



COPPE/UFRJ

**SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA – SAEC
IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL**

Mauricio El-Mann

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

Orientadores: Richard Magdalena Stephan
Luís Guilherme Barbosa Rolim

Rio de Janeiro
Setembro de 2009

SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA – SAEC
IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

Mauricio El-Mann

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

Aprovada por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.

Prof. Maria Dias Bellar, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2009

El-Mann, Mauricio

Sistema Armazenador de Energia Cinética –
SAEC – Implementação Experimental / Mauricio El-Mann. –
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 87 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Lúís Guilherme Barbosa Rolim

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 83-87

1. *Flywheel*. 2. Armazenador de Energia. 3. Eletrônica
de Potência. I. Stephan, Richard Magdalena. et al. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Elétrica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Em memória de meu tio José Hofnung, que tanto incentivo me deu e tão cedo partiu.

À minha avó Jenta, pelo infindável orgulho em meus passos.

Aos meus pais Joseph e Elena, por aceitarem se privar de minha companhia pelos estudos, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais. Meus admiradores, que inculcaram em mim persistência, coragem, determinação e amor ao próximo.

As minhas irmãs Marisa e Danielle pela amizade que sempre nos unirá e o total apoio e felicidade no caminhar para o sucesso.

À minha amada futura esposa e fiel companheira Lilian, que é a essência em minha vida e a quem sempre me nutre de tamanha força, mesmo quando uma faísca apenas exista lá ao fundo do túnel e ela a transforma em luz com sua compreensão, carinho, esperança e seu amor eterno para me ver galgar com êxito.

Ao meu sobrinho Eduardo Saul, um presente em nossas vidas.

Aos meus tios Semita, Raquel e Henrique e cunhados Paulo e Roberto, sempre interessados em minha trajetória.

A todos meu amor e gratidão eterna!

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente e principalmente a Hashem (D'us), por tudo que Ele me proporcionou e continua proporcionando durante toda a minha vida.

À Marinha do Brasil, por me conceder o estudo ao mestrado, por possibilitar a absorção de conhecimentos e ensinamentos, que serão aplicados em prol de nossa instituição em seu cotidiano e por mais uma realização profissional em minha trajetória.

Aos meus orientadores, Professores Richard Magdalena Stephan e Luís Guilherme Barbosa Rolim, que sempre me orientaram desde o início do projeto com muito saber, dedicação, paciência, responsabilidade e atenção até poder galgar sozinho na escrita final de minha dissertação. Obrigado por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Professor José Luiz da Silva Neto, que sempre se fez presente para dirimir quaisquer dúvidas que iam surgindo ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Rubens de Andrade Júnior, por sua colaboração em ensinamentos de cunho teórico e prático no laboratório da universidade.

Ao corpo docente que me guiou, aprimorou e brilhou em meu caminho durante todo meu trajeto, que são profissionais exemplares e que conduzem o orientando em cada etapa até a finalização do trabalho com eficiência e inteligência. Isto tudo foi essencial para quem esteve afastado do meio acadêmico por quase uma década.

Ao meu orientador na Marinha do Brasil, o Engenheiro de Tecnologia Militar Renato Vianna Barradas, sempre presente e atencioso para orientar e auxiliar em todos pontos críticos e assim permitir o término deste trabalho.

Ao meu fabuloso amigo Marcelo Raposo Ribeiro e companheiro de toda hora que, mesmo nas horas mais difíceis, sempre esteve presente para dar continuidade a execução e término deste trabalho.

Ao amigo Guilherme Sotelo, minha gratidão por sua colaboração e constante apoio ao projeto.

Aos funcionários Ocione, Sérgio e Valberg, que sempre prontamente ajudaram no empréstimo de equipamentos de medição, ferramentas e componentes necessários as montagens dos circuitos experimentais deste trabalho.

Aos colegas Abnery Riquelme, Antônio Borré, Edísio Aguiar Jr., Felipe Padilha, Júlio Ferreira, Marcos Dantas, Silvangela Lílian e Ulisses Miranda que deram suas parcelas de contribuição auxiliando a superar certas dificuldades encontradas pelo caminho.

Aos colegas de estudo meus agradecimentos. E a todos que cooperaram de alguma forma com o desenvolvimento do meu trabalho, pois não gostaria de esquecer de alguém, o meu muito obrigado!

Muito obrigada a todos!

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

SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA - SAEC IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

Mauricio El-Mann

Setembro/2009

Orientadores: Richard Magdalena Stephan
Luís Guilherme Barbosa Rolim

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta os resultados experimentais da implementação de um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC), a partir de simulações realizadas e apresentadas em trabalho recente, visando dar contribuição a mais uma etapa no desenvolvimento de tal sistema no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O SAEC pode ser descrito como um acumulador de energia mecânica e consiste basicamente num volante de inércia de grande massa girando a alta velocidade, que acoplado a um acionamento elétrico, é capaz de converter a energia mecânica em elétrica e vice-versa.

O SAEC em desenvolvimento no laboratório é composto por um volante de inércia, acoplado ao eixo de uma Máquina de Relutância Variável (MRV), que opera como motor/gerador. A MRV é acionada por um conversor de potência em ponte assimétrica (Conversor da MRV), que é interligado a um conversor de potência em ponte completa (Conversor da Rede), por meio de um elo CC (circuito RC). O Conversor da Rede é conectado a rede elétrica por meio de indutores. A energia elétrica pode ser fornecida tanto para o elo CC quanto para a rede CA, de acordo com a aplicação desejada.

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

FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM - FESS PRACTICAL IMPLEMENTATION

Mauricio El-Mann

September/2009

Advisors: Richard Magdalena Stephan
Luís Guilherme Barbosa Rolim

Department: Electrical Engineering

This work presents the experimental results of the practical implementation of a Flywheel Energy Storage System (FESS) that begins with simulations of the FESS and presented in recent work, and proposes to give another step in development of that technology at the Laboratory of Applied Superconductivity of the Federal University of Rio de Janeiro.

The FESS is a mechanical accumulator, where the mechanical energy is stored as kinetic energy in a flywheel. The conversion from mechanical to electrical energy, and vice-versa, is made by a Switched Reluctance Machine (SRM). That device is able to supply energy to an electrical load, during fault occurrences.

The FESS is formed by a flywheel, connected to a SRM, which operates as a motor/generator. This machine is driven by a Half Bridge Power Converter (SRM Converter), which is connected to a Full Bridge Power Converter (Grid Converter), by means of a DC link. The Grid Converter is connected to the electric grid by means of inductors. The electrical energy can be provided to the DC link or to the electric utility, in agreement of the desired application.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estado da Arte	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Organização da Dissertação	5
2 Usos para o SAEC	7
2.1 Motivação	7
2.2 Aplicação do SAEC na área industrial	7
2.3 Aplicação do SAEC em meios de transporte	9
2.4 Aplicações do SAEC na área aeroespacial	10
2.5 Aplicações do SAEC na área militar	11
2.5.1 EMALS	13
2.5.2 <i>Rail Gun</i>	15
2.5.3 <i>E-bomb</i>	16
2.5.4 V-MADS	17
3 Descrição do Sistema Experimental	18
3.1 Introdução	18
3.2 A Máquina de Relutância Variável	19
3.2.1 Construção e características	19
3.2.2 Funcionamento Básico	21
3.3 Os mancais	24
3.4 Os Conversores	26
3.5 O Controle	29
3.6 O <i>encoder</i>	30
3.7 A Montagem	32
4 Lógica de Controle	35
4.1 Estratégia de controle	35
4.2 Sistema de Controle	37

4.3	Aquisição de dados do SAEC	39
4.3.1	Aquisição de dados na configuração monofásica	39
4.3.2	Aquisição de dados na configuração trifásica	41
4.3.3	Aquisição dos pulsos do <i>encoder</i>	42
4.4	Temporizadores	44
4.4.1	<i>Timer</i> 2	44
4.4.2	<i>Timers</i> 1 e 3	44
4.4.3	<i>Timer</i> 4	45
4.5	Cálculo da velocidade angular	46
4.6	Sinais PWM no Controle dos Conversores	47
4.6.1	Sinais PWM na configuração monofásica do SAEC	48
4.6.1.1	Sinais PWM no controle do Conversor da Rede	48
4.6.1.2	Sinais PWM no controle do Conversor da MRV	49
4.6.2	Sinais PWM na configuração trifásica do SAEC	49
4.6.2.1	Sinais PWM no controle do Conversor da Rede	50
4.6.2.2	Sinais PWM no controle do Conversor da MRV	50
4.7	Funcionamento do SAEC	51
4.7.1	Controle do Conversor da Rede	52
4.7.1.1	O SAEC na configuração monofásica	52
4.7.1.2	O SAEC na configuração trifásica	54
4.7.2	Aplicação da falta e a regeneração	56
4.7.3	Acionamento da MRV	56
5	Resultados Experimentais	58
5.1	Introdução	58
5.2	Resultados obtidos no sistema monofásico	59
5.2.1	Regeneração para o elo CC	60
5.2.2	Regeneração para a rede monofásica	62
5.3	Resultados obtidos no sistema trifásico	70
5.3.1	Regeneração para o elo CC	70
5.3.2	Regeneração para a rede trifásica	72
5.4	Resultados práticos x Simulados	77
5.5	Melhorias para o atual protótipo utilizado no laboratório	78
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	80
6.1	Conclusões	80
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros	82
	Referências Bibliográficas	83

Lista de Figuras

3.1	MRV usada na prática e desmontada para manutenção	20
3.2	Acionamento da MRV	22
3.3	MRV com rotor alinhado pela fase A	22
3.4	MRV com rotor alinhado pela fase B	23
3.5	MRV com rotor alinhado pela fase C	23
3.6	Vista do mancal inferior da MRV	25
3.7	Funcionamento da MRV com mancal supercondutor	25
3.8	Sistema mecânico completo	26
3.9	Circuito do SAEC	27
3.10	Forma da corrente na aceleração da MRV	27
3.11	Estados das chaves	28
3.12	Conversores e controle do SAEC	29
3.13	Ambiente de programação do software usado	30
3.14	<i>Encoder</i> utilizado na MRV	31
3.15	Circuito para conversão Pulsos/Tensão	32
3.16	Circuito para condicionamento do sinal de velocidade	32
3.17	Circuito para a entrada das tensões de fase	33
3.18	Circuito para o condicionamento dos sinais de fase	34
3.19	Controle e medições do SAEC	34
4.1	Estratégia de controle adotada	36
4.2	Placa controladora	38
4.3	Aquisição de dados na configuração monofásica	40
4.4	Aquisição de dados na configuração trifásica	42
4.5	Obtenção dos sinais do <i>encoder</i>	43
4.6	Temporizador Timer 2	44
4.7	Configuração dos <i>Timers</i> 1 e 3	45
4.8	Temporizador Timer 4	45
4.9	Temporizadores 3 e 4 associados a primeira rotina de velocidade	46
4.10	Temporizadores 3 e 4 associados a segunda rotina de velocidade	47
4.11	Controle por PWM na configuração monofásica	48
4.12	Controle por PWM na configuração trifásica	50
4.13	Controle do Conversor da Rede	52

4.14	PLL implementado nas configurações monofásicas	53
4.15	Controle vetorial monofásico	54
4.16	Diagrama em blocos do PLL trifásico implementado no DSP	55
4.17	Controle vetorial trifásico nas configurações trifásicas do SAEC	56
5.1	Circuito usado para alimentação de carga no elo CC	59
5.2	Circuito usado para alimentação de carga na rede	59
5.3	Potência na carga	60
5.4	Tensão no elo CC	61
5.5	Velocidade da MRV	62
5.6	Potência na entrada do sistema	63
5.7	Tensão na entrada do sistema	64
5.8	Velocidade da MRV	65
5.9	Potência na entrada do sistema	66
5.10	Tensão na entrada do sistema	66
5.11	Velocidade Angular da MRV	67
5.12	Tensão na entrada do sistema	68
5.13	Detalhe da tensão na entrada do sistema	68
5.14	Potência na entrada do sistema	69
5.15	Velocidade final da MRV atingida em 2 passos	69
5.16	Potência na carga	71
5.17	Tensão na carga	71
5.18	Velocidade Angular da MRV	72
5.19	Tensões na entrada do sistema	73
5.20	Velocidade da MRV	73
5.21	Correntes na entrada do sistema	74
5.22	Potência na carga	74
5.23	Velocidade Angular da MRV	75
5.24	Velocidade Angular da MRV	77

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar a motivação do uso do Sistema de Armazenamento de Energia Cinética (SAEC) como uma possível solução tecnológica para problemas da qualidade de energia elétrica em diversos ambientes ou sistemas.

1.1 Motivação

Cada vez mais, equipamentos eletrônicos têm sido projetados e montados com circuitos semicondutores operando com baixas tensões de alimentação, apresentando grande sensibilidade para problemas de qualidade de energia. Em se tratando de aplicação da eletrônica em áreas sensíveis como a médica ou militar, a qualidade de energia elétrica passa a fazer parte de um processo de discussão quanto à implicação de uma interrupção de fornecimento da mesma.

Entre alguns problemas causadores de distúrbios na qualidade de fornecimento de energia elétrica pode-se citar os picos de tensão, variação na frequência da rede, afundamentos de tensão, pequenas interrupções e transientes, entre outras.

Sistemas de alimentação a partir de baterias, geradores ou qualquer dispositivo de acúmulo de energia são fundamentais para serviços que não podem parar de funcionar ou sofrer interferências.

Um mecanismo de armazenamento de energia cinética, como o que será assunto

nesta dissertação, passará a ser aplicado, em futuro próximo, na área militar. Navios aeródromos norte-americanos estão sendo construídos com este tipo de acumulador de energia para suporte ao lançamento de aeronaves. Com base no conhecimento do potencial dos sistemas de armazenamento de energia cinética de última geração, vislumbra-se a aplicação destes dispositivos em uma grande gama de áreas e situações. A possibilidade real de uso do SAEC na área militar, particularmente no meio naval, foi uma das razões pela qual o autor se sentiu motivado para o desafio de entendimento e desenvolvimento deste dispositivo acumulador de energia cinética.

1.2 Estado da Arte

Um volante de inércia é um elemento mecânico antigo e bem conhecido, que adiciona uma inércia a um sistema de modo a armazenar energia cinética quando em movimento rotacional. São elementos usados em grande parte das máquinas motrizes e continuam seu movimento, por inércia, quando varia o conjugado do motor que os movimenta. Desta forma, o volante de inércia se opõe às acelerações bruscas de um movimento rotativo conseguindo, então, diminuir as flutuações de velocidade angular do conjunto ou retardar a perda de velocidade. Este tipo de sistema é conhecido por *Flywheel* e foi muito utilizado na Revolução Industrial em máquinas a vapor que se utilizavam de grandes volantes de inércia. Este sistema simples e bastante conhecido pode ser classificado como de 1ª geração [1].

O contínuo avanço e barateamento de sensores, semicondutores e componentes eletrônicos em geral, permitiu o aumento do uso da eletrônica de potência na aplicação de métodos de controle em vários dispositivos elétricos que requeriam um controle complexo e não tão simples como o dispositivo a controlar. Isto permitiu o uso intensivo da Eletrônica Digital e Eletrônica de Potência em muitas linhas de pesquisa, incluindo os sistemas que trabalhavam com acumuladores de energia. Passou-se a utilizar esta tecnologia disponível para o controle destes sistemas permitindo a alimentação de cargas elétricas com tensões e frequências desejadas. A implementação de um sistema com controle digital que possa colocar uma massa girante em uma determinada velocidade e a existência de conversores,

formados por semicondutores de potência, que possam controlar o fluxo de energia e gerar tensões e frequências desejadas para determinada aplicação, é tema desta dissertação e será chamado SAEC ou FESS (*Flywheel Energy Storage System*). Este sistema pode ser considerado de 2ª geração [1].

O desenvolvimento tecnológico permitiu que determinados sistemas SAEC que anteriormente não apresentavam resultados satisfatórios para aplicações comerciais pudessem tornar-se viáveis e promissores para o emprego nas áreas industrial, militar e espacial por meio de melhorias nos materiais e componentes utilizados no sistema. Observando-se a equação 1.1 a seguir, nota-se que melhorias no sistema podem ser obtidas se estudado o que pode ser realizado para o aumento da energia cinética a ser armazenada no volante de inércia.

$$E_c = \frac{Iw^2}{2} \quad (1.1)$$

onde I é o momento de inércia do volante e w sua velocidade angular.

Pode ser observado que a energia cinética armazenada aumentará muito cada vez que se aumentar a velocidade angular, já que esta variável está elevada ao quadrado. O aumento da velocidade, por si só, conduz a pesquisas para o aprimoramento em diversos fatores, com o conseqüente aumento da confiabilidade do sistema. Dentre vários fatores que podem contribuir para o aumento da energia acumulada no sistema através do uso de elevadas velocidades, pode-se citar:

- O uso de novos materiais na confecção do rotor como, por exemplo, fibras e resinas, de modo a aumentar de maneira suficiente a resistência mecânica para operação em altas velocidades com a confiabilidade desejada;
- A aplicação da eletrônica de potência de forma a tornar o processo de conversão de energia mais eficiente através da diminuição de perdas elétricas;
- O uso de vácuo de forma a reduzir as perdas das partes mecânicas com o ar (atrito viscoso)
- A utilização de sistema de mancais que possibilitem a redução de atritos por contato com a utilização de mancais magnéticos e supercondutores.

Estes tipos de recursos e melhorias já são utilizados e com isso se chega a 3ª geração destes sistemas armazenadores de energia cinética [1]. O protótipo, assunto desta dissertação, já possui algumas das melhorias descritas acima e que serão apresentadas em capítulo posterior.

Como dito anteriormente, diversas pesquisas foram e estão sendo feitas para tornar o SAEC atrativo em aplicações onde outros elementos armazenadores de energia eram ou são usados. Dentre os vários fatores que podem contribuir para o SAEC de 3ª geração substituir os outros elementos acumuladores, pode-se citar: as menores perdas durante a conversão de energia, a diminuição das perdas por atrito devido à utilização de mancais supercondutores, menor tempo para recarga do sistema, elevado tempo de vida útil, crescente aumento de densidades de energia e potência e de energia total acumulada. Desta forma, os SAEC de 3ª geração podem ser considerados como dispositivos de armazenamento de energia promissores, principalmente, para aplicações que requeiram muitos ciclos de carga/descarga, curtos intervalos de tempo para recarga do sistema e em outras onde se exige maiores potências elétricas [1], [2], [3].

1.3 Objetivos

Este trabalho objetiva conceber uma implementação experimental baseada em uma estratégia de controle adequada ao funcionamento do SAEC, tomando como caso-exemplo uma aplicação de compensação durante faltas, isto é, o uso do SAEC como UPS (*Uninterruptible Power Supply*). A referência para a implementação são as simulações realizadas no software PSCAD [2], e serão apresentados resultados envolvendo algumas etapas de operação do sistema desde sua inicialização, aplicação da falta até a regeneração da máquina utilizada na aplicação.

A seguir são listados alguns passos importantes e necessários para a consecução dos objetivos almejados:

- Montagem do *hardware* para o funcionamento do SAEC em sua configuração monofásica;

- Desenvolvimento de códigos para serem inseridos em DSP (*Digital Signal Processor*) para controle do SAEC em sua configuração monofásica;
- Testar o funcionamento da configuração monofásica nas opções de regeneração para o elo CC e para a rede;
- Montagem do *hardware* para o funcionamento do SAEC em sua configuração trifásica;
- Desenvolvimento de códigos para serem inseridos em DSP para controle do SAEC em sua configuração trifásica;
- Testar o funcionamento da configuração trifásica nas opções de regeneração para o elo CC e para a rede;
- Montagem e inserção de circuitos e instrumentos de medição para a obtenção dos resultados práticos nas configurações monofásica e trifásica;

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação propõe a implementação experimental de uma estratégia de controle para um SAEC, em um protótipo que utiliza uma MRV (Máquina de Relutância Variável) para a conversão de energia elétrica em mecânica, e vice-versa. Esta implementação tomou por base as simulações dos SAEC realizadas no software de simulação PSCAD, que são descritas e detalhadas em [2]. Foram simulados SAEC para aplicação em configurações monofásicas e trifásicas, para alimentação de cargas críticas em Corrente Contínua e Corrente Alternada, caracterizando o emprego do SAEC como UPS (*Uninterruptible Power Supply*).

No segundo capítulo são brevemente apresentadas algumas aplicações que estão em andamento ou em estudo, no meio civil e militar, de sistemas armazenadores de energia.

O terceiro capítulo apresenta e descreve os dispositivos que formam o SAEC implementado em laboratório.

No quarto capítulo são apresentados diagramas em blocos e explicações das lógicas implementadas no DSP nos vários arranjos realizados no protótipo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados práticos mais importantes obtidos a partir das experiências realizadas em laboratório.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as considerações sobre os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Usos para o SAEC

Este capítulo tem como objetivo apresentar algumas áreas nas quais estes sistemas são utilizados e alguma motivação para a aplicação de um Sistema de Armazenamento de Energia Cinética na área militar ou, mais especificamente falando, no meio naval.

2.1 Motivação

O emprego de novos materiais e técnicas permitem um maior acúmulo de energia, e a obtenção de maiores densidades de energia e potência em relação às soluções convencionais, mostram a viabilidade da utilização do SAEC em muitas aplicações nas mais variadas áreas.

2.2 Aplicação do SAEC na área industrial

A Qualidade de Energia pode ser entendida de maneira simples e rápida como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos. Problemas como magnitude da tensão, frequência, cintilação (*Flicker*), variações de tensão de curta duração, interrupção de tensão, desequilíbrio de tensão, tensões transitórias e tensões

harmônicas, são alguns dos parâmetros que devem ser considerados quando se trata de qualidade de energia.

As situações transitórias na rede elétrica são comuns e podem ser ocasionadas por descargas atmosféricas, correntes de partida de grandes motores, pelos efeitos de chaveamentos de capacitores em linhas de transmissão, entre outros. Estes distúrbios que ocorrem nos sistemas podem provocar inúmeras interferências indesejáveis como acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis, podendo chegar até mesmo a interrupção do fornecimento de energia. O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas.

Defeitos em aparelhos eletrônicos (TV, DVD, computador, geladeira, etc), causados por oscilações de tensão no fornecimento de energia, levam ao estudo de soluções para o problema na qualidade de fornecimento de energia elétrica em uma área residencial. Com a proliferação de equipamentos eletrônicos sensíveis, e muitos com controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis, exige-se cada vez mais qualidade no sinal elétrico entregue pelas concessionárias.

A indústria vem realizando uma crescente integração dos processos, significando que a falha de qualquer componente do processo poderá trazer conseqüências importantes para sua produção. Em uma indústria, um problema de qualidade de energia, como um afundamento de tensão, pode proporcionar uma falha em um equipamento de controle, causando a perda de peças de sua produção e a possível diminuição do tempo de vida útil de equipamento de um processo vital. A parada da linha de produção ou o refugo do produto em alguma etapa do processo poderá acarretar em um alto prejuízo.

Com a possibilidade do sistema elétrico sofrer alterações devido a ocorrência de distúrbios culminando em uma deterioração da qualidade do fornecimento de energia elétrica, muitas indústrias optaram por adquirir equipamentos que possam melhorar a qualidade da energia recebida.

