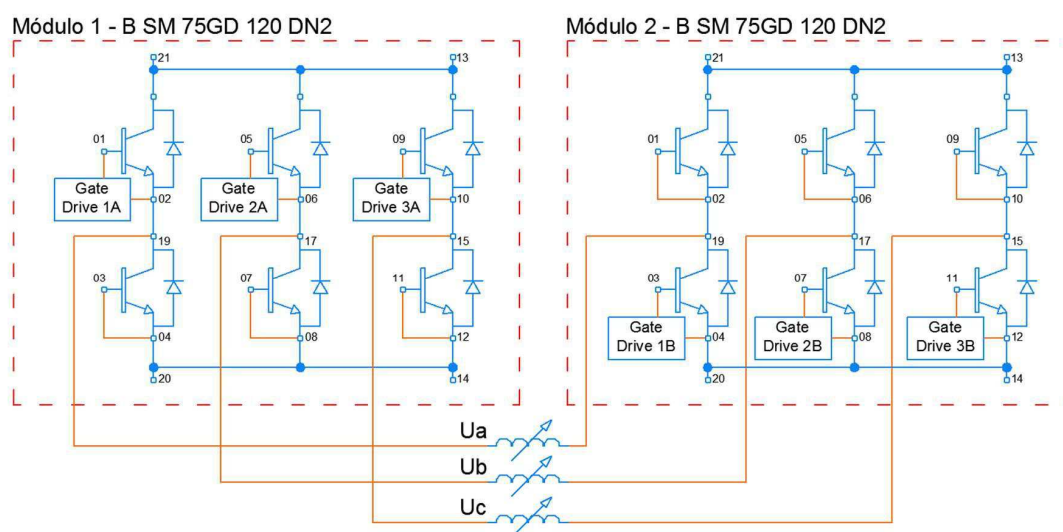


Figura 4.4 - Arranjo nos módulos IGBT.

O circuito completo do conversor *Half Bridge* utilizado é exibido na figura 4.5. O Circuito foi concebido baseado no modelo utilizado por [3] porém foram acrescentados um relé e dois contadores com a finalidade de direcionar um fluxo de corrente durante as fases de roda livre, permitindo assim mudar o tipo de operação da máquina sem precisar modificar nenhuma ligação física.

As figuras 4.5 e 4.6 apresentam o esquema de ligações previsto para o arranjo dos módulos, disponibilizando o acesso aos pontos de entrada dos pulsos de disparo, carga, e demais conexões através de terminais do tipo SACK, facilitando a reconfiguração do circuito de acionamento, possibilitando alterar o arranjo e ligações para atender outras técnicas de chaveamento ou ainda construir outras topologias do conversor de potência, conforme apresentado no item 3.3.

A figura 4.7 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.

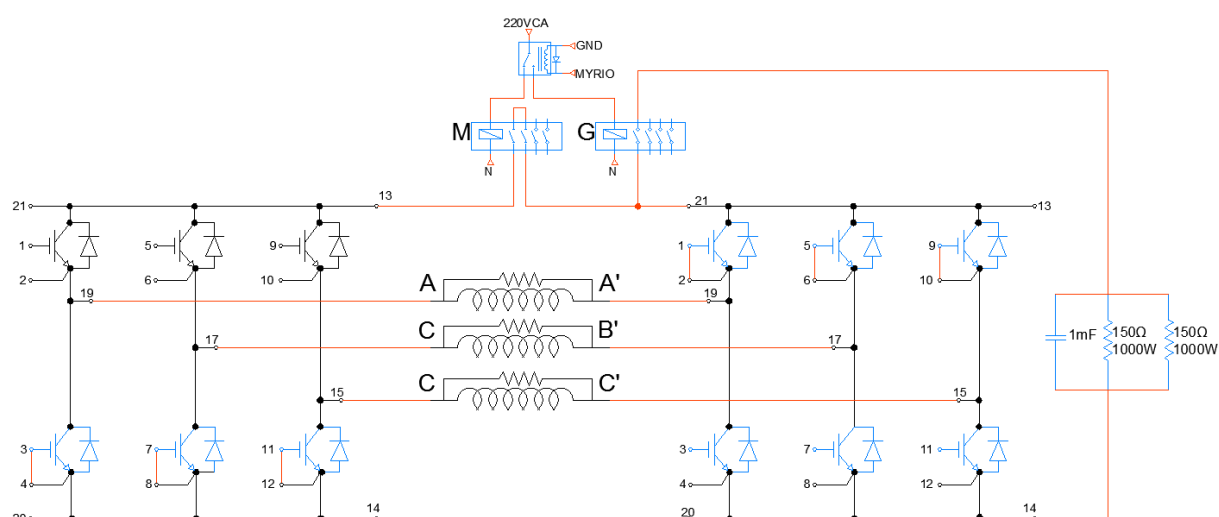


Figura 4.5 - Esquema de ligação do conversor assíncrono HB.

Ao chavear os pares de chave correspondente a cada fase, a corrente circulará por uma das fases da MRV. Mesmo após a abertura das chaves a corrente armazenada na fase da MRV continuará circulando até que o indutor esteja descarregado. Os diodos de atuação rápida serão os responsáveis de redirecionar essa energia armazenada de volta à fonte para aplicações como motor (Relé desligado). Em aplicações como gerador os dois diodos direcionarão a corrente armazenada para a carga (Relé acionado), sendo ainda possível acionar a MRV como gerador auto excitado com o acionamento de ambos relés

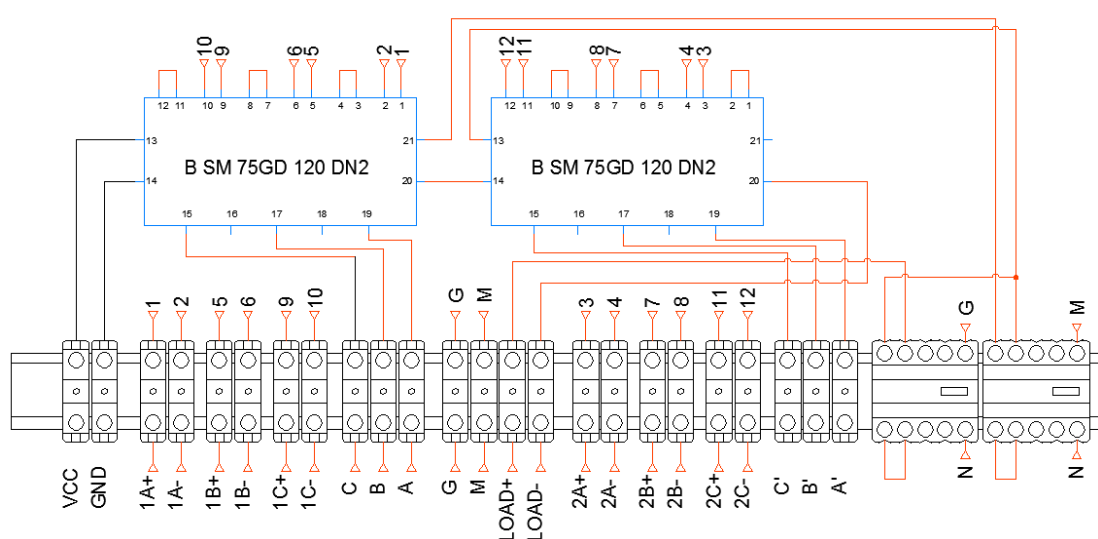


Figura 4.6 – Arranjo físico do conversor assíncrono HB

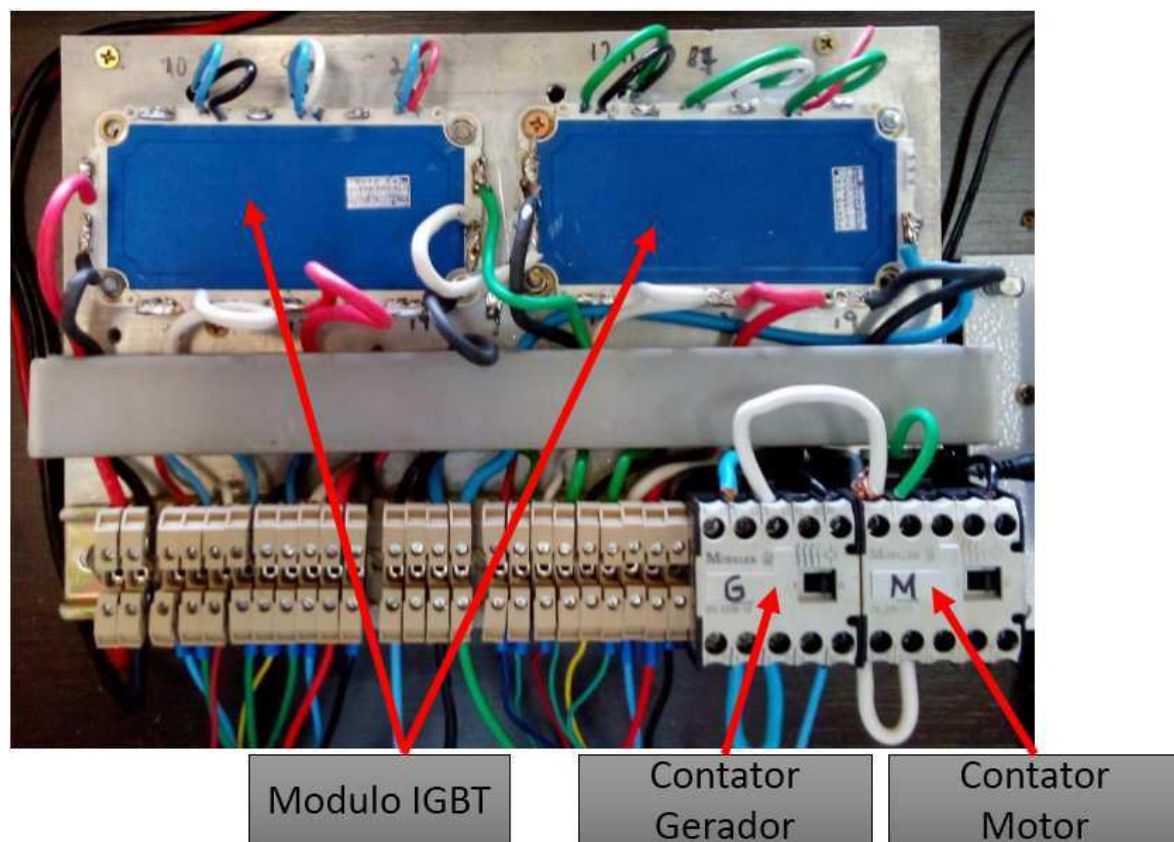


Figura 4.7 - Foto do conversor de potência completo.

Durante a etapa de acionamento da fase A da MRV, as chaves 1A e 1B 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 4.8.

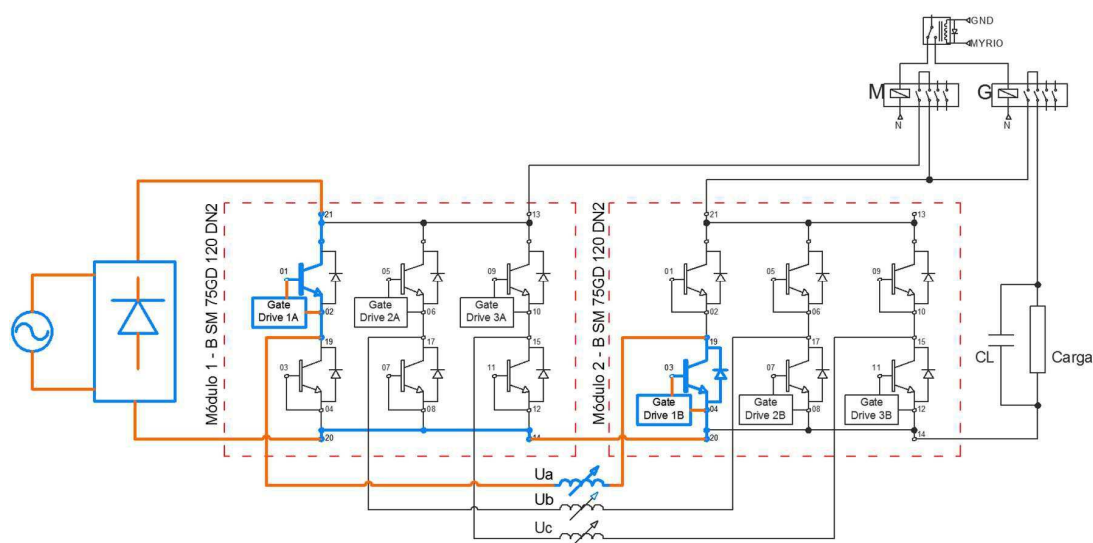


Figura 4.8 - Comportamento do Arranjo de IGBTs durante o acionamento.

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 4.9 apresenta o circuito durante esta etapa.

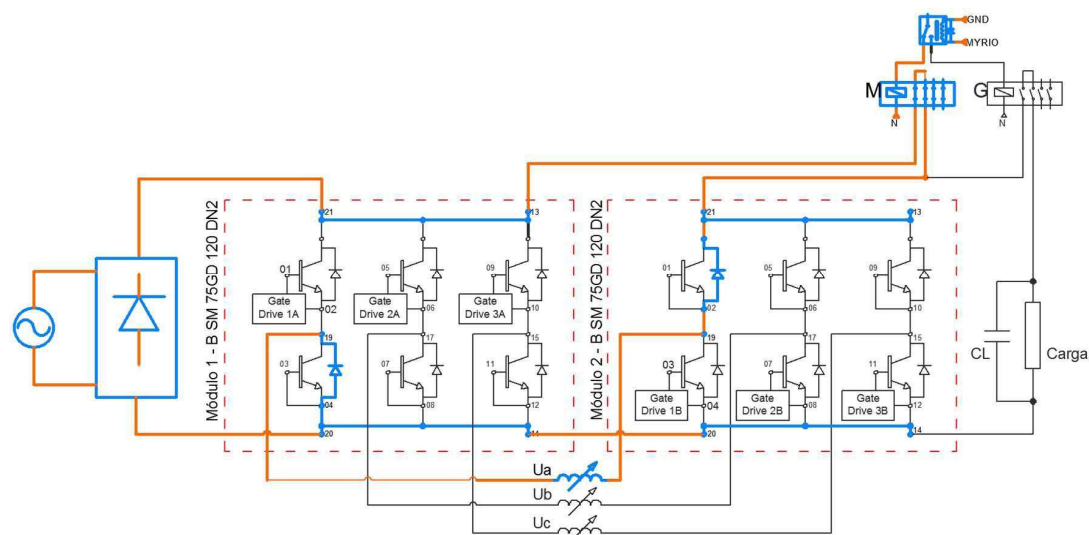


Figura 4.9 - Comportamento do Arranjo de IGBTs, durante a roda livre como motor.

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 4.10.

