



**COPPE/UFRJ**

SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA – SAEC  
ESTRATÉGIA DE CONTROLE E SIMULAÇÕES

Marcelo Raposo Ribeiro

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  
José Luiz da Silva Neto

Rio de Janeiro  
Novembro de 2008

SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA – SAEC  
ESTRATÉGIA DE CONTROLE E SIMULAÇÕES

Marcelo Raposo Ribeiro

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. José Luiz da Silva Neto, Ph. D.

---

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

---

Prof. Maria Dias Bellar, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
NOVEMBRO DE 2008

Ribeiro, Marcelo Raposo

Sistema Armazenador de Energia Cinética –  
SAEC – Estratégia de Controle e Simulações/ Marcelo Raposo  
Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XVI, 141 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

José Luiz da Silva Neto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de  
Engenharia Elétrica, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 119-122

1. *Flywheel*. 2. Eletrônica de Potência. 3. Estratégia de  
Controle 4. Armazenador de Energia. I. Stephan, Richard  
Magdalena. et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho:*

*Ao meu querido avô Geraldo, um presente de Deus e um exemplo em minha vida.*

*Às minhas queridas avós Judith e Nair, hoje, estrelas a iluminarem meu caminho.*

*Aos meus pais José e Tânia, pelo amor incondicional e pelos inúmeros sacrifícios que fizeram ao longo de suas vidas em prol da minha felicidade e do meu sucesso.*

*À minha adorável irmã Márcia, pela alegria irradiada em minhas conquistas.*

*À minha amada esposa Mônica, pelo carinho, apoio e compreensão sempre presentes.*

*A vocês, minha gratidão e o meu amor.*

## AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, por ter-me concedido esta oportunidade de dedicação integral à pesquisa e ao estudo, possibilitando meu aprimoramento profissional, e confiando que os ensinamentos e conhecimentos adquiridos serão totalmente repassados, disseminados e aplicados em prol de nossa instituição naval.

Aos meus orientadores, Professores Richard Magdalena Stephan e José Luiz da Silva Neto, que sempre com muita paciência, dedicação e atenção, orientaram a condução deste trabalho e dirimiram as principais dúvidas que por ventura surgiram, a fim de que esta dissertação pudesse ser finalizada.

Ao Professor Luís Guilherme Barbosa Rolim, que sempre esteve disponível para auxiliar e indicar o caminho para a solução dos mais variados tipos de problemas encontrados durante o desenvolvimento do protótipo.

Ao Professor Rubens de Andrade Júnior, que por muitas vezes dedicou parte de seu precioso tempo em ensinamentos muito interessantes.

Estes professores são exemplos de profissionais que amam suas universidades e sabem torná-la cada dia maior, superando dificuldades e prosseguindo na busca da execução de um trabalho cada vez melhor; por conduzir seus orientados de forma objetiva e precisa, com sugestões práticas e eficientes.

Ao meu orientador na Marinha do Brasil, o Engenheiro de Tecnologia Militar Renato Vianna Barradas, que auxiliou a determinar os pontos cardeais deste trabalho, norteando o caminho a ser perseguido, e pela atenção e cordialidade que sempre dispensou a mim.

Ao meu grande amigo Mauricio El-Mann, que foi um companheiro inseparável durante o desenvolvimento deste trabalho, e co-responsável por todo êxito obtido até aqui. “Afinal, sempre se restará muito a fazer.”

À minha amiga Renata Alves, cuja experiência transmitida e incentivo foram fundamentais para o sucesso e a tranquilidade desta etapa.

Ao amigo, Guilherme Sotelo, as palavras sempre serão insuficientes para agradecer por sua relevante e constante contribuição.

Aos funcionários Ocione, Sérgio e Valbergue, que estiveram sempre prontos a socorrer em meio às necessidades de componentes elétricos, eletrônicos, equipamentos de medição, e com idéias criativas e proficuas que contribuíram para consecução deste trabalho e para o desenvolvimento do projeto da *Flywheel*.

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

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  
ESTRATÉGIA DE CONTROLE E SIMULAÇÕES

Marcelo Raposo Ribeiro

Novembro/2008

Orientadores: Richard Magdalena Stephan  
José Luiz da Silva Neto

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta a concepção de uma estratégia de controle para um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) e as simulações deste SAEC, visando dar suporte para a implementação prática de tal sistema que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O SAEC 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 LASUP/UFRJ, é composto por um volante de inércia, acoplado a uma Máquina de Relutância Variável (MRV), que opera como motor/gerador. A MRV é acionada por um conversor de potência em ponte semi-controlada (ou 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 paralelo). 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  
CONTROL STRATEGY AND SIMULATIONS

Marcelo Raposo Ribeiro

November/2008

Advisors: Richard Magdalena Stephan  
José Luiz da Silva Neto

Department: Electrical Engineering

This work presents the conception of a control strategy for a Flywheel Energy Storage System (FESS) and simulations of the FESS, which is in development at the Laboratory of the Applied Superconductivity of the Federal University of Rio de Janeiro. The aim is to give support to the practical implementation of this system.

The FESS is able to supply energy to an electrical load, from the conversion of mechanical energy, stored in a flywheel element, into electrical energy, during fault occurrences.

The FESS is formed by a flywheel, connected to a Switched Reluctance Machine (SRM), which operates as a motor/generator. The SRM 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.



## ÍNDICE:

<b>Capítulo 1: Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Estado da Arte .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. Organização da Dissertação .....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 2: Sistema Armazenador de Energia Cinética – SAEC.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Conversores de Potência.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Sistema de Controle .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3. Máquina de Relutância Variável.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4. Mancais Magnéticos e Câmara de Vácuo .....</b>	<b>16</b>
<b>Capítulo 3: Análise Comparativa entre Elementos Armazenadores de Energia....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Densidade Energética dos Elementos Armazenadores de Energia .....</b>	<b>21</b>
3.1.1 SAECs ou <i>Flywheels</i> .....	21
3.1.2 Capacitores .....	22
3.1.3 Indutores.....	22
3.1.4 Baterias.....	23
3.1.5 Represas.....	23
<b>3.2. Comparação da Densidade Energética .....</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo 4: Aplicações para o SAEC.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Qualidade de Energia Elétrica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2. Conceito <i>All-Electric Ship</i> .....</b>	<b>29</b>
4.2.1 Sistema de Catapultagem Eletromagnético .....	32
4.2.2 <i>Rail Gun</i> .....	36
4.2.3 Armas de Microondas de Alta Potência .....	38
4.2.4 <i>E-Bomb</i> .....	39
4.2.5 Armas a Laser.....	40
<b>4.3. Contribuições do Desenvolvimento Bélico .....</b>	<b>42</b>
<b>Capítulo 5: Estratégias de Controle .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1. Controle da tensão CC pelo Conversor da MRV e Controle da velocidade pelo Conversor da Rede.....</b>	<b>45</b>