O SAEC vem sendo estudado [4] e utilizado em várias áreas, no meio civil, na função de uma fonte ininterrupta de energia ou UPS, para assegurar a continuidade

e qualidade da energia elétrica recebida. Energia cinética no valor máximo de 19MWs armazenada no volante de inércia é encontrada nas especificações de um fabricante [5]. No caso de uma pequena interrupção até a completa suspensão de fornecimento de energia elétrica pela concessionária, o SAEC entraria (ao invés de um tradicional banco de baterias) inicialmente para suportar o tempo necessário para o gerador diesel iniciar seu funcionamento e dar continuidade ao fornecimento de energia, com qualidade, até o reestabelecimento de energia pela concessionária. No caso do distúrbio ser de curta duração, o SAEC evitaria o acionamento do gerador de emergência e conseqüentemente a poluição emitida pelo mesmo e o desgaste de suas peças. Este UPS é um equipamento robusto e com capacidade para dar suporte a uma ampla faixa de carga por um tempo relativamente longo.

Outro exemplo de aplicação do SAEC é na economia de energia ou combustível em guindastes utilizados para manobra de contêineres [6]. O volante de inércia do SAEC é acelerado quando o guindaste é operado para a descida da carga e a energia acumulada é utilizada para auxílio no levantamento de um próximo contêiner, economizando combustível do diesel gerador e diminuindo a emissão de gases para a atmosfera.

2.3 Aplicação do SAEC em meios de transporte

O estudo e aplicação de SAEC também contribui na área automotiva e de transporte público para compor os sistemas de propulsão de ônibus, trens, carros elétricos e híbridos [7], [8], [9]. Como qualquer produto lançado no mercado, muitos aspectos, como tamanho, peso, confiabilidade, segurança e custo, são estudados de modo a viabilizar a comercialização do Flywheel neste nicho de mercado.

O conceito de um flywheel alimentando um ônibus foi desenvolvido na década de 40 para a substituição dos ônibus elétricos que na época circulavam [10]. Ao invés de utilizar um motor de combustão ou baterias ou recebendo energia elétrica através de linhas aéreas, o ônibus carregaria um flywheel que rodaria a 3000 RPM por um motor de indução. O Flywheel seria carregado nas estações e usado para a tração, entre as mesmas, usando a transformação de energia cinética em elétrica. Este sistema tinha a vantagem de não ser poluente, ser silencioso e não precisar do ônibus rodar em

trilhos, mas em compensação havia o problema do peso, a necessidade da segurança dos passageiros contra a velocidade do volante de inércia e a atuação do Flywheel como um giroscópio resistindo às mudanças de direção do veículo.

No setor do transporte subterrâneo ou dos metrô a energia armazenada no SAEC traria alguns benefícios como prover potência nas horas de pico, estabilizar as flutuações de tensão devido às grandes variações de carga e redução do consumo de energia aumentando o uso do freio regenerativo.

O freio regenerativo é o mecanismo com que se reduz a velocidade do veículo convertendo parte da energia cinética em energia armazenada ao invés de dissipar em forma de calor como se faz normalmente através de freio mecânico e banco de resistores. A energia armazenada é usada para alimentar de volta à rede elétrica para uso de outros veículos. Em caso de carros híbridos ou carros com baterias, a energia é armazenada em banco de baterias ou capacitores para uso posterior. As baterias têm um tempo de vida limitado, dependente da temperatura, de quantas vezes é descarregada e da profundidade da descarga. A energia poderá ser armazenada rodando um flywheel.

Um SAEC com o nome de KERS (*Kinetic Energy Recovering System*) é uma novidade no círculo de Fórmula 1 no ano de 2009. A potência fornecida pelo KERS representa cerca de 10% da potência máxima de um motor de F-1 e poderá ser particularmente útil em ultrapassagens.

2.4 Aplicações do SAEC na área aeroespacial

A partir da inevitável evolução do SAEC como substituto à tradicional solução de banco de baterias como fonte de armazenamento de energia, a ideia de seu emprego no espaço passou a ser realizável através de trabalhos realizados por pesquisadores de empresas e da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) [11], [12], [13]. Estes pesquisadores iniciaram o desenvolvimento de SAEC especialmente concebidos para o espaço de modo a substituição de baterias na Estação Espacial Internacional. O SAEC poderia suprir a carga com 3 vezes mais tempo do que a bateria utilizada.

Passando-se de uma aplicação de uma estação espacial para um satélite em órbita, poderia se pensar na substituição de baterias por um SAEC já que este último não teria a limitação de uma vida útil de uns 5 anos e sim, provavelmente, a própria vida do satélite. O satélite, enquanto estivesse em posição de modo a seu painel solar estar recebendo luz solar, estaria fornecendo energia elétrica ao SAEC, que estaria girando e acumulando energia para quando o satélite entrasse na sombra da terra. Neste momento, a energia mecânica seria convertida em energia elétrica para alimentar os sistemas elétricos vitais do satélite. Para o teste e garantia da confiabilidade do SAEC, pensou-se inicialmente na aplicação deste sistema em conjunto com o banco de baterias normalmente usado nestes satélites [14].

Um efeito importante do uso de um sistema flywheel em uma nave espacial é o efeito giroscópio em que este equipamento acrescenta ao sistema como um todo. Nestes casos, o projeto tem que estabelecer as topologias como por exemplo o uso de equipamentos girando em sentidos contrários ou outra solução para criar um efeito giroscópico nulo. Este efeito está relacionado a tendência de um corpo que gira a uma elevada velocidade de manter inalterada a posição de seu eixo de rotação. Este efeito é tanto maior quanto maior for a velocidade rotacional e o peso do corpo.

2.5 Aplicações do SAEC na área militar

É de conhecimento popular que muito da tecnologia usada na área da medicina, automotiva, comunicação, entre outras, é oriunda da busca pelo desenvolvimento bélico onde muito dos experimentos são realizados e testados nos campos de batalha. Inúmeras tecnologias encontradas atualmente em produtos, processos ou serviços, foram desenvolvidas inicialmente e especificamente para atender as necessidades das forças armadas, e que acabaram sendo utilizadas na produção de bens e serviços de uso civil. A INTERNET, originalmente desenvolvida por uma agência do Departamento de Defesa dos EUA com o nome de ARPANET, visava assegurar as comunicações em todo território através de uma rede de computadores interligados, mesmo que parte do sistema fosse destruído. Outro exemplo é o GPS (*Global Positioning System*), muito usado hoje por condutores de veículos e até por usuários de celulares com este recurso embutido.

Ao mesmo tempo em que empresas se dedicam ao desenvolvimento de SAEC que possam ser aplicados em áreas onde possam dar um retorno financeiro, outras se dedicam a realizar o estudo, o desenvolvimento e até a aplicação desta tecnologia nos carros de combate, aeronaves e navios e dar suporte aos novos conceitos de dispositivos bélicos a serem empregados no meio militar.

All-Electric Ship é um novo conceito que tem sido estudado, onde os sistemas auxiliares a vapor, hidráulicos, pneumáticos são substituídos por sistemas elétricos e combinados à planta de propulsão, também elétrica. Resumindo, todas as cargas elétricas, como bombas e iluminação, são alimentadas pela mesma fonte que o sistema de propulsão, restando somente configurar os fechamentos dos circuitos de interligação entre as fontes e as cargas. Dentre os benefícios pode-se citar a redução de equipamentos primários de energia, redução dos custos com economia de combustível, menos manutenção e tripulação pela redução de equipamentos, mais espaço disponível para outros dispositivos e menos ruído com o conseqüente aumento de poder de ocultação. Este conceito, que faz uso de conversores para a distribuição elétrica ao longo do navio, aumenta a confiabilidade e a qualidade de energia entregue aos equipamentos utilizadores de bordo.

Baseado neste conceito apresentado no parágrafo anterior, pode-se dividir a planta elétrica de um navio em quatro setores: planta geradora, serviços de baixa tensão, planta da propulsão e armamento. Este último setor pode ser equipado com novos armamentos que estão sendo desenvolvidos para serem implementados em alguns navios da marinha americana. O SAEC, em grande parte destas aplicações, será utilizado como um gerador de pulsos de energia para os sistemas bélicos.

Alguns dispositivos e armas do futuro [15], mencionados nas seções a seguir, irão necessitar elevadas correntes de alimentação causando problemas para os atuais navios de guerra, que precisam retirar esta energia do sistema de geração de energia elétrica de bordo no momento do lançamento. Entretanto, na próxima geração de navios, que incorporam o conceito *All-Electric Ship*, a alimentação de determinadas cargas por pulsos de elevada energia deverá ser fornecida por elementos armazenadores de energia [16], [17], [18]. Desta forma, a geração e distribuição destes pulsos de energia não causarão distúrbios elétricos nos demais sistemas e cargas elétricas de bordo.

2.5.1 EMALS

As catapultas a vapor, em uso nos navios aeródromos (porta-aviões) atuais, estão chegando em seu limite operacional para o lançamento de aeronaves cada vez mais equipadas, pesadas e velozes. São catapultas grandes, pesadas e que possuem uma enorme quantidade de trechos de redes inerentes ao sistema pneumático e hidráulico ao qual fazem parte. Estas catapultas convencionais não possuem controle por *feedback*, levando a uma operação com transientes que reduzem a vida útil do sistema.

A substituição do sistema a vapor por um com densidade de energia superior poderá reduzir o volume e irá permitir a inclusão de mais equipamentos a bordo. Este sistema é o EMALS (*Electromagnetic Aircraft Launch System*) [19], [20].

Na década de 40 a marinha americana construiu um protótipo de uma catapulta eletromagnética que não pôde ser aplicada pela necessidade de avanços tecnológicos no campo dos materiais, da microeletrônica, da eletrônica de potência e de técnicas de controle.

Atualmente, a marinha americana está implementando o sistema EMALS na substituição das catapultas a vapor existentes em seu navios aeródromos. O navio aeródromo americano USS Gerald R. Ford, o primeiro desta nova classe, irá usar este novo sistema de catapultagem de aeronaves [21].

A implementação do EMALS também implicará uma redução de pessoal necessário para a manutenção e reparo já que o sistema novo não possuirá uma quantidade enorme de redes, bombas, hidráulica, pneumática e partes mecânicas que as catapultas a vapor exigem. O sistema exigirá quase que somente um pessoal qualificado em eletricidade/eletrônica ao invés de mecânica. A vantagem do EMALS é a integração total no conceito de um navio totalmente elétrico (*All-Electric Ship*).

O funcionamento básico do EMALS, em poucas palavras, é a do lançamento de uma aeronave através de um motor síncrono linear alimentado por cicloconversores cuja energia entregue é oriunda da energia armazenada em um SAEC.

Além de atender às futuras demandas de energia necessárias ao lançamento de aeronaves modernas e sofisticadas, o EMALS tem a vantagem da redução de peso, volume e manutenção e de aumentar a controlabilidade, disponibilidade, confiança

e eficiência.

Como já comentado em capítulo passado, a eletrônica usada no controle de um dispositivo moderno como o EMALS permite o uso de soluções de controle avançadas e refinadas possibilitando um controle muito mais preciso com relação ao usado no sistema a vapor. Com o EMALS, a aeronave teria seu lançamento bem suave não comprometendo a estrutura de lançamento e proporcionando uma decolagem agradável para o piloto.

Está previsto o lançamento de aeronaves a cada 45 segundos, ou seja, o tempo necessário para o EMALS conseguir acelerar o volante de inércia até a velocidade nominal. O rotor operará a uma velocidade de 6400rpm e armazenará 121 MJ de energia cinética. Esta última, pode ser considerada uma razoável quantidade de energia se comparada ao valor limítrofe de projeto de aproximadamente 95 MJ das catapultas a vapor.

Pelo uso de modernas técnicas de controle e da eletrônica de potência e, no fato do EMALS ser essencialmente elétrico, o sistema caracteriza-se por ser altamente confiável e eficiente.

Uma desvantagem é que grande energia eletromagnética pode causar interferência eletromagnética nos equipamentos eletrônicos sensíveis tanto a bordo quanto no interior das aeronaves a serem lançadas. Estas interferências deverão ser minimizadas no projeto.

Outra desvantagem são as altas velocidades atingidas o que complica em se tratando de um equipamento instalado em uma plataforma flutuante. O projeto de sustentação dos rotores bem como do próprio equipamento deverá levar em conta este aspecto.

Este longo processo de desenvolvimento e implementação do EMALS, no primeiro navio a receber esta evolução tecnológica, passou por vários obstáculos técnicos mas a marinha americana considera o programa fundamental no fato de que a economia será grande. A vontade é tentar manter a programação para 2015 e não se cogita em reprojeter a estrutura do navio para receber novamente um sistema a vapor. Os navio ingleses também esperam incorporar este novo dispositivo pelo fato de

possuírem aeronaves que ao estarem completamente carregadas possivelmente não tenham condições de decolagem com o uso do sistema a vapor. A grande pergunta agora é se o sistema EMALS será colocado em funcionamento na data desejada pelo governo americano tendo em vista os atrasos ocorridos no cronograma inicial.

2.5.2 *Rail Gun*

A ideia do *Rail Gun* pode ter vindo pelo fato de que projéteis convencionais são propelidos graças a pólvora embutida em seu corpo, o que os torna mais volumosos, pesados e necessitando um cuidado de manuseio devido ao próprio fator explosivo do material utilizado. Fora isso, pode-se também se ater ao fato das limitações de velocidades alcançadas impostas com este tipo de propelente [22].

Este tipo de armamento foi proposto como um importante componente na estratégia de um programa para proteger os Estados Unidos de ataques nucleares, conhecida como Guerra nas Estrelas (Star Wars), defendida em 1983 pelo governo do presidente americano Ronald Reagan.

Ao invés de um míssil balístico, o *Rail Gun* poderia lançar satélites e naves a uma altitude atmosférica ideal para a partida dos motores convencionais. Em lugares sem atmosfera, este dispositivo poderia realizar o lançamento de projéteis onde a inexistência de oxigênio impediria a queima de propelentes químicos.

O sistema basicamente utiliza um acelerador linear utilizando a força de Lorentz por meio de um grande impulso elétrico para impulsionar uma armadura afixada em dois trilhos paralelos [23].

Este novo armamento utiliza o campo magnético, gerado por elevadas correntes de alimentação, para acelerar um projétil a velocidades muito maiores que a de um projétil convencional. A alimentação por pulsos de elevada energia poderia ser fornecida por elementos armazenadores de energia, como, por exemplo, o SAEC.

A munição deste armamento seria relativamente leve e de fácil transporte e manuseio, facilitando a operação desta arma pelo pessoal embarcado. As altas velocidades possibilitariam se atingir alvos a maiores distâncias com maior letalidade e seriam um fator a favor ao minimizar o efeito do vento na trajetória do projétil

[24].

2.5.3 *E-bomb*

Enquanto uma potência mundial, em tempos de paz, desenvolve e cresce com a dependência dos computadores, eletrônica e sistemas de informação, os requisitos de proteção contra sistemas capazes de emitir pulsos eletromagnéticos e interferir em seus sistemas devem ser revistos.

A estrutura de um país pode não estar preparada para enfrentar um colapso (inclusive da rede elétrica) devido ao efeito de um ataque por pulsos eletromagnéticos.

Se um blackout atingisse uma cidade, as indústrias sofreriam com a perda na produção. O comércio fecharia e os serviços de saúde cessariam deixando milhares de pessoas sem atendimento em casos de graves acidentes. Em uma maior escala, poderia haver a queda da rede de computadores que ligam setores do governo e defesa do país. Nós somos dependentes de energia e quando da falta dela coisas ruins acontecem e muito rapidamente. Qualquer civilização sempre foi dependente de energia.

Uma arma como a bomba eletromagnética é projetada para se obter vantagem desta dependência. Em vez de cortar a energia em uma área, ela pode simplesmente destruir máquinas que se utilizam de energia elétrica. Os geradores poderão se tornar inúteis, os telefones não funcionarem e carros não andarem. Em questão de segundos uma cidade poderá voltar atrás 200 anos [25].

As forças armadas têm perseguido esta ideia por muitas décadas. A ideia básica da bomba eletromagnética é a de uma arma deste tipo danificar os circuitos elétricos por meio de um intenso campo eletromagnético. As correntes induzidas em fios e cabos elétricos poderão danificar sistemas de comunicação, sistemas de navegação, sistema de controle em bombas e mísseis, geração, redes de computadores e muitos outros circuitos vitais do meio civil e militar [26], [27].

2.5.4 V-MADS

Active Denial Technology é uma tecnologia não letal que usa ondas eletromagnéticas para parar, deter e fazer o inimigo voltar atrás de uma distância relativamente grande. Este tipo de tecnologia poderá salvar vidas ao repelir os indivíduos e sem causar danos [27].

Este tipo de arma poderá ser usado em missões humanitárias, de pacificação e outras missões onde não seja necessário o uso de armas mortais.

O sistema é proposto para a defesa dos soldados ao impedir o acionamento de armas portáteis que podem estar em uso por pessoas num alcance de 1000m. Contra-medidas podem ser realizadas em cobrir o corpo com vestimentas metálicas, como um escudo ou refletor. Não se sabe qual é o comportamento desta arma em dias chuvosos, nublados e quanto de energia pode ser absorvida pela atmosfera.

Esta tecnologia usa um transmissor para emitir uma onda eletromagnética de 95GHz a um alvo. Ao atingir o indivíduo, a onda penetra menos que 1/64 polegadas da pele e aquece rapidamente a pele produzindo uma sensação de queimação que cessa quando o transmissor é desligado ou o indivíduo vai para fora do alcance do feixe. O problema desta arma é que poderá acarretar prejuízos se o feixe atingir os olhos da pessoa.

Estudos estão sendo feitos para determinar onde estes equipamentos podem ser montados. O equipamento pode ser montado numa base em terra ou em um veículo (V-MADS - *Vehicle-Mounted Active Denial System*) e futuramente em navios e aeronaves [28].

Capítulo 3

Descrição do Sistema Experimental

Este capítulo tem como objetivo apresentar aspectos e funcionamento dos dispositivos envolvidos no protótipo utilizado em laboratório.

3.1 Introdução

Nas próximas seções serão apresentados os dispositivos usados para realizar a montagem de um SAEC experimental.

A máquina motriz usada é uma Máquina de Relutância Variável (MRV) que, dependendo da situação energética do sistema, poderá funcionar ora como motor drenando potência da rede e ora como gerador, devolvendo a energia cinética armazenada em forma de energia elétrica para a rede. A MRV utilizada para a aplicação no SAEC possui características que serão mencionadas na próxima seção. Algumas vantagens como robustez, simplicidade e eficiência em grandes faixas de torque e velocidade fazem da MRV uma escolha muito boa quando comparada com outras máquinas bem conhecidas, como, por exemplo, máquinas de indução e máquinas síncronas de ímãs permanentes [29].

São usados dois conversores de potência que irão chavear de modos diferentes de

acordo com a necessidade de sentido do fluxo de energia. Os conversores são ligados à uma placa condicionadora, que tem como uma das funções, enviar os pulsos para os mesmos.

A placa que contém o DSP tem a função de controlar todos os dispositivos do SAEC.

3.2 A Máquina de Relutância Variável

A MRV será usada para acelerar um volante de inércia, preso em seu eixo, com o intuito de acumular a energia cinética que será usada, após a conversão para energia elétrica, para as compensações na rede elétrica após a ocorrência de um distúrbio externo.

A comprovação do correto funcionamento do protótipo, através da detecção de um distúrbio, foi na aplicação de uma falta na rede de alimentação do sistema.

3.2.1 Construção e características

Normalmente as Máquinas de Relutância Variável possuem pólos salientes no estator e no rotor, com enrolamentos concentrados no estator e sem enrolamentos no rotor. Os enrolamentos do estator podem ser enrolados externamente à carcaça e depois deslizados nos pólos do estator, e isto leva a um serviço de manufatura bem simples fazendo o custo da máquina ser baixo.

O rotor possui construção simples e é essencialmente feito por lâminas de ferro e não carrega enrolamentos ou ímãs permanentes provendo uma estrutura resistente para altas velocidades e temperaturas. O rotor deste tipo de máquina, geralmente, possui as características de uma baixa inércia, perdas mínimas no rotor e robustez mecânica. As MRV embora de simples aparência são mais difíceis de projetar devido às não linearidades.

As máquinas de relutância variável têm uma frequência alta de comutação se comparadas às máquinas de corrente alternada de valores nominais equivalentes.

As formas de onda contêm harmônicos e alcançam altos níveis de saturação especialmente nos cantos dos pólos. Correntes parasitas são induzidas e é altamente recomendável o uso de aço laminado especialmente em aplicações de alta eficiência.

A Máquina de Relutância Variável utilizada neste trabalho foi uma MRV 6/4, isto é, uma máquina com 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor. É uma máquina trifásica e construída de modo que cada fase é composta de bobinas enroladas nos pares de pólos dispostos a 180 graus. As bobinas pertencentes a cada fase, e enroladas nos pares de pólos em oposição, são ligadas em série e de modo a se ter os fluxos adicionados naquela direção. A máquina é classificada como uma máquina regular onde os pólos do estator e rotor têm simetria as suas linhas de centros e igualmente espaçados em torno de suas peças. A máquina utilizada nesta dissertação pode ser observada melhor com suas partes separadas, de acordo com a Figura 3.1.

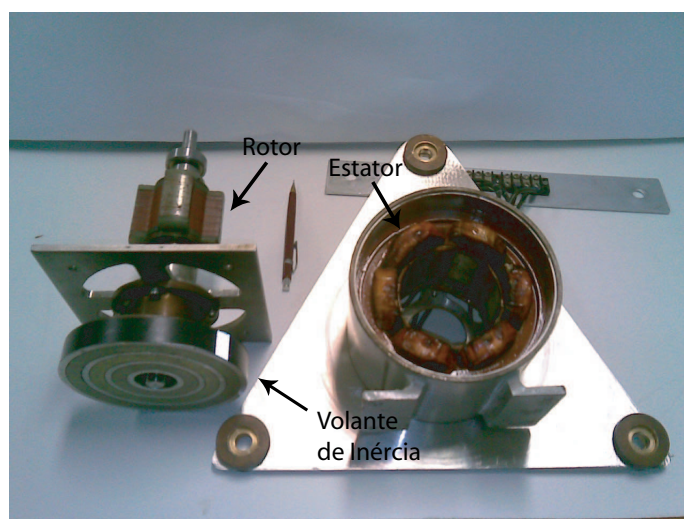


Figura 3.1: MRV usada na prática e desmontada para manutenção

Estas máquinas apresentam grandes faixas de velocidade a potência constante. São máquinas confiáveis mesmo sob condições de falta. Uma das razões é que o rotor não possui qualquer fonte de excitação e assim não gera potência na fase com problema, não produzindo torque e não apresentando perigo de faiscamento ou fogo devido a correntes grandes. Ainda mais, os enrolamentos são fisicamente e eletromagneticamente isolados um dos outros reduzindo a possibilidade de faltas fase-fase.

Apesar de toda sua simplicidade, sua operação necessita de um sensor de

posição para a determinação da posição do rotor (se não forem usados recursos para funcionamento sem sensor). Ao se trabalhar a altas velocidades, o sensor de posição pode proporcionar problemas devido ao alinhamento mecânico e ser uma fonte de instabilidades (sensibilidade do sinal gerado e transmitido em ambientes com alto grau de interferência eletromagnética). Mesmo correndo o risco de se deparar com estes problemas em laboratório, optou-se por utilizar este recurso, em altas velocidades, viabilizando a operação de um sistema flywheel com dimensões reduzidas e de alta densidade de energia, uma vez que armazenadores cinéticos têm sua energia de armazenamento proporcional ao quadrado da velocidade angular.