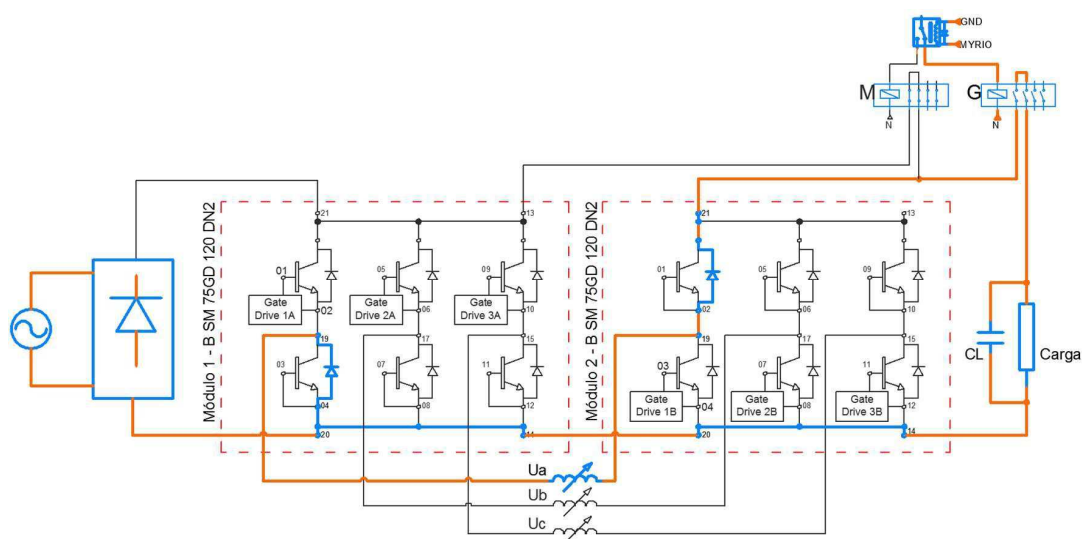


Figura 4.10 - Comportamento do Arranjo de IGBTs, durante a roda livre como gerador.

O acionamento das demais fases da MRV segue funcionamento semelhante, sendo que para cada fase existem duas chaves IGBT para acionamento e dois diodos para a etapa de roda livre, conforme descrito no item 3.3.1.

4.2.2 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, pois os pulsos de disparo devem estar referenciados ao emissor de cada uma das chaves. Para solucionar esse problema foi necessário utilizar um circuito adicional com opto-acopladores para isolar o sinal de disparo e acopla-lo ao emissor correspondente de cada uma chave. O circuito isolador dos pulsos de disparo das chaves IGBT pode ser visto na figura 4.11.

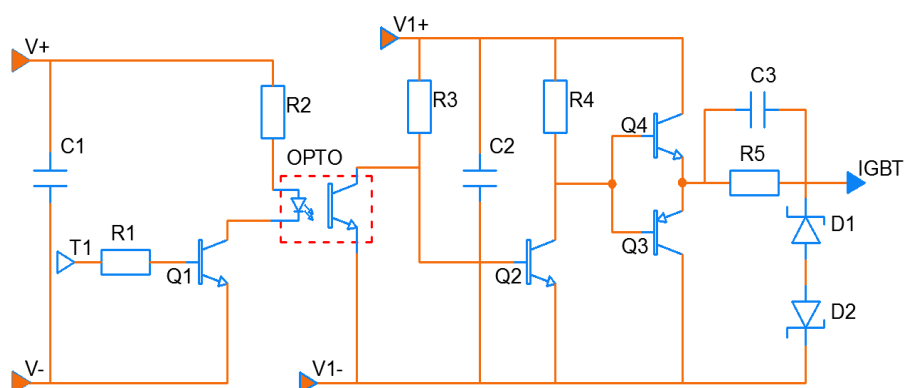


Figura 4.11 - Circuito Isolador de Sinais.

Ao todo foram necessários seis circuitos isoladores, um para cada chave IGBT do conversor de potência. A figura 4.12 exibe as placas utilizadas contendo os seis circuitos isoladores.

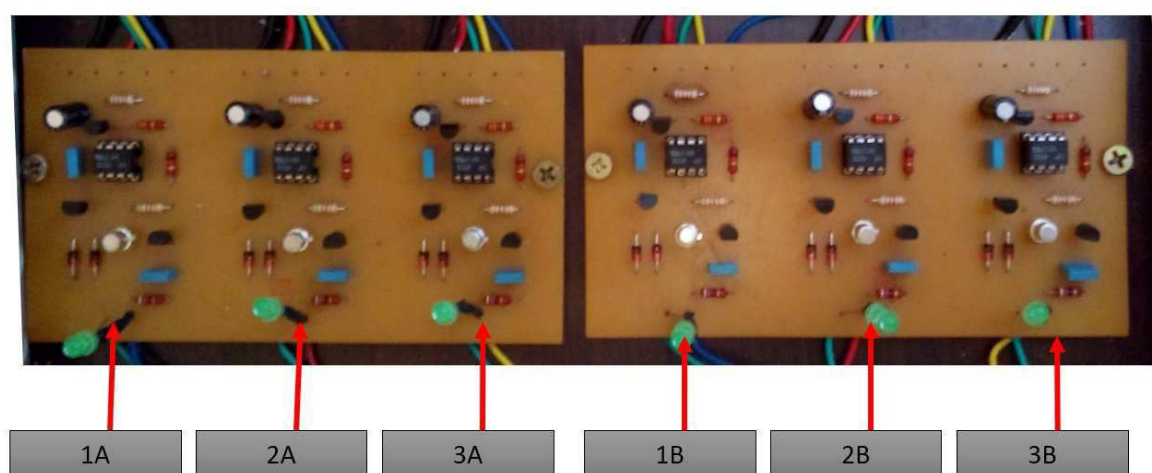


Figura 4.12 – Gate Drive completo.

O isolamento é feito de forma galvânica utilizando uma fonte independente para cada “Drive”, garantindo assim o isolamento galvânico do sinal. O uso desse circuito ainda possibilita a amplificação do pulso de comando de 3.3V vindo do DSP/FPGA para 15V. A figura 4.13 exibe a fonte utilizada.

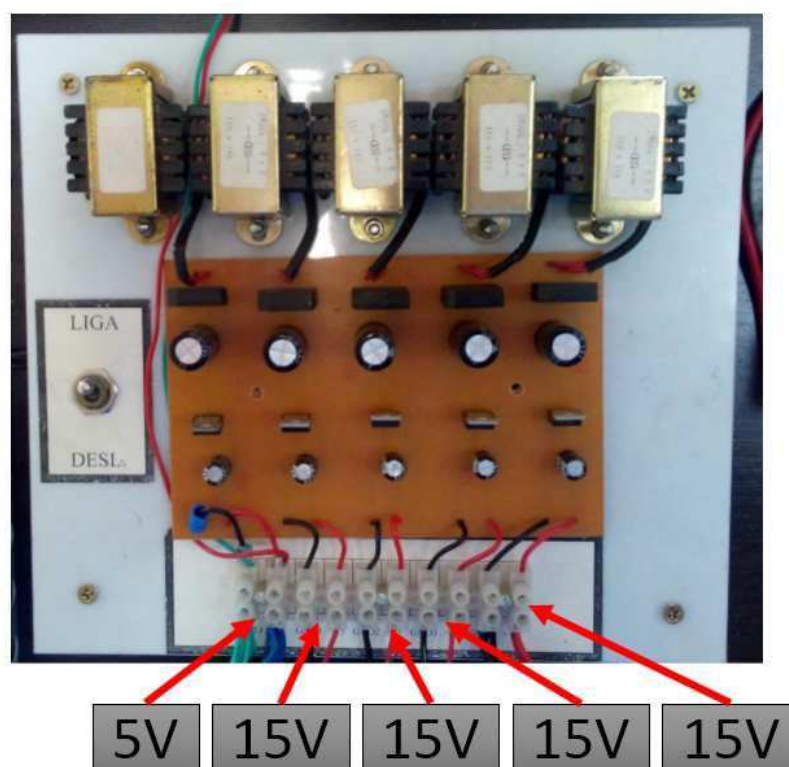


Figura 4.13 - Fonte utilizada para alimentar o Gate Drive.

4.2.3 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*, uma 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 4.14 exibe uma foto da placa de aquisição.



Figura 4.14 - Processador de tempo real NI MyRIO 1900 [18].

A figura 4.15 exibe o processador montado juntamente com as suas conexões e interligações, juntamente ao dispositivo foi disponibilizado bornes de acesso rápido a duas entradas analógicas, AO0 e AO1, permitindo fazer a aquisição de sinais de tensão e corrente para as operações de controle em malha fechada. Ainda foi disponibilizado através de terminais do tipo SACK o acesso a outras entradas e saídas do processador. A figura 4.16 exibe a interface de expansão que disponibiliza acesso rápido a 3 saídas digitais PWM, 3 entradas analógicas e 2 saídas analógica, as demais linhas de I/O do myRIO não foram utilizadas e permanecem disponíveis para futuras expansões da bancada. A tabela 4.1 exibe a relação entre as entradas e saídas disponíveis e utilizadas.

A close-up photograph of a multi-pin terminal block. A bundle of colored wires (blue, yellow, red, green) is connected to the top row of pins. Below the terminal block, three red arrows point to specific pins in the bottom row. These pins are labeled with blue ink as 'PWM', 'A1', and 'A0'. Below the image, three grey boxes contain the labels 'PWM', 'Entrada Analógica', and 'Saída Analógica' respectively, with red arrows pointing from the text boxes to the corresponding pins in the image.

Figura 4.16 - Interface de expansão.

Tabela 4.1 - Entradas e Saídas utilizadas no myRIO.

	Entrada/Saída Digital	Entrada Analógica	Saída Analógica	USB
Encoder	8			
Gate-Drive	6			
Relé de acionamento	1			
Realimentação		2		
PWM	3			
Comando Inversor de Frequência	2		1	
Entrada analógica		3		
Saída analógica			2	
Comunicação com Supervisor				1
Não utilizado	20	5	3	1
Total	40	10	6	2

4.2.4 Conjunto de Cargas

Para o acionamento da MRV como gerador, foi disponibilizado um conjunto de carga composta por duas resistências 150Ω 1000W, uma lâmpada incandescente e um capacitor 100μF. As cargas podem ser conectadas em série, paralela ou de forma mista, possibilitando a obtenção de diferentes valores de resistência na carga. A figura 4.17 exibe o conjunto de cargas.



Figura 4.17 - Conjunto de Cargas.

4.2.5 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 4.18 exibe o circuito utilizado.

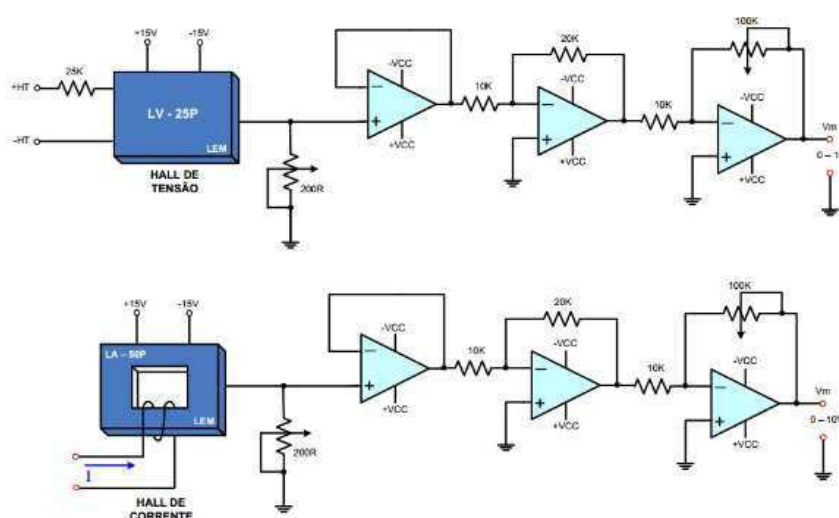


Figura 4.18 - Circuito eletrônico da placa condicionadora de sinais.

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 4.19 exibe a placa condicionadora de sinais.

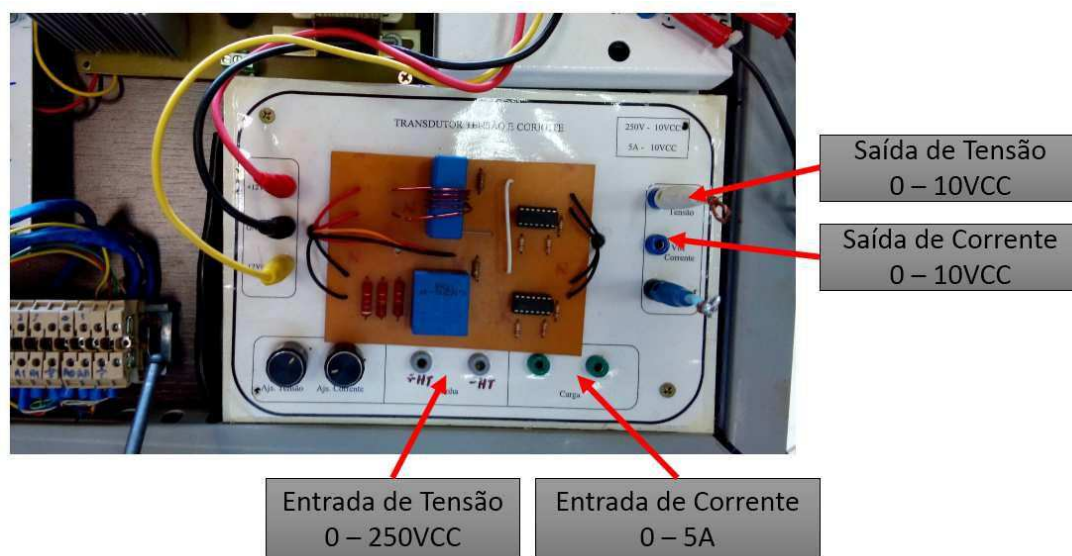


Figura 4.19 - Placa condicionadora de sinais.

4.2.6 Interface de conexão com a MRV

A figura 4.20 exibe a interface para conexão com a MRV.

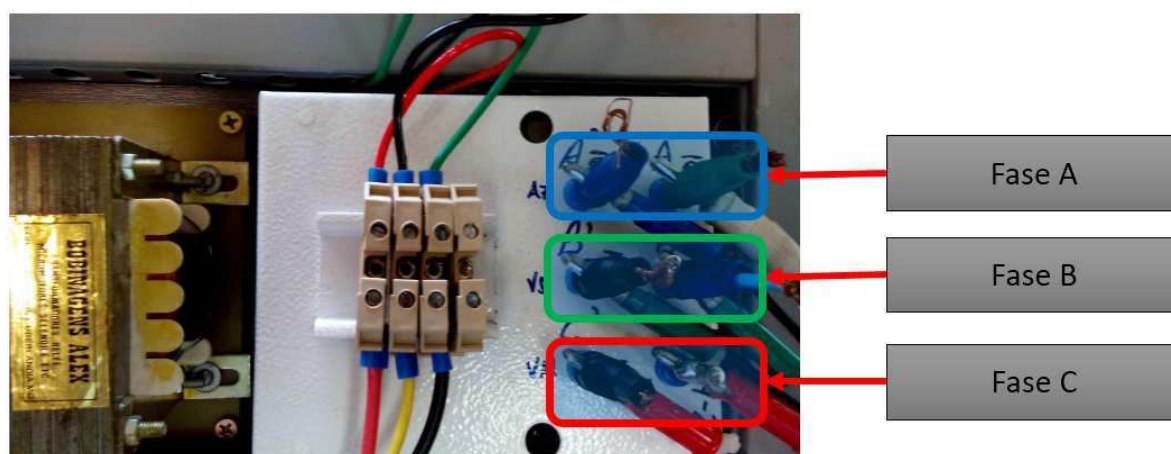


Figura 4.20 - Interface de conexão com a MRV.

4.3 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 foi utilizada para fornecer a corrente de magnetização da Máquina.

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

Para tratamento das operações matemáticas foi necessário utilizar o sistema de numeração em ponto fixo devido, 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. Para o trabalho desenvolvido foi utilizado ponto fixo em 32bits com parte inteira de 24bits (32/24), a tabela 4.2 apresenta o total de recursos disponíveis na plataforma FPGA e apresenta ainda o total destes recursos utilizados para desenvolvimento das funções.

Tabela 4.2 - Recursos disponíveis na interface FPGA do NI MyRIO [18].