<b>5.2. Controle da tensão CC pelo Conversor da Rede e Controle da velocidade pelo Conversor da MRV</b> .....	<b>47</b>
5.2.1 Controle do Conversor da MRV .....	50
5.2.2 Controle do Conversor da Rede.....	51
<b>Capítulo 6: Simulações – Modelo do SAEC e Resultados</b> .....	<b>53</b>
<b>6.1. Descrição do Modelo do SAEC para Simulação</b> .....	<b>54</b>
<b>6.2. Resultado das Simulações</b> .....	<b>74</b>
6.2.1 Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede 1φ (CC/1φ) .....	74
6.2.2 Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede 1φ (CA/1φ) .....	83
6.2.3 Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede 3φ (CC/3φ) .....	93
6.2.4 Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede 3φ (CA/3φ) .....	98
<b>Capítulo 7: Resultados Experimentais</b> .....	<b>113</b>
<b>Capítulo 8: Conclusões e Trabalhos Futuros</b> .....	<b>116</b>
<b>8.1 Conclusões</b> .....	<b>116</b>
<b>8.2 Trabalhos Futuros</b> .....	<b>117</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>119</b>
<b>ANEXO A – SAEC_Monofasico_CC.psc</b> .....	<b>123</b>
<b>ANEXO B – SAEC_Monofasico_CA.psc</b> .....	<b>127</b>
<b>ANEXO C – SAEC_Trifasico_CC.psc</b> .....	<b>131</b>
<b>ANEXO D – SAEC_Trifasico_CA.psc:</b> .....	<b>135</b>
<b>ANEXO E – Rotinas de Blocos de Controle da Simulação</b> .....	<b>140</b>

Os arquivos digitais de cada configuração do modelo do SAEC no PSCAD (extensão .psc) acompanham a versão digital desta Dissertação.

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Diagrama em blocos do SAEC – Ligação em derivação. ....	7
Figura 2: Protótipo do SAEC – Parte Interna à Câmara de Vácuo.....	7
Figura 3: Protótipo do SAEC – Câmara de Vácuo e <i>Dewar</i> . ....	8
Figura 4: Protótipo do SAEC – Sistema de Controle, Conversores Eletrônicos e Elo CC. .....	8
Figura 5: Circuito de Eletrônica de Potência.....	9
Figura 6: Circuito do Conversor da MRV.....	10
Figura 7: Circuito do Conversor da Rede Trifásico.....	11
Figura 8: Vista da Seção da MRV 6/4 – Fase 1 Alinhada.....	14
Figura 9: Vista da Seção da MRV 6/4 – Fase 1 Desalinhada.....	14
Figura 10: Seqüência de Alimentação das Fases da MRV – Operação como Motor. ....	15
Figura 11: Seqüência de Alimentação das Fases da MRV – Operação como Gerador. .	15
Figura 12: Corte do Protótipo de SAEC desenvolvido no LAUP/UFRJ. ....	17
Figura 13: Corte do Protótipo de SAEC a ser desenvolvido no laboratório. ....	17
Figura 14: Local para Posicionamento dos Blocos Supercondutores. ....	18
Figura 15: Blocos Supercondutores de YBCO.....	19
Figura 16: Criostato Resfriado pela Circulação de Nitrogênio Líquido. ....	19
Figura 17: Câmara de vácuo. ....	20
Figura 18: Fonte de Alimentação Ininterrupta.....	28
Figura 19: Compensador em derivação.....	28
Figura 20: Compensador Série.....	29
Figura 21: Sistema EMALS.....	33
Figura 22: <i>Rail Gun</i> .....	36
Figura 23: Controle do Conversor da MRV. ....	46
Figura 24: Controle do Conversor da Rede.....	46
Figura 25: Estratégia de Controle Adotada. ....	48
Figura 26: Estados de Condução do Conversor da MRV. ....	51
Figura 27: Circuito com Rede Elétrica, Conversor da Rede e Elo CC. ....	54
Figura 28: Malha de Controle da Tensão CC. ....	55
Figura 29: Geração das Correntes de Referência.....	55
Figura 30: Transformação para as Coordenadas “dq”. ....	56
Figura 31: Geração dos Sinais de Modulação. ....	56

Figura 32: Normalização dos Sinais de Modulação - PWM. ....	57
Figura 33: Interpolador de Pulsos PSCAD - PWM. ....	57
Figura 34: Modelo da MRV. ....	60
Figura 35: Conversor da MRV. ....	61
Figura 36: Estado 1 de uma fase do Conversor da MRV. ....	62
Figura 37: Estado 2 de uma fase Conversor da MRV. ....	62
Figura 38: Estado 3 de uma fase Conversor da MRV. ....	63
Figura 39: Corrente de Referência e da Fase 1 da MRV durante a motorização. ....	63
Figura 40: Corrente de Referência e da Fase 1 da MRV durante regeneração (de 16 a 18s). ....	64
Figura 41: Malha de Controle de Velocidade e Malha de Controle de Tensão durante a Falta. ....	65
Figura 42: Controle dos ângulos de condução das fases da MRV. ....	66
Figura 43: Curva de $L \times \theta_r$ e modos de operação da MRV. ....	66
Figura 44: Malha da Equação Mecânica da MRV. ....	67
Figura 45: Obtenção dos sinais “Trgon <sub>1,2,3</sub> ” para chaveamento do Conversor da MRV. ....	67
Figura 46: Chaveamento PWM dos IGBTs ímpares. ....	68
Figura 47: Comportamento dos sinais “ton” e “toff” no tempo. ....	68
Figura 48: Comparação entre “Trgon1” e “ton”. ....	69
Figura 49: Comparação entre “Trgon1” e “toff”. ....	69
Figura 50: Comparação entre “Trgon1” e “ton” durante a falta (de 16 a 18s). ....	70
Figura 51: Comparação entre “Trgon1” e “toff” durante a falta (de 16 a 18s). ....	70
Figura 52: Cálculo do erro entre o módulo da corrente de referência “Iref” (“ModIref”) e a corrente de fase medida “ $I_{L1,2,3}$ ” ....	71
Figura 53: Chaveamento por Banda de Histerese dos IGBTs pares. ....	71
Figura 54: Determinação dos tempos $t_0$ , $t_1$ e $t_2$ . ....	73
Figura 55: Bloco de Controle dos pulsos para o Conversor da MRV. ....	73
Figura 56: Configuração CC/1 $\phi$ . ....	74
Figura 57: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CC/1 $\phi$ ). ....	75
Figura 58: Curva de Torque da MRV (CC/1 $\phi$ ). ....	76
Figura 59: Zoom na Curva de Torque da MRV (CC/1 $\phi$ ). ....	76
Figura 60: Curva de Tensão no elo CC (CC/1 $\phi$ ). ....	77
Figura 61: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CC/1 $\phi$ ). ....	77