3.2.2 Funcionamento Básico

A conversão de energia elétrica em mecânica com geração eficiente de torque, em uma máquina de relutância variável, depende do sincronismo entre a excitação das fases com a posição angular do rotor.

A MRV é uma máquina elétrica cujo conjugado é produzido pela tendência de movimento dos pólos do rotor em se alinhar com os pólos do estator de modo a se ter o valor máximo de indutância na fase energizada. Em operação de motorização cada fase é alimentada quando a indutância está na fase de crescimento e desalimentada quando na região de decrescimento. A operação de geração é feita de forma contrária, isto é, cada fase é alimentada na região de decrescimento da indutância e desalimentada próxima ao crescimento da mesma.

Pela observação da Figura 3.2, fica mais fácil o entendimento do funcionamento básico da MRV.

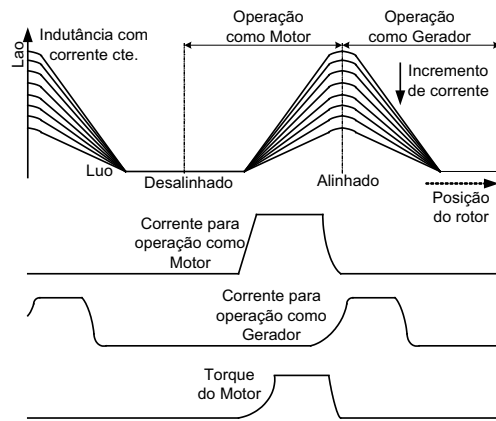


Figura 3.2: Acionamento da MRV

A Figura 3.3 mostra o rotor de uma MRV alinhado com a fase A da máquina, representando a condição inicial do SAEC real montado no laboratório. Esta posição inicial é muito importante devido ao uso de um *encoder* incremental utilizado no protótipo.

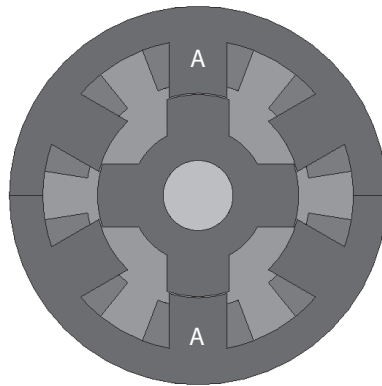


Figura 3.3: MRV com rotor alinhado pela fase A

Quando o conversor que controla a MRV deixar de energizar a fase A e passar a energizar a fase B da MRV, o rotor passará a realizar um movimento no sentido horário, de modo a alinhar o rotor com essa fase e assim permanecer na posição de indutância máxima. Esta nova posição é representada na Figura 3.4.

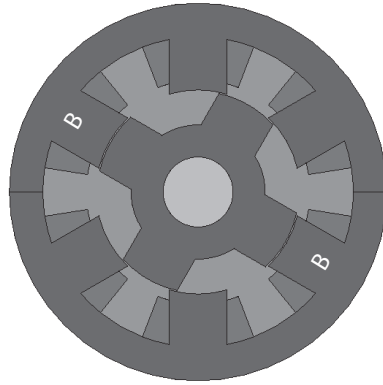


Figura 3.4: MRV com rotor alinhado pela fase B

Se de modo seqüencial, o conversor passar a energizar a fase C, o rotor irá novamente se movimentar no sentido horário e se alinhar com a fase alimentada, conforme a Figura 3.5.

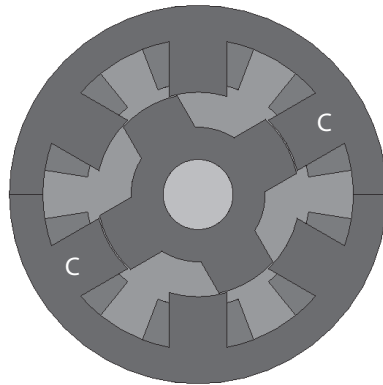


Figura 3.5: MRV com rotor alinhado pela fase C

Repetindo-se toda a seqüência da mesma forma descrita fará com que a máquina trabalhe como um motor e após 12 comutações, o rotor retornará ao ponto inicial.

Para a operação como gerador, cada fase deverá ser alimentada quando do decréscimo da indutância da fase em questão, isto é, quando a mesma estiver na posição alinhada com o rotor.

Pelo dito acima, observa-se outra característica importante destas máquinas: o funcionamento da máquina como motor ou gerador pode ser obtido apenas com um

sentido de corrente. Tudo vai depender, como já comentado, da energização de uma fase no momento de crescimento ou decaimento da indutância própria da mesma.

O leitor que desejar se aprofundar no funcionamento, controle e projeto de máquinas de relutância variável poderá consultar [30] [31] [32].

3.3 Os mancais

Em uma aplicação como a que vai ser implementada, objetiva-se a maximização da energia armazenada através do aumento da massa e principalmente da velocidade do rotor da MRV. Para isso, se faz necessário minimizar a dissipação de energia, para que o tempo de regeneração seja longo. Portanto, é necessário que o sistema opere em uma câmara evacuada minimizando o atrito viscoso com o ar, que é proporcional a velocidade de rotação. A perda nos mancais rotativos, será minimizada utilizando mancais de alta eficiência, isto é, usando mancais magnéticos supercondutores, mancais magnéticos passivos de ímãs permanentes ou mancais eletromagnéticos.

No protótipo, montado em laboratório, foi utilizado um Mancal Magnético Supercondutor (MMS) para trabalhar junto a um rotor de ímãs permanentes (NdFeB) preso ao eixo da MRV, formando o mancal inferior da máquina. O mancal superior é formado por tradicional mancal mecânico (rolamento).

A Figura 3.6 mostra o mancal inferior da MRV.

Para se chegar ao efeito de supercondutividade, blocos de supercondutores de YBCO deverão ser resfriados a temperaturas muito baixas. Nove blocos supercondutores deverão estar posicionados nos alojamentos existentes no criostato e selados. O resfriamento se dará por condução e através da passagem de nitrogênio líquido, armazenado em um *Dewer*, pelo interior do criostato. Pode-se dizer que os blocos supercondutores e o criostato formam o estator do mancal supercondutor.

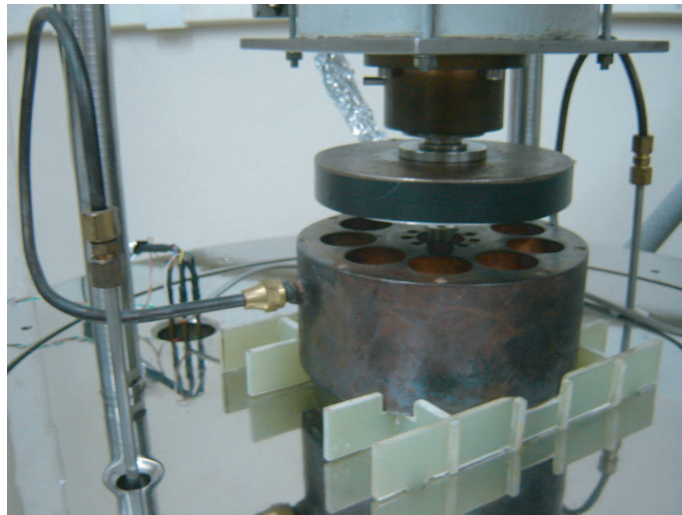


Figura 3.6: Vista do mancal inferior da MRV

Na mesma figura, pode-se observar a a outra parte do mancal supercondutor, constituída de um disco com ímã permanente de NdFeB.

Para se aumentar a estabilidade e a rigidez axial e radial deste mancal supercondutor, o material supercondutor deve ser resfriado na presença de um campo magnético, sendo necessário o posicionamento do disco de NdFeB próximo aos blocos antes que estes passem para o estado supercondutor [33].

Pode-se observar, através da Figura 3.7, o funcionamento do sistema utilizando o mancal supercondutor.



Figura 3.7: Funcionamento da MRV com mancal supercondutor

O protótipo montado em laboratório permite, após se ter minimizado as perdas por atrito mecânico, a diminuição do atrito viscoso através da produção de vácuo no interior de um invólucro desenvolvido para este fim.

Pode-se observar, através da Figura 3.8, o sistema mecânico como um todo, inclusive com o invólucro responsável pelo fechamento a vácuo do SAEC.



Figura 3.8: Sistema mecânico completo

3.4 Os Conversores

A Figura 3.9 mostra, de forma esquemática simplificada, o circuito de chaveamento do SAEC.

O Conversor da Rede é conectado à rede elétrica por meio de indutores e é constituído por chaves com topologia em ponte completa. Quando a aplicação é destinada a alimentar a carga crítica no lado da rede, este conversor funciona como inversor, na regeneração. O Conversor da rede é ligado ao Conversor da MRV por intermédio do elo CC.

A MRV é acionada pelo Conversor da MRV, configurado em ponte semi-controlada ou assimétrica. Na regeneração, este conversor funciona de modo a manter a tensão do elo CC constante.

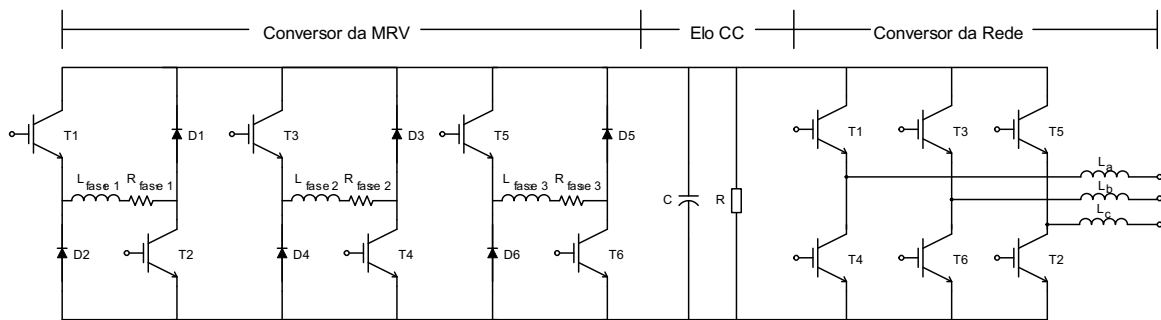


Figura 3.9: Circuito do SAEC

Quando o sistema se encontra em situação normal, isto é, velocidade da MRV constante, o Conversor da MRV é controlado de modo a injetar a corrente necessária na máquina para manter o volante acumulando a energia cinética nominal. O acionamento dos IGBTs deste conversor é realizado de forma a se obter a forma de onda obtida na prática através de um osciloscópio e mostrada na Figura 3.10.

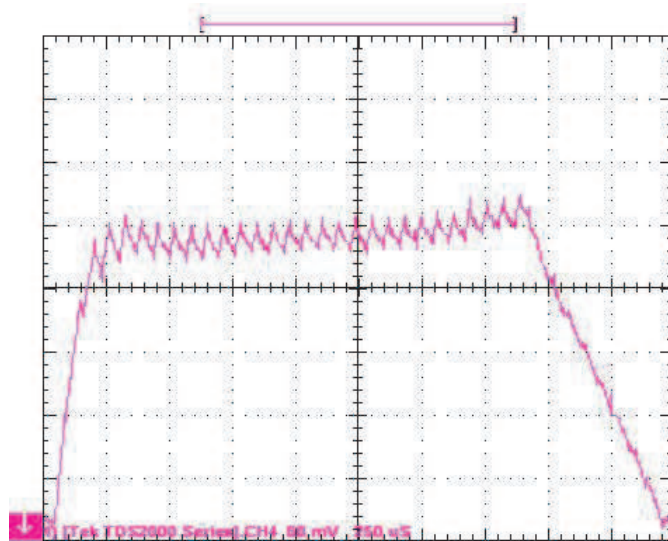


Figura 3.10: Forma da corrente na aceleração da MRV

A Figura 3.11 mostra os três estados possíveis para o controle da MRV, tanto no acionamento para a aceleração quanto na regeneração.

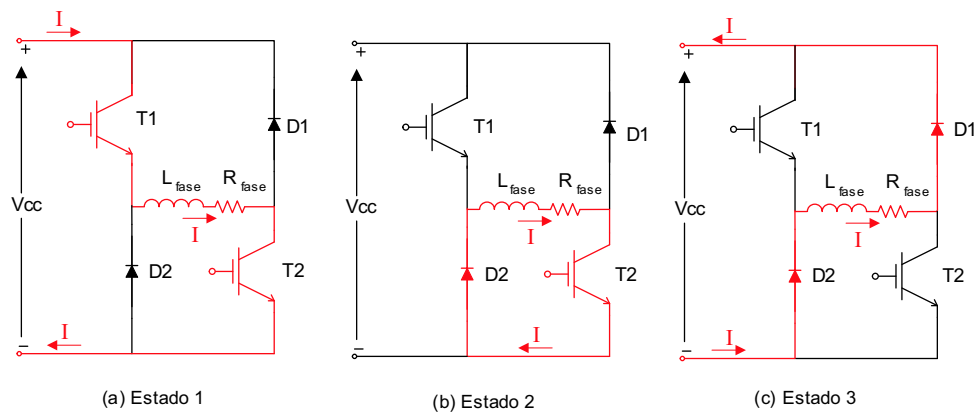


Figura 3.11: Estados das chaves

O estado 1, mostrado na Figura 3.11(a), é caracterizado pelo acionamento dos dois IGBTs da ponte assimétrica. Com isso, a corrente circulará pela fase da máquina produzindo a aceleração da mesma. Este estado é caracterizado pelo aumento da corrente.

O estado 2, observado na Figura 3.11(b), realiza o desligamento do IGBT superior. Desta forma, a energia armazenada no enrolamento da fase da MRV circulará pelo IGBT inferior e o diodo D2. Este estado é o responsável pela diminuição da corrente na fase considerada.

Os dois estados acima são os responsáveis pela forma do topo da corrente apresentada na Figura 3.10.

O estado 3, mostrado na Figura 3.11(c), é caracterizado pelo desligamento dos IGBTs da ponte semi-controlada fazendo com que a energia armazenada no enrolamento de fase volte para a fonte, fluindo pelos diodos.

O uso de IGBTs nos conversores do sistema permite o controle bidirecional do fluxo de potência.

A Figura 3.12 mostra parte do sistema SAEC.



Figura 3.12: Conversores e controle do SAEC

3.5 O Controle

Com o objetivo de validar o controle proposto e avaliar o desempenho de cada configuração, foi montado um protótipo, capaz de assumir as diversas configurações necessárias, tanto no aspecto físico como computacional.

O controle foi todo implementado digitalmente, permitindo a mudança de configuração de forma simples e rápida.

A ferramenta computacional utilizada foi o software de emulação e programação *Code Composer Studio* (CCS) pertencente ao KIT de desenvolvimento da empresa Texas Instruments para o trabalho com o DSP TMS320F2812 [34] - [37].

A aplicação foi realizada toda no ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio para microcontroladores e DSPs da Texas Instruments. Esse software contém ferramentas para desenvolvimento e depuração de códigos ideais para aplicação em sistemas embarcados.

A Figura 3.13 apresenta a tela do software de programação e controle da aplicação. Constata-se que, com a utilização deste software, fica fácil o controle e depuração do código escrito. Pode-se visualizar os valores das variáveis através da apresentação gráfica ou numérica das mesmas.

Algumas variáveis, como por exemplo a referência da tensão no elo CC, podem ser mudadas manualmente através da tela do software.

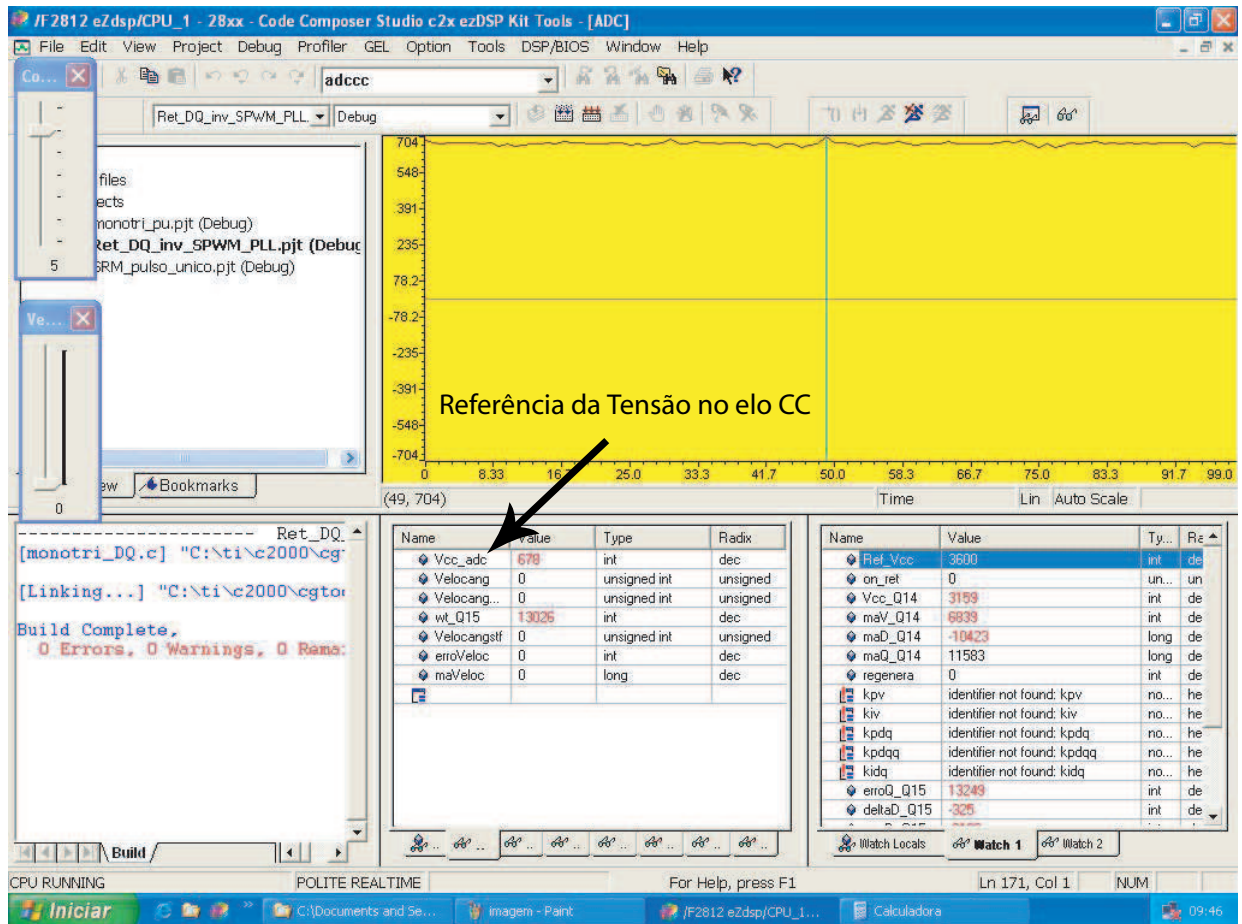


Figura 3.13: Ambiente de programação do software usado

O controle, propriamente dito, é composto pela placa de circuito impresso onde se encontra o DSP e a placa condicionadora de sinais que tem a função de enviar os sinais tratados e assim serem devidamente usados pelo DSP. Estas placas também se encontram na Figura 3.12.

3.6 O encoder

O *encoder* acoplado ao eixo da MRV é do tipo incremental e com resolução igual a 1024, isto é, sempre haverá a necessidade de um ponto de referência inicial para se saber a posição do rotor em um instante posterior qualquer e a cada volta do rotor

são emitidos 1024 pulsos pelo *encoder*.

O *encoder* envia pulsos que são lidos por um circuito especial interno ao DSP, explicado no próximo capítulo, e processados no código implementado no sistema para finalmente dar a informação de velocidade da MRV. Esta informação é importante para se obter o controle da velocidade da máquina.

Além disto, o *encoder* é necessário para o sistema obter conhecimento da posição do rotor da MRV e poder acionar a máquina de forma correta (comutação das fases no momento requerido), permitindo a aceleração ou frenagem da máquina.

O *encoder* usado mostrou-se muito suscetível a ruídos ao longo das práticas realizadas. Procurou-se realizar uma blindagem e um rearranjo dos cabos do *encoder* para minimizar os efeitos de interferência eletromagnética emitida pelos conversores.

A Figura 3.14 mostra o *encoder* montado no eixo da máquina de relutância variável usada na prática.

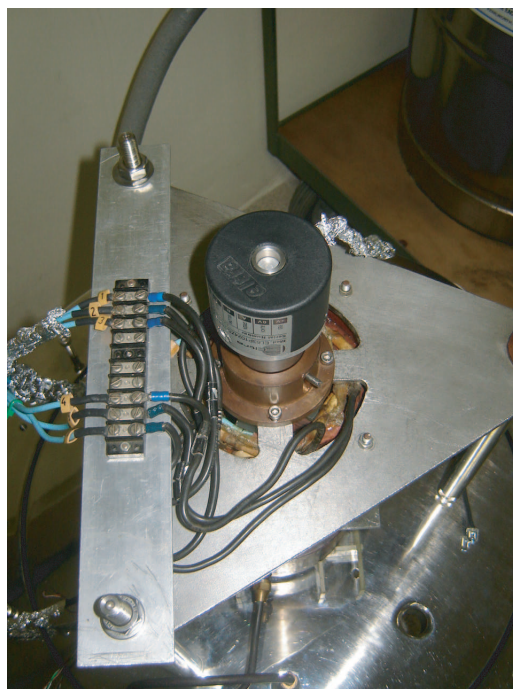


Figura 3.14: *Encoder* utilizado na MRV

Na necessidade da obtenção da informação de velocidade da MRV para posterior análise, foram montados circuitos que possibilitassem a aquisição de velocidade pelo

osciloscópio ou pela placa de aquisição de dados.

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram os circuitos montados para auxílio na aquisição dos pulsos gerados pelo *encoder* que após processados no CI LM2917 irá dar a informação de velocidade da MRV em forma de tensão.

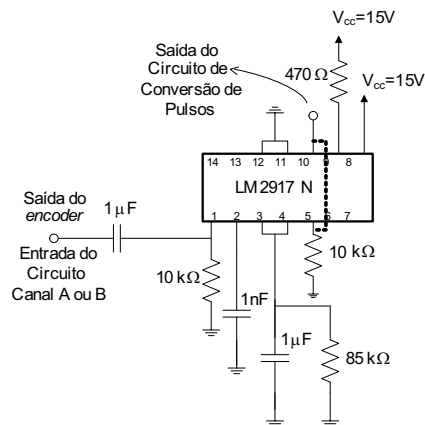


Figura 3.15: Circuito para conversão Pulsos/Tensão

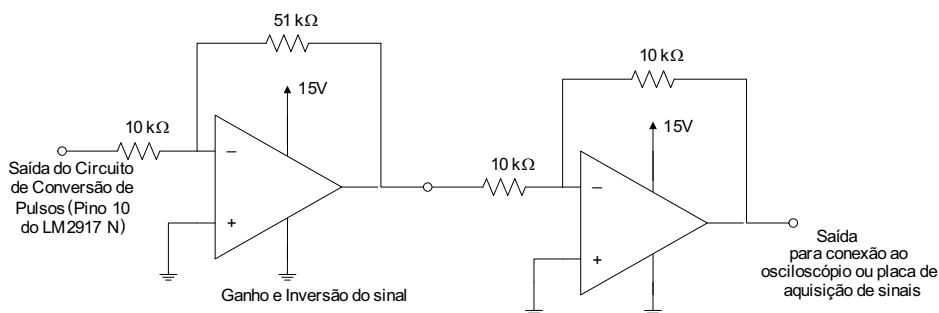


Figura 3.16: Circuito para condicionamento do sinal de velocidade

3.7 A Montagem

Foram montadas em bancada 4 configurações de SAEC, onde levou-se em conta uma ordem crescente de complexidade de montagem de circuitos e programação de código a ser implementado em DSP, de acordo com os ítems enumerados a seguir:

- i. Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede Monofásico;
- ii. Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede Monofásico;

- iii. Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede Trifásico; e
- iv. Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede Trifásico.