Recurso	Disponível	Utilizado	
<i>Slices</i>	4400	3457	78,57%
<i>Registers</i>	35200	13577	38,57%
<i>LUTs</i>	17600	13395	76,11%
<i>DSP48x</i>	80	26	32,50%
<i>RAM</i>	60	29	48,33%

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 interessante 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.

A figura 4.21 apresenta a função principal embarcada no DSP, que está dividida em várias subfunções, sendo uma para a leitura e conversão do código GRAY vindo 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. O código fonte completo pode ser visualizado nos

apêndices A e B, juntamente com as demais funcionalidades implementadas como algoritmo PID para controle em malha fechada e funções de gerenciamento da interface supervisória.

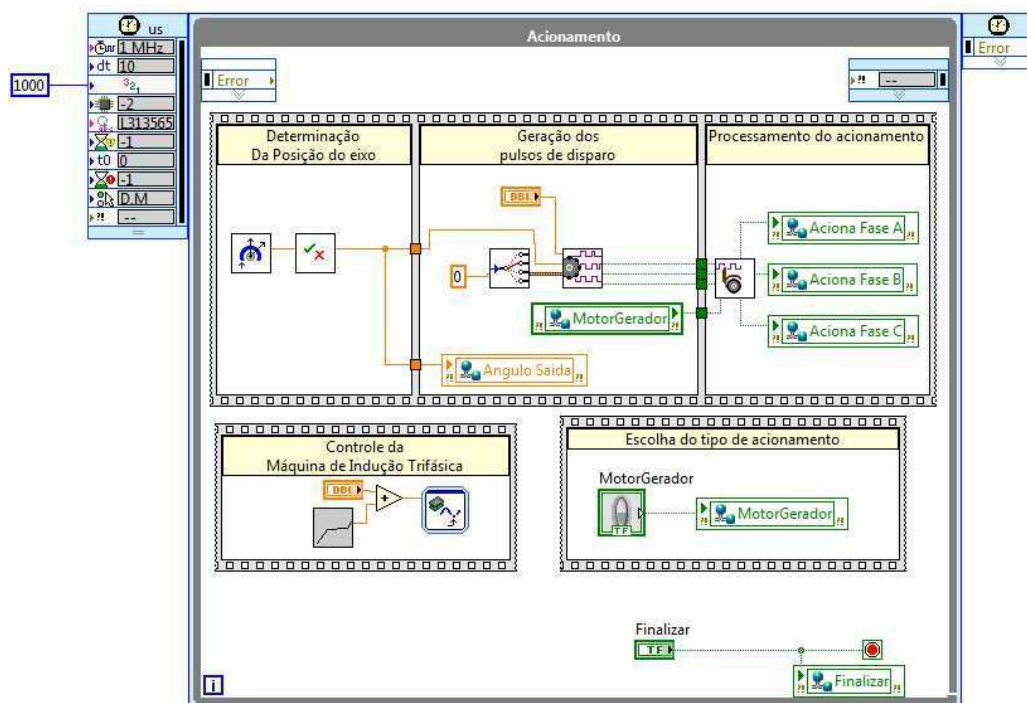


Figura 4.21 - Função principal do programa de acionamento e controle.

O chaveamento da MRV como gerador deve ser realizado no instante em que a indutância da fase a qual se deseja excitar estiver decrescendo e na configuração 6x4 não deve ter uma largura de pulso (ângulos de magnetização) superior a 30 graus. A figura 4.22 apresenta a curva de indutância para as três 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 nas figuras 4.22 e 4.23 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 15 e 30 graus, existindo duas possibilidades de manipulação dos ângulos de magnetização:

- Controlado pela saída do controlador PI, 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.

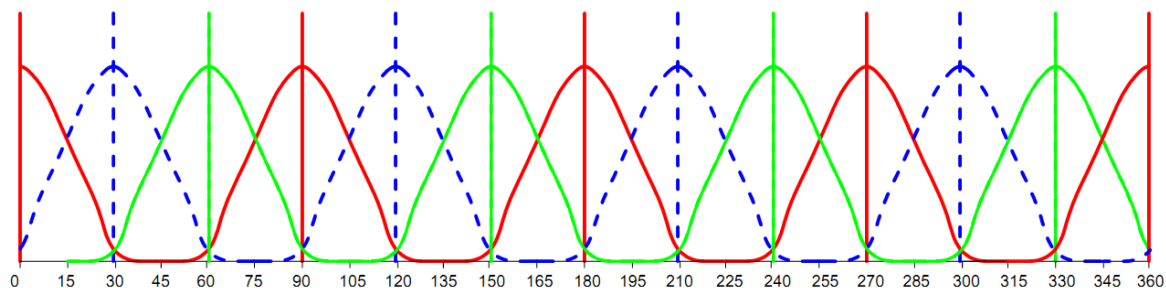


Figura 4.22 - Curvas de indutância das três fases da MRV.

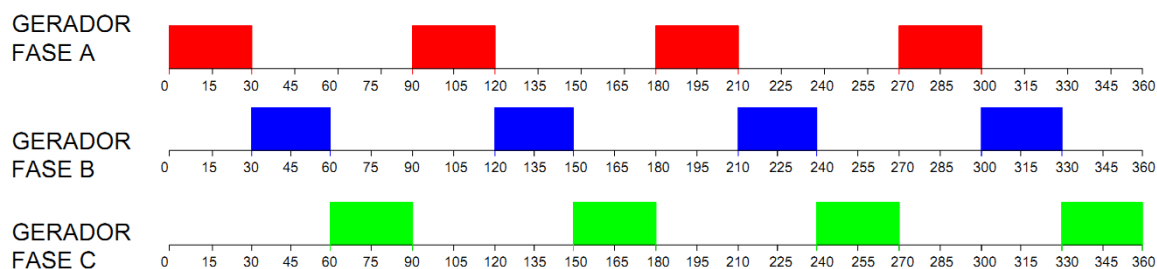


Figura 4.23 - Instantes de acionamento para acionamento como gerador.

Um controle adicional foi implementado no sistema, permitindo a comutação do relé auxiliar e um conjunto de contadores, bastando reajustar os ângulos de chaveamento para coincidir com os momentos de aumento da indutância de cada fase para operar como moto

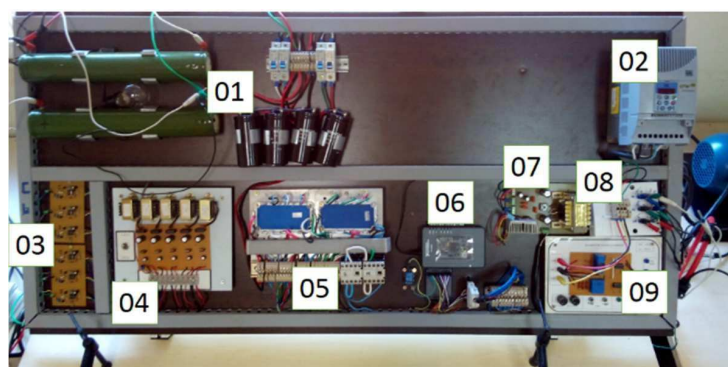
4.4 RESULTADOS

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.

4.4.1 Plataforma Experimental

A figura 4.24 mostra uma foto da bancada finalizada, contendo duas placas gate-drive, uma fonte com 5 saídas isoladas galvanicamente, um arranjo dos dois módulos IGBT constituindo o conversor de potência HB, um processador DSP/FPGA, uma fonte simétrica +15/0/-15VCC juntamente com a placa condicionadora de sinais, um conjunto de cargas formado por um capacitor $1000\mu F$, duas resistências 1500Ω e uma lâmpada incandescente 150W, podendo ser ligadas em série, paralelo ou independentes de acordo com as necessidades e por fim um inversor de frequência SSW08 WEG, o diagrama completo com todas as interligações entre os circuitos pode ser visto no apêndice C.



- 01 – Conjunto de cargas
- 02 – Inversor de Frequência
- 03 – Gate-Drive
- 04 – Fonte de tensão
- 05 – Conversor de potência HB.
- 06 – Processador DSP/FPGA
- 07 – Fonte de tensão
- 08 – Conexão de saída para MRV.
- 09 – Placa condicionadora de sinais

Figura 4.24 - Bancada construída finalizada.

A Figura 4.25 apresenta a MRV (4x6, 1,5CV) juntamente com uma máquina de indução trifásica (4 Polos, 1,5CV) que servirá como máquina primária para os acionamentos como gerador e o encoder absoluto (*single turn*, 8bits). O conjunto ainda possui uma fonte retificadora trifásica não exibida na foto, que alimenta o conversor de potência.



- 01 – Máquina de Indução Trifásica
- 02 – Máquina a Relutância Variável
- 03 – Encoder Absoluto

Figura 4.25 - MRV, MIT e encoder.

Foi feita 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 4.26 e 4.27.

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

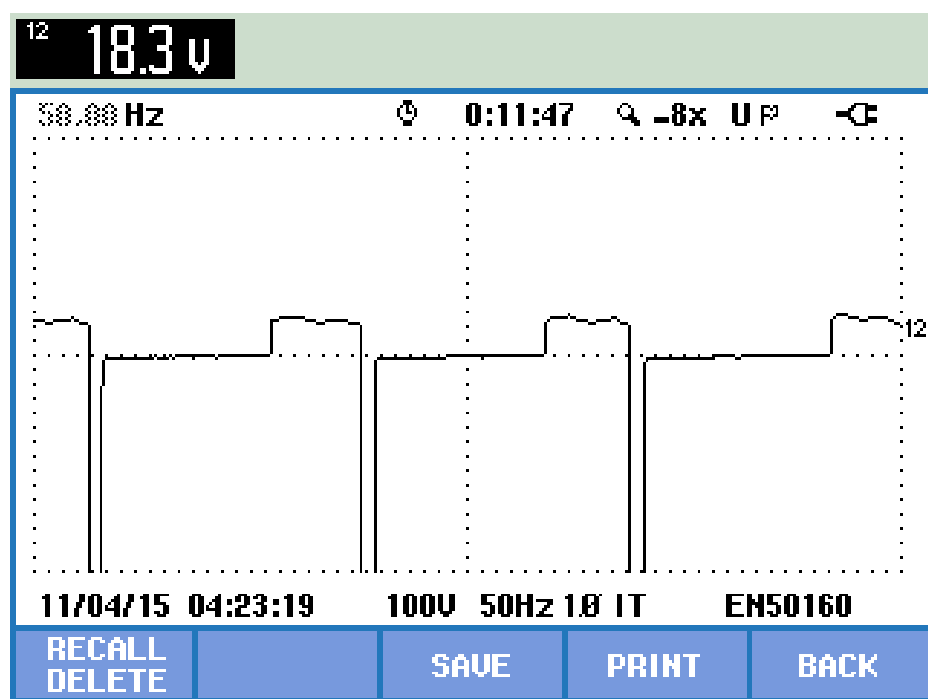


Figura 4.26 - Forma de onda da tensão na fase A da MRV durante o estado de motorização.

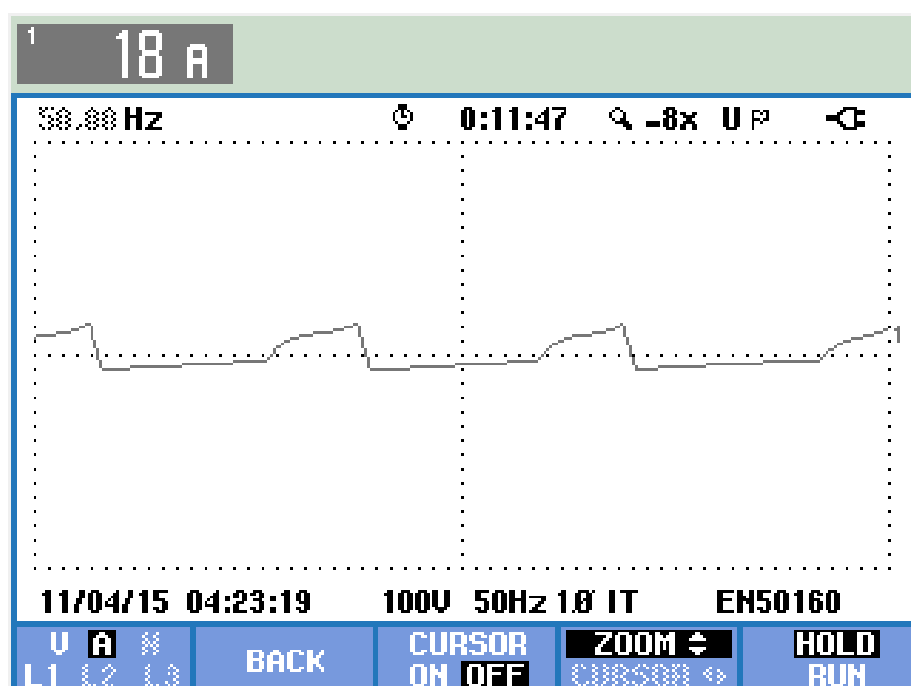


Figura 4.27 - Forma de onda da corrente (aumentada 10 vezes) da Fase A da MRV durante o estado de motorização.

As figuras 4.28 e 4.29 apresentam a forma de onda da tensão e corrente obtidas durante o acionamento como gerador, após o acionamento da máquina primária.

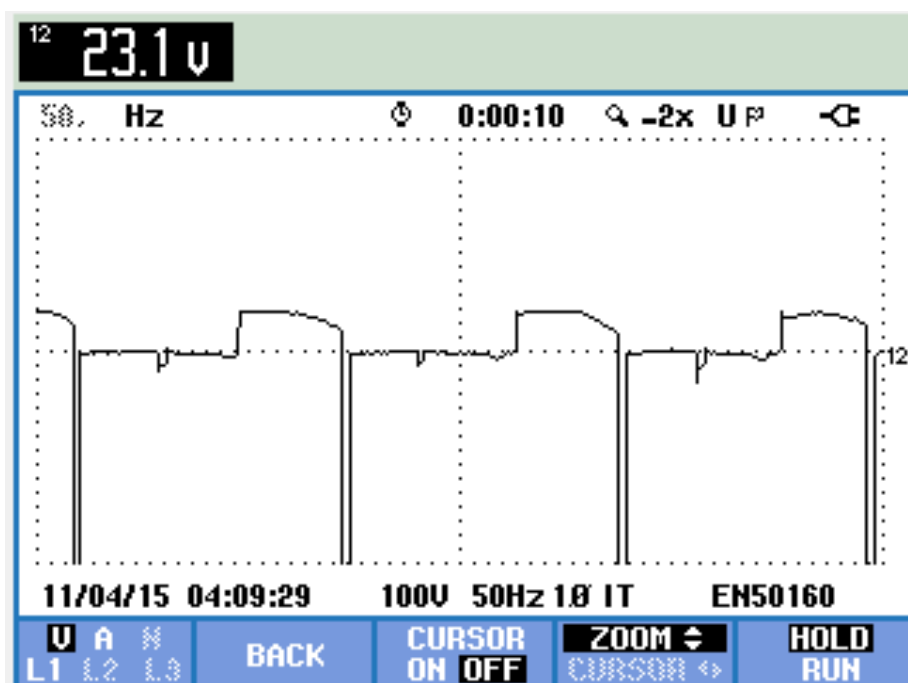


Figura 4.28 - Tensão na Fase da MRV no acionamento como gerador.