Figura 62: Corrente de Referência CA (“ <i>i<sub>aref</sub></i> ”), Corrente da Rede CA (“ <i>i<sub>a</sub></i> ”) e Amplitude de “ <i>i<sub>aref</sub></i> ” (“ <i>I<sub>amp</sub></i> ”) (CC/1 $\phi$ ).....	78
Figura 63: Correntes nas 3 fases da MRV (CC/1 $\phi$ ).....	78
Figura 64: Corrente de Referência da MRV (CC/1 $\phi$ ).....	79
Figura 65: Pulsos nos <i>gates</i> dos IGBTs 1 e 2 (CC/1 $\phi$ ).....	79
Figura 66: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 1 (CC/1 $\phi$ ).....	80
Figura 67: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 2 (CC/1 $\phi$ ).....	80
Figura 68: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 1 durante a falta (CC/1 $\phi$ ).....	81
Figura 69: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 2 durante a falta (CC/1 $\phi$ ).....	81
Figura 70: Ângulo “Teta” em graus (CC/1 $\phi$ ).....	82
Figura 71: Posição Angular “ <i>Trgon<sub>1,2,3</sub></i> ” em graus (CC/1 $\phi$ ).....	82
Figura 72: Configuração CA/1 $\phi$ .....	83
Figura 73: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CA/1 $\phi$ ).....	84
Figura 74: Curva de Torque da MRV (CA/1 $\phi$ ).....	84
Figura 75: Zoom da Curva de Torque da MRV (CA/1 $\phi$ ).....	85
Figura 76: Curva da Potência no SAEC ( <i>p<sub>famedia</sub></i> ) e da Potência na Carga ( <i>p<sub>loadmedia</sub></i> ) (CA/1 $\phi$ ).....	85
Figura 77: Curva da Tensão na Carga – Aplicação da falta em 16 s (CA/1 $\phi$ ).....	86
Figura 78: Curva da Tensão na Carga – Extinção da falta em 18 s (CA/1 $\phi$ ).....	87
Figura 79: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Aplicação da falta em 16 s (CA/1 $\phi$ ).....	87
Figura 80: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Durante a falta (CA/1 $\phi$ ).....	88
Figura 81: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Extinção da falta em 18 s (CA/1 $\phi$ ).....	88
Figura 82: Curva de Tensão no elo CC (CA/1 $\phi$ ).....	89
Figura 83: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CA/1 $\phi$ ).....	89
Figura 84: Corrente de Referência CA (“ <i>i<sub>aref</sub></i> ”), Corrente da Rede CA (“ <i>i<sub>a</sub></i> ”) e Amplitude de “ <i>i<sub>aref</sub></i> ” (“ <i>I<sub>amp</sub></i> ”) (CA/1 $\phi$ ).....	90
Figura 85: Correntes nas 3 fases da MRV (CA/1 $\phi$ ).....	90
Figura 86: Corrente de Referência da MRV (CA/1 $\phi$ ).....	91
Figura 87: Pulsos nos <i>gates</i> dos IGBTs 1 e 2 (CA/1 $\phi$ ).....	92
Figura 88: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 1 durante a falta (CA/1 $\phi$ ).....	92
Figura 89: Pulsos no <i>gate</i> do IGBT 2 durante a falta (CA/1 $\phi$ ).....	92

Figura 90: Configuração CC/3φ. ....	93
Figura 91: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CC/3φ).....	94
Figura 92: Curva de Torque da MRV (CC/3φ). ....	94
Figura 93: Curva de Tensão no elo CC (CC/3φ). ....	95
Figura 94: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CC/3φ). ....	95
Figura 95: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) (CC/3φ).....	96
Figura 96: Correntes nas 3 fases da MRV (CC/3φ).....	96
Figura 97: Corrente de Referência da MRV (CC/3φ).....	97
Figura 98: Configuração CA/3φ. ....	98
Figura 99: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CA/3φ). ....	99
Figura 100: Curva de Torque da MRV (CA/3φ). ....	100
Figura 101: Curva de Tensão no elo CC (CA/3φ). ....	100
Figura 102: “Zoom” na Curva de Tensão no elo CC (CA/3φ).....	101
Figura 103: Curva da Potência do SAEC e da Potência na Carga (CA/3φ).....	101
Figura 104: Tensões de Fase na Carga Trifásica (CA/3φ). ....	102
Figura 105: Correntes de Fase na Carga Trifásica (CA/3φ).....	102
Figura 106: Tensão de Fase na Carga R e na Carga RL (CA/3φ). ....	103
Figura 107: Correntes de Fase no SAEC (CA/3φ). ....	103
Figura 108: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) (CA/3φ). ....	104
Figura 109: Correntes nas 3 fases da MRV (CA/3φ).....	104
Figura 110: Corrente de Referência da MRV (CA/3φ).....	105
Figura 111: Configuração CA/3φ - Variação de Carga em t = 17s. ....	106
Figura 112: Tensão na Carga – Fase “a”– Período: 16 a 18s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256)...	107
Figura 113: Tensão na Carga – Fase “a”– Instante: 16s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	107
Figura 114: Tensão na Carga – Fase “a”– Instante: 17s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	107
Figura 115: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 18s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	108
Figura 116: Corrente na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).108	
Figura 117: Corrente na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	108
Figura 118: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 16s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	109
Figura 119: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) (m <sub>a</sub> =0,7256).....	109

Figura 120: Tensão na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ )...	110
Figura 121: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 16s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	110
Figura 122: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	110
Figura 123: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	111
Figura 124: Corrente na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	111
Figura 125: Corrente na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	111
Figura 126: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 16s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	112
Figura 127: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ). .....	112
Figura 128: Curva da velocidade angular (Protótipo). .....	113
Figura 129: Tensão na carga – Momento da Falta (15 s). .....	114
Figura 130: Correntes de Fase da MRV Simulada e Medida. .....	115

## ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 1: Densidade Volumétrica de Energia .....	24
Tabela 2: Densidade de Energia e de Potência por massa.....	25
Tabela 3: Baterias x SAECs. ....	26
Tabela 4: Bateria x SAEC x SMES [34] [35].....	26
Tabela 5: Comparação entre Sistemas de Catapultagem.....	35



## Capítulo 1: Introdução

Este capítulo tem como objetivo situar o leitor sobre o tema abordado nesta dissertação, apresentando a motivação, os objetivos, o estado da arte e o modo de organização deste trabalho.

### 1.1. Motivação

A missão a qual o autor foi designado pela Marinha do Brasil (MB), cursar Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro, foi fator determinante e decisivo para se desenvolver algo que possa vir a ser aplicado nos meios navais da MB, e contribuir com o desenvolvimento tecnológico desta Força Armada.

A informação de que Sistemas Armazenadores de Energia Cinética (SAECs), mais conhecidos como *Flywheels*, serão empregados pela Marinha Americana para o fornecimento de energia no lançamento de aviões em seus navios aeródromos da próxima geração, CVN-21, cuja construção do primeiro da classe foi iniciada em 2007 [1] e deverá estar em operação em 2014, despertou o interesse imediato pelo tema. As catapultas eletromagnéticas, devido às suas inúmeras vantagens que serão apresentadas no Capítulo 4, poderão vir a substituir, num futuro próximo, as convencionais catapultas a vapor. Os SAECs serão utilizados como elementos armazenadores de energia neste novo sistema de catapultagem de aeronaves.

As armas eletromagnéticas e a laser, em corrente desenvolvimento, e que muito provavelmente irão equipar as futuras plataformas de guerra navais, necessitam de pulsos elétricos de alta energia. Isto pode comprometer o funcionamento dos demais sistemas de bordo que são alimentados por energia elétrica. Os SAECs vêm sendo apontados como uma solução para alimentação destas novas armas, que necessitam de grande quantidade de energia elétrica num curtíssimo intervalo de tempo.

Estas novas possibilidades de aplicações no campo militar-naval contribuíram para incentivar o estudo sobre estes equipamentos armazenadores de energia elétrica.