As formas de onda de corrente na MRV e na carga e a tensão no elo CC foram aquistadas por um osciloscópio e carregadas em arquivos de dados através de software específico do equipamento. A velocidade do rotor da MRV foi aquistada pelo software Matlab após passar pelo circuito de Conversão Pulso/Tensão montado em um Protoboard (foi usada uma placa de aquisição).

A lógica de controle na montagem realizada para os casos monofásicos necessitava de apenas seis sinais de entrada: tensão e corrente de entrada, as três correntes da MRV e a tensão do elo CC.

A placa de condicionamento usada tem circuitos para o tratamento de apenas seis sinais. Foi preciso montar um circuito à parte de modo a condicionar os sinais adicionais necessários aos casos trifásicos. Na montagem trifásica são necessários oito sinais de entrada: Duas tensões e duas correntes de entrada do sistema, as três correntes da MRV e a tensão do elo CC.

A Figuras 3.17 e 3.18 mostram os circuito que foram montados para a aquisição das tensões trifásicas de entrada do sistema. Estes sinais foram devidamente condicionados para o posterior envio e processamento pelo DSP.

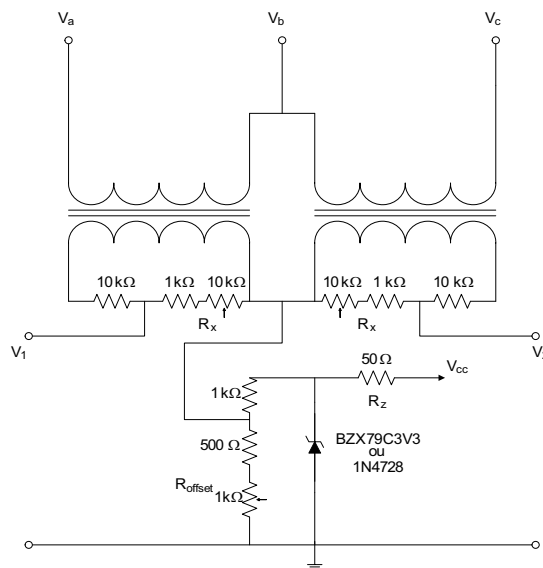


Figura 3.17: Circuito para a entrada das tensões de fase

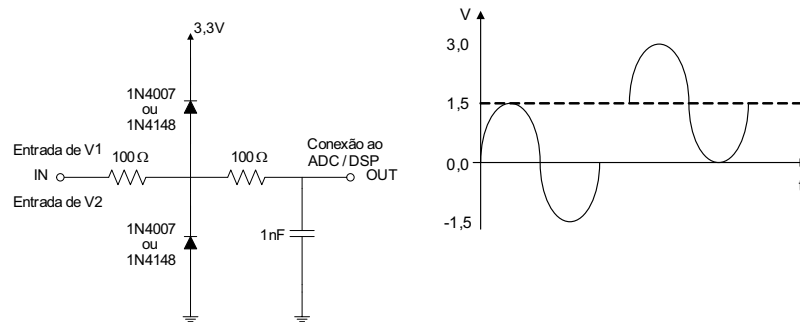


Figura 3.18: Circuito para o condicionamento dos sinais de fase

A implementação prática do SAEC pode ser dividida em duas partes. A parte dos conversores e máquina e a parte de medição auxiliar e controle.

A Figura 3.19 mostra a parte referente ao controle e medições do sistema.

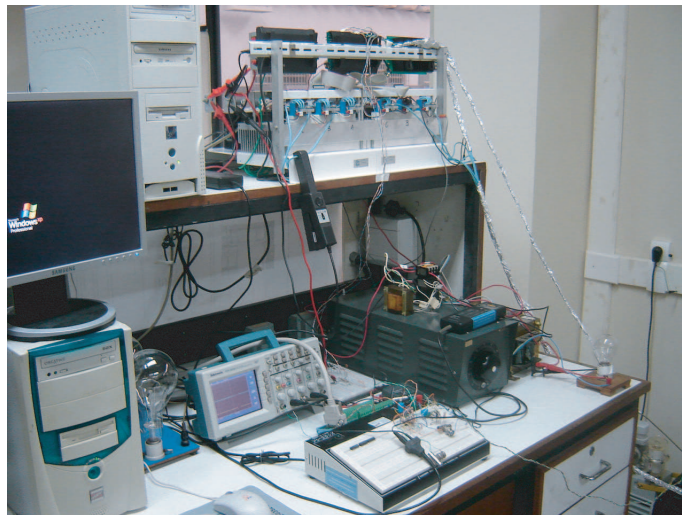


Figura 3.19: Controle e medições do SAEC

Todas as montagens foram realizadas de modo a se ter como referência as simulações realizadas em trabalho anterior [2]. Foram simuladas, no PSCAD, as 4 configurações enumeradas anteriormente nesta seção.

Capítulo 4

Lógica de Controle

Este capítulo tem como objetivo apresentar a lógica implementada no DSP para o funcionamento do SAEC nas quatro configurações citadas no capítulo anterior e montadas em laboratório.

4.1 Estratégia de controle

A programação das quatro configurações montadas no LASUP foi baseada na estratégia de controle adotada. A Figura 4.1 apresenta a estratégia de controle adotada para o SAEC implementado na prática.

Inicialmente, o capacitor é carregado até a tensão de referência por meio do Conversor da Rede, cujo chaveamento é determinado pela malha de controle de tensão associada ao Conversor da Rede. Em seguida, dando continuidade ao processo de inicialização, a malha de controle de velocidade, comanda o Conversor da MRV, que aciona a máquina como motor, acelerando o volante de inércia até a velocidade de referência. Quando o volante de inércia atingir a velocidade de referência, o SAEC estará pronto para atender a sua finalidade, que neste caso, é alimentar uma carga elétrica durante a falta de energia na rede, e enquanto houver energia cinética armazenada na massa girante, disponível para a conversão.

Durante a falta, a energia cinética armazenada na massa girante é convertida em

energia elétrica pela MRV, que neste instante funciona como gerador. O controle da MRV passa da malha de controle de velocidade para a malha de controle de tensão associada ao Conversor da MRV, já que não há mais sentido em manter a rotação constante, visto que o volante de inércia deve ser desacelerado para que ocorra a conversão da energia mecânica em elétrica. Neste momento, o controle de tensão é feito pelo Conversor da MRV, enquanto que, a operação do Conversor da Rede irá depender da aplicação: quando alimentando uma carga conectada ao elo CC, este é desligado; e quando alimentando uma carga conectada ao lado CA, este opera como inversor.

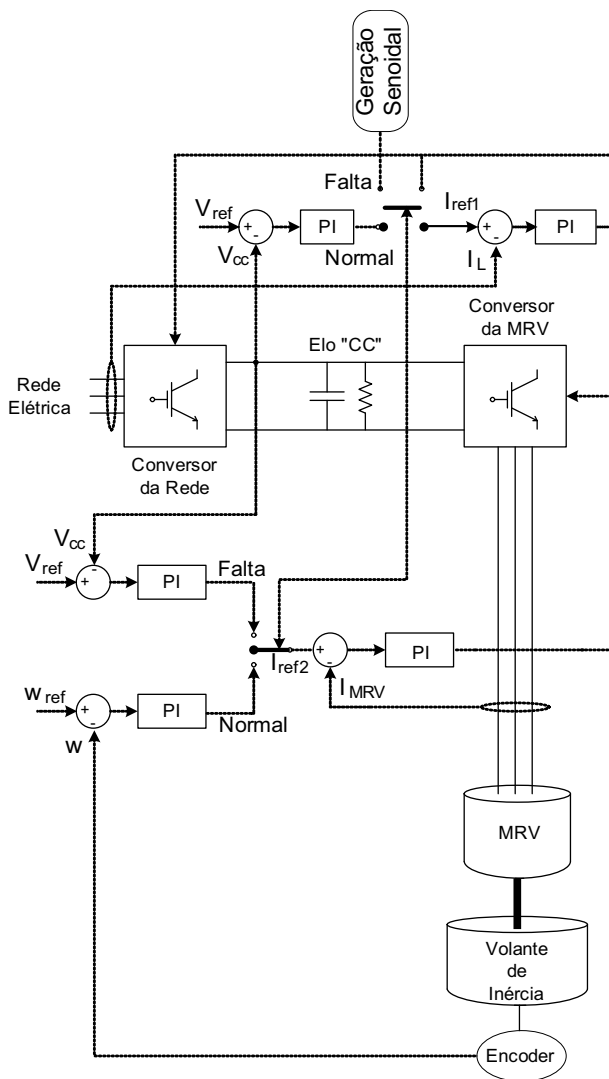


Figura 4.1: Estratégia de controle adotada

Todo o trabalho realizado e a opção pela estratégia de controle adotada foi concebida após a leitura de estudos sobre o assunto [38], [39].

4.2 Sistema de Controle

O sistema de controle do SAEC é composto de *hardware* e *software* que interagem entre si.

O código utilizado para o controle do experimento necessita de sinais oriundos do sistema para os devidos processamentos do DSP e posterior envio de sinais de saída para a correção de grandezas elétricas e mecânicas do SAEC. A Figura 4.2 mostra, de forma esquemática, as conexões físicas do sistema de controle do SAEC utilizado neste trabalho.

O *hardware* ou placa principal de toda a estrutura de controle do SAEC é baseada na PCI eZdsp F2812 da Spectrum Digital. Esta placa favorece o desenvolvimento, depuração e testes de algoritmos de controle por possuir toda uma estrutura digital e analógica que permite seu uso em inúmeras áreas e particularmente em aplicações na área da Eletrônica de Potência.

A referida placa contém circuitos necessários para o correto funcionamento do DSP TMS320F2812 da Texas Instruments instalado na mesma e alguns outros circuitos e conectores para a comunicação externa do DSP.

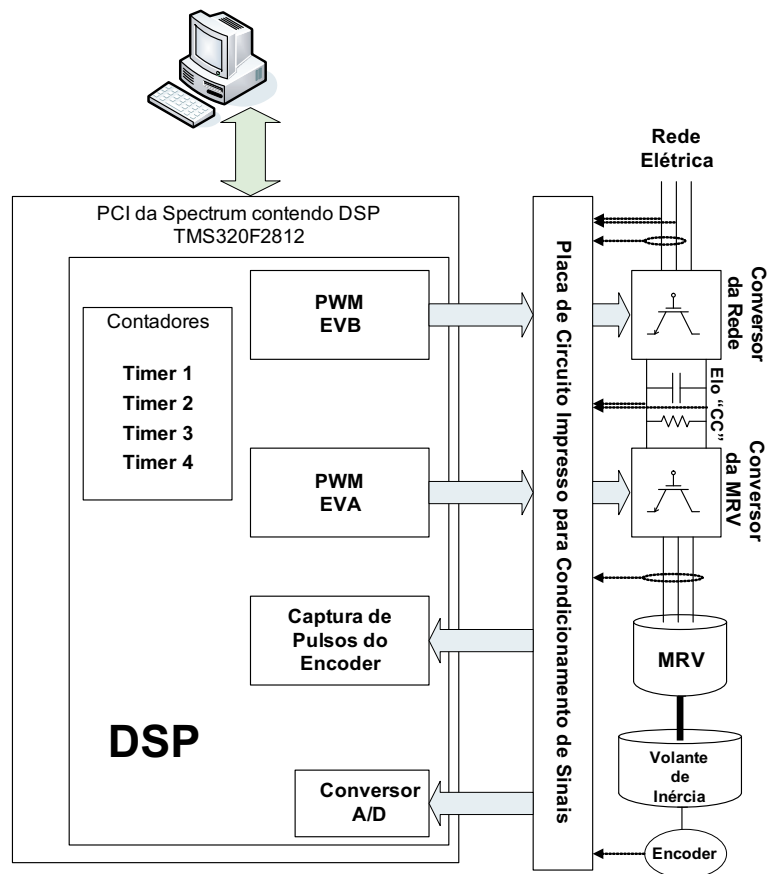


Figura 4.2: Placa controladora

Um computador pessoal é ligado à placa controladora, através de um conector, para o envio do código, comandos e valores de referência de variáveis pertencentes ao sistema. O computador servirá para a visualização em tempo real das grandezas inerentes ao SAEC.

Os periféricos necessários para o controle do SAEC e existentes internamente no DSP, mostrados na Figura 4.2, são relacionados a seguir:

- Contadores/Temporizadores
- Geradores de sinais digitais e pulsos de PWM
- Circuito para contagem de pulsos do *Encoder*
- Conversores Analógicos Digitais (CAD)

A figura mostra, ainda, o bloco relativo à placa condicionadora responsável no interfaceamento da placa controladora com o resto do sistema. Os sinais de correntes e tensões do SAEC, pulsos do *Encoder* e pulsos de chaveamento para os Conversores da Rede e da MRV passam pela Placa Condicionadora de Sinais.

4.3 Aquisição de dados do SAEC

O SAEC necessita, como na maioria das aplicações, de dados de entrada para que possam ser processados pelo DSP e posteriormente causem a saída do processo.

Os sinais das grandezas medidas são recebidos pelo DSP após serem enviados, inicialmente, por sensores específicos a cada grandeza considerada. As Figuras 4.3 e 4.4 a seguir, representam, de forma esquemática, o trajeto dos sinais adquiridos nas configurações monofásicas e trifásicas, respectivamente.

4.3.1 Aquisição de dados na configuração monofásica

A Figura 4.3 mostra o diagrama em blocos da estrutura montada para a aquisição de dados do SAEC em sua configuração monofásica. Nesta configuração são utilizados 6 sinais que são convertidos no Conversor Analógico Digital (CAD) do DSP para posterior processamento na rotina de controle do sistema.

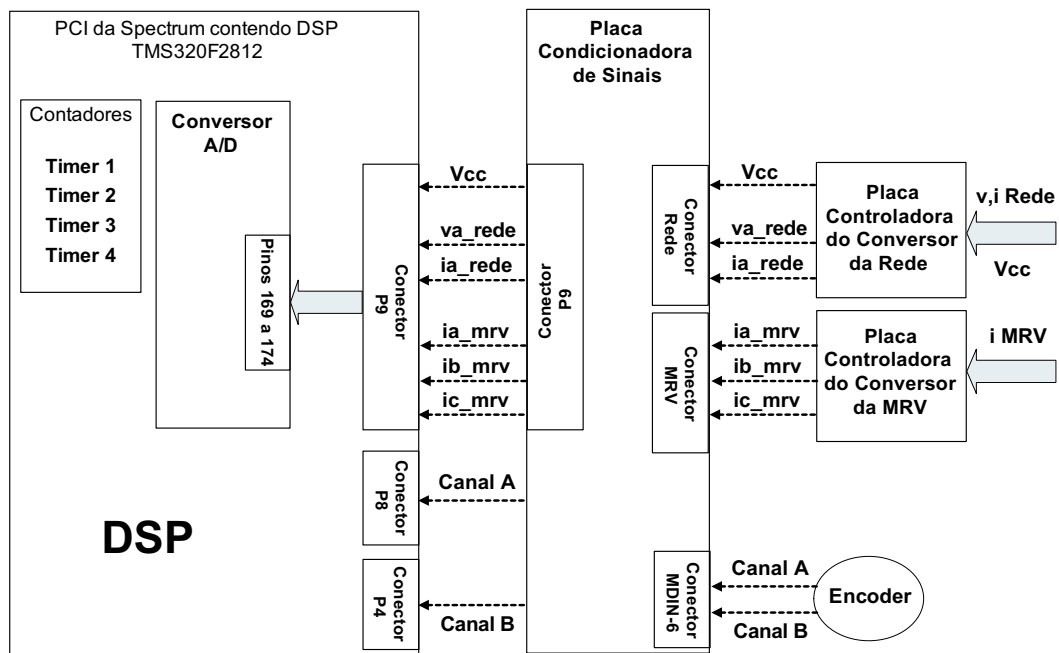


Figura 4.3: Aquisição de dados na configuração monofásica

Os sinais aqúistados e convertidos pelo CAD para posterior processamento na lógica computacional implementada são:

- Tensão no elo CC (V_{cc})
- Tensão e Corrente na entrada do sistema (va_{rede} , ia_{rede})
- Correntes da MRV (ia_{mrv} , ib_{mrv} , ic_{mrv})

A tensão e as correntes da rede e da MRV são aqúistadas por meio de transdutores de tensão e corrente, respectivamente e, juntamente com a tensão do elo CC, passam pela placa controladora existente no Conversor da Rede sofrendo reduções em suas amplitudes. A seguir, estes sinais sofrem nova modificação ao passarem pela Placa Condicionadora de Sinais, onde tornam-se compatíveis com o nível de sinal de entrada exigido pelo CAD do DSP.

As grandezas contínuas (tensão do elo CC e as correntes na MRV) não necessitam sofrer um deslocamento (offset) na Placa Condicionadora de Sinais. As grandezas alternadas (correntes e tensões na rede) necessitam de um deslocamento pois o CAD só converte sinais positivos na faixa de 0 a 3 Volts que chegam em seus pinos de

entrada. Então os sinais analógicos correspondentes aos sinais medidos têm que sofrer um deslocamento de modo a variarem entre os valores positivos mencionados.

Após o armazenamento das grandezas medidas nos registradores do Conversor Analógico Digital, é realizada uma filtragem digital em cada grandeza de modo a compensar a alta frequência de amostragem e desta maneira minimizar os efeitos de ruídos causados por interferências eletromagnéticas (EMI). No final de todo o tratamento os sinais alternados serão reproduzidos de modo a representar os sinais analógicos originais adquiridos.

Os pulsos com origem no *encoder* passam pela Placa Condicionadora e são processados por um circuito específico do DSP para a contagem dos pulsos do mesmo. Este processo será comentado um pouco mais em uma seção mais adiante.

4.3.2 Aquisição de dados na configuração trifásica

A Figura 4.4 mostra o diagrama em blocos da estrutura montada para a aquisição de dados do SAEC em sua configuração trifásica. Nesta configuração são utilizados 8 sinais que são convertidos no CAD do DSP. Nas configurações trifásicas são usados 2 sinais adicionais para contemplar a aquisição de duas tensões e duas correntes da rede na entrada do Conversor da Rede trifásico. A aquisição dos sinais de corrente e tensão de duas fases da rede são suficientes para o conhecimento dos valores da terceira fase da entrada do sistema.

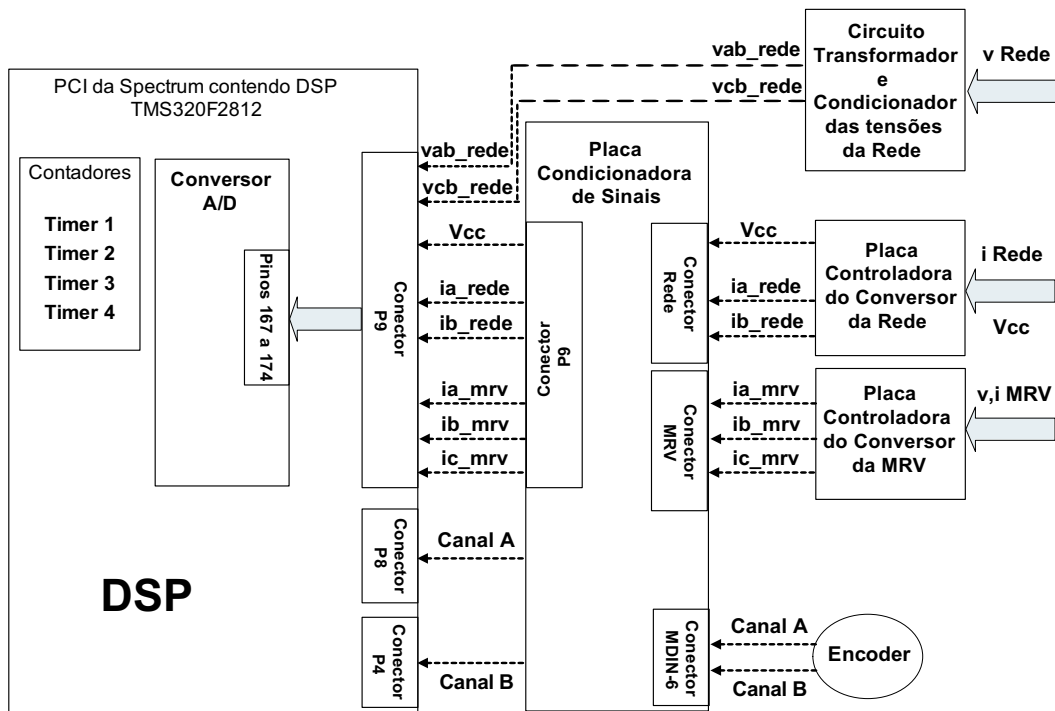


Figura 4.4: Aquisição de dados na configuração trifásica

A Placa Condicionadora usada somente possui 6 circuitos para condicionamento dos sinais adquiridos. No momento em que se passou a adotar a configuração trifásica viu-se a necessidade da aquisição de mais dois sinais. Conforme comentado na Seção 3.7, foram montados circuitos a parte para o devido condicionamento dos dois sinais adicionais. Estes circuitos são utilizados para a aquisição das duas tensões da rede e podem ser novamente visualizados por meio das Figuras 3.17 e 3.18.

As alterações físicas realizadas servem tanto para o funcionamento na configuração trifásica quanto para a monofásica, bastando pequenas modificações no código fonte utilizado.

4.3.3 Aquisição dos pulsos do *encoder*

A Figura 4.5 mostra o processo de obtenção dos pulsos do *encoder* para permitir o conhecimento, pelo SAEC, da posição e velocidade do rotor da MRV.

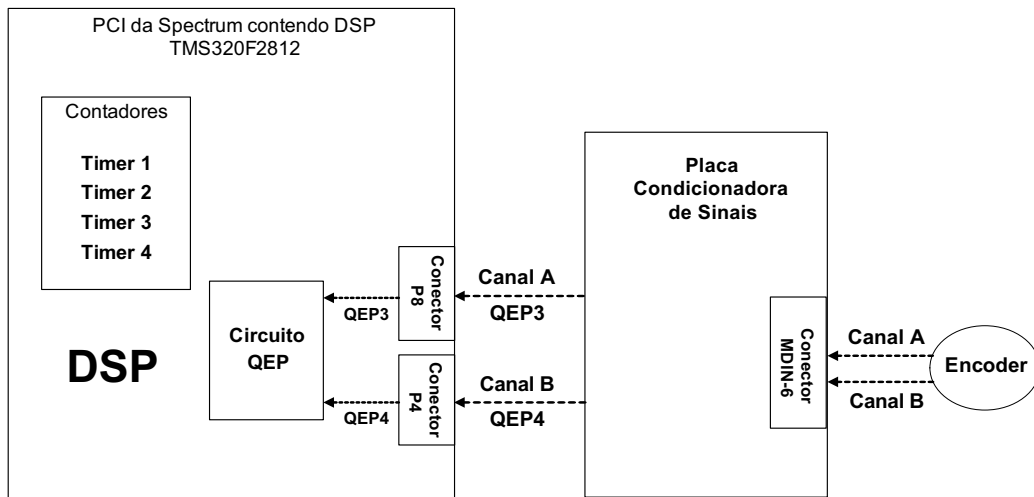


Figura 4.5: Obtenção dos sinais do *encoder*

A comutação de fases da MRV, tanto para manter o volante de inércia com velocidade constante como para sua aceleração e frenagem, é comandada pelo DSP a partir dos sinais A e B (*Channel* e *Channel B*) originados do *encoder*, referentes à posição angular instantânea do rotor. Estes dois sinais, enviados pelo *encoder*, possibilitam a obtenção da velocidade do volante de inércia após alguns cálculos realizado pelo código implementado no DSP. Os sinais A e B, ao entrarem no sistema de controle, passam a se chamar sinais QEP3 (*Quadrature-Encoder Pulse 3*) e QEP4 (*Quadrature-Encoder Pulse 4*).