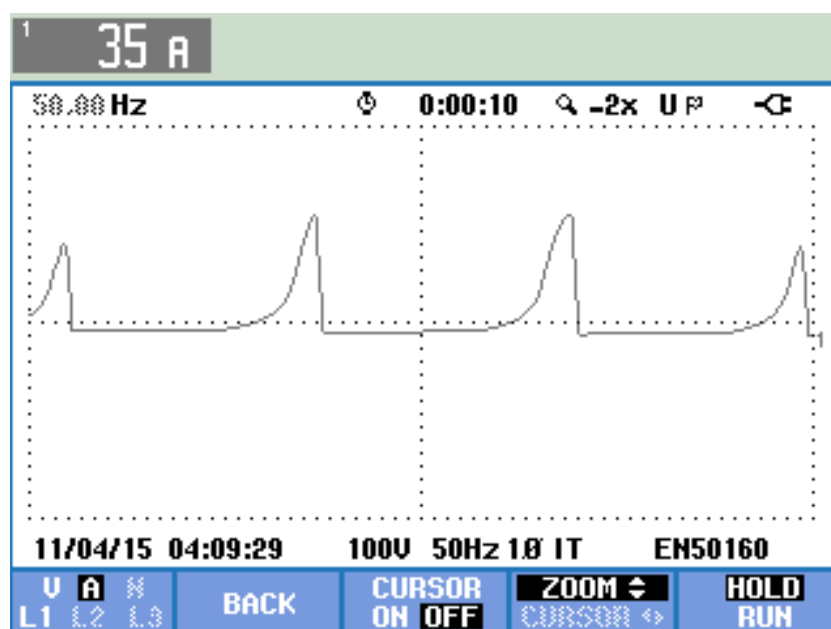


Figura 4.29 - Corrente (aumentada 10x) na fase da MRV no acionamento como gerador.

A figura 4.30 exibe a forma de onda da tensão obtida na carga.

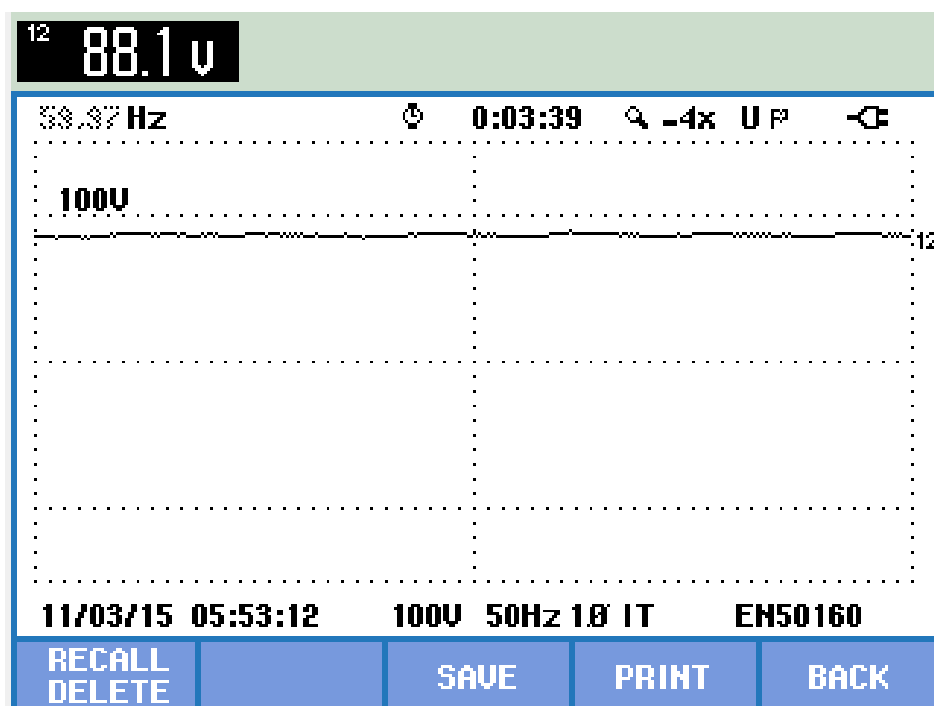


Figura 4.30 - Tensão gerada na carga.

Para este acionamento foi utilizada uma velocidade constante de 900RPM na máquina primária, juntamente com uma excitação de 23,1V e carga resistiva foi de 66,1 Ω , gerando uma tensão na carga de 88,1V com uma potência gerada de 117,4W.

4.4.2 Software de Supervisão e Controle

Uma interface de supervisão foi desenvolvida na linguagem Labview® para o acionamento do GRV. A inferace visa auxiliar o controle da MRV, possibilitando alterar *set-points* e parâmetros de controle em tempo real. Sendo assim, a interface foi divida em três partes distintas, sendo:

- Tela 01 - Acionamento: Permite visualizar as principais informações do acionamento da MRV, como a fase que está energizada, o valor instâneo lido pelo encoder, seleccionar o tipo de acionamento a ser realizado (motor/gerador), controlar manualmente o valor de θ_{off} , alterar manualmente o valor de rotação da máquina primária, deslocar a referência do encoder em realação às fases da MRV. Nesta tela ainda está disponível um gráfico que

pode exibir a forma de onda da tensão ou corrente na fase da MRV ou na carga, dependendo do tipo de controle/acionamento que se deseja realizar. A figura 4.31 exibe a tela principal do supervisor.

- Tela 02 - Medidas: Exibe as formas de ondas coletadas da tensão na carga (controle do acionamento como gerador) e a velocidade real em que a MRV está girando (controle do acionamento do como motor). A tela 02 pode vista na figura 4.32.
- Tela 03 - Controlador PID: Permite selecionar o tipo de controle desejado entre manual e automática, definir o set point de controle, sintonizar a malha de controle informando os ganhos proporcional, integral e derivativo, visualizar os estados do controle (variável manipulada, variável de processo, set-point em % e em Volts[gerador]/RPM[motor]. A tela 03 pode ser vista na figura 4.33.

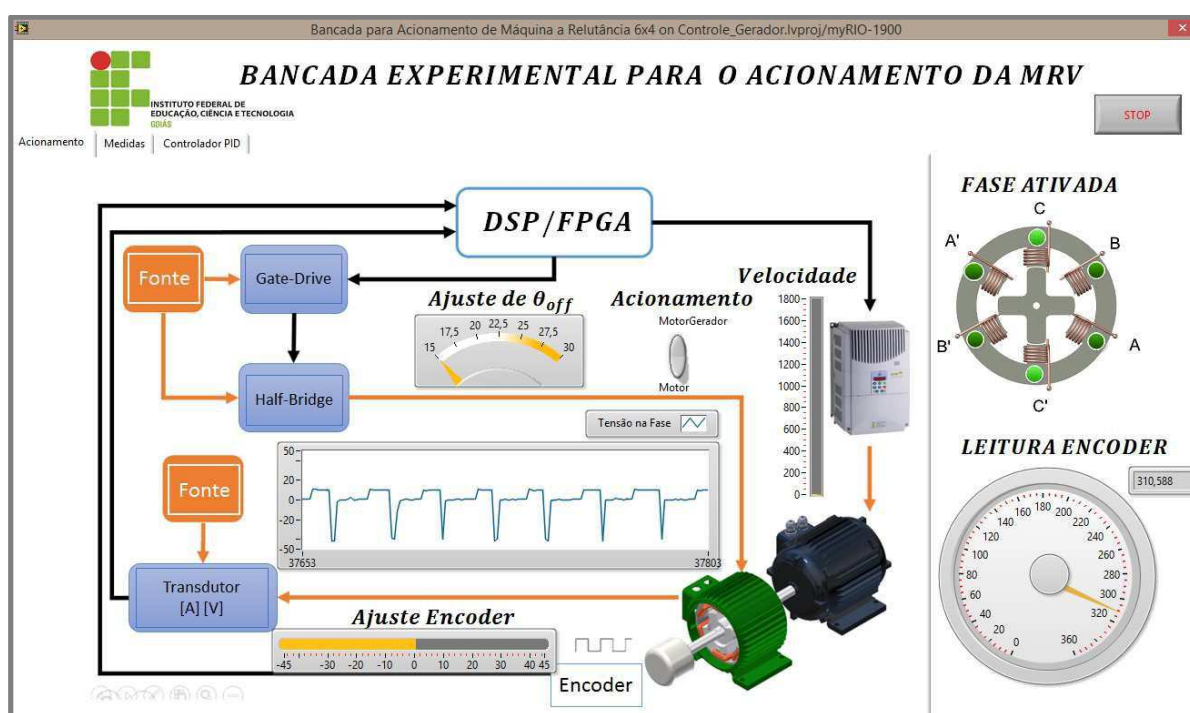


Figura 4.31 - Tela 01 Acionamentos.



Figura 4.32 - Tela 02 Medidas.

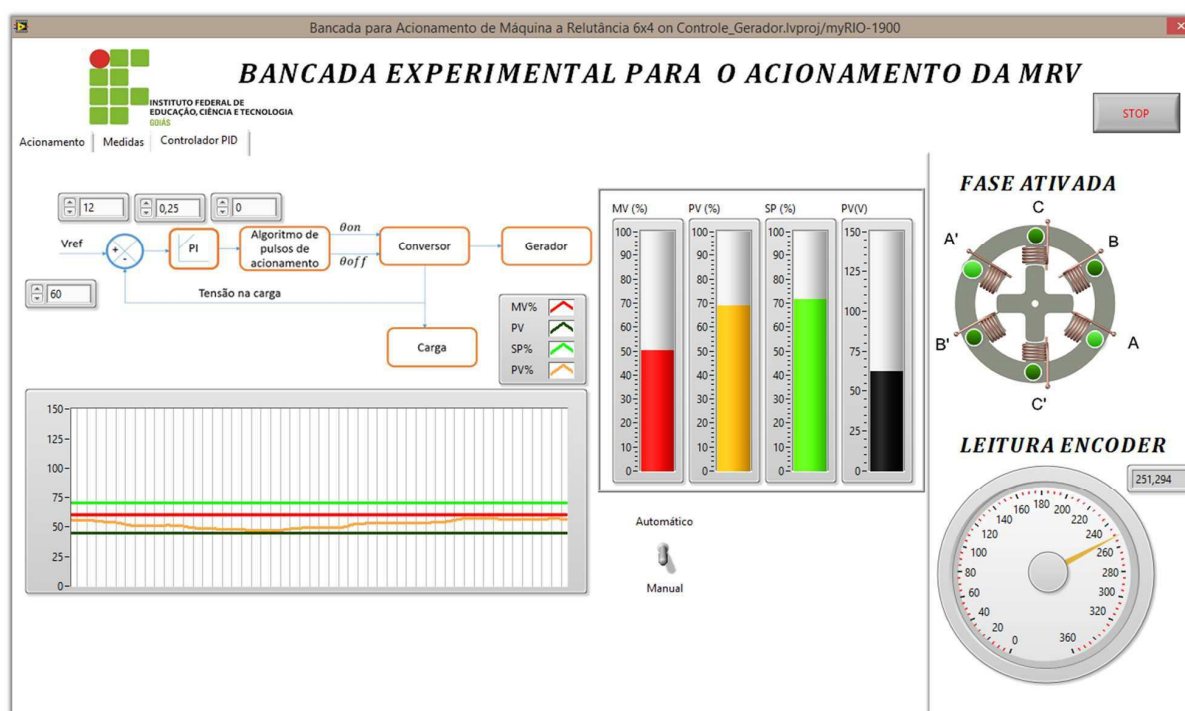


Figura 4.33 - Tela 03 Controlador PID.

Por ser desenvolvido na linguagem LabView, mesma linguagem utilizada na programação do DSP/FPGA, o supervisor se torna uma ferramenta 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.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS

Dois ensaios foram realizados para identificar o comportamento da MRV operando como gerador frente à variação de alguns parâmetros operacionais. Este capítulo apresenta os resultados obtidos.

5.1 ENSAIO COM VELOCIDADE CONSTANTE, TENSÃO DE EXCITAÇÃO E θ_{off} VARIÁVEL

O objetivo deste experimento é verificar o comportamento do GRV em função da variação da tensão de excitação e θ_{off} . Neste caso, a velocidade da máquina primária foi ajustada em 900RPM e a carga resistiva instalada na saída do gerador foi de $66,1\Omega$. Os ensaios foram feitos com uma variação na tensão de excitação de 5 a 25V. Para cada valor de tensão ensaiado o ângulo θ_{off} foi variado de 15 a 30 graus. A figura 5.1 apresenta o resultado obtido.

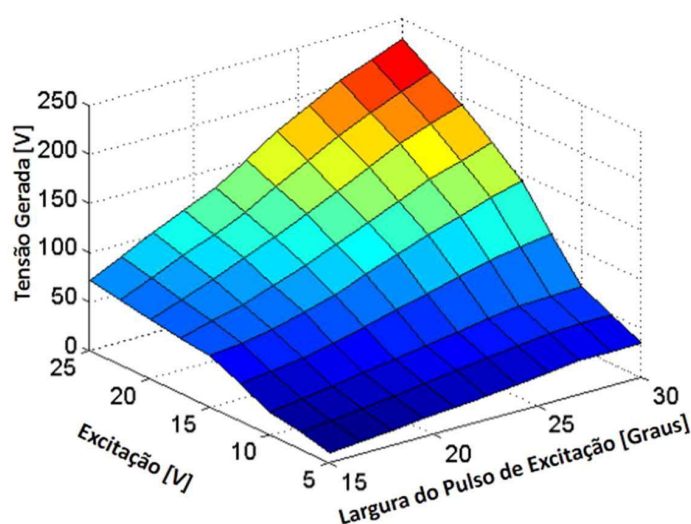


Figura 5.1 - Tensão gerada em função da tensão de excitação e variação de θ_{off} .

Percebe-se que com o aumento da tensão de excitação houve um aumento da tensão gerada, esse comportamento pode ser visto nas figuras 5.2 e 5.3, apresentando curvas da tensão gerada em função da excitação para diferentes valores de θ_{off} . A variação do θ_{off} também implicou em uma significativa variação na tensão gerada. Essa variação pode ser vista na figura 5.3.

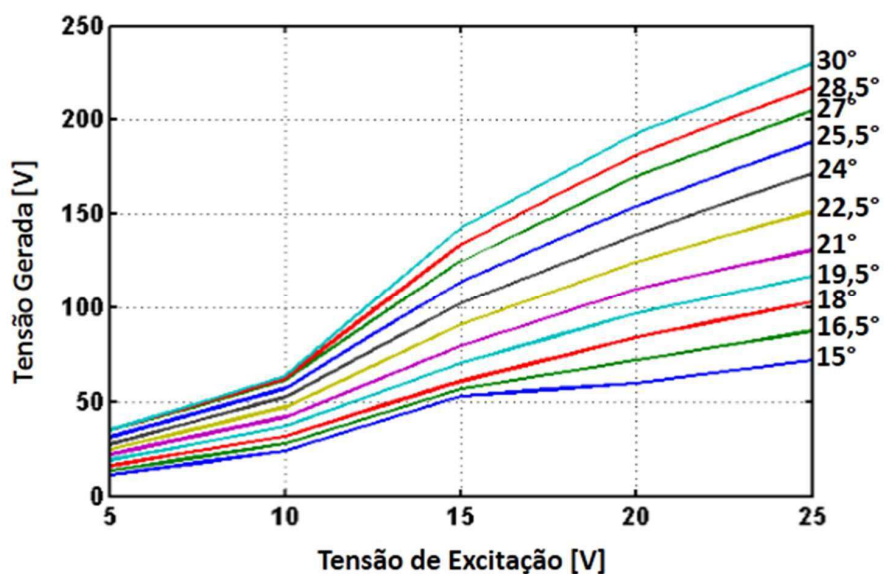


Figura 5.2 - Tensão gerada em função da tensão de excitação para diferentes valores de θ_{off} .