A existência de um protótipo em desenvolvimento no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a disponibilidade para a realização de testes em laboratório também são fatores

motivadores, pois permitirão dar continuidade ao projeto, o que torna este trabalho ainda mais gratificante.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho objetiva conceber uma estratégia de controle adequada ao funcionamento do SAEC, tomando como caso-exemplo uma aplicação de compensação durante faltas. Isto inclui desenvolver modelos e apresentar os resultados das simulações realizadas em PSCAD, envolvendo todas as etapas de operação do sistema, desde sua inicialização, aplicação e extinção da falta, até a recuperação dos valores nominais do sistema, com a finalidade de contribuir para a implementação e construção do protótipo em laboratório.

## 1.3. Estado da Arte

A idéia de se armazenar energia mecânica em uma massa girante, ou seja, num volante de inércia, e utilizá-la para um determinado fim é algo bem conhecido pelos nossos antepassados. Inicialmente, os volantes de inércia eram utilizados para se evitar variações de velocidade em motores e geradores. Estes tipos podem ser classificados como de 1ª geração [2], cujo objetivo principal é manter uma velocidade constante de rotação de uma máquina.

Com o advento da Eletrônica de Potência e da Eletrônica Digital, foi possível se obter uma nova aplicação para o aproveitamento da energia cinética armazenada nos volantes de inércia. A partir da conversão desta energia mecânica em elétrica, é possível alimentar cargas elétricas com a tensão e a frequência desejadas. Nesta dissertação, denominamos estes sistemas de SAEC, conhecidos também por *Flywheel* ou pela sigla em inglês “FESS” (*Flywheel Energy Storage System*), cujo objetivo principal é armazenar energia cinética durante condições normais de funcionamento da rede elétrica e alimentar uma carga elétrica em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA) durante a ocorrência de uma falta na rede elétrica, ou ainda, compensar eventuais afundamentos de tensão, aumento na demanda e harmônicos no sistema. Estes podem ser classificados como os SAECs de 2ª geração [2].

A energia cinética armazenada é proporcional ao momento de inércia  $J$  e ao quadrado da velocidade angular  $\omega$ , conforme Equação (1).

$$E_c = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \quad (1)$$

Logo, um aumento na velocidade angular aumenta consideravelmente a energia armazenada no volante de inércia e a densidade de energia do SAEC. Porém, as perdas em vazio, que são o atrito viscoso com o ar e o atrito por contato nos mancais mecânicos, aumentam, prejudicando a eficiência do sistema. Além disto, as partes girantes do sistema devem suportar tensões mecânicas elevadas devido à alta rotação a que são submetidas. Estas limitações, encontradas nos SAEC de 2ª geração, já podem ser sobrepujadas devido:

- ao desenvolvimento de novos materiais compósitos, como fibras de vidro e de carbono, que permitem velocidades tangenciais de até 1 km/s (3.600 km/h);
- ao emprego de sistemas de vácuo, que reduzem as perdas por atrito viscoso com o ar;
- à utilização de mancais magnéticos, que eliminam o atrito por contato;
- ao avanço da eletrônica de potência, que permitiu melhor condicionamento de sinais; e
- à evolução da microeletrônica, que permitiu sistemas de controle mais sofisticados e de menor custo.

A reunião destes fatores, resultado de uma evolução tecnológica recente, está possibilitando o desenvolvimento e a implementação dos SAECs de 3ª geração, que possuem desempenho muito superior à geração anterior, e cuja velocidade de rotação pode atingir dezenas de milhares de rpm (aproximadamente 60.000 rpm). Desta forma, cresce o número de possibilidades para o emprego de *Flywheels*, visto que, esta nova geração possui densidades de energia e potência superiores às baterias, conforme Tabela 2, no Capítulo 3.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

Esta dissertação propõe duas contribuições para o desenvolvimento do SAEC de alta velocidade, ou seja, de 3ª geração: a concepção de uma estratégia de controle que

permita a conversão da energia mecânica em elétrica, e vice-versa, e a simulação deste sistema no PSCAD, de forma a dar suporte para a implementação da parte experimental.

No segundo capítulo, é realizada uma descrição geral do SAEC e das partes principais que compõem o sistema: os Conversores de Potência, o Sistema de Controle, a Máquina de Relutância Variável (MRV), os Mancais Magnéticos e o Sistema de Vácuo.

O terceiro capítulo apresenta uma comparação entre vários dispositivos de armazenamento de energia e os SAECs, com relação às densidades de energia e de potência, por volume e por massa, evidenciando a potencialidade das *Flywheels* de 3<sup>a</sup> geração em relação aos demais.

No quarto capítulo, são apresentadas algumas aplicações civis e militares para os SAECs, destacando o Sistema de Catapultagem Eletromagnético, mais conhecido como *Electromagnetic Aircraft Launch System* (EMALS), apontando suas características principais, o local onde será empregado e porque estará substituindo um sistema utilizado há mais de 50 anos.

O quinto capítulo apresenta duas possibilidades de estratégia de controle para os SAECs, indicando a mais adequada para futura implementação no protótipo em desenvolvimento no LASUP/UFRJ.

O sexto capítulo apresenta uma descrição detalhada do modelo de SAEC simulado, a modelagem da MRV e os resultados das simulações realizadas no PSCAD, considerando a inicialização do sistema, a aplicação da falta na rede elétrica, o suprimento de energia pelo SAEC, a extinção da falta e a recuperação das condições nominais do sistema (tensão nominal do elo CC e velocidade nominal do volante de inércia). Os gráficos de torque, velocidade e potência deste capítulo mostram o SAEC absorvendo/devolvendo energia da/para a rede elétrica. São considerados 4 casos para simulação do SAEC no PSCAD:

- Conversor da Rede Monofásico:
  - regeneração para o elo CC; e
  - regeneração para a rede elétrica.
- Conversor da Rede Trifásico:
  - regeneração para o elo CC; e
  - regeneração para a rede elétrica.

No sétimo capítulo, são apresentados alguns resultados experimentais obtidos a partir dos testes realizados com o protótipo em desenvolvimento no LASUP/UFRJ. Demais resultados práticos e a descrição detalhada da implementação experimental serão documentados em trabalho a ser publicado em futuro breve [3].

No oitavo capítulo, são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros, a partir dos resultados obtidos nas simulações e de alguns resultados experimentais.

## Capítulo 2: Sistema Armazenador de Energia Cinética – SAEC

O Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC) consiste num volante de inércia que acoplado a um acionamento elétrico é capaz de converter a energia mecânica em elétrica e vice-versa. Possui diversas aplicações, dentre as quais:

- alimentar uma determinada carga elétrica na ausência da fonte de alimentação principal;
- suprir um eventual aumento na demanda;
- compensar afundamentos de tensão; e
- alimentar cargas elétricas que requeiram pulsos de energia, como é o caso do EMALS, e de outras aplicações militares.

O protótipo que vem sendo desenvolvido no LASUP/UFRJ, apresentado nas Figuras 1 a 4, é formado pelas seguintes partes:

- Volante de Inércia;
- Máquina de Relutância Variável (MRV);
- Conversor da MRV (Conversor eletrônico bidirecional em potência);
- Elo CC (Circuito RC paralelo);
- Conversor da Rede (Conversor eletrônico bidirecional em potência);
- Sistema de Controle (Processador Digital de Sinais (DSP), Placa Condicionadora de Sinais e sensores de tensão, corrente, e velocidade (*Encoder*));
- Indutores de interligação com a rede elétrica;
- Manca Magnético Supercondutor (MMS); e
- Câmara de Vácuo.