Os dois sinais pulsantes oriundos do *encoder* chegam na Placa Condicionadora de Sinais pelo conector Mini-Din de 6 pinos e, após serem tratados, entram na placa principal (Spectrum Digitam) pelos conectores P8 (sinal QEP3) e P4 (sinal QEP4) da mesma.

O circuito QEP, existente no DSP, especialmente projetado para manipular com os pulsos gerados pelo *encoder*, decodifica e conta os dois sinais provenientes da Placa Condicionadora de Sinais.

O código implementado no DSP irá usar os sinais obtidos pela placa principal e enviar comandos para energizar as fases da MRV em função da posição e velocidade do rotor.

4.4 Temporizadores

O DSP, integrado na placa principal de controle, possui 4 contadores ou temporizadores (*Timers*). Todos estes Contadores/Temporizadores são utilizados nos códigos implementados nas quatro configurações montadas em bancada. Alguns detalhes da utilização destes *Timers* são descritos a seguir.

4.4.1 *Timer 2*

O *Timer 2* foi configurado para operar em uma frequência de aproximadamente 245.9kHz e apresenta a forma visualizada na Figura 4.6.

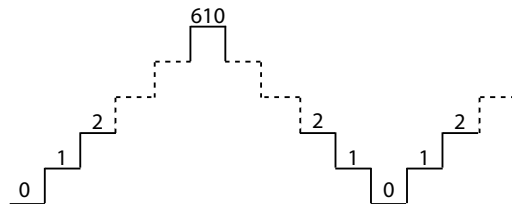


Figura 4.6: Temporizador Timer 2

A configuração deste *Timer* foi realizada de forma a proporcionar um pedido de interrupção a cada vez que se atinja o pico ou o vale do temporizador. Isto ocorre a cada $4.07 \mu\text{s}$ em um *clock* de 150MHz.

O Temporizador/Contador ou *Timer 2* é utilizado para a chamada da Rotina de Serviço de Interrupção (RSI) responsável, principalmente, pela aquisição de dados e cálculo da velocidade angular da MRV.

4.4.2 *Timers 1 e 3*

Os *Timers 1 e 3* foram configurados para operar em uma frequência de aproximadamente 15.4kHz e apresentam a forma visualizada na Figura 4.7.

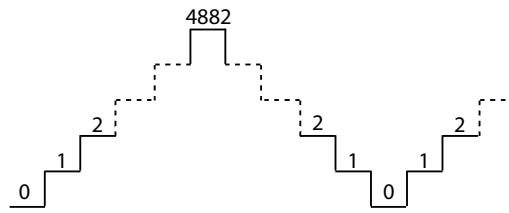


Figura 4.7: Configuração dos *Timers* 1 e 3

O *Timer* 1 é somente utilizado para gerar o sinal de onda portadora triangular no acionamento PWM da ponte assimétrica do Conversor da MRV.

O periférico *Timer* 3 é usado de maneira bastante diversificada, conforme funções que o utilizam listadas abaixo:

- Chamada da RSI T3 sempre que o contador atingir seu pico ou a cada 65.1 μs , aproximadamente;
- Geração da onda portadora triangular no acionamento PWM da ponte completa formada por IGBTs do Conversor da Rede; e
- Obtenção do tempo no cálculo da velocidade angular da MRV.

4.4.3 *Timer* 4

O *Timer* 4 foi configurado para funcionar em conjunto com o circuito responsável pelo processamento dos pulsos do *encoder*. A Figura 4.8 mostra a forma obtida deste contador pela configuração realizada neste periférico.

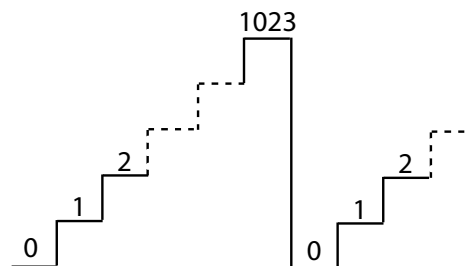


Figura 4.8: Temporizador *Timer* 4

O *Timer 4* contabilizará 4 unidades, no total de 1024, a cada passagem de pulsos (oriundos do *encoder*) dos canais A e B pelo circuito QEP. Neste período, o rotor da MRV terá percorrido um deslocamento angular de 0.35156 graus.

Quando o *Timer 4* tiver contado 1024 unidades, o rotor da MRV terá deslocado 90 graus mecânicos.

4.5 Cálculo da velocidade angular

Foram escritas e testadas duas rotinas para a aquisição dos pulsos do *encoder* e a utilização dos mesmos para a obtenção do valor da velocidade angular do rotor da MRV. As duas rotinas testadas, basicamente, utilizam os Temporizadores/Contadores T3 e T4 para o cálculo da velocidade.

A primeira rotina escrita consiste em esperar o contador T4 chegar ao seu máximo valor configurado, isto é, o valor numérico 1023. Nesta situação o rotor da MRV terá girado 90 graus mecânicos, levando-se em conta que o *Timer 4* tenha iniciado pelo valor zero. A rotina utiliza o Temporizador ou Timer 3 no cálculo do tempo decorrido para o rotor da MRV girar 90 graus para então dividir o deslocamento angular $2\pi/4$ rad pelo mesmo, chegando-se ao valor numérico da velocidade angular do rotor da MRV. A Figura 4.9 ilustra o princípio de obtenção da velocidade angular da MRV através da utilização dos Temporizadores 3 e 4 na primeira rotina implementada.

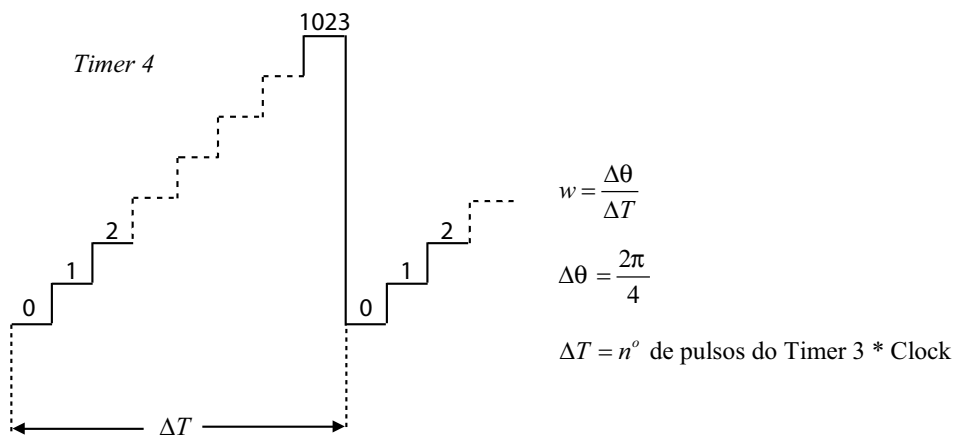


Figura 4.9: Temporizadores 3 e 4 associados a primeira rotina de velocidade

A segunda rotina escrita foi uma tentativa de se obter um cálculo da velocidade mais preciso que o anterior. A rotina determina o tempo gasto para o rotor realizar um deslocamento angular de no mínimo 20 graus e, no máximo 40 graus, realizando posteriormente o cálculo da velocidade angular da MRV. A Figura 4.10 ilustra o princípio de obtenção da velocidade angular da MRV através da utilização dos Temporizadores 3 e 4 na segunda rotina implementada.

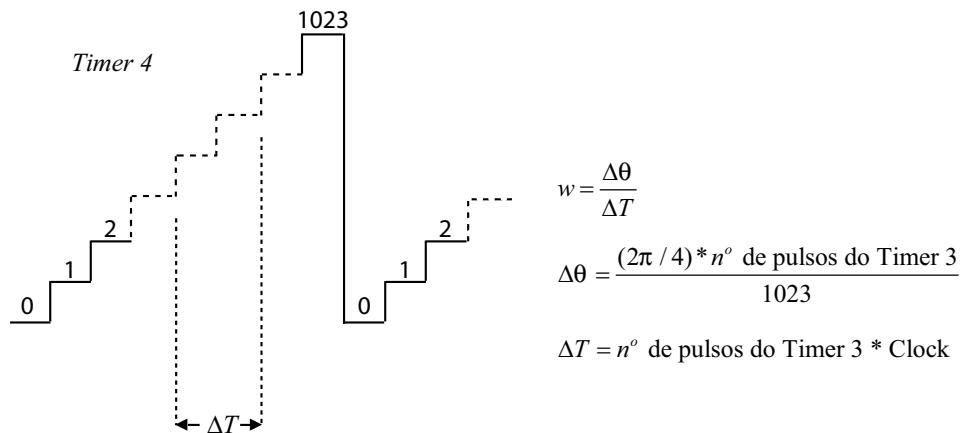


Figura 4.10: Temporizadores 3 e 4 associados a segunda rotina de velocidade

As duas rotinas escritas foram testadas comparando-se os resultados de velocidade angular obtidos através do *software* com um tacômetro digital. Os valores de velocidade angular obtidos por *software* apresentaram diferenças inferiores a 5% quando comparados com os realizados através do tacômetro.

A primeira rotina escrita foi a escolhida para ser utilizada no código implementado no DSP.

4.6 Sinais PWM no Controle dos Conversores

A técnica usada no controle dos conversores usados no SAEC é a Modulação por Largura de Pulsos (PWM).

Tanto a tensão sintetizada na entrada do Conversor da MRV pelo Conversor da Rede, no modo normal de funcionamento do sistema, quanto a tensão gerada na entrada do Conversor da Rede, funcionando com inversor, no modo regeneração ou

frenagem, é proveniente do chaveamento por PWM do Conversor da Rede.

O chaveamento por PWM também é executado no Conversor da MRV tanto no modo normal quanto no modo de regeneração do SAEC.

4.6.1 Sinais PWM na configuração monofásica do SAEC

A Figura 4.11 mostra o caminho dos sinais de chaveamento por PWM, desde o DSP até os Conversores da Rede e da MRV, na configuração monofásica do sistema.

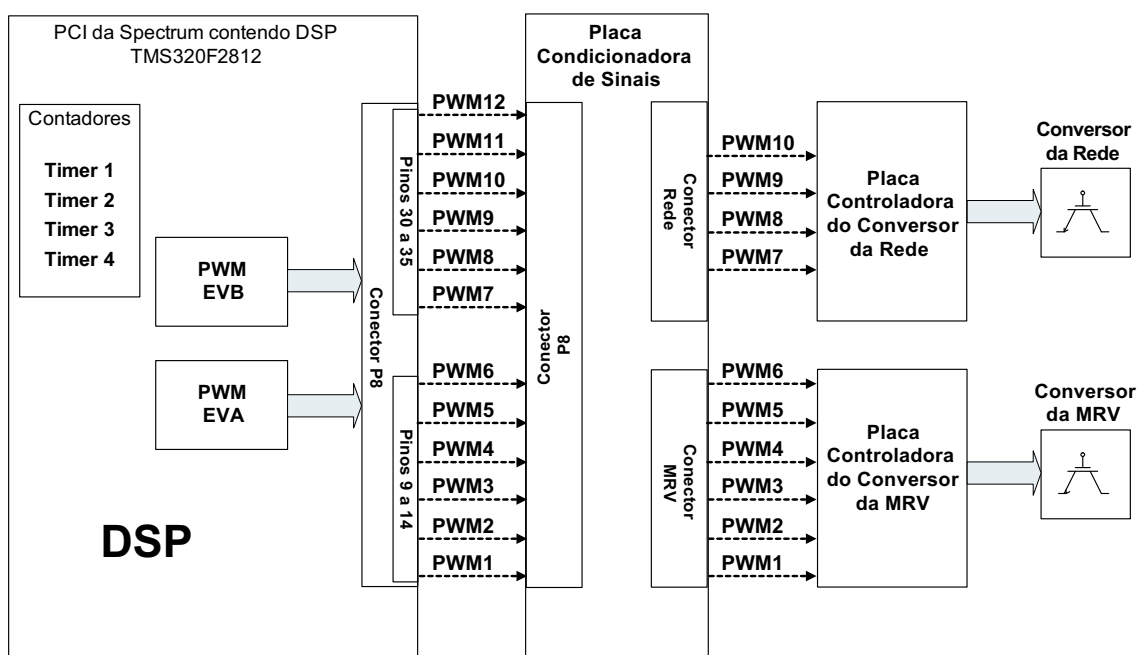


Figura 4.11: Controle por PWM na configuração monofásica

4.6.1.1 Sinais PWM no controle do Conversor da Rede

Os pulsos PWM7 a PWM10 comandam os disparos dos IGBT do Conversor da Rede e permitem a variação e regulação da tensão do elo CC de acordo com o desejado, no modo normal de funcionamento. No modo regeneração, estes sinais disparam os IGBT do conversor e o transformam em um inversor.

O periférico do DSP, EVB (*Event Manager B*), responsável pelo envio dos pulsos PWM é configurado para usar o recurso de banda morta e não permitir a ocorrência

de curto-circuito entre as fases da rede.

No caso monofásico é usada a topologia em ponte completa no Conversor da Rede, isto é, são usados apenas 4 IGBT dos 6 disponíveis no conversor. Neste caso, os Pulsos PWM11 e PWM12 são desabilitados no periférico EVB.

4.6.1.2 Sinais PWM no controle do Conversor da MRV

Inicialmente, a MRV é movimentada para alinhamento do rotor com a fase A, permitindo ao *encoder* estabelecer uma referência inicial para o posicionamento do rotor da máquina. Somente a fase A será responsável por receber os sinais de PWM, enquanto as outras permanecerão sem receber os pulsos. Nesta situação, os sinais PWM1 e PWM2 comandam os disparos dos IGBT relativos a fase A da MRV de acordo com os chaveamentos caracterizados pelos Estados 1 e 2, descritos na Seção 3.4 e ilustrados nas Figuras 3.11(a) e 3.11(b).

Todas as fases da MRV, no modo normal de funcionamento do SAEC, ao contrário do ocorrido na fase de alinhamento, podem ser chaveadas para proporcionarem a motorização (aceleração) da MRV ou sua regeneração (frenagem). Os sinais PWM1 a PWM6 mudam seus estados binários, de acordo com a necessidade da ocasião, proporcionando os chaveamentos dos IGBT do Conversor da MRV em qualquer um dos três estados possíveis, já considerados em capítulo anterior.

Ao contrário do Conversor da Rede, não será usado o recurso de banda morta pois não há a possibilidade da ocorrência de situações de curto-circuito entre fases da MRV.

4.6.2 Sinais PWM na configuração trifásica do SAEC

A Figura 4.12 mostra o caminho dos sinais de chaveamento por PWM, na configuração trifásica do SAEC.

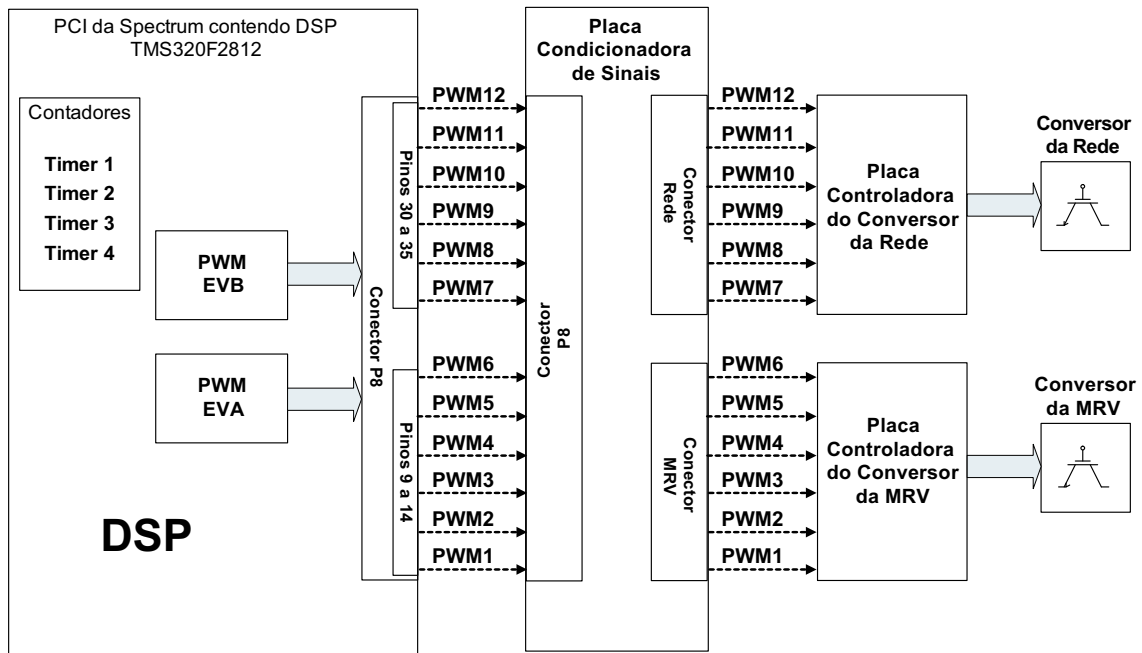


Figura 4.12: Controle por PWM na configuração trifásica

4.6.2.1 Sinais PWM no controle do Conversor da Rede

Os pulsos PWM7 a PWM12 comandam os disparos dos IGBT do Conversor da Rede e permitem o funcionamento do mesmo como inversor ou retificador controlado, conforme a necessidade do SAEC.

No caso trifásico, novamente, é usada a topologia em ponte completa no Conversor da Rede, mas agora, são usados todos os 6 IGBT dos 6 disponíveis no módulo de potência do conversor.

4.6.2.2 Sinais PWM no controle do Conversor da MRV

Os sinais de PWM para o acionamento dos semicondutores existentes no Conversor da MRV, na configuração trifásica, são enviados pela mesma lógica de controle implementada no DSP na configuração monofásica, contemplando os três estados de chaveamento dos IGBT do conversor da máquina.

4.7 Funcionamento do SAEC

Nas seções anteriores deste capítulo comentou-se a respeito de algumas funções básicas mais importantes para o correto funcionamento do SAEC, desde a aquisição de dados até o disparo dos semicondutores dispostos nos conversores do sistema.

Nesta seção são dadas informações complementares para que se entenda, de forma global, o funcionamento do SAEC nas configurações monofásicas e trifásicas. A diferença entre estas configurações reside no controle do Conversor da Rede, conforme será mostrado adiante.

Em um primeiro momento, como na maioria dos códigos escritos, são realizadas declarações e inicializações de variáveis e configurações de registradores do DSP. As operações listadas abaixo estão dentre as principais funções desta primeira etapa:

- Inicialização do sistema do DSP, estabelecendo e habilitando o *clock* de funcionamento do sistema e dos periféricos;
- Configuração do sistema de entradas e saídas do DSP, determinando os pinos de PWM e saídas digitais, determinação do *clock*, modo e sequenciamento do CAD e configurações dos Temporizadores/Contadores;
- Configuração das interrupções para a chamada das RSI responsáveis pelo controle dos conversores e pelas aquisições de dados; e
- Realização da definição, configuração e inicialização de registradores, variáveis e de códigos contendo funções matemáticas em ponto fixo.

O DSP utilizado neste experimento possui somente aritmética em ponto fixo. Esta aritmética é uma forma de expressar valores numéricos reais, porém empregando palavras binárias de comprimento finito. Muito utilizada em componentes para aplicações embarcadas, ela é uma aritmética de números inteiros e é necessária quando se quer que o processamento se faça em altas velocidades. É necessário o conhecimento da aritmética em ponto fixo para garantir a correta escrita do código a ser implementado no DSP e retrate os valores reais tratados na aplicação [40], [41].

Após a configuração e inicialização de registradores, periféricos e variáveis, se dá início a colocação do sistema em tempo real e onde o usuário liga o Conversor da Rede e escolhe o nível de tensão desejado no elo CC, por meio da colocação de valores no ambiente do software CCS.

4.7.1 Controle do Conversor da Rede

4.7.1.1 O SAEC na configuração monofásica

O esquema de controle da tensão no elo CC e corrente na entrada do Conversor da Rede é mostrado no diagrama em blocos da Figura 4.13.

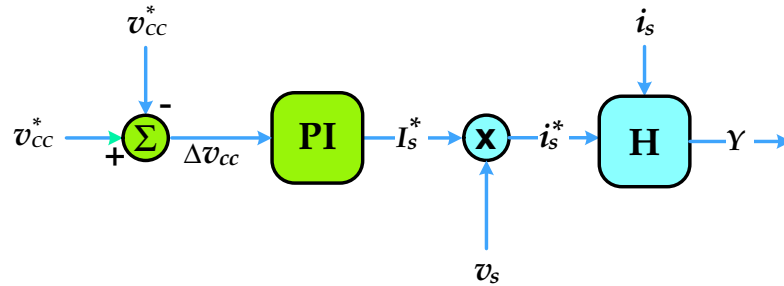


Figura 4.13: Controle do Conversor da Rede

Caso haja um aumento na potência demandada pela MRV, a energia armazenada no elo CC será transferida para acelerar ou manter uma velocidade constante do volante de inércia, acarretando na diminuição da tensão no elo CC. Para manter esta tensão regulada, deverá haver um aumento de corrente i_s . Uma explicação análoga pode ser feita caso haja uma diminuição na potência demandada pela carga.

Para o controle de corrente no Conversor da Rede, foi implementada, nas versões monofásicas, a solução encontrada em [42], que consiste em um método que leva em conta a característica monofásica da tensão de entrada e a um mínimo de operações necessárias para um pequeno esforço computacional do DSP. O controle é feito de forma que a corrente tenha a mesma fase da tensão de entrada v_s do SAEC. Para isto, é usado um PLL para a detecção da fase de v_s e geração de um sinal senoidal isento de ruído.

O PLL implementado nas versões monofásicas foi o proposto por Karimi e Iravani que possui adaptação para o sistema monofásico e que possui tanto rastreamento da fase do sinal de entrada como a amplitude da componente fundamental do mesmo. A saída reproduzirá a componente da frequência fundamental da entrada e esta será usada na geração de senos e cossenos. O PLL utilizado nos códigos das versões monofásicas deste trabalho foi implementado de acordo com trabalhos teóricos e práticos realizados na UFRJ [42] e escrito tomando-se como base a Figura 4.14.