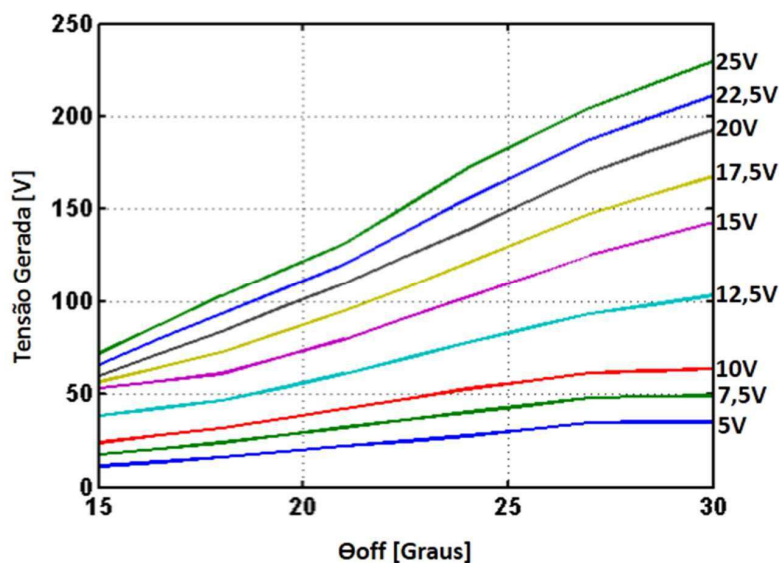


Figura 5.3 - Tensão gerada em função de θ_{off} para diferentes valores de tensão de excitação.

Durante este ensaio, também foi observado o comportamento da potência gerada. A figura 5.4 exibe o comportamento da potência na carga em função da variação da excitação e de θ_{off} .

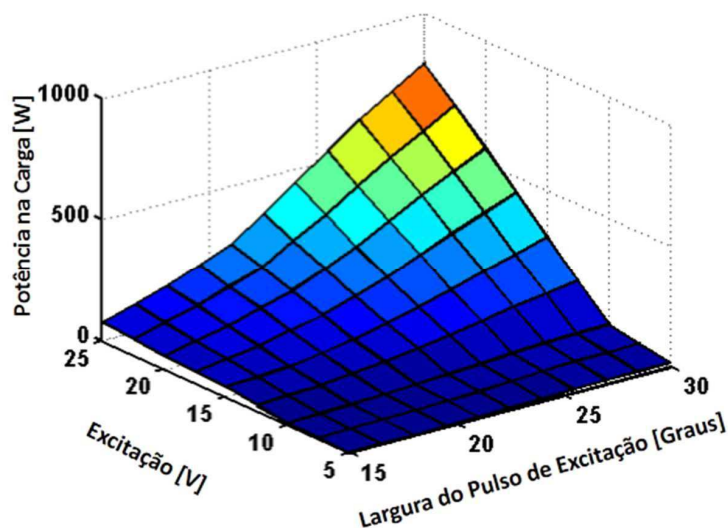


Figura 5.4 - Potência gerada em função da tensão de excitação e variação de θ_{off} .

Percebe-se que com o aumento da tensão de excitação, há uma elevação rápida da potência gerada, efeito visto na figura 5.5, que apresenta curvas de potência gerada em função da excitação para diferentes valores de θ_{off} . O mesmo efeito ocorre na variação do θ_{off} , exibido na figura 5.6.

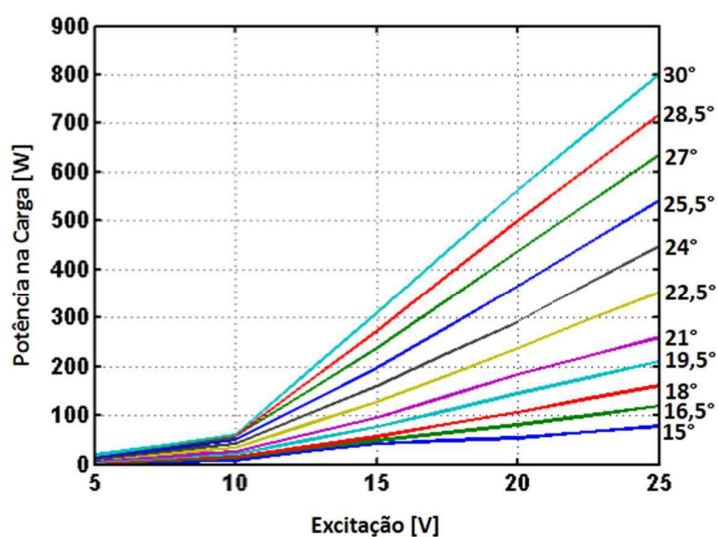


Figura 5.5 - Potência gerada em função da tensão de excitação para diferentes valores de θ_{off} .

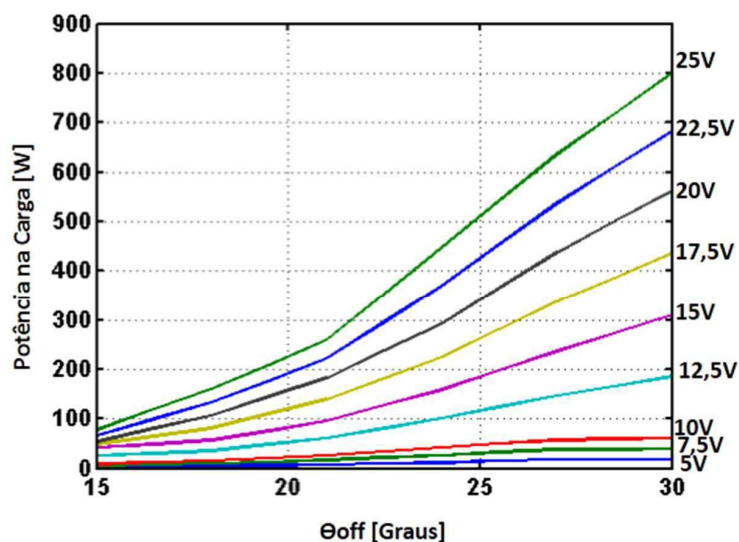


Figura 5.6 - Potência gerada em função de θ_{off} para diferentes valores de tensão de excitação.

Além da tensão e potência gerada, também foi observada a corrente média necessária para a excitação e a potência solicitada à fonte de excitação. Ambos resultados são apresentados nas figuras 5.7 e 5.8.

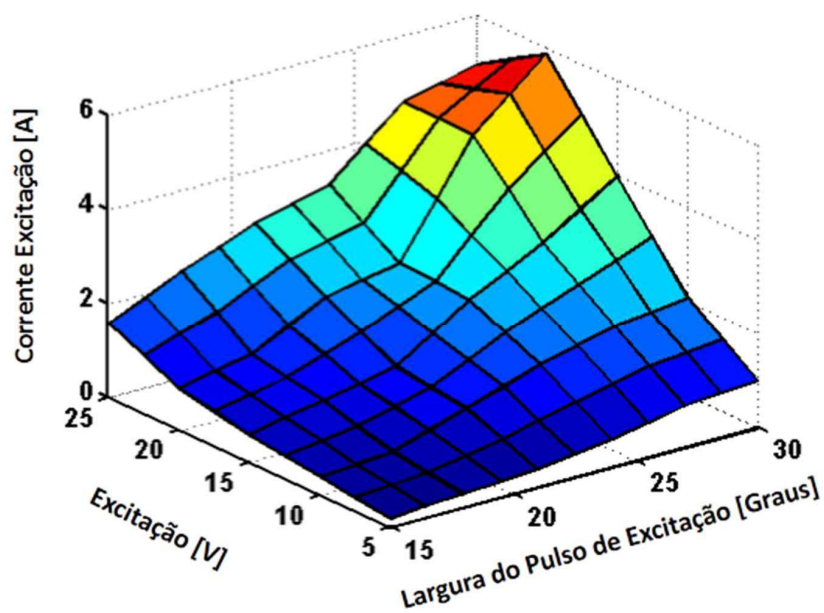


Figura 5.7 - Corrente média na fonte de excitação.

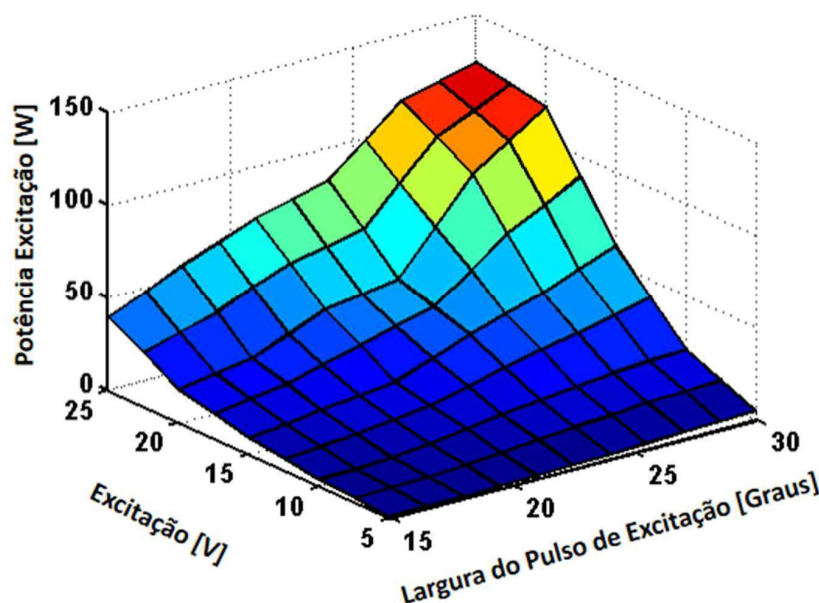


Figura 5.8 - Potência média na fonte de excitação.

Através dos resultados coletados, foi possível perceber o comportamento da MRV e a influência que o θ_{off} e a tensão de excitação tem sobre a tensão gerada. Durante os ensaios a tensão gerada variou de 11,2V (5V/15graus) até 231V(25V/30Graus), mostrando que é possível ajustar a tensão gerada controlando a tensão de excitação, o ângulo θ_{off} ou ambos. O resultado completo do ensaio pode ser visto no apêndice D.

5.2 ENSAIO COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO CONSTANTE, VELOCIDADE E θ_{off} VARIÁVEL.

Afim de verificar a influência da velocidade de acionamento da máquina primária na tensão gerada, foi realizado outro ensaio variando a velocidade de acionamento da máquina primária, na faixa de 600 a 1200RPM, para cada velocidade ensaiada o ângulo de θ_{off} foi variado de 15 a 30 graus e a tensão de excitação mantida constante com 15V. As figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 exibem os resultados obtidos, onde percebe se que a velocidade de acionamento da MRV pouco influência na tensão gerada, evidenciando uma das vantagens

em se utilizar a MRV como gerador em processos que possuem velocidades variáveis, como na geração eólica.

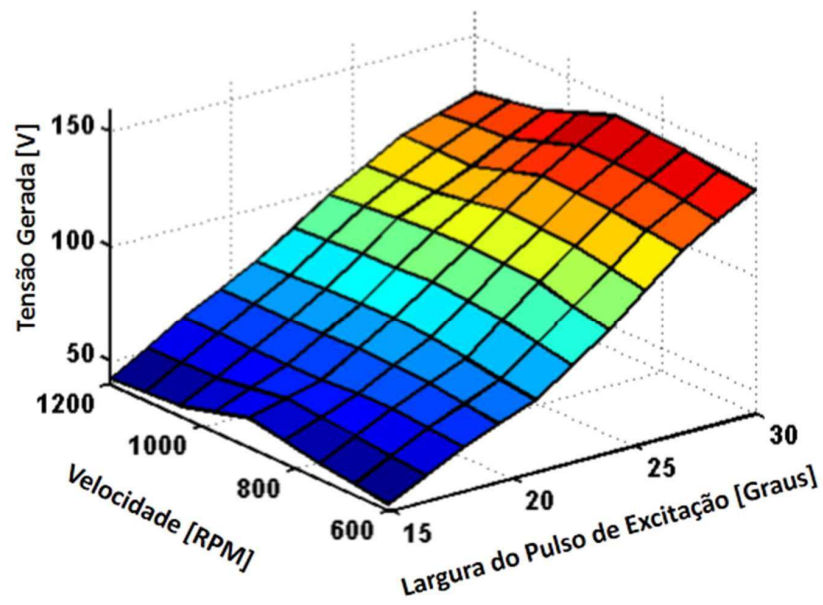


Figura 5.9 - Superfície 3D da tensão gerada em função da variação da velocidade e do ângulo θ_{off} .

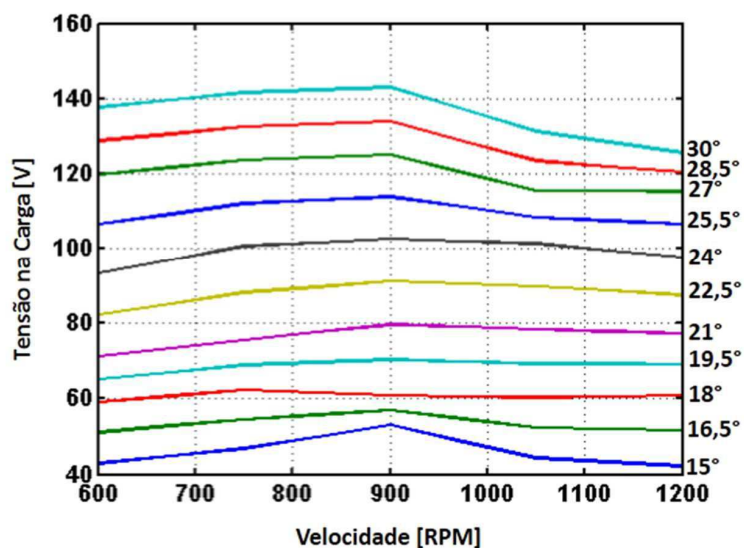


Figura 5.10 - Tensão gerada em função da velocidade de acionamento da MRV para diferentes valores de θ_{off} .

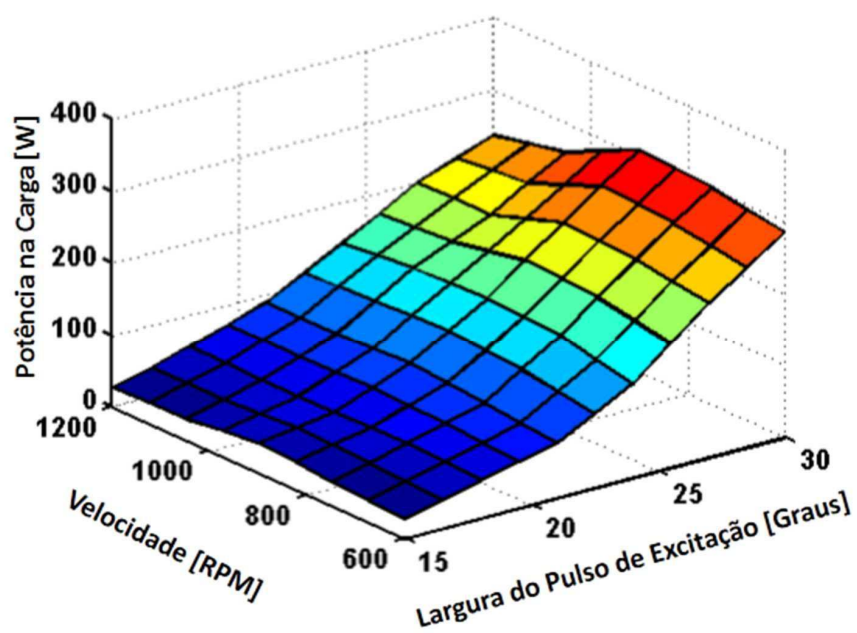


Figura 5.11 - Superfície 3D da potência gerada em função da variação da velocidade e do ângulo θ_{off} .