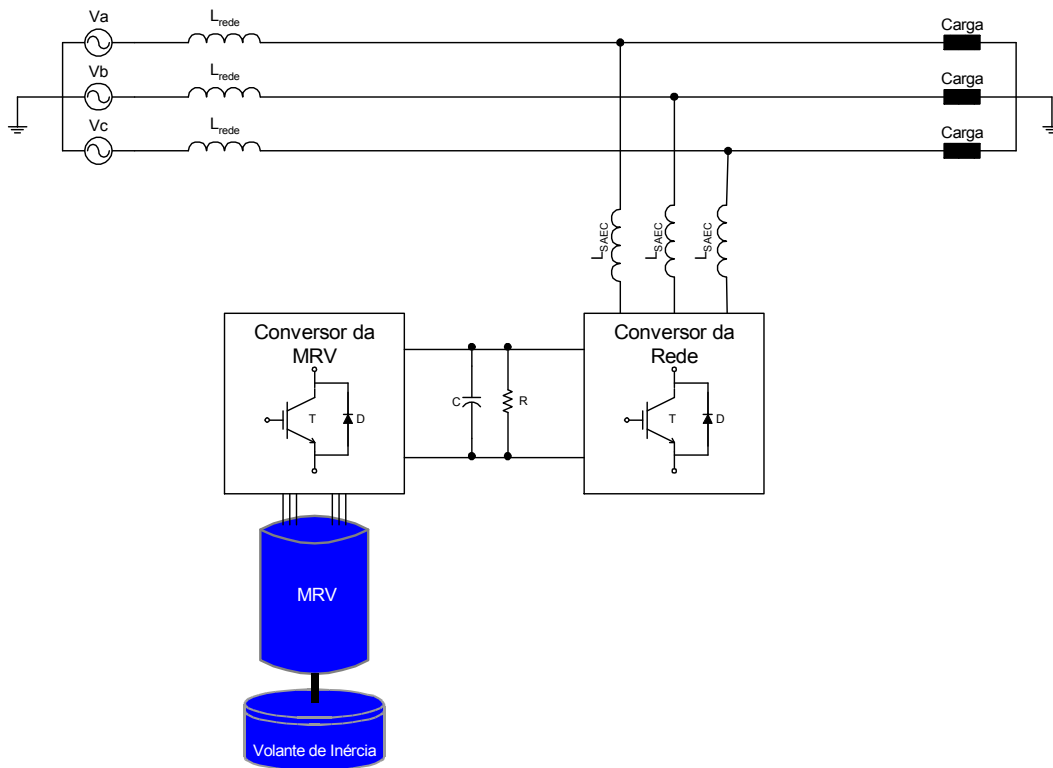


Figura 1: Diagrama em blocos do SAEC – Ligação em derivação.

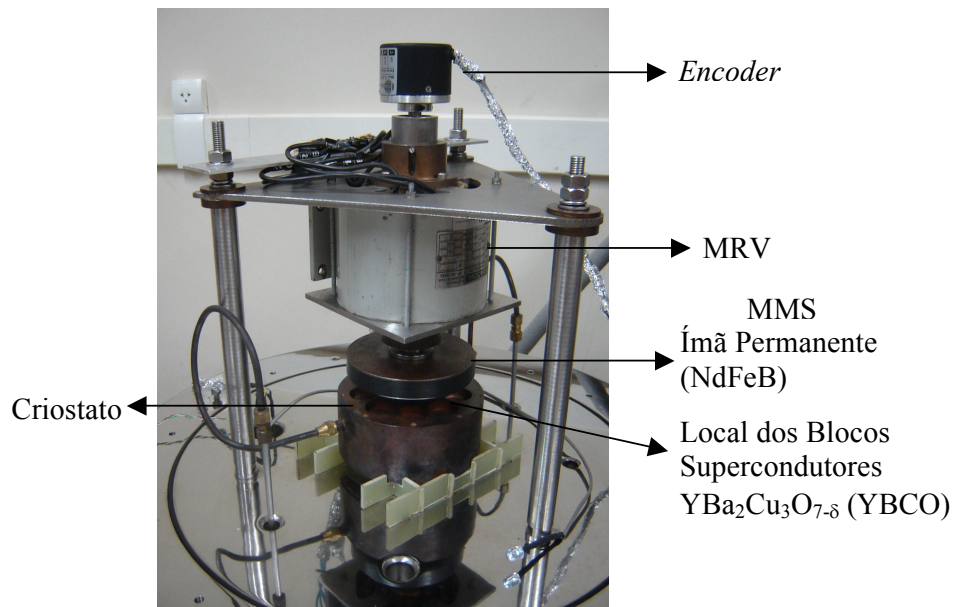


Figura 2: Protótipo do SAEC – Parte Interna à Câmara de Vácuo.

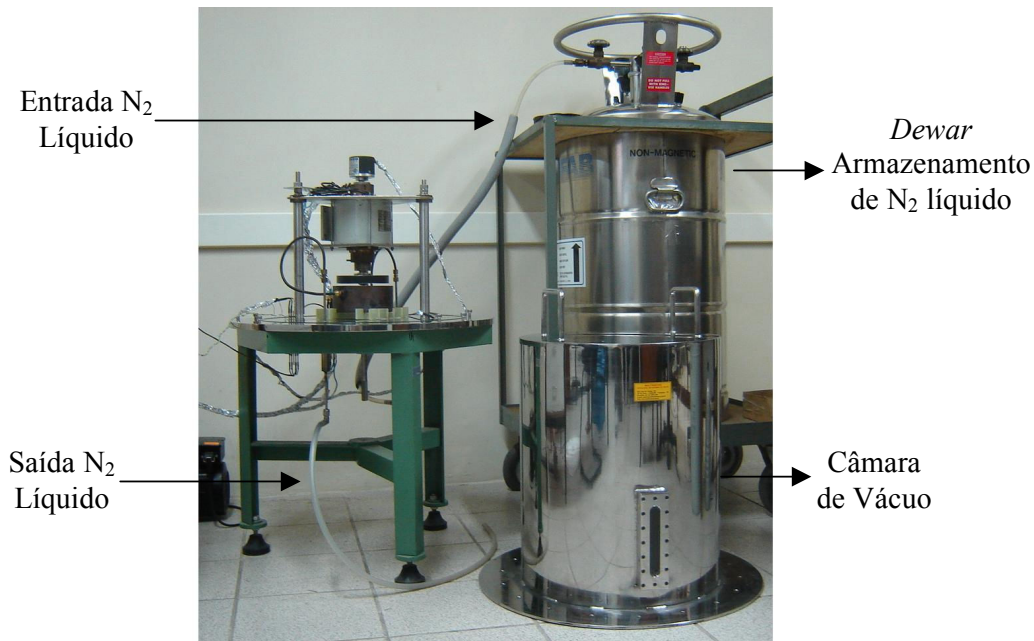


Figura 3: Protótipo do SAEC – Câmara de Vácuo e Dewar.