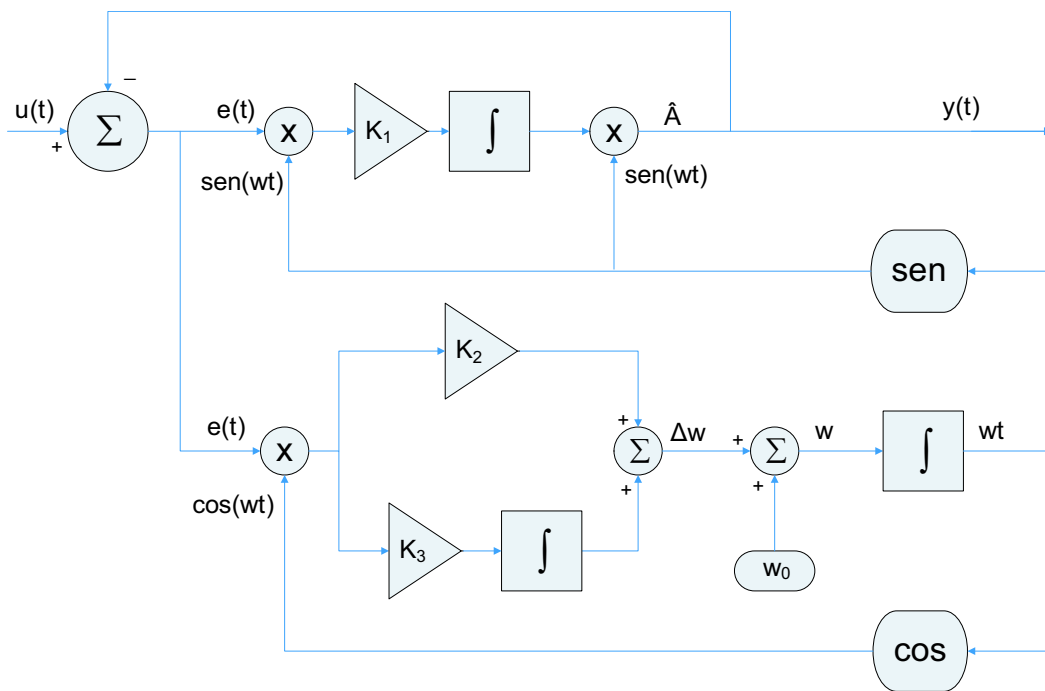


Figura 4.14: PLL implementado nas configurações monofásicas

O diagrama em blocos do controle de corrente implementado no DSP é mostrado na Figura 4.15 e inclui variáveis referenciadas em um sistema dq e compensadores PI.

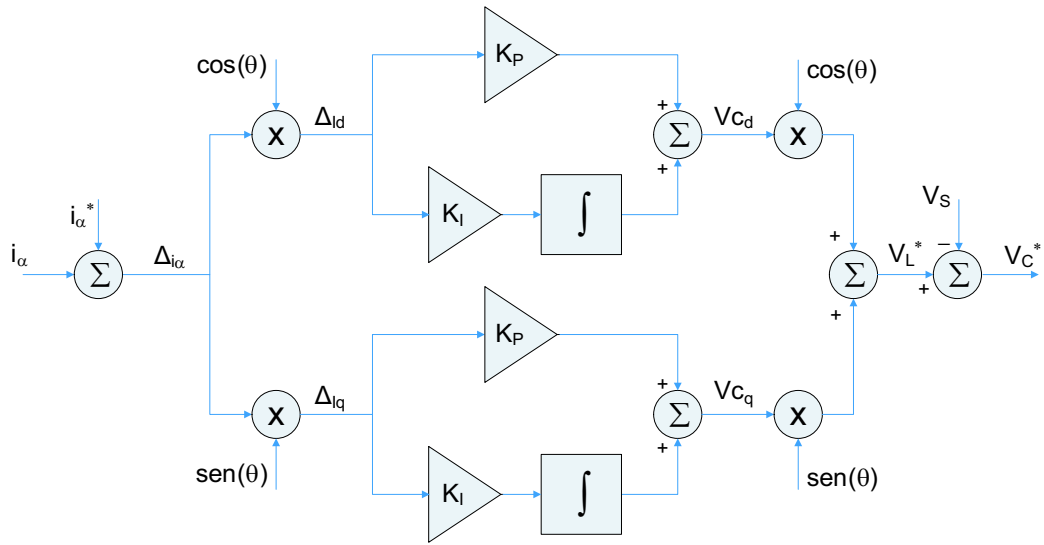


Figura 4.15: Controle vetorial monofásico

O método se utiliza do PLL na transformação do sistema estático ABC para o sistema de eixos girantes dq, por meio da transformada de Clarke e Park. As transformadas de Clarke e Park são expressas de acordo com as equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} d \\ q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Por fim, é obtido o sinal V_C^* que corretamente processado irá resultar em uma referência de PWM para os IGBTs da ponte completa do conversor da rede.

4.7.1.2 O SAEC na configuração trifásica

Como já comentado, foram realizadas modificações físicas no protótipo de modo a transformá-lo da configuração monofásica em trifásica. O Conversor da Rede passa a ser ligado na rede trifásica da concessionária.

O *Software* foi modificado e passou a contemplar o controle do Conversor da Rede trifásico. Para isto, o código foi reescrito de modo a conter trechos para o funcionamento de um PLL e controle vetorial trifásicos e a geração de tensões senoidais trifásicas para a rede, quando da ocorrência de uma falta elétrica no sistema.

O PLL trifásico foi implementado com a utilização da transformada de Clarke e pode ser visualizado por meio da Figura 4.16.

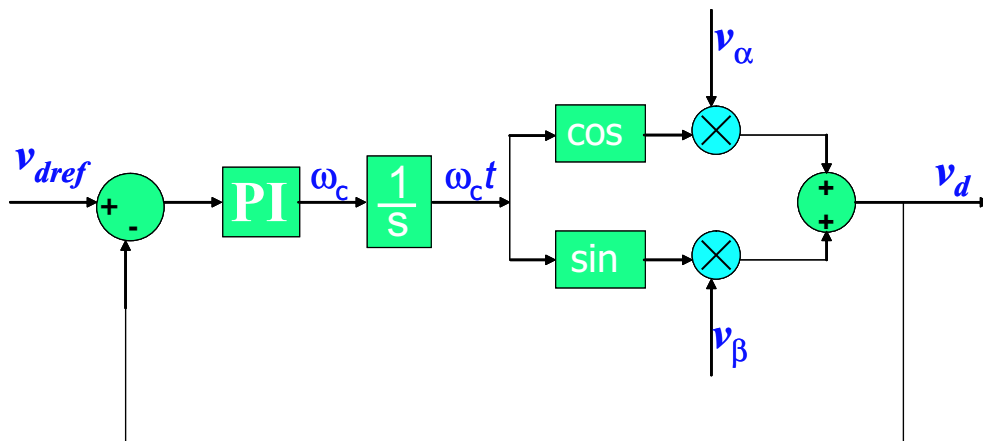


Figura 4.16: Diagrama em blocos do PLL trifásico implementado no DSP

Na configuração trifásica, é usado um outro controle vetorial para o controle de corrente, na entrada do Conversor da Rede. As grandezas alternadas, em regime permanente, se transformam em constantes, na transformação das coordenadas ABC para o sistema de eixos girantes dq.

Após algumas operações, o caminho inverso é realizado passando-se para o sistema estático ABC e o posterior envio de pulsos PWM para o controle do Conversor da Rede trifásico.

O processo do controle vetorial pode ser entendido de forma esquemática através da Figura 4.17.

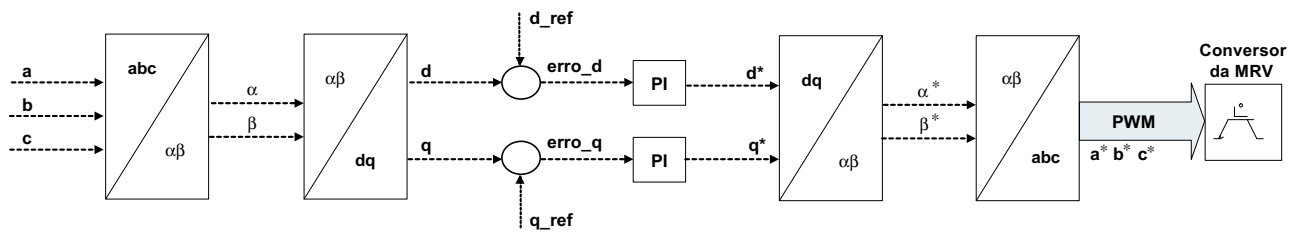


Figura 4.17: Controle vetorial trifásico nas configurações trifásicas do SAEC

4.7.2 Aplicação da falta e a regeneração

Existe um pequeno trecho de código responsável por detectar uma falta no sistema. Na ocorrência deste tipo de falha, o programa comandará o chaveamento dos IGBTs do Conversor da MRV para o modo regeneração e possibilitará o Conversor da Rede em fornecer alimentação para a rede elétrica.

O Conversor da Rede é desligado nas configurações que tem por objetivo a alimentação de cargas conectadas ao elo CC

No experimento, o Conversor da MRV funcionará levando a energia armazenada no Flywheel para o elo CC (fase de regeneração), mantendo a tensão no elo CC constante. A velocidade irá variar de acordo com a potência solicitada pela carga.

4.7.3 Acionamento da MRV

A MRV é movimentada de modo a se ter o alinhamento de seu rotor com a fase A do estator da máquina. Isto permite que o *Encoder* utilizado no protótipo, do tipo incremental, tenha a referência do posicionamento inicial do rotor da MRV.

A partir deste ponto, o programa fica em um loop infinito e de acordo com as temporizações configuradas nos *Timers 2 e 3*, duas Rotinas de Serviço de Interrupção, que compõem o centro de controle do código, são chamadas.

Como comentado anteriormente, a primeira RSI, basicamente, realiza a aquisição de dados e calcula a velocidade da MRV. A segunda realiza o controle dos conversores e espera a ocorrência da falta para comandar a regeneração do SAEC e a conseqüente

alimentação da carga crítica.

Todas as fases da máquina, ao contrário do ocorrido na fase de alinhamento, poderão ser chaveadas para proporcionarem a motorização (aceleração) da MRV ou sua regeneração (frenagem) de acordo com a situação desejada ou requerida pelo usuário ou sistema. A máquina irá ter comportamento de motor ou gerador dependendo do momento, ou mais precisamente, do ângulo do rotor, em que uma das fases do estator da máquina será energizada. Inicialmente o usuário irá determinar a movimentação da MRV até o funcionamento em regime permanente da mesma, na velocidade angular desejada inserida no ambiente CCS.

A regulação de corrente na MRV é realizada através de um acionamento PWM com controle de corrente por PI digital.

Como mencionados na Seção 3.4, são usados 3 estados de chaveamento da ponte assimétrica do Conversor da MRV para o controle da máquina na velocidade nominal, aceleração e regeneração. Para isto, são usados os modos de chaveamento unipolar e bipolar.

O modo unipolar é caracterizado, principalmente, pelos estados 1 e 2 de chaveamento, onde um IGBT da ponte assimétrica, permanece ligado, enquanto o outro chaveia, de modo a se obter a forma de corrente mostrada na Figura 3.10 e proporcionar a aceleração e posterior manutenção de velocidade constante do volante de inércia.

O modo bipolar é caracterizado pelos estados 1 e 3 de chaveamento, onde os dois IGBTs da ponte assimétrica são ligados ou desligados ao mesmo tempo. Assim, é obtida a regeneração do SAEC. Neste modo de operação, os IGBTs são acionados de forma a alimentar uma determinada fase, logo após o alinhamento do rotor com a mesma.

À medida que se aumenta a velocidade angular da máquina, é necessário realizar um avanço de disparo do IGBT relacionado a fase a ser alimentada. Esta necessidade não foi levada em conta no código implementado no DSP utilizado no protótipo.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta uma análise do resultados obtidos através de dispositivos de medição. Os resultado foram obtidos nas quatro montagens realizadas em laboratório.

5.1 Introdução

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados experimentais obtidos através de implementação prática realizada em laboratório, em quatro configurações básicas e tomando-se como base as simulações realizadas em trabalho recente [2].

Para realizar tal tarefa, foram montados dois circuitos distintos para a adaptação do sistema para a rede monofásica e trifásica. Cada um destes circuitos foi desmembrado para, cada um, trabalhar com uma lógica específica. Primeiramente iniciou-se a aquisição de dados com a topologia mais simples que foi a montagem do SAEC monofásico para alimentar uma carga CC no caso de uma falta na alimentação da rede monofásica. Seguiu-se com a mesma montagem anteriormente citada mas com a diferença de existir uma carga crítica a ser alimentada no lado da rede elétrica monofásica. As duas últimas montagens são análogas às duas anteriormente comentadas mas implementadas em um sistema elétrico trifásico.

Os resultados foram adquiridos e são apresentados e comentados na seqüência em

que as montagens foram realizadas. Esta seqüência de montagem foi adotada, por seguir uma ordem crescente de complexidade na implementação das configurações a serem programadas e montadas em laboratório. Apesar de se constatar que cada etapa é uma evolução da antecessora, cada uma possui uma aplicação própria, não devendo ser considerada apenas mais uma etapa no desenvolvimento do protótipo.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram as montagens realizadas e os locais de inserção dos instrumentos para as medições das grandezas desejadas.

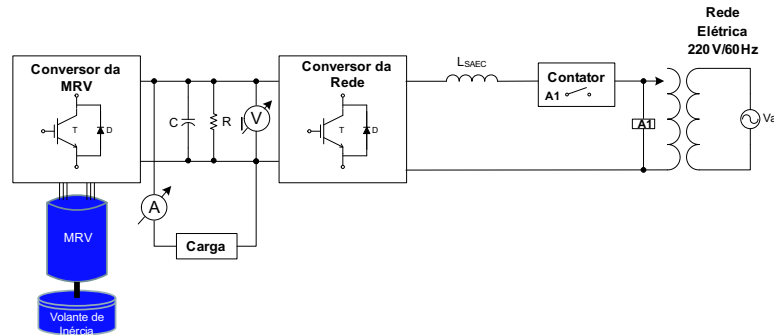


Figura 5.1: Circuito usado para alimentação de carga no elo CC

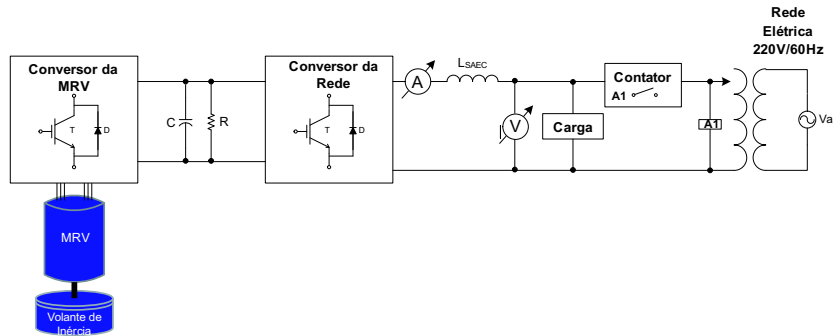


Figura 5.2: Circuito usado para alimentação de carga na rede

5.2 Resultados obtidos no sistema monofásico

O software foi escrito de forma que o conversor de rede tome conhecimento que está conectado à rede monofásica e desta forma utilize quatro chaves semicondutoras trabalhando como retificador em onda completa em um primeiro momento. Para garantir o funcionamento adequado deste retificador a tensão do elo CC deve ser

maior que a tensão de entrada em qualquer instante de tempo. Este mesmo conversor irá trabalhar como um inversor em ponte completa e irá sintetizar uma tensão trifásica a partir de uma tensão CC obtida no elo do sistema.

5.2.1 Regeneração para o elo CC

Como dito anteriormente, esta configuração é a mais simples de todas as montagens realizadas e foi a primeira a gerar resultados práticos. Inicialmente foram obtidos resultados qualitativos ao se conectar lâmpadas em paralelo ao elo CC e verificar a luminosidade das lâmpadas na regeneração até que a energia cinética útil acumulada no sistema se esgotasse. Após a obtenção de resultados satisfatórios, iniciou-se a obtenção das curvas para posterior análise.

Dados da prática implementada:

- Velocidade Nominal: 450 rad/s
- Carga: Lâmpada de 25W/200V
- Tensão do Elo CC: 100V

A Figura 5.3 reflete a potência fornecida à carga crítica conectada em paralelo ao elo CC desde o início da aceleração da MRV até o início da regeneração quando a potência passará a ser fornecida à carga.

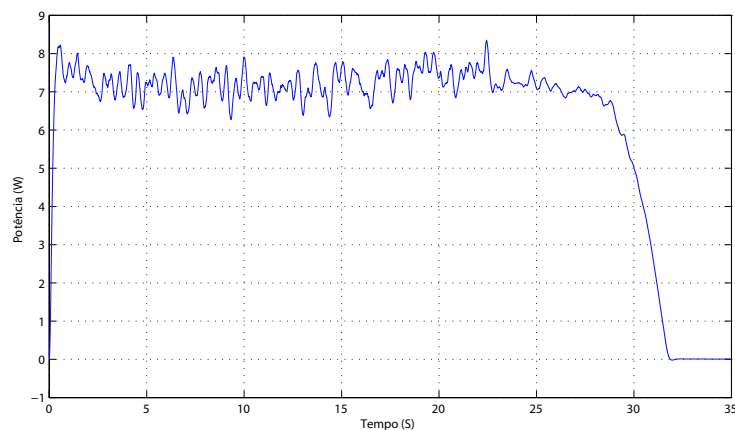


Figura 5.3: Potência na carga

A Figura 5.4 foi obtida pela aquisição do sinal de tensão no elo CC, que neste caso, é a tensão através da carga a ser alimentada. Percebe-se nesta figura que a regeneração se inicia após aproximadamente 23 segundos após o início da prática (desde a aceleração do volante de inércia). É possível verificar através da figura a queda acentuada da tensão após os 28s.

A aquisição dos sinais, isto é, a análise quantitativa é muito importante pois é fácil observar que a tensão não se mantém muito tempo constante. Através do brilho das lâmpadas (análise qualitativa) é difícil a observação desta queda de tensão.

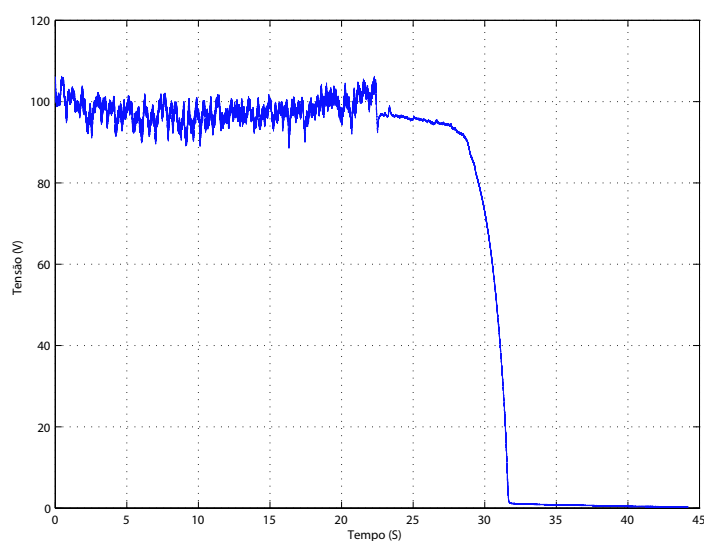


Figura 5.4: Tensão no elo CC

Com o auxílio da figura 5.5, é possível verificar todo o processo de acúmulo de energia do SAEC, desde a aceleração do volante de inércia até o aproveitamento da energia acumulada na alimentação da carga a ser mantida.

Inicialmente, o volante de inércia é acelerado até que entre em regime permanente, na velocidade angular desejada, em $t=18.5s$. Neste período, o Conversor da Rede trabalha como um retificador controlado, mantendo uma tensão constante no elo CC. O Conversor da MRV irá, inicialmente, acionar as chaves para acelerar o volante de inércia e manter uma velocidade constante (suprir as perdas) após atingir o valor desejado, inserido no software.

Aos 22.5 segundos, é simulada uma falta na rede monofásica através da diminuição da tensão da rede pelo acionamento do variac de entrada do sistema. No

momento em que o software identificar a diminuição da tensão da rede monofásica, além de um limite programado, é iniciada a regeneração ($t=22.5s$). O Conversor da MRV será o único a se manter funcionando e atuará de modo a manter a tensão constante no elo CC. O sistema suporta a alimentação da carga até $t= 31.7s$. Neste momento a regeneração termina e se dá a continuidade no movimento do volante de inércia sem que o restante da energia seja utilizada na conversão de energia cinética para a elétrica.

Considera-se que nem toda a energia cinética armazenada no volante de inércia pode ser utilizada [43], em função de que, para uma carga com potência P constante, a medida que a velocidade angular w tende a zero, o torque T tende ao infinito, e conseqüentemente a corrente I da MRV e do respectivo conversor também.

O movimento do volante de inércia termina totalmente após $t=43.9s$.

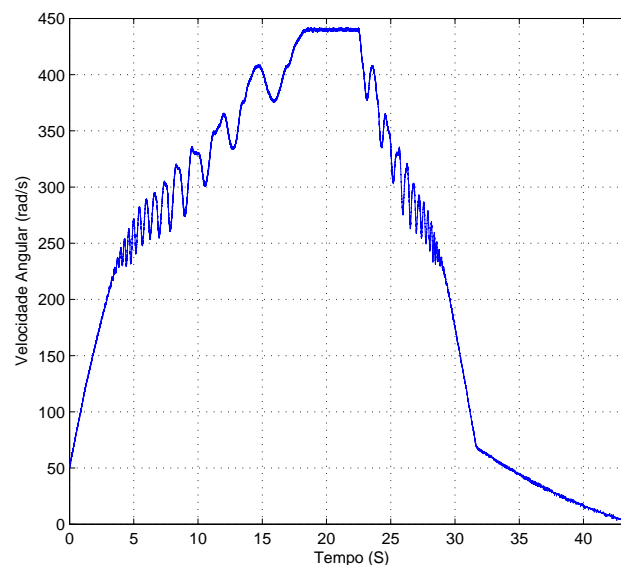


Figura 5.5: Velocidade da MRV

5.2.2 Regeneração para a rede monofásica

Esta configuração foi montada, ainda no sistema monofásico, para que se observe a alimentação de uma carga crítica, ligada na entrada do sistema, mesmo na ocasião de uma falha na alimentação da rede. Neste caso, o Conversor da MRV irá manter

a tensão constante no elo CC enquanto o Conversor da Rede funcionará como um inversor, mantendo uma tensão senoidal e compatível com o sinal da rede de alimentação.

Dados da prática implementada:

- Velocidade Nominal: 300 rad/s
- Carga: Resistor de 220Ω
- Tensão do Elo CC: 100V

Pode-se observar, pela Figura 5.6, que enquanto a MRV está sendo acelerada a potência fornecida ao SAEC é crescente, e corresponde à energia necessária para levar o volante de inércia a sua velocidade nominal. Quando a velocidade nominal é atingida, e permanece constante, percebe-se que a potência no intervalo $t=7.8s$ a $t=15.1s$, é somente aquela necessária para suprir as perdas por atrito e as perdas de comutação das chaves nos dois conversores.