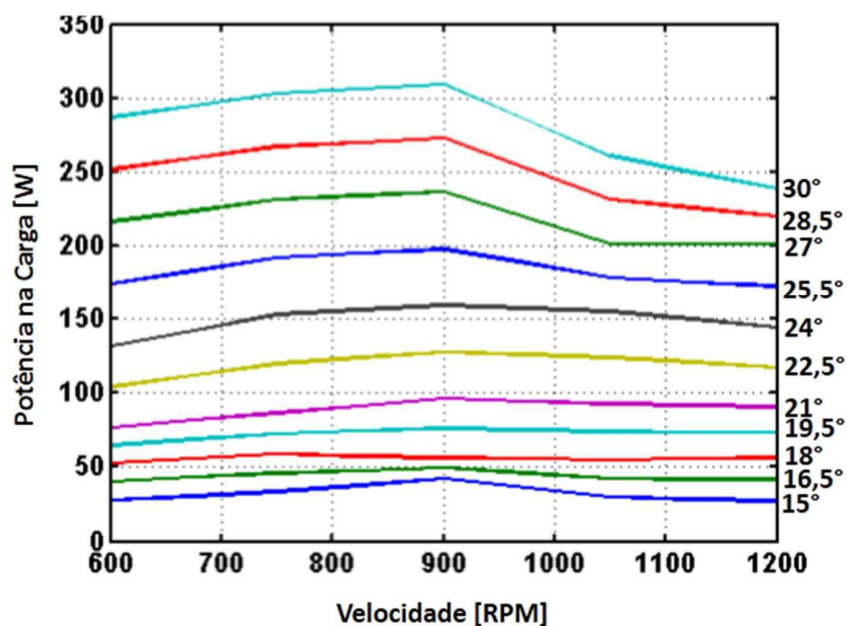


Figura 5.12 - Potência gerada em função da velocidade de acionamento da MRV para diferentes valores de θ_{off} .

Por se tratar de um estudo preliminar, objetivando verificar o funcionamento da bancada e devido ao fato de estar operando em malha aberta, a velocidade de acionamento foi feita para rotação relativamente baixas, sendo de 600 a 1200RPM. Para o acionamento em velocidades abaixo de 600RPM deve ser implementado um controle das correntes injetadas nas fases da máquina, pois em velocidades menores cada fase da máquina permanece energizada por um tempo maior, implicando o aumento da corrente de excitação e consequentemente estresse das chaves de acionamento.

Para rotações elevadas, espera se que a influência da rotação na tensão gerada tenha comportamento semelhante ao obtido, tendo pouca influência sobre a tensão gerada, porém esta investigação será feita em trabalhos futuros.

O resultado completo do ensaio pode ser visto no apêndice E.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento da bancada de acionamento da MRV, foram abordados diversos assuntos pertinentes ao tema.

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.

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.

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.

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 trabalho.

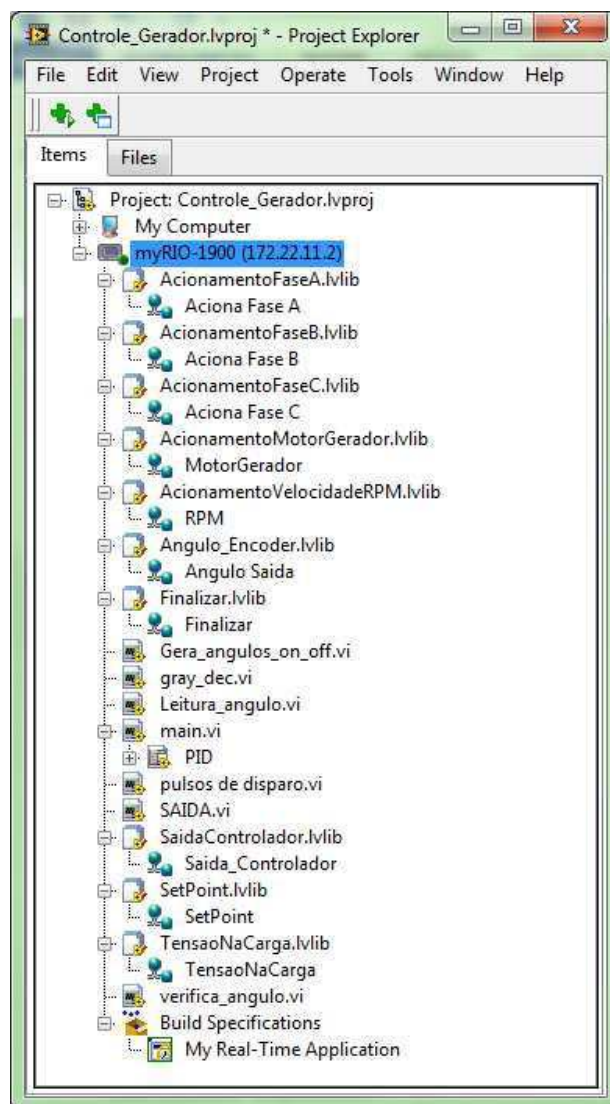
Baseado no desenvolvimento da bancada experimental para acionamento da Máquina a Relutância 6x4 operando como Gerador, seguem algumas sugestões de temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Acionamento como motor, operando em malha aberta;
 - Controle da velocidade no acionamento da MRV como motor;
 - Controle da tensão gerada no acionamento como gerador;
-

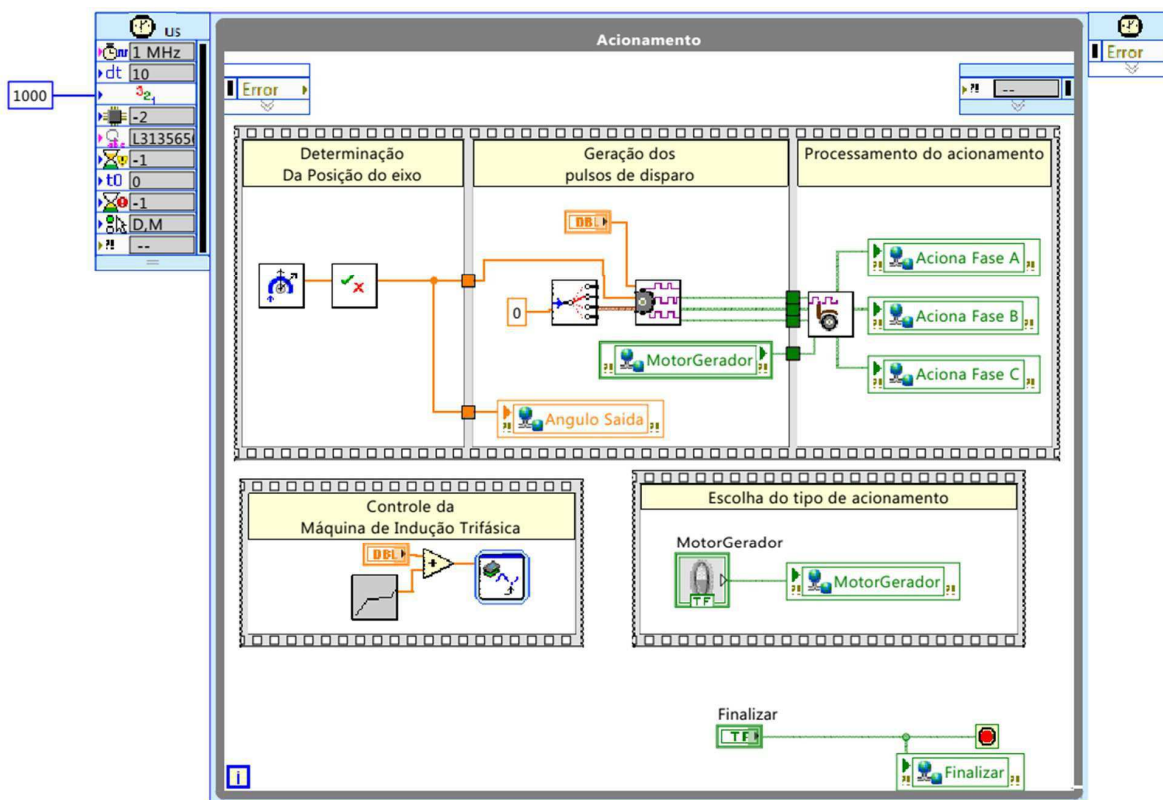
- Acionamento como gerador auto-excitado;
 - Controle da tensão gerada como gerador auto-excitado;
 - Acionamento como moto-gerador;
 - Controle de velocidade e tensão gerada no acionamento como moto-gerador;
 - Ensaio acerca dos melhores pontos de operação e rendimento, operando como gerador ou como motor.
 - 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.
 - Estudo comparativo entre a performance do acionamento da MRV quando acionada por FPGA e pelo controlador em tempo real.
 - Estudo comparativo entre os diferentes conversores eletrônicos de potência.
 - Estudo e implementação de técnicas de acionamento sensorless.
 - Estudo e implementação de técnicas de acionamento “*flux-boosting*” para a geração apresentada em [3].
-

APENDICE A – CÓDIGO FONTE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO *REAL TIME*

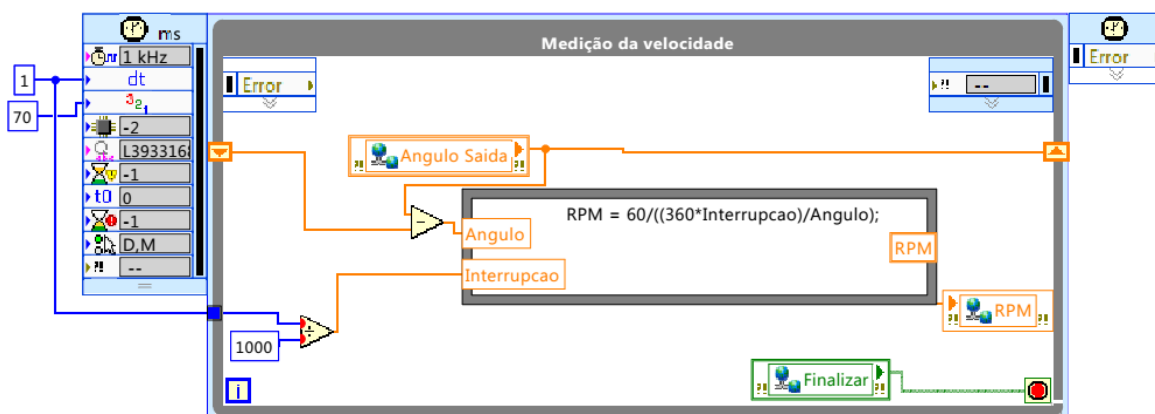
- Tela Principal do gerenciador de projetos do LabVIEW.



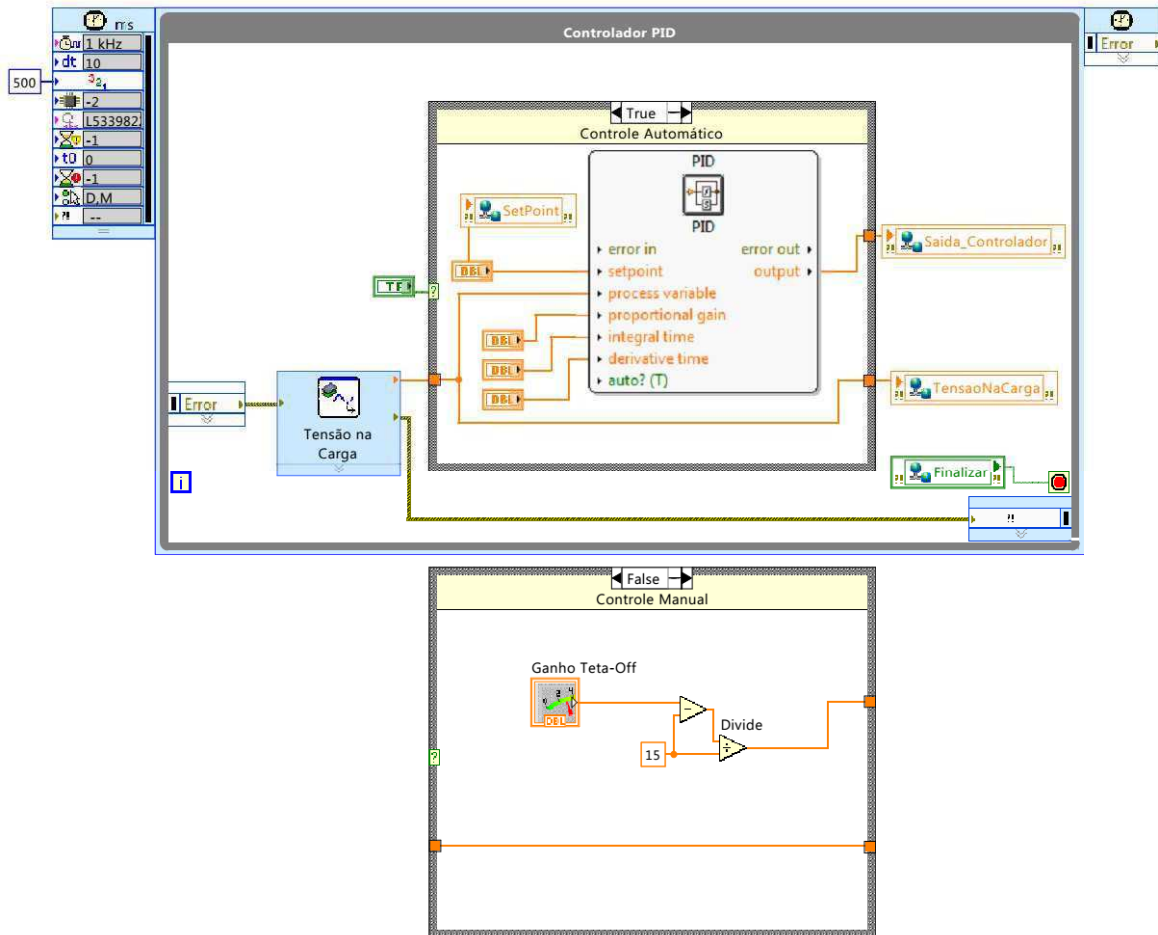
- Função principal de acionamento (Arquivo main.vi)



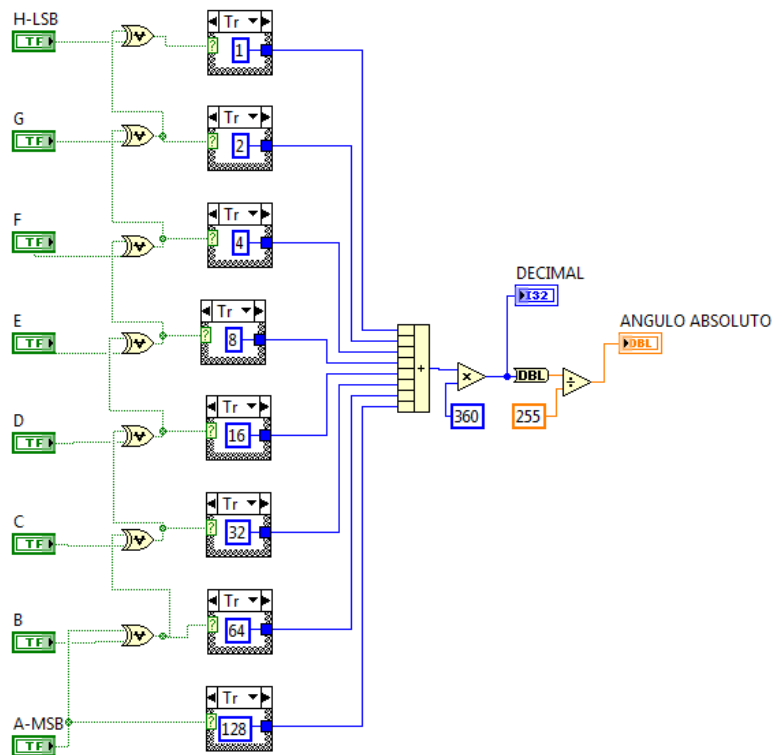
- Função para medição da velocidade da MRV em aplicações como motor. (Arquivo main.vi)