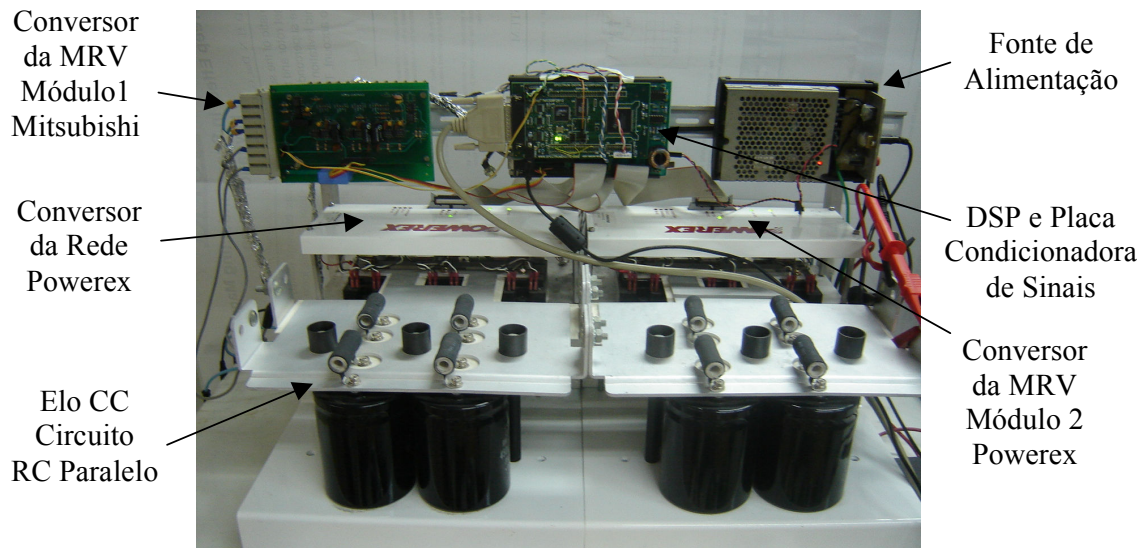


Figura 4: Protótipo do SAEC – Sistema de Controle, Conversores Eletrônicos e Elo CC.

O conjunto formado pelo ímã permanente de NdFeB e pelos blocos supercondutores  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) (Figura 2), corresponde ao Mancal Magnético Supercondutor (MMS) que serve como mancal de escora para a parte girante do SAEC. Os blocos supercondutores são resfriados por condução térmica a temperaturas



criogênicas em um criostato, por onde circula o nitrogênio líquido ( $N_2$ ), proveniente do Dewar (Figura 3).

Além da função que exerce no MMS, o ímã permanente atua como volante de inércia, juntamente com o rotor da MRV. Posteriormente, um cilindro de grande raio  $r$  e massa  $M$  poderão ser acoplados ao eixo girante para aumentar a energia armazenada no sistema, já que o momento de inércia  $J$  de um cilindro sólido é proporcional a sua massa  $M$  e ao quadrado de seu raio  $r$ , conforme Equação (2).

$$J = \frac{M \cdot r^2}{2} \quad (2)$$

Entretanto, um incremento na velocidade angular é o que mais elevará a densidade de energia do sistema, devido à proporcionalidade da energia cinética com o quadrado da velocidade, de acordo com a Equação (1). Por isso, os mancais mecânicos, presentes na primeira fase dos testes, com baixas velocidades, devem ser integralmente substituídos pelos mancais magnéticos.

## 2.1. Conversores de Potência

O circuito de eletrônica de potência consiste de dois conversores eletrônicos bidirecionais em potência e do elo CC, que serve de interface entre o Conversor da MRV e o Conversor da Rede, conforme mostrado pela Figura 5. A Figura 4 apresenta uma foto dos Conversores de Potência, do elo CC (circuito RC paralelo), do DSP, da Placa Condicionadora de Sinais (atrás do DSP) e de uma fonte de alimentação, pertencentes ao protótipo em desenvolvimento no LASUP.

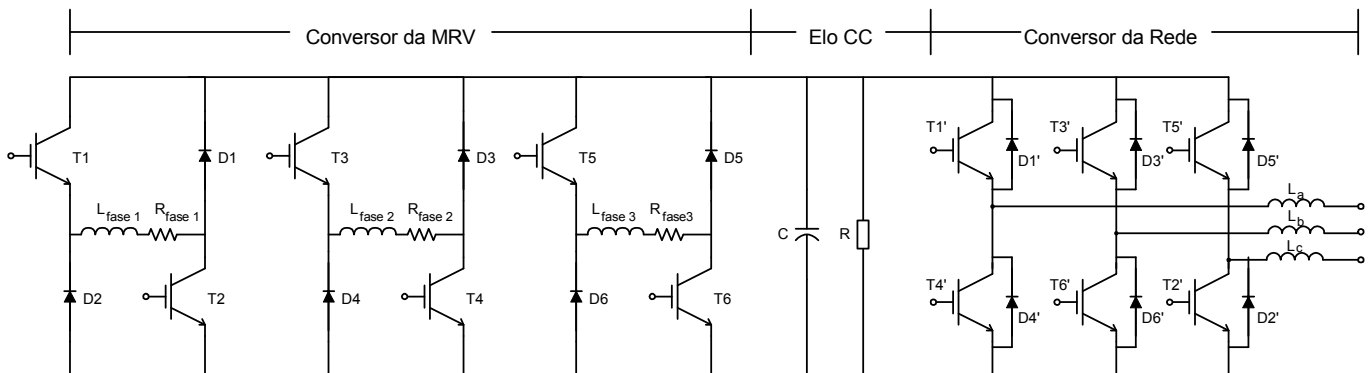


Figura 5: Circuito de Eletrônica de Potência.

O Conversor da MRV é um conversor em ponte semi-controlada (ou assimétrica) a IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), formado por dois módulos de ponte completa, conforme mostrado pela Figura 6, de maneira a controlar a MRV, e permitir que ora seja operada como motor, ora como gerador. Neste conversor, apenas um dos IGBTs de cada perna é conectado ao circuito de comando de chaveamento, enquanto o outro permanece com o *gate* desconectado, sendo utilizado somente o diodo em antiparalelo a este IGBT desativado. A técnica de chaveamento utilizada na simulação deste conversor para o acionamento da MRV é a Modulação por Largura de Pulso (PWM) com controle de corrente por Banda de Histerese. No protótipo, o controle da corrente é feito por um PI digital convencional, implementado em *software*.

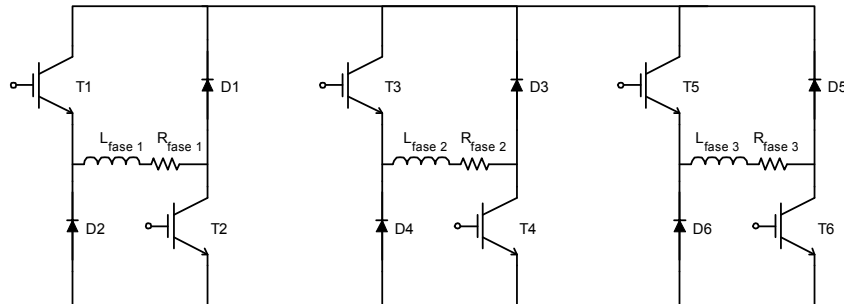


Figura 6: Circuito do Conversor da MRV.