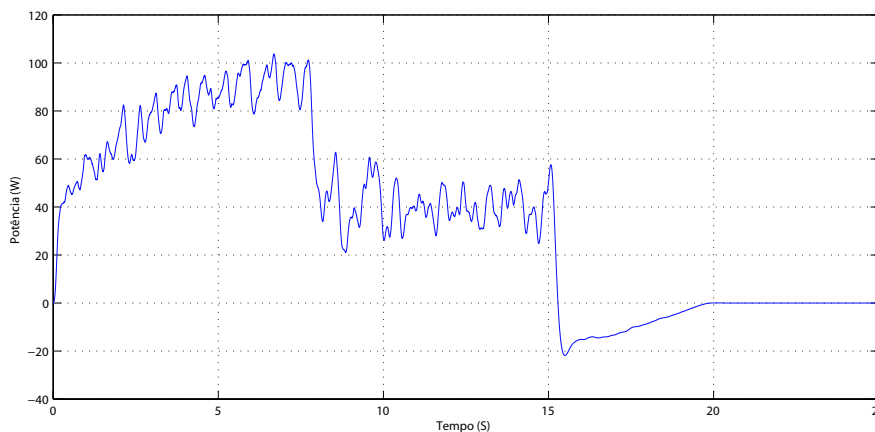


Figura 5.6: Potência na entrada do sistema

Em 15.1s é aplicada a falta na alimentação monofásica do sistema através do desligamento do variac. O tempo da aplicação da falta é facilmente identificado nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

A potência passa a ser fornecida à carga crítica (potência negativa), durante o intervalo de tempo que vai de $t=15.08s$ a $t=19.7s$.

A Figura 5.7 mostra a tensão senoidal, para a alimentação da carga, fornecida pelo Conversor da Rede que neste momento trabalha como um inversor.

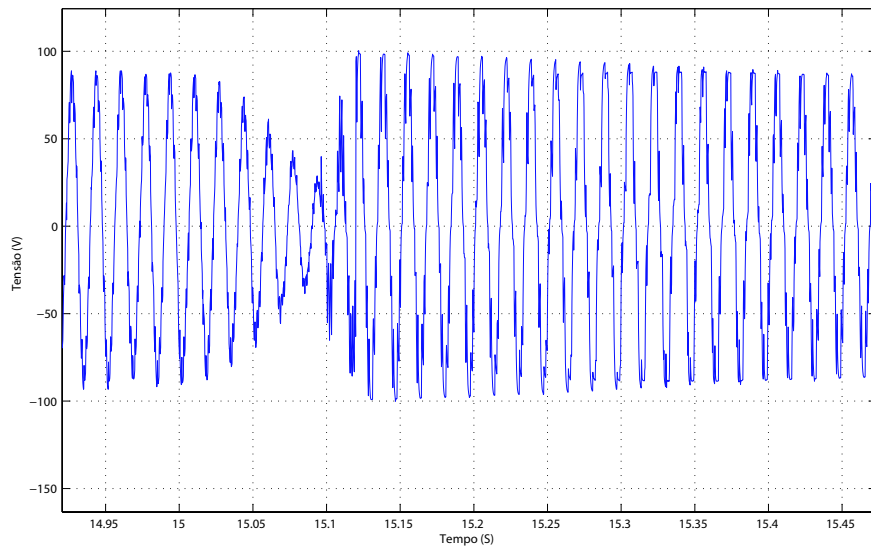


Figura 5.7: Tensão na entrada do sistema

A Figura 5.8 mostra a dinâmica da MRV desde sua aceleração até a frenagem dando condições para que o Conversor da MRV atue como um gerador e carregue o capacitor com tensão constante.

A máquina permaneceu com velocidade constante desde $t=7.8s$ a $t=15.1s$ onde, então, foi requisitada pelo sistema.

Nesta prática, a MRV girou sem fornecer energia para o sistema a partir de $t=19.7s$.

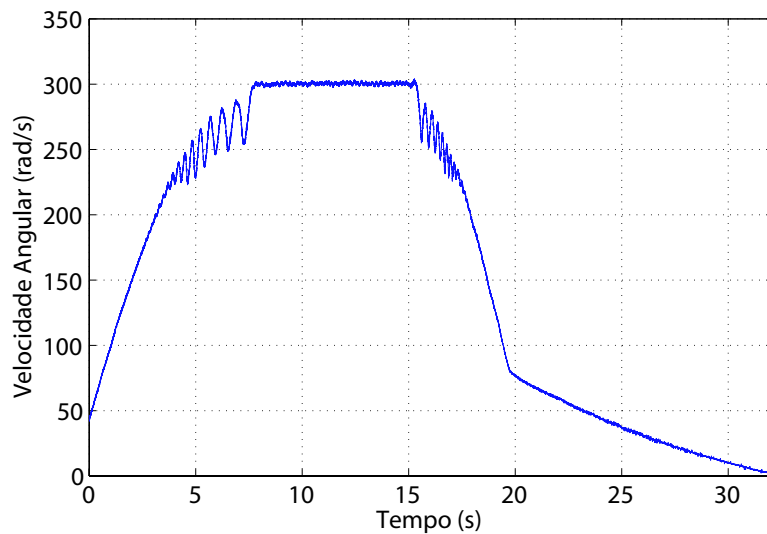


Figura 5.8: Velocidade da MRV

Nesta prática, a MRV foi acionada para girar a uma velocidade de aproximadamente 4300rpm e assim permitir a comparação deste caso com o anterior.

Dados da prática implementada:

- Velocidade Nominal: 450 rad/s
- Carga: Resistor de 220Ω
- Tensão do Elo CC: 100V

Neste caso, pode-se verificar facilmente que, devido ao aumento da velocidade de trabalho da MRV, o volante de inércia irá acumular mais energia que o anterior.

Observa-se através da Figura 5.9 que as perdas em regime permanente, no presente caso, são maiores que anteriormente.

Se por um lado, a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade, por outro, as perdas aumentam conforme aumenta a velocidade de rotação do volante de inércia. Apesar do ganho de energia cinética ser bem maior que as perdas mecânicas por contato e por atrito viscoso, é imprescindível que um sistema, que preze pela sua eficiência, se utilize de recursos que minimize estas perdas, como por exemplo, o uso de sistema de mancais magnéticos e invólucro a vácuo.

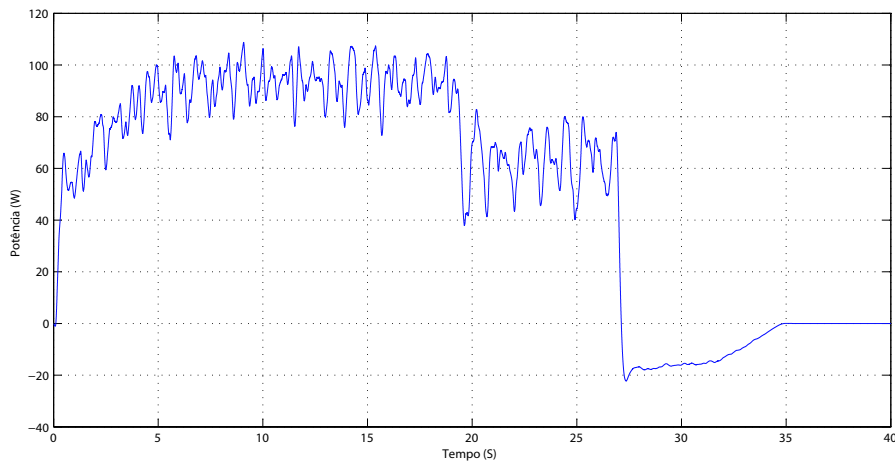


Figura 5.9: Potência na entrada do sistema

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram as aquisições da tensão de entrada do SAEC e a velocidade da MRV, respectivamente.

A MRV foi acionada e alcançou o regime permanente na velocidade angular de 450rad/s em $t=19.5\text{s}$. Aplicou-se uma falta em $t=26.39\text{s}$ resultando na alimentação ininterrupta da carga até $t=34.8\text{s}$.

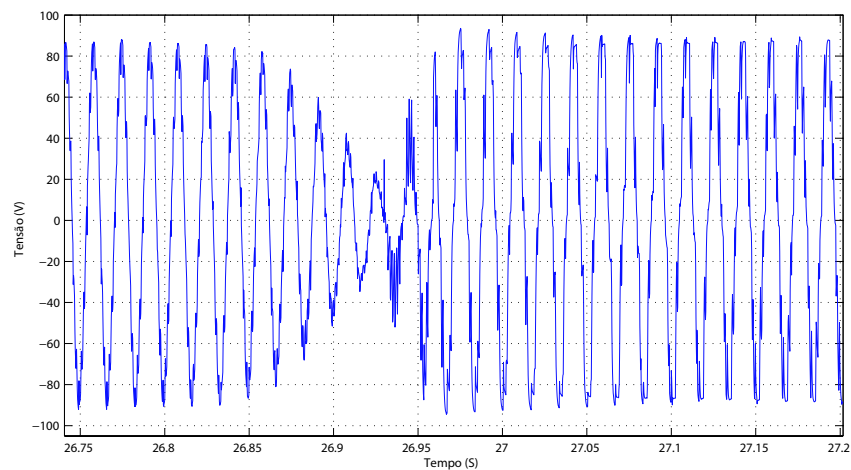


Figura 5.10: Tensão na entrada do sistema

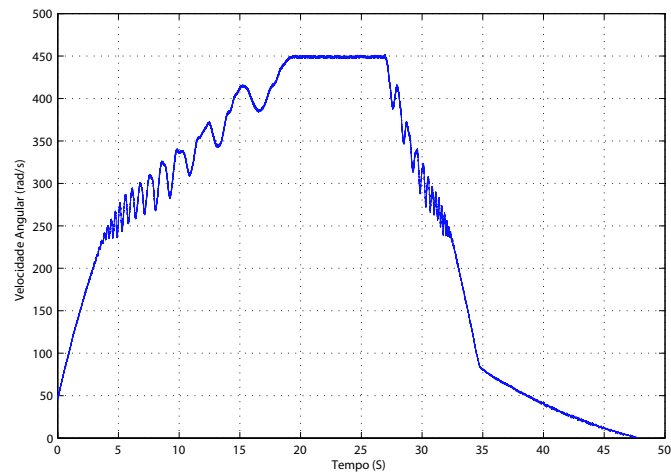


Figura 5.11: Velocidade Angular da MRV

O sistema inicialmente foi implementado com um disjuntor que era o responsável pelo desligamento da entrada de tensão para o SAEC. Por algum possível ruído introduzido pelo mesmo, o sistema não identificava a falta no sistema. Foi introduzido, então, um variac para facilitar a simulação de uma falta na rede elétrica. Mas a dinâmica para se ter tensão nula em um curto espaço de tempo é grande em relação ao disjuntor. Para dirimir qualquer dúvida sobre o funcionamento correto do software, foi retirada a tomada da rede elétrica para a comprovação do conjunto montado.

Este experimento se utilizou dos mesmos parâmetros do anterior e apresentou resultados coerentes, como pode se constatar através das Figuras 5.12 e 5.13 a seguir.

A falta foi aplicada em $t=24.4s$.

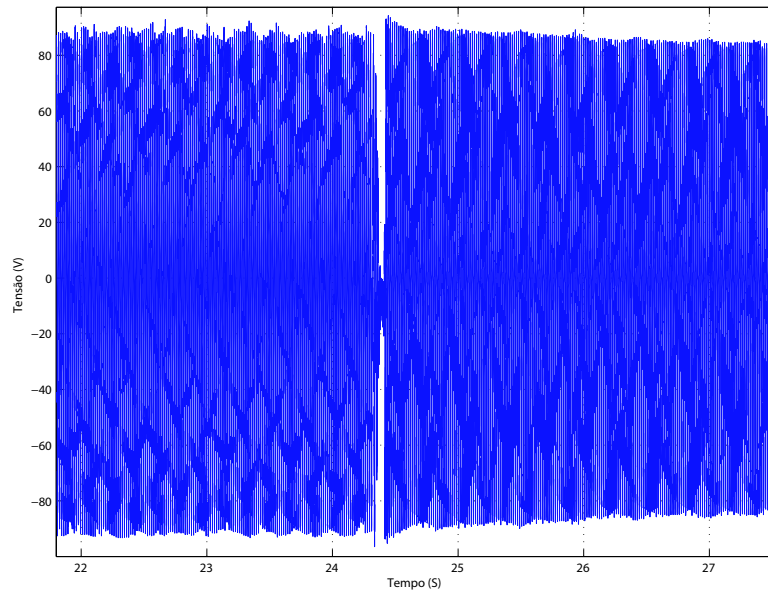


Figura 5.12: Tensão na entrada do sistema

A figura 5.13 foi ampliada para a melhor visualização da passagem da condição normal para a condição de regeneração.

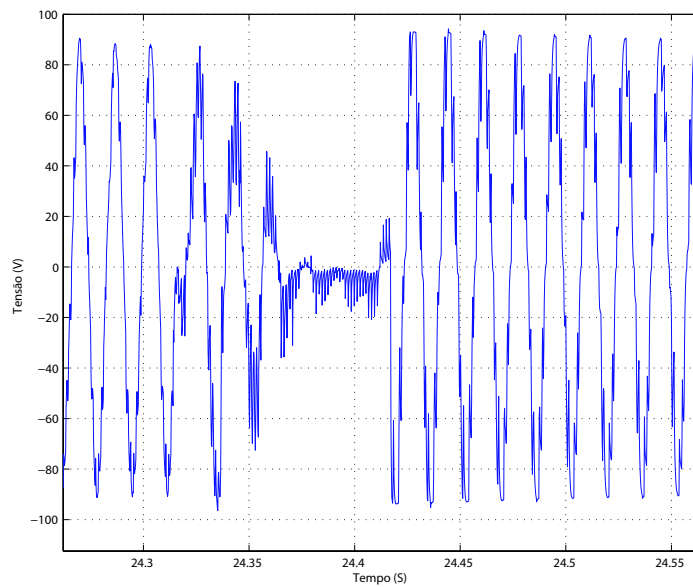


Figura 5.13: Detalhe da tensão na entrada do sistema

A prática seguinte, foi realizada com os mesmos parâmetro utilizados anteriormente mas com a utilização de dois degraus de velocidade da MRV.

Verificando-se cuidadosamente a Figura 5.14, fica evidenciado que a potência

necessária para suprir as perdas na velocidade angular final de regime é maior que a demandada em um passo anterior, já que as perdas aumentam com o aumento da velocidade.

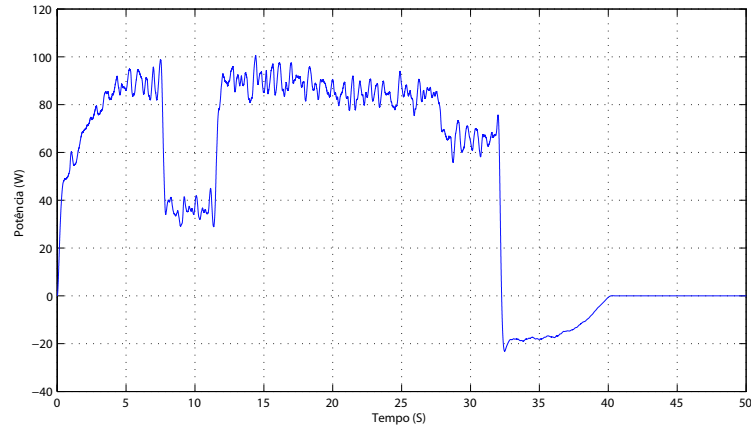


Figura 5.14: Potência na entrada do sistema

Na Figura 5.15, observa-se, que a velocidade angular intermediária se estabiliza aos 7.8 segundos na velocidade de 310rad/s e então inicia-se uma nova aceleração em $t=11.7s$ para somente atingir uma nova velocidade de regime de 440rad/s em $t=28s$.

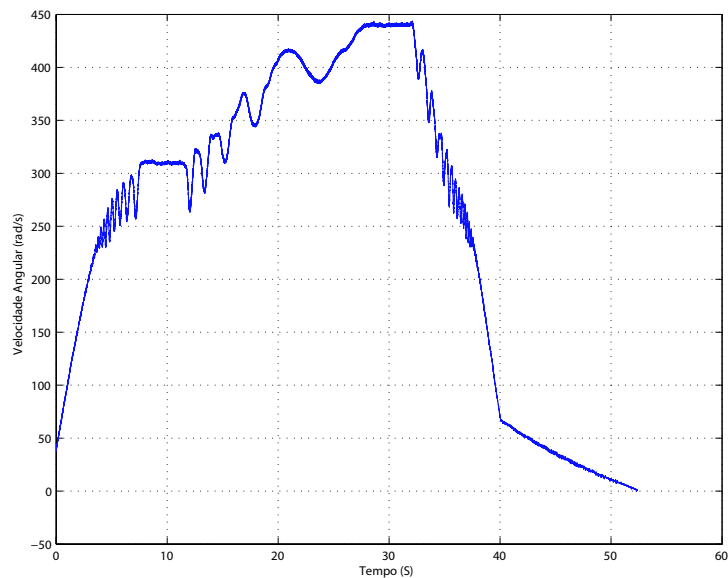


Figura 5.15: Velocidade final da MRV atingida em 2 passos

Em $t=32s$ foi forçada uma regeneração para terminar a prática monofásica.

5.3 Resultados obtidos no sistema trifásico

É importante se ressaltar que, em todas as práticas, foi usada uma tensão no elo CC de aproximadamente 100V. Algumas vezes o sistema de controle deixou de funcionar devido as altas interferências emitidas pelo grande chaveamento do sistema trifásico, quando se tentava aumentar a tensão do elo CC. Esta interferência, inclusive, afetava o correto funcionamento do encoder e conseqüentemente o funcionamento da MRV.

O software foi escrito para que o conversor de rede trabalhasse com a rede trifásica. Do mesmo modo do que realizado no caso monofásico, foram escritas duas versões de código para atender cada uma das configurações do circuito trifásico.

5.3.1 Regeneração para o elo CC

Nesta configuração, o Conversor da Rede será automaticamente desligado e não funcionará no momento da regeneração pois a carga a ser alimentada é conectada ao elo CC.

O funcionamento desta configuração é análoga ao caso de regeneração para o elo cc monofásico mas com a diferença que no funcionamento de aceleração e manutenção de velocidade da MRV é utilizado o Conversor da Rede trifásico. A alteração é tanto física como lógica.

Dados da prática implementada:

- Velocidade Nominal: 450 rad/s
- Carga: 1 Lâmpada de 25W/200V
- Tensão do Elo CC: 100V

Pela observação das Figura 5.16, 5.17 e 5.18 constata-se que a falta ocorreu em $t=17.37s$ após o volante de inércia estar girando em regime permanente desde $t=13.2s$.

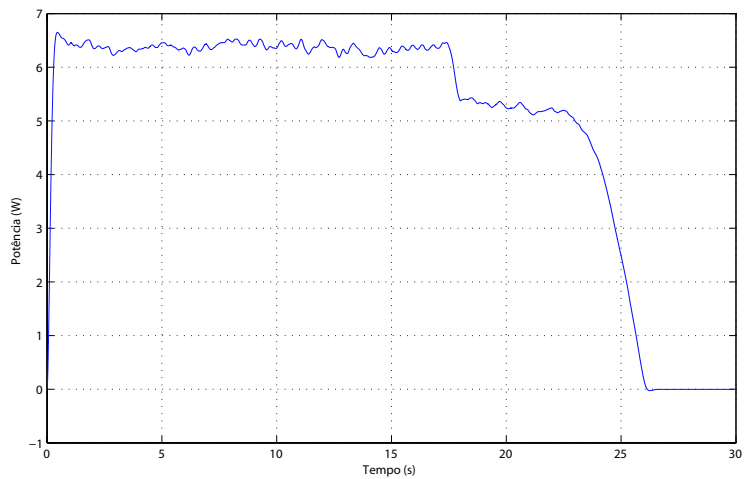


Figura 5.16: Potência na carga

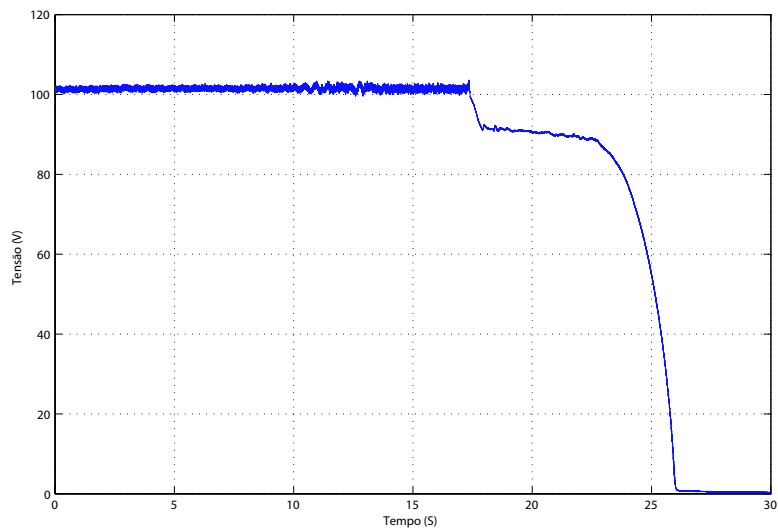


Figura 5.17: Tensão na carga

A fase de regeneração é responsável por alimentar a carga conectada no elo CC e termina em $t=26.1s$ onde se inicia o giro do volante de inércia sem a devida conversão de energia armazenada.

O volante de inércia cessa seu movimento após $t=38.9s$.

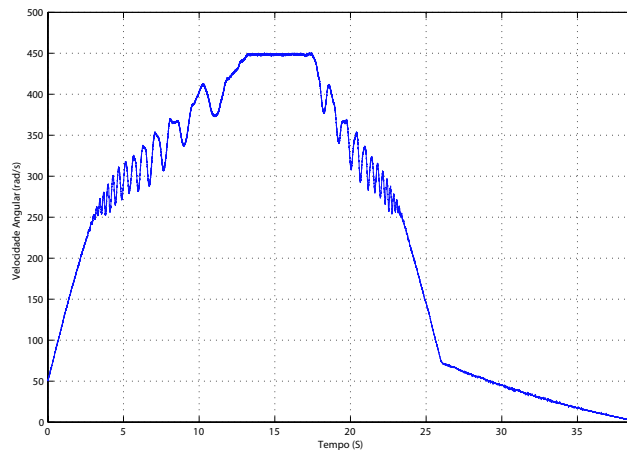


Figura 5.18: Velocidade Angular da MRV

5.3.2 Regeneração para a rede trifásica

Nesta topologia, o Conversor da Rede irá trabalhar como um retificador trifásico na etapa de aceleração e de regime da MRV mas se tornará um inversor, no momento da regeneração, fornecendo tensões trifásicas à carga conectada na rede elétrica.

Dados da prática implementada:

- Velocidade Nominal: 450 rad/s
- Carga: 3 Lâmpadas de 60W/200V
- Tensão do Elo CC: 100V

A Figura 5.19 mostra o detalhe da passagem da condição normal do sistema para a condição de regeneração após a imposição de uma falta na rede elétrica trifásica.

Pela figura pode-se verificar que as duas tensões produzidas pela regeneração possuem a mesma diferença de fase que as fornecidas pela rede elétrica (120 graus), indicando o correto funcionamento do Conversor da Rede, que neste momento está funcionando como um inversor.

Outro detalhe a ser observado, nesta figura, é a quantidade de harmônicos que este sinal produzido possui.

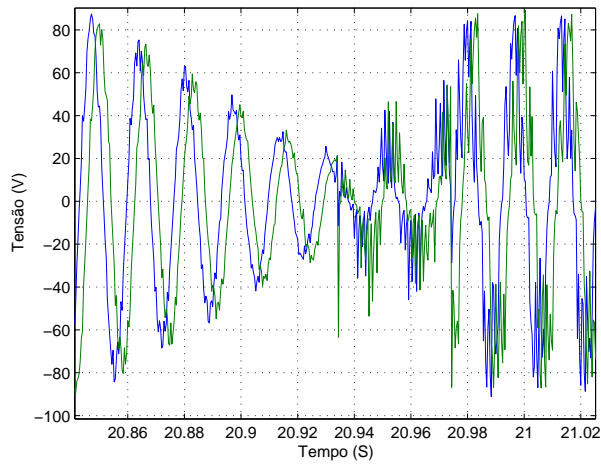


Figura 5.19: Tensões na entrada do sistema

Através da Figura 5.20 verifica-se que a velocidade angular da MRV se estabilizou em $t=15s$ e iniciou, em $t=21s$, sua frenagem por conta da imposição de uma falta na alimentação principal do sistema.