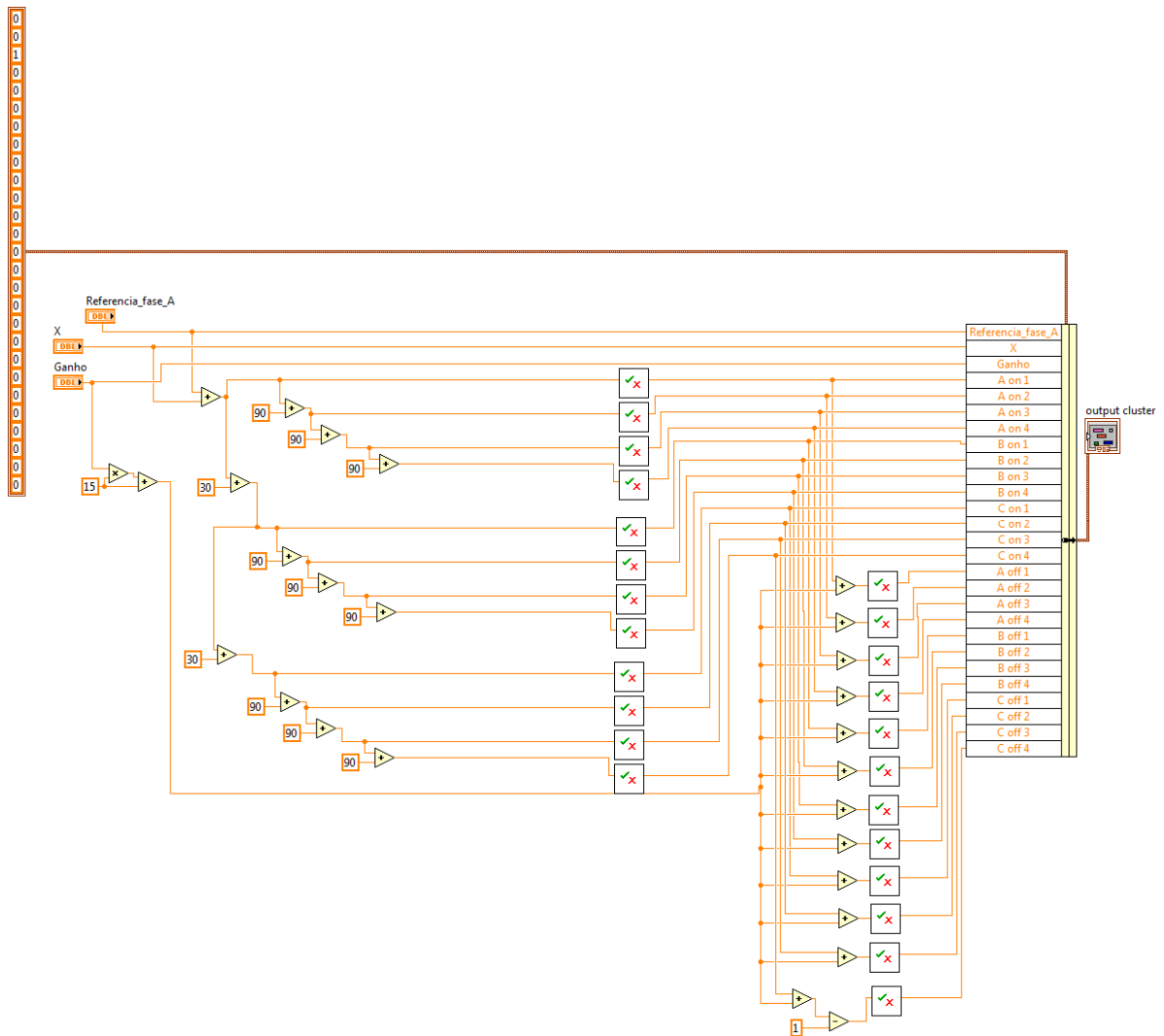
- Função para controle em malha fechada (PID) / malha aberta (manual). (Arquivo main.vi)



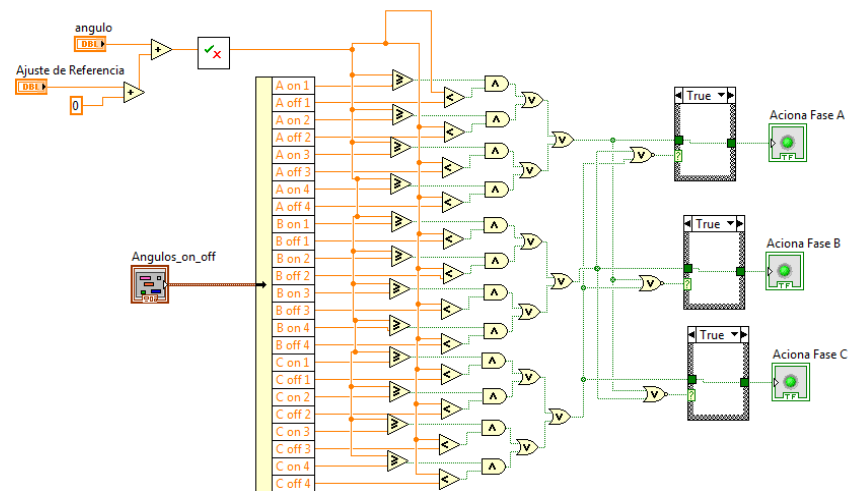
- Função para conversão do código Gray em posição angular. (Arquivo gray_dec.vi)



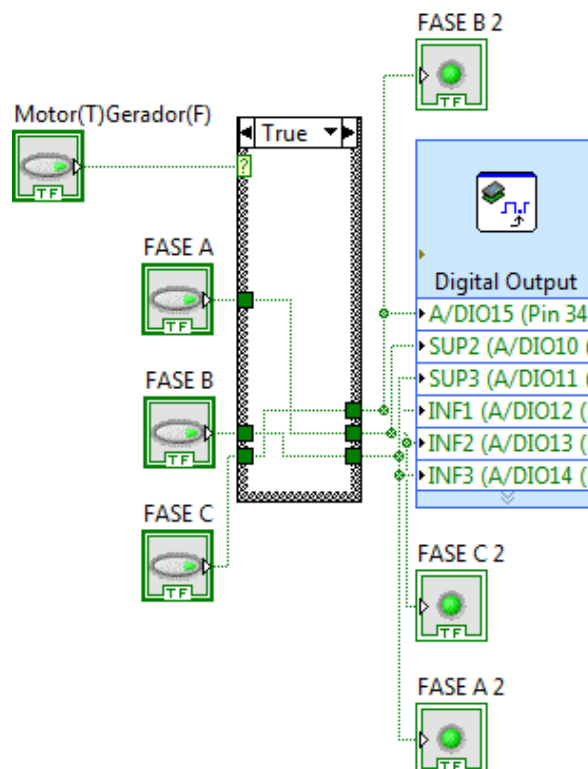
- Função para criar todos ângulos θ_{on} e θ_{off} . (Arquivo Gera_Angulos_on_off)



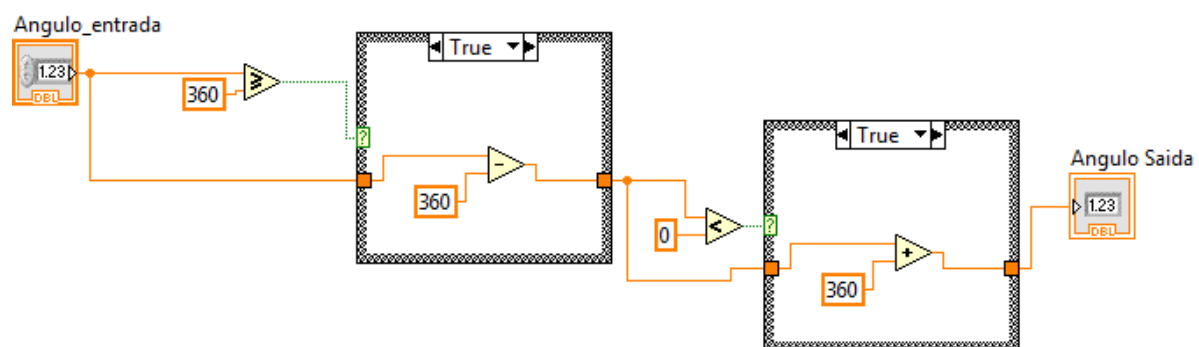
- Função para decidir qual fase deverá ser acionada. (Arquivo Pulsos_de_disparo.vi)



- Função para atualizar e escrever na saída digital. (Arquivo Saida.vi)

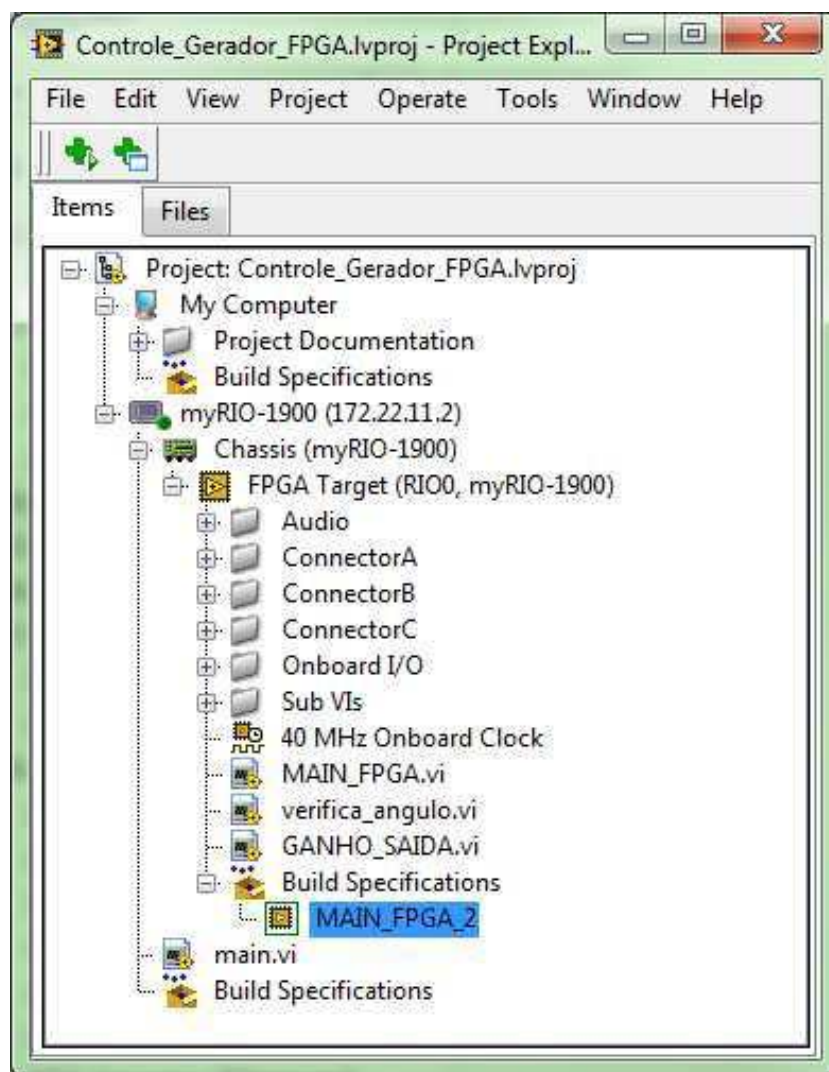


- Função para avaliar e corrigir o ângulo. (Arquivo Verifica_angulo.vi)

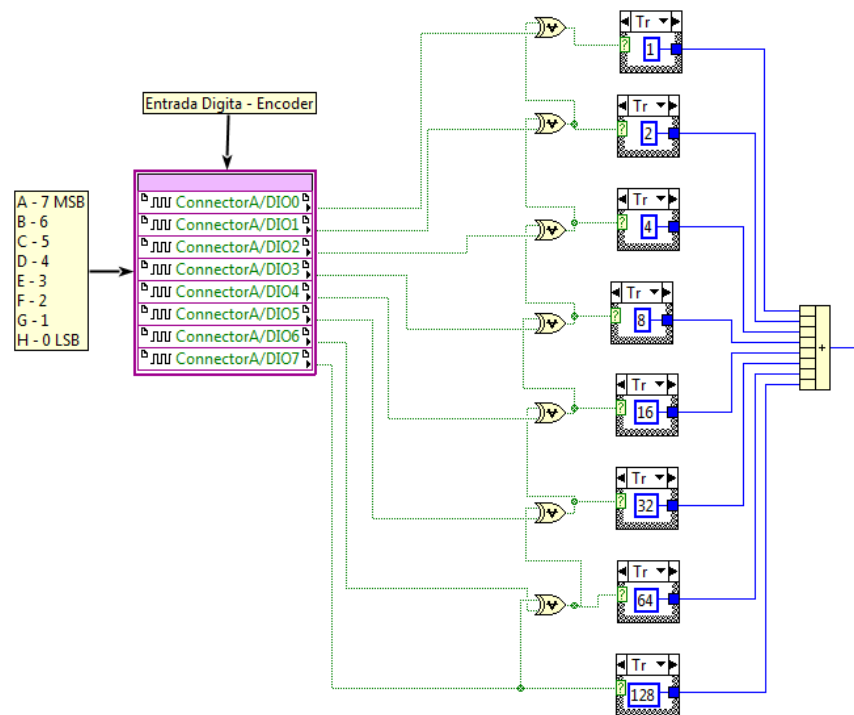


APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO FPGA

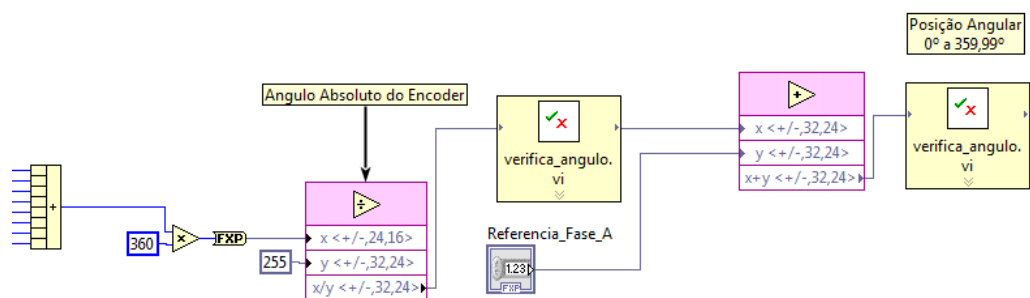
- Tela principal do gerenciador de projetos do LabVIEW.