O Conversor da Rede, Figura 7, possui configuração em ponte completa a IGBTs, controlado por PWM. No protótipo, o controle da corrente é feito por um PI em coordenadas d-q implementado por *software* para sistema trifásico. Tal controle, utilizando coordenadas d-q, também foi empregado em simulação e teste experimental em sistema monofásico [4]. Este conversor funciona como retificador ou inversor, dependendo do sentido do fluxo de potência durante o funcionamento do SAEC. Quando a carga a ser alimentada é conectada ao elo CC, este conversor é desabilitado durante o período de regeneração da energia, pois fica sem função no sistema.

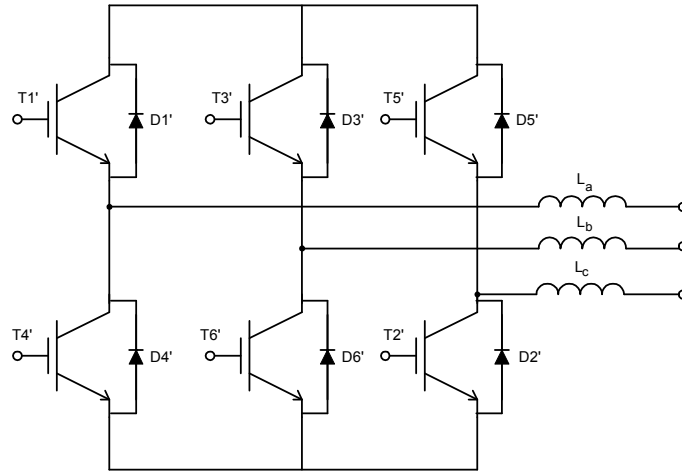


Figura 7: Circuito do Conversor da Rede Trifásico.

## 2.2. Sistema de Controle

O Sistema de Controle, composto fisicamente pelo Processador Digital de Sinais (DSP), pela Placa Condicionadora de Sinais e pelos sensores de tensão, corrente e velocidade (*Encoder*), é o cérebro do SAEC. Depois de definida a aplicação para o SAEC (alimentação ininterrupta de energia elétrica, compensação de afundamentos de tensão ou aumento momentâneo da demanda), o Sistema de Controle poderá ser desenvolvido para atender a finalidade desejada, já que, para cada aplicação são necessários um novo conjunto de variáveis a ser medido e um novo programa de computação a ser elaborado.

Os sensores do SAEC detectam os distúrbios na carga ou na rede elétrica e enviam as informações de tensão, corrente e velocidade para a Placa Condicionadora, onde os sinais são tratados e condicionados para serem transmitidos ao DSP, onde são processados, segundo um programa especificamente elaborado para a aplicação definida.

Os sinais de controle são enviados para o:

- Conversor da Rede: que de acordo com a aplicação e a estratégia de controle adotadas neste trabalho, durante a operação normal da rede elétrica, funciona como retificador controlado, mantendo a tensão do elo CC constante, e quando regenerando a energia para a rede CA, funciona como inversor, impondo na saída correntes de acordo com a compensação desejada. As correntes

sintetizadas são sincronizadas com as tensões de linha por meio de um algoritmo de sincronização do tipo PLL; e

- Conversor da MRV: que aciona a MRV, como motor ou gerador em função da saída da “Malha de Controle de Velocidade” ou da “Malha de Controle de Tensão durante a Falta”. Quando a energia para a carga está sendo suprida pela fonte de alimentação principal, este conversor aciona a MRV como motor, mantendo a velocidade de rotação constante. Durante a falta, este conversor aciona a MRV como gerador, realizando a regeneração e convertendo a energia mecânica em elétrica. Neste momento, o Conversor da MRV controla a tensão do elo CC pela “Malha de Controle de Tensão durante a Falta”, e a velocidade angular da massa girante decresce à medida que a energia é convertida.

Desta forma, o Sistema de Controle determina o sentido do fluxo de potência no SAEC.

### **2.3. Máquina de Relutância Variável**

A MRV, também conhecida na literatura como Máquina de Relutância Chaveada, devido à necessidade de se utilizar um conversor eletrônico para comutação da alimentação das fases desta máquina, foi escolhida para compor o acionamento elétrico do SAEC que está sendo desenvolvido no LASUP/UFRJ.

Um estudo prévio sobre a utilização da MRV em SAEC [5] apontou-a como uma excelente opção para o emprego neste tipo de sistema, devido ao atendimento dos requisitos necessários para esta aplicação:

- operação em uma ampla faixa de velocidades - de zero até várias dezenas de milhares de rpm (aproximadamente 60.000 rpm) [2];
- suporte ao estresse mecânico, devido às elevadas velocidades de rotação (rotor sem enrolamentos); e
- elevada confiabilidade e robustez.

Além do atendimento aos requisitos citados, a MRV possui algumas vantagens que devem ser citadas, como:

- compacta;

- de fácil construção e manutenção;
- custo de construção relativamente baixo; e
- ausência de perdas devido à variação do campo magnético, quando sem alimentação das fases, isto é, girando somente pela inércia.

Entretanto, existem algumas desvantagens em relação à utilização da MRV, destacadas a seguir:

- torque pulsante, principalmente quando operando a baixas velocidades;
- necessidade de uso de conversor eletrônico para acionamento da máquina; e
- necessidade de utilização de um sensor de posição angular do rotor (neste trabalho, um *Encoder*), ou de estratégias de estimação da posição angular do rotor, conforme [6].

Entretanto, as vantagens apresentadas pela MRV para a aplicação em um SAEC de alta velocidade superam as desvantagens mencionadas. Como o SAEC deve operar a alta velocidade, o problema da pulsação do conjugado é atenuado. Para controlar o sentido do fluxo de energia, a velocidade do volante de inércia e a tensão no elo CC no SAEC é necessária a utilização de um conversor eletrônico de potência. Logo, as duas primeiras desvantagens citadas anteriormente sobre a utilização da MRV em um SAEC são irrelevantes para a aplicação proposta nesta dissertação.

Por não ser o escopo deste trabalho, não serão apresentados em maiores detalhes os conceitos e teorias sobre a MRV. Entretanto, o leitor que desejar se aprofundar sobre esta máquina e seu acionamento poderá consultar as referências [7] - [10].

A configuração da MRV, adotada na simulação e empregada no protótipo, é a 6/4, isto é, 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor (Figura 8). Cada fase da máquina é composta por duas bobinas situadas em posições diametralmente opostas em relação ao eixo da máquina. Cada enrolamento enlaça seu respectivo pólo no estator. Na Figura 8, a bobina da fase 1 é representada em cinza escuro ao redor dos 2 pólos de uma fase do estator. Cada fase enlaça um par de pólos diametralmente opostos. Estas bobinas podem ser ligadas em série ou paralelo, desde que os fluxos magnéticos dos enrolamentos de cada fase sejam sempre somados.

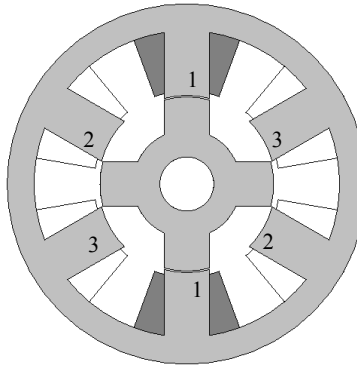


Figura 8: Vista da Seção da MRV 6/4 – Fase 1 Alinhada.