Alimentação da carga trifásica cessou em $t=30s$ e o volante de inércia parou seu movimento em $t=43.5s$.

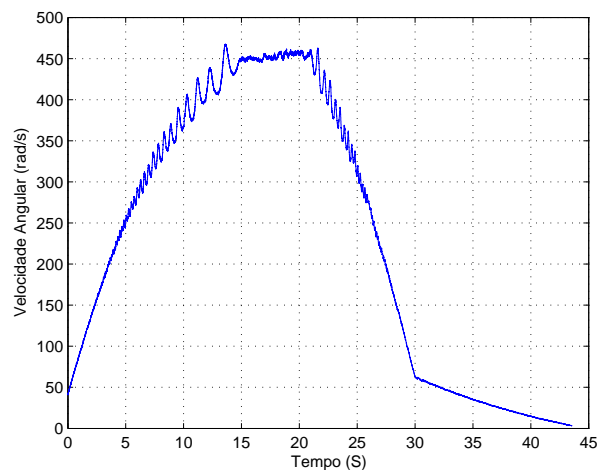


Figura 5.20: Velocidade da MRV

A Figura 5.21 mostra duas correntes aquistadas na entrada do sistema. Nota-se, também, que a amplitude dos sinais de corrente são menores quando a MRV funciona em estado de espera, o que era de se esperar.

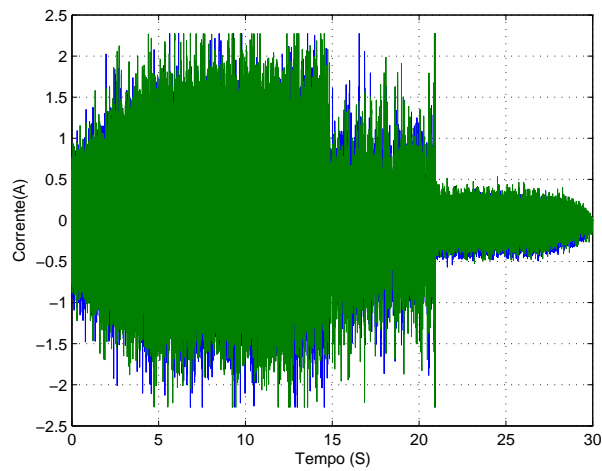


Figura 5.21: Correntes na entrada do sistema

Nesta última prática, foram usadas as mesmas 3 lâmpadas (carga trifásica) e mesma velocidade final de regime da MRV da utilizada anteriormente.

A Figura 5.22 mostra a potência demandada pela rede para acelerar a MRV até o valor de velocidade angular desejada. Pode-se constatar um aumento muito pequeno nas perdas em relação ao caso monofásico. Esta energia é gasta no chaveamento das seis chaves eletrônicas usadas no caso trifásico.

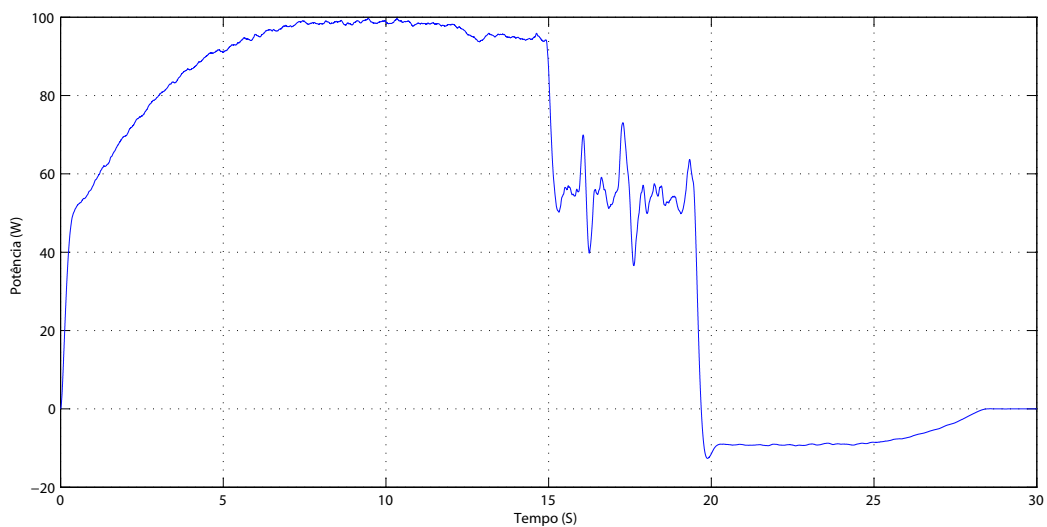


Figura 5.22: Potência na carga

Através da Figura 5.23, verifica-se que a máquina foi acelerada até atingir a

velocidade de regime em $t=15s$ e iniciou o processo de regeneração em $t=19.6s$, após a imposição de uma falta no sistema.

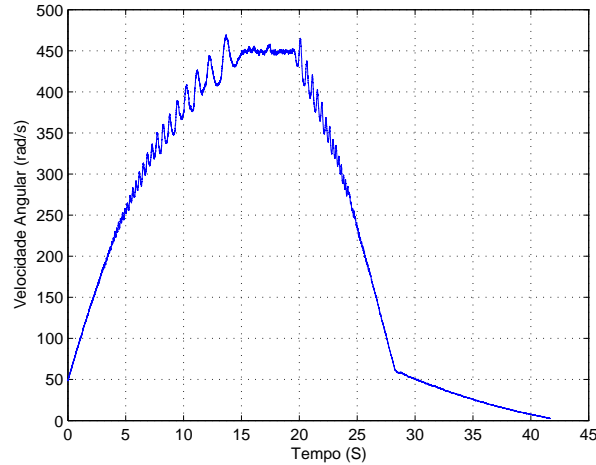


Figura 5.23: Velocidade Angular da MRV

O processo de regeneração terminou em $t=28.3s$ e o eixo da MRV cessou seu movimento após $t=41.5s$.

A seguir será feita uma análise simples em termos de energia e potência tomando-se como base as Figuras 5.22 e 5.23.

Abaixo é realizado o cálculo aproximado do momento de inércia J_{TOTAL} do conjunto formado pelo volante de inércia (ímã permanente-mancal magnético), pelo eixo do sistema de rotação e pelo rotor da MRV. Sabendo-se que:

- a base do volante de inércia (ímã permanente) é de aço SAE 1020, e é formado por 4 anéis de Al e 3 anéis de NdFeB; e
- $\rho_{Al} = 2.700 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{NdFeB} = 7.400 \text{ kg/m}^3$

tem-se:

$$J = \frac{1}{2}.m.R^2 \quad (5.1)$$

$$J_{TOTAL} = J_M + J_{ROTOR} + J_{EIXO} \quad (5.2)$$

Obtem-se então, $J_{TOTAL} = 0.003422Kg.m^2$

Observando o gráfico da velocidade (Figura 5.23), percebe-se que a variação de energia durante o intervalo de tempo da regeneração é igual a:

$$\Delta E_c = E_{cf} - E_{ci} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (w_f^2 - w_i^2) \quad (5.3)$$

Chega-se a equação 5.4 após a substituição dos valores do momento de inércia do conjunto rotor/volante e das velocidades angulares referentes ao período de regeneração na equação 5.3.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot 0,003422 \cdot (450^2 - 60^2) \quad (5.4)$$

Finalmente, chega-se ao valor da energia mecânica convertida em energia elétrica conforme resultado mostrado na equação 5.5.

$$\Delta E_c = 340,32J \quad (5.5)$$

Esta energia corresponde às perdas nos conversores, às perdas por atrito e à energia suprida à carga crítica.

Isto implica que a potência fornecida durante o período de regeneração é de:

$$P = \frac{340,3}{8,0} = 42,5W \quad (5.6)$$

Desta forma, calculando-se a potência média no intervalo da regeneração por meio do cálculo aproximado desta área na curva de potência (Figura 5.22), nota-se que a potência média vale:

$$P_{med_regenerao} = [9W \cdot 5s + (9W \cdot 3s)/2]/8s = 58,5J/8s = 7,3W \quad (5.7)$$

Subtraindo-se a potência média convertida durante a regeneração que é de 42,5 W dos 7,3 W que foi fornecida a carga, obtém-se 35,2 W, que corresponde ao

valor das perdas durante o período de regeneração. Este valor de perdas não pode ser considerado equivalente ao obtido durante, por exemplo, o período em que a velocidade angular é mantida constante, pois as perdas por atrito são proporcionais a velocidade de rotação do volante de inércia. Logo as perdas, no intervalo de 15 a 20 s, oscilando em torno de 55 W, são maiores devido ao valor constante e mais elevado da velocidade conforme pode ser observado pela figura 5.22.

Os resultados experimentais indicam ser necessário um maior acúmulo de energia no volante de inércia para que se consiga obter um cálculo mais apurado do balanço de energia. O valor de energia cinética acumulada mostrou ser próximo ao valor obtido nas perdas no processo de regeneração.

5.4 Resultados práticos x Simulados

A Figura 5.24 mostra um resultado de comparação da forma da corrente simulada com a obtida em um osciloscópio na prática.

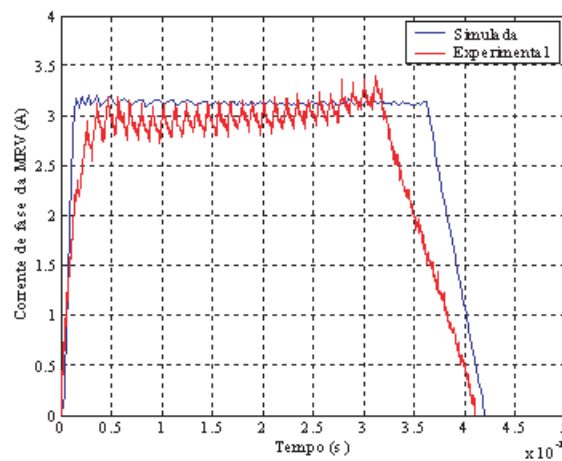


Figura 5.24: Velocidade Angular da MRV

A MRV foi acelerada até atingir e estabilizar a velocidade angular em 300rad/s.

Percebe-se uma diferença nas formas das Curvas de Corrente da MRV Simulada e

Experimental. Conforme já dito, a implementação prática se baseou nas simulações realizadas em [2] mas o código não foi escrito com a mesma lógica de chaveamento da MRV realizada na simulação.

Na simulação foi empregada a técnica de chaveamento por PWM com controle de corrente por Banda de Histerese, enquanto no protótipo foi implementado o PWM com controle de corrente por PI digital convencional para o acionamento da MRV.

5.5 Melhorias para o atual protótipo utilizado no laboratório

Observou-se que o atual protótipo existente em laboratório possui aspectos mecânicos, elétricos e computacionais que podem ser melhorados.

Segue-se abaixo alguns tópicos que poderão contribuir para a obtenção de um SAEC mais eficiente e que proporcione melhores resultados práticos:

- Projeto e/ou construção de uma MRV que possibilite o seu rotor girar a velocidades superiores a atual. Para isto poderá ser necessária a construção de uma MRV cuja estrutura externa seja a parte girante aumentando a eficiência da máquina.
- No que diz respeito a sensibilidade a grandes interferências eletromagnéticas, geradas pelos chaveamentos dos dispositivos semicondutores, nas placas de circuito impresso e circuitos eletrônicos usadas no protótipo, recomenda-se o desenvolvimento de uma comunicação serial do PC com a placa onde se encontra o DSP, a substituição do cabo do encoder utilizado por um especial blindado, uma melhor blindagem dos cabos em geral, o rearranjo das PCI do protótipo e a possibilidade, no futuro, do uso de fibras óticas.
- O desenvolvimento de uma interface amigável que facilite o uso do protótipo como equipamento didático e de uma lógica de controle implementado em um DSP de ponto flutuante.
- No que diz respeito ao software propriamente dito, ressalva-se a importância

do aprimoramento da rotina de controle de corrente nos casos trifásicos onde se utiliza a teoria de mudança do sistema de eixos abc para dq0.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas e comentadas as principais conclusões com relação ao estudo realizado. São também apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou a implementação de um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) baseada em simulações realizadas em [2]. O sistema consiste em se utilizar a energia cinética armazenada em um volante de inércia acionado por uma máquina de relutância variável. Esta energia é convertida em energia elétrica e vice-versa por meio de conversores de potência.

A 3ª geração de SAECs, por meio do emprego de novos materiais, técnicas de controle mais complexas, e dispositivos eletrônicos modernos, demonstra que seu potencial para aplicação é enorme, podendo ser aplicado em áreas bem diversas. São considerados alguns exemplos de aplicação dos SAECs nas áreas industrial, aeroespacial, militar e de transporte.

São apresentados os componentes físicos constituintes da montagem do protótipo

de um SAEC na bancada em laboratório. São feitas algumas considerações quanto as características e funcionamento da máquina e dispositivos usados no SAEC desenvolvido no laboratório.

A estratégia de controle usada foi a de se utilizar do Conversor da Rede para manter uma tensão contínua no elo CC e do Conversor da MRV para acelerar e manter constante a velocidade da máquina. No caso da necessidade de uma regeneração, o Conversor da MRV irá manter a tensão do elo CC constante enquanto o Conversor da Rede estabelecerá uma tensão compatível com a rede elétrica.

São descritos os sinais de controle adquiridos e seus respectivos processamentos através do hardware e lógica de controle inserida no DSP do SAEC.

A adoção de uma lógica de controle para a obtenção de velocidade constante da MRV através da implementação de um controlador PI de velocidade (constituindo uma malha de corrente externa ao PI de corrente) atendeu aos requisitos do sistema *flywheel* mencionados em Trabalhos Futuros em trabalho anterior [44].

Não se conseguiu obter um cálculo mais apurado do balanço de energia ,com os valores de energia cinética obtidas nos experimentos, pelo fato de se ter mais energia transformada em perdas do que em energia elétrica útil, utilizada para a alimentação da carga crítica.

A prática foi realizada aplicando quatro configurações. Foram divididas em aplicações monofásicas e trifásicas e com regeneração para cargas conectadas no elo CC (cargas CC) ou na rede elétrica (cargas CA). Em cada configuração realizada, foi montado um circuito próprio e implementado um código de programação específico no DSP.

Os resultados das práticas realizadas comprovaram que o SAEC é capaz de alimentar cargas críticas, seja no lado do elo CC ou no lado da rede, a partir da conversão da energia cinética, acumulada em um volante de inércia, em energia elétrica.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho teórico-prático surgiram questões que merecem um estudo mais aprofundado. A seguir, alguns temas decorrentes de tais questões serão comentados, visando dar continuidade a esta linha de pesquisa aqui apresentada:

- i. De acordo com as conclusões apresentadas na seção anterior, nota-se a importância da execução de velocidades angulares do volante de inércia superiores às utilizadas neste trabalho, o que possibilitaria um cálculo mais apurado do balanço de energia. Ao se aumentar a velocidade de operação da MRV, recomenda-se o estudo do uso da máquina em local onde não cause dano ao operador.
- ii. Modificação da rotina de partida da MRV que permita a energização de uma outra fase caso o rotor da máquina esteja em posição de torque nulo para a fase inicialmente energizada.
- iii. Utilização de técnicas para estimativa dos parâmetros , em ponto fixo, dos reguladores PI.
- iv. Implementação na lógica de controle de um trecho de código que possibilite a sincronização das tensões de saída, no modo regeneração, com a rede externa.
- v. Implementação de um trecho de código que leve em conta a variação de avanço de disparo dos IGBTs do Conversor da MRV em função da velocidade angular do volante de inércia.
- vi. Realizar uma modificação na lógica implementada na prática para que se possa realizar comparações com os resultados obtidos em simulação no PSCAD [2]. Para isso será necessária a implementação da técnica de chaveamento por PWM com controle de corrente por Banda de Histerese, inserida na lógica de controle do SAEC simulado no PSCAD.

Referências Bibliográficas

- [1] STEPHAN, R. M., ANDRADE JR, R., SOTELO, G. G., Third Generation of Flywheels: a promising substitute to batteries, *Revista Eletrônica de Potência*, v. 13, pp.171-176, 2008.
- [2] RIBEIRO, M. R., Sistema Armazenador de Energia Cinética – SAEC - Estratégia de Controle e Simulações. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [3] HEBNER, R., BENO, J., WALLS, A., Flywheel batteries come around again, *IEEE Spectrum*, v. 39, issue 4, pp. 46 - 51, April 2002.
- [4] JUNLING, C., XINJIAN, J., DONGQI, Z., HAIGANG, W., A Novel Uninterruptible Power Supply using Flywheel Energy Storage Unit, *Power Electronics and Motion Control Conference*, v. 3, pp. 1180-1184, Aug. 2004.
- [5] Disponível em: <http://www.piller.com/> Acesso em:24 ago. 2009
- [6] FLYNN, M.M., MCMULLEN, P., SOLIS, O., Saving Energy using Flywheels, *Industry Applications Magazine*, IEEE v. 14, issue 6, pp. 69-76, November-December 2008.
- [7] BROBECK, W.M., Design Study for a Flywheel-Electric Car, *Vehicular Technology Conference*, 28th IEEE v. 28, pp. 145-152, March 1978.
- [8] FU, X.X., XIE, X., The Control Strategy of Flywheel Battery for Electric Vehicles, *Control and Automation*, IEEE International Conference, pp. 492-496, May-June 2007.

- [9] THELEN, R.F., HERBST, J.D., CAPRIO, M.T., A 2 MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power, Vehicular Technology Conference, 58th IEEE v. 5, pp. 3231-3235, Oct. 2003.
- [10] Disponível em: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/enwiki/1259114> Acesso em:24 ago. 2009
- [11] WAGNER, R.C., BOYLE, D.R., DECKER, K., Commercialization of Flywheel Energy Storage Technology on the International Space Station, Energy Conversion Engineering Conference, 37th Intersociety, pp. 146-150, July 2004.
- [12] CHRISTOPHER, D.A., BEACH, R.F., BARTON, J.R., A Flywheel Energy Storage System Test on the International Space Station, Energy Conversion Engineering Conference, Proceedings of the 32nd Intersociety, v. 3, pp. 1762-1766, July-Aug. 1997.
- [13] Disponível em: <http://technology.grc.nasa.gov/green/energy-storage.shtmlflywheel> Acesso em:24 ago. 2009
- [14] BEAMAN, B.G., RAO, G.M., Hybrid Battery and Flywheel Energy Storage System for LEO Spacecraft, Battery Conference on Applications and Advances, The Thirteenth Annual, pp. 113-116, Jan. 1998.
- [15] BEACH, F.C., MCNAB, I.R., Present and Future Naval Applications for Pulsed Power, Pulsed Power Conference, IEEE, pp. 1-7, June 2005.
- [16] Disponível em: http://atg.ga.com/EM/defense/electric_ship/index.php Acesso em:24 ago. 2009
- [17] MCGROARTY, J., SCHMELLER, J., HOCKNEY, R., POLIMENO, M., Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship, Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, pp. 400-406, July 2005.
- [18] KULKARNI, S., SANTOSO, S., Impact of Pulse Loads on Electric Ship Power System: With and Without Flywheel Energy Storage Systems, Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, pp. 568-573, April 2009.
- [19] DOYLE, M.R., SAMUEL, D.J., CONWAY, T., KLIMOWSKY, R.R., Electromagnetic Aircraft Launch System - EMALS, IEEE Transactions on Magnetics, v. 31, issue 1, pp. 528-533, Jan. 1995.

- [20] SWETT, D.W., BLANCHE, J.G., IV, Flywheel Charging Module for Energy Storage Used in Electromagnetic Aircraft Launch System, IEEE Transactions on Magnetics, v. 41, issue 1, pp. 525-528, Jan. 2005.
- [21] Disponível em: <http://atg.ga.com/EM/defense/emals/index.php> Acesso em:25 ago. 2009
- [22] HAUGH, D., 'Field' Guns: Electromagnetic Launchers, IEE Review, v. 41, issue 4, pp. 155-158, July 1995.
- [23] Disponível em: <http://www.powerlabs.org/railgun2.htm> Acesso em:25 ago. 2009
- [24] WALLS, W.A., WELDON, W.F., PRATAP, S.B., PALMER, M., ADAMS, D., Application of Electromagnetic Guns to Future Naval Platforms, IEEE Transactions on Magnetics, v. 35, issue 1, pp. 262-267, Jan. 1999.
- [25] ABRAMS, M., Dawn of the E-Bomb, IEEE Spectrum, v. 40, issue 11, pp. 24-30, Nov. 2003.
- [26] Disponível em: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/hpm.htm> Acesso em:25 ago. 2009
- [27] SCHAMILOGLU, E., High Power Microwave Sources and Applications, Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, v. 2, pp. 1001-1004, June 2004.
- [28] Disponível em: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/v-mads.htm> Acesso em:25 ago. 2009
- [29] KLINE, J.A., Opportunities for Switched Reluctance Motor-Drives, Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 42-47, June 1999.
- [30] MILLER, T.J.E. Switched Reluctance Motors and Their Control. Magna Physics Publishing and Clarendon Press - Oxford, USA, 1993.
- [31] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., UMANS, S. D., Máquinas Elétricas, McGraw-Hill, Brasil, 1975.

- [32] ROLIM, L. G. B., Investigation of a drive system: soft-switching converter and switched reluctance motors. Dr.-Ing. thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 1997.
- [33] ANDRADE JÚNIOR, R. de, FERREIRA, A. C., SOTELO, G. G., et al., A superconducting high-speed flywheel energy storage system, *Physica C - Superconductivity*, v. 408, n. 410C, pp. 930-931, 2004.
- [34] Texas Instruments. DSP F2812 User´s manual.
- [35] eZdsp for the TMS320F2812 Quick Start GuideT
- [36] eZdsp F2812 Technical Reference Rev F 2003
- [37] eZdsp F2812 Document Number 506262 Schematic Rev C 2003
- [38] ANDRADE JUNIOR, R. de, SOTELO, G. G., FERREIRA, A.C., ROLIM, L.G.B., SILVA NETO, J.L. da, STEPHAN, R.M., SUEMITSU, W.I., NICOLSKY, R.. Flywheel Energy Storage System Description and Tests, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, pp. 2154-2157, 2007.
- [39] SILVA NETO, J. L., ROLIM, L. G. B., SOTELO, G. G., Interfacing a Flywheel-Based Energy Storage System to the Power Utility Grid Through a Switched Reluctance Motor/Generator. In: VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Fortaleza, Brasil, 2003.
- [40] LABROSSE, J. J., *Embedded Systems Building Blocks*. CMP Books, Second Edition, USA.
- [41] *Fixed-Point Blockset Users Guide*, The Mathworks Inc., 1999.
- [42] MIRANDA, U. de A., *Análise e Implementação de Conversores Monofásico-Trifásico*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [43] BERNARD, N., BEN AHMED, H., MULTON, B., KERZREHO, C., DELAMARE, J., FAURE, F., *Flywheel Energy Storage Systems in Hybrid and Distributed Eletricity Generation*”, PCIM, Nurnberg, May 2003.

- [44] BENTINHO, J. A. L., Eliminação de Sensor Mecânico no Acionamento de Máquina de Relutância Variável. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.