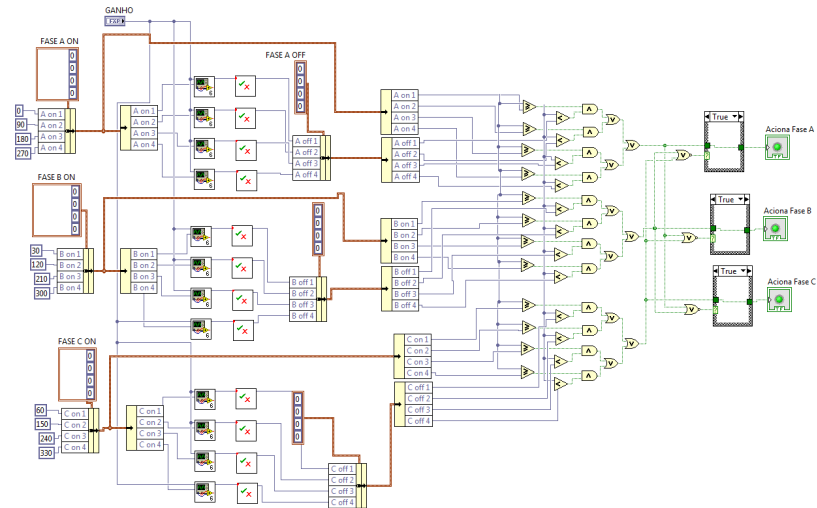
- Leitura do Encoder e conversão em valor decimal.



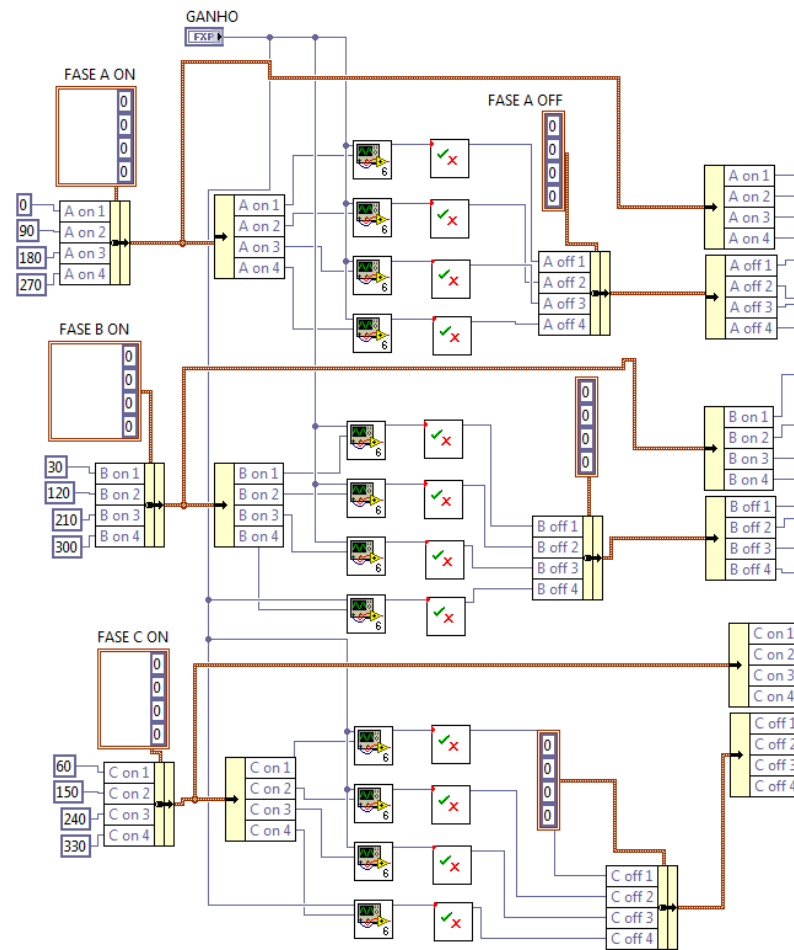
- Obtenção do ângulo lido do encoder a partir do valor decimal resultante da conversão Gray/Binário/Decimal.



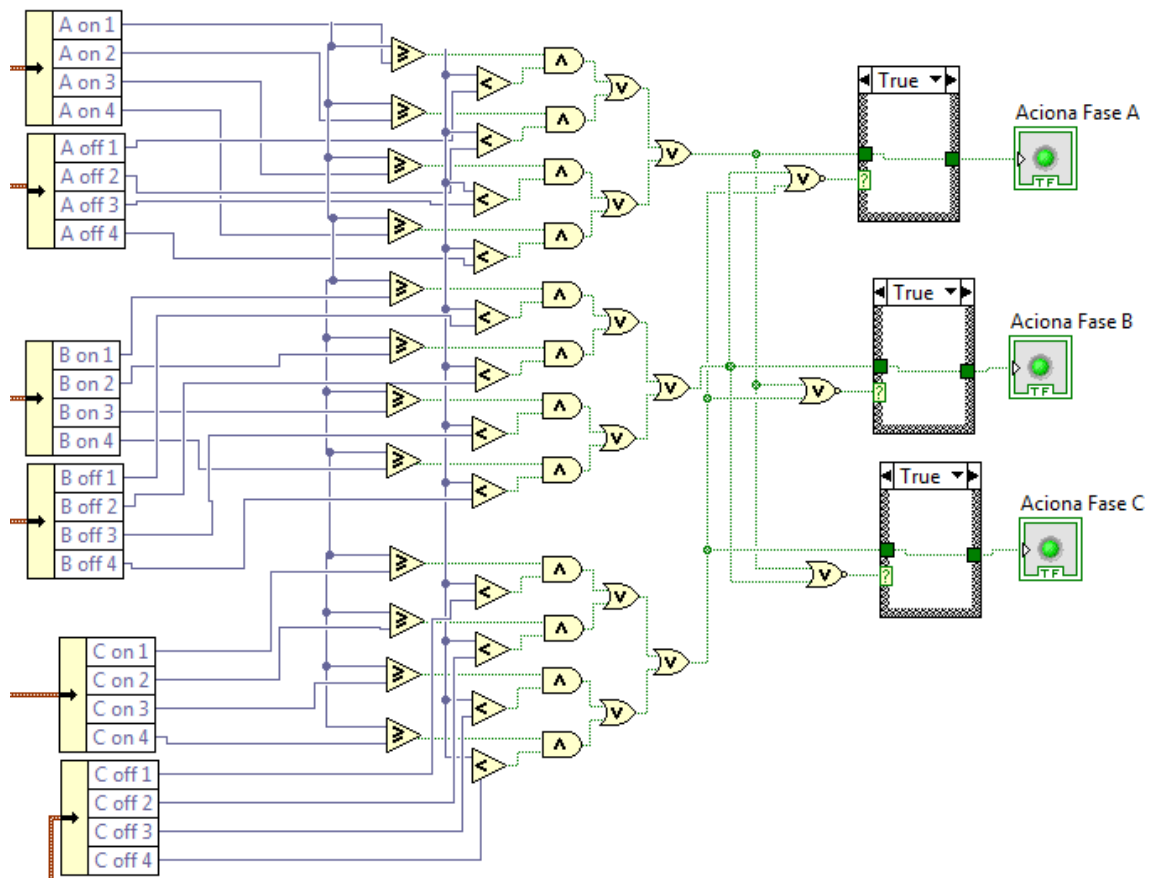
- Visão geral da função de geração de ângulos θ_{on} e θ_{off} , avaliação do instante de acionamento de cada fase da MRV, Acionamento das saídas.



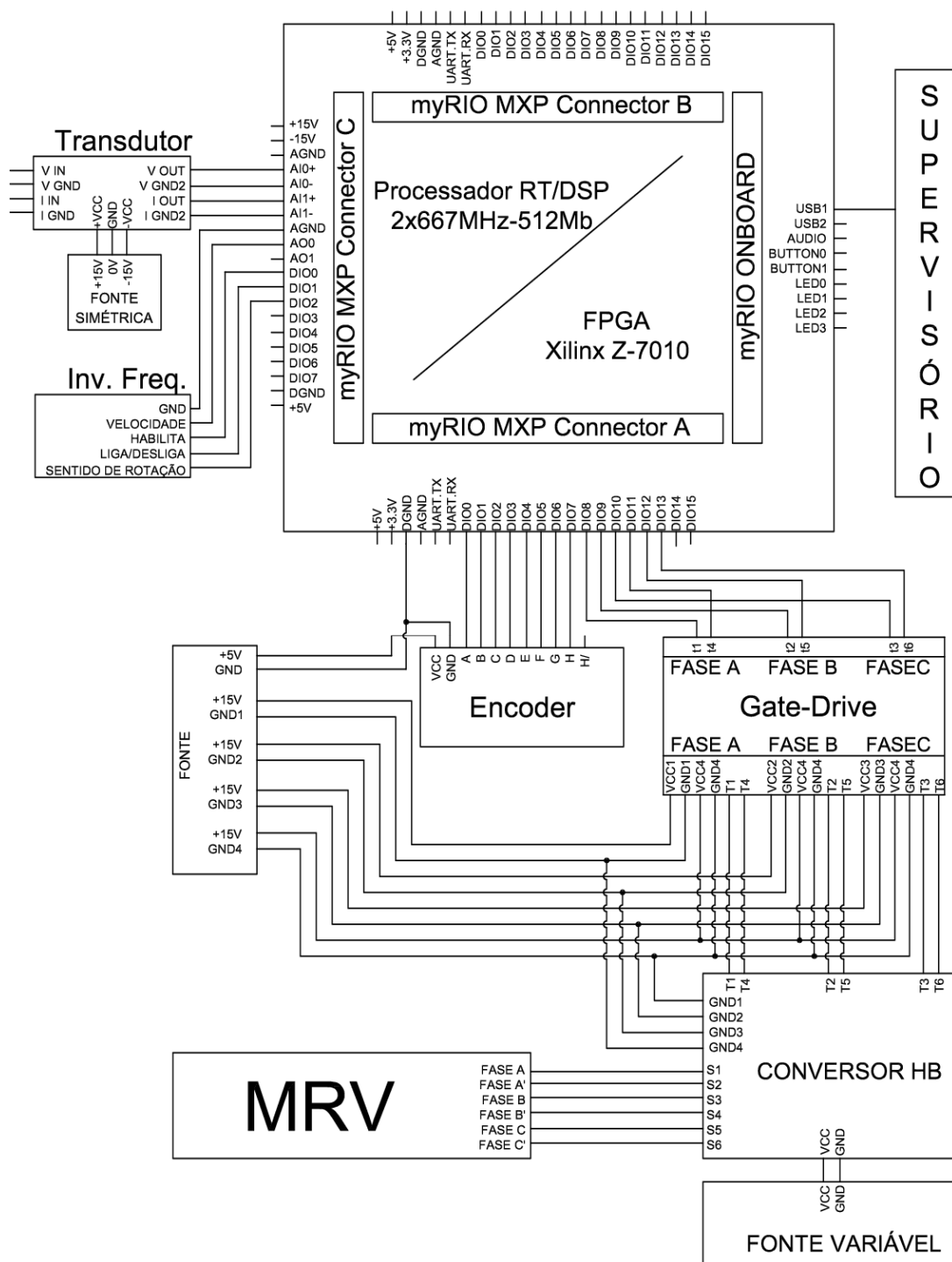
- Trecho do código responsável pela geração dos ângulos de acionamento.



- Trecho do código responsável pela avaliação da fase a ser acionada e acionamento da saída digital.



APENDICE C – INTERLIGAÇÃO ENTRE OS CIRCUITOS



APENDICE D – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO ENSAIO DE VELOCIDADE CONSTANTE

Tensão Excitação [V]	θ_{off} [Graus]	Potência média Excitação [W]	Tensão Carga [V]	Potência Carga [W]	Carga [Ω]	Velocidade [RPM]
5,00	15,00	1,00	11,20	1,90	66,10	900,00
5,00	18,00	1,50	16,00	3,87	66,10	900,00
5,00	21,00	2,00	22,00	7,32	66,10	900,00
5,00	24,00	3,00	27,50	11,44	66,10	900,00
5,00	27,00	4,50	34,80	18,32	66,10	900,00
5,00	30,00	5,00	35,00	18,53	66,10	900,00
10,00	15,00	4,00	24,00	8,71	66,10	900,00
10,00	18,00	5,00	31,90	15,40	66,10	900,00
10,00	21,00	10,00	42,10	26,81	66,10	900,00
10,00	24,00	15,00	52,70	42,02	66,10	900,00
10,00	27,00	19,00	61,50	57,22	66,10	900,00
10,00	30,00	21,00	63,60	61,19	66,10	900,00
15,00	15,00	9,00	53,20	42,82	66,10	900,00
15,00	18,00	13,50	61,00	56,29	66,10	900,00
15,00	21,00	18,00	79,70	96,10	66,10	900,00
15,00	24,00	33,00	102,60	159,26	66,10	900,00
15,00	27,00	45,00	125,00	236,38	66,10	900,00
15,00	30,00	60,00	143,00	309,36	66,10	900,00
20,00	15,00	18,00	60,10	54,64	66,10	900,00
20,00	18,00	24,00	84,30	107,51	66,10	900,00
20,00	21,00	40,00	110,10	183,39	66,10	900,00
20,00	24,00	46,00	138,90	291,88	66,10	900,00
20,00	27,00	92,00	170,00	437,22	66,10	900,00
20,00	30,00	118,00	193,00	563,52	66,10	900,00
25,00	15,00	40,00	72,00	78,43	66,10	900,00
25,00	18,00	57,50	103,00	160,50	66,10	900,00
25,00	21,00	72,50	131,00	259,62	66,10	900,00
25,00	24,00	82,50	172,00	447,56	66,10	900,00
25,00	27,00	115,00	205,00	635,78	66,10	900,00
25,00	30,00	125,00	231,00	807,28	66,10	900,00

APENDICE E – RESUMO DOS DADOS COLETADOS NO ENSAIO DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Tensão Excitação [V]	θ_{off} [Graus]	Potência média Excitação [W]	Tensão Carga [V]	Potência Carga [W]	Carga [Ω]	Velocidade [RPM]
15,00	15,00	10,50	43,00	27,97	66,10	600,00
15,00	18,00	21,00	59,10	52,84	66,10	600,00
15,00	21,00	22,50	71,20	76,69	66,10	600,00
15,00	24,00	34,50	93,20	131,41	66,10	600,00
15,00	27,00	46,50	119,60	216,40	66,10	600,00
15,00	30,00	73,50	137,70	286,86	66,10	600,00
15,00	15,00	12,00	46,90	33,28	66,10	750,00
15,00	18,00	13,50	62,30	58,72	66,10	750,00
15,00	21,00	18,00	75,60	86,47	66,10	750,00
15,00	24,00	25,50	100,60	153,11	66,10	750,00
15,00	27,00	45,00	123,60	231,12	66,10	750,00
15,00	30,00	69,00	141,50	302,91	66,10	750,00
15,00	15,00	9,00	53,00	42,50	66,10	900,00
15,00	18,00	13,50	61,00	56,29	66,10	900,00
15,00	21,00	18,00	79,70	96,10	66,10	900,00
15,00	24,00	33,00	102,60	159,26	66,10	900,00
15,00	27,00	45,00	125,00	236,38	66,10	900,00
15,00	30,00	60,00	143,00	309,36	66,10	900,00
15,00	15,00	10,50	44,30	29,69	66,10	1050,00
15,00	18,00	13,50	60,30	55,01	66,10	1050,00
15,00	21,00	24,00	78,30	92,75	66,10	1050,00
15,00	24,00	43,50	101,30	155,24	66,10	1050,00
15,00	27,00	48,00	115,40	201,47	66,10	1050,00
15,00	30,00	52,50	131,30	260,81	66,10	1050,00
15,00	15,00	18,00	42,30	27,07	66,10	1200,00
15,00	18,00	18,00	61,00	56,29	66,10	1200,00
15,00	21,00	22,50	77,30	90,40	66,10	1200,00
15,00	24,00	31,50	97,60	144,11	66,10	1200,00
15,00	27,00	48,00	115,30	201,12	66,10	1200,00
15,00	30,00	55,50	125,60	238,66	66,10	1200,00

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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. *Eletronic 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 comprensive 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.
- [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 Exceitation**. 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.
-