Quando um par de pólos do rotor está exatamente alinhado com o par de pólos do estator da fase em questão, diz-se que esta é a posição alinhada desta fase. Por exemplo, na Figura 8, o rotor está alinhado com a fase 1. Já na Figura 9, o rotor está desalinhado em relação a qualquer outra fase, estando na posição mais afastada em relação à fase 1, o que corresponde a uma posição de equilíbrio instável.

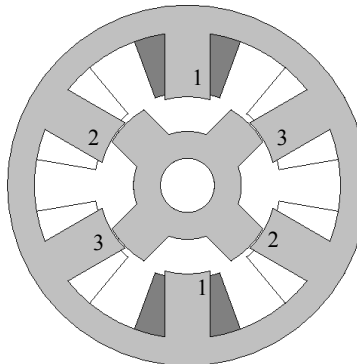


Figura 9: Vista da Seção da MRV 6/4 – Fase 1 Desalinhada.

Se, no momento em que a posição alinhada de uma fase for alcançada, a alimentação desta fase for desligada e a da fase seguinte for excitada, haverá um torque que fará com que o rotor se desloque para a posição alinhada desta fase que está sendo alimentada. Repetindo este procedimento para as demais fases da máquina de forma seqüencial, a MRV irá operar como motor, conforme pode ser visto pela Figura 10.

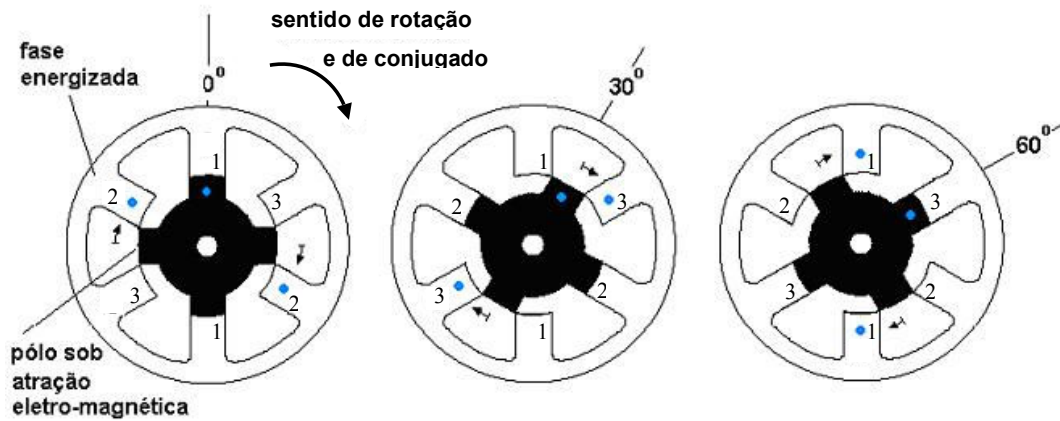


Figura 10: Seqüência de Alimentação das Fases da MRV – Operação como Motor.

Para operação como gerador, cada fase só deverá começar a ser alimentada quando a mesma estiver na posição alinhada com o rotor. A excitação desta fase permanecerá até que o pólo do rotor esteja completamente alinhado com o pólo do estator da fase seguinte, produzindo ao longo deste percurso um torque negativo. Em seguida, esta fase é alimentada até que o pólo do rotor esteja em perfeito alinhamento com o pólo do estator da fase que se segue. Realizando seqüencialmente este procedimento com as demais fases, conforme Figura 11, um torque resultante negativo igual ao somatório dos torques de cada fase será obtido, freando o rotor da MRV e permitindo que ocorra a regeneração da energia.

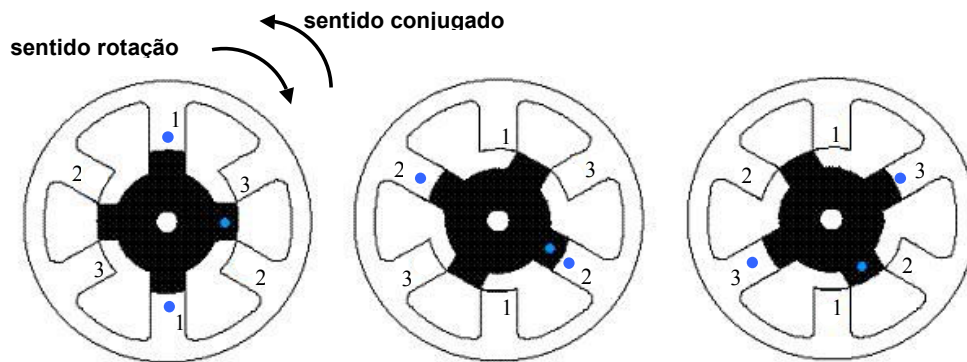


Figura 11: Seqüência de Alimentação das Fases da MRV – Operação como Gerador.

Nas Figura 10 e Figura 11, os pontos azuis no estator da MRV indicam as fases energizadas naquele momento, enquanto que os pontos azuis no rotor servem apenas de referência para a observação do sentido da rotação.

## 2.4. Mancais Magnéticos e Câmara de Vácuo

A energia cinética armazenada na massa girante é proporcional ao momento de inércia e ao quadrado da velocidade angular. Por isso, um aumento na velocidade angular implica numa elevação considerável da densidade de energia do sistema, porém ao custo do crescimento das perdas em vácuo, que são causadas pelo atrito viscoso com o ar e pelo atrito por contato nos mancais mecânicos. Estas perdas em vácuo podem ser minimizadas inserindo-se a parte girante do SAEC dentro de uma câmara de vácuo e empregando-se mancais magnéticos.

Dentre os vários tipos de mancais existentes, optou-se por utilizar mancais magnéticos a fim de diminuir o atrito por contato presente nos mancais mecânicos. Podem ser utilizados os seguintes tipos de mancais magnéticos:

- Mancais Eletromagnéticos (MEM): são os mais utilizados, porém requerem um complexo sistema de controle, e são sensíveis a distúrbios eletromagnéticos;
- Mancais de Ímãs Permanentes (MIP): apresentam menor custo, porém não provêm sustentação estável em todas as dimensões, e portanto, podem ser utilizados somente como mancais auxiliares; e
- Mancais Magnéticos Supercondutores (MMS): são auto-estáveis, porém necessitam de refrigeração criogênica, o que eleva o custo do sistema. Entretanto, a descoberta de novos materiais supercondutores e recentes desenvolvimentos em isolamento criogênica têm diminuído o custo com a refrigeração, tornando seu emprego cada vez mais viável.

No protótipo, atualmente em desenvolvimento no LASUP/UFRJ, estão sendo utilizados, para os primeiros testes, um MMS de escora em conjunto com mancais mecânicos de segurança para posicionamento radial e axial. O MMS é formado por um ímã permanente de NdFeB, que constitui o rotor do MMS, e por blocos supercondutores de YBCO, texturizados por fusão semeada. Para aumentar a rigidez do MMS, os blocos de YBCO foram resfriados a temperatura de 77K na presença do campo magnético do ímã permanente. Os blocos supercondutores e o criostato, por onde há um fluxo de nitrogênio líquido, constituem o estator do MMS.



A Figura 12 apresenta um corte do Protótipo de SAEC desenvolvido no laboratório, onde os componentes enumerados são: 1) Encapsulamento da Câmara de vácuo, 2) Suporte da MRV, 3) MRV, 4) Rotor do MMS, 5) Blocos Supercondutores de YBCO e 6) Criostato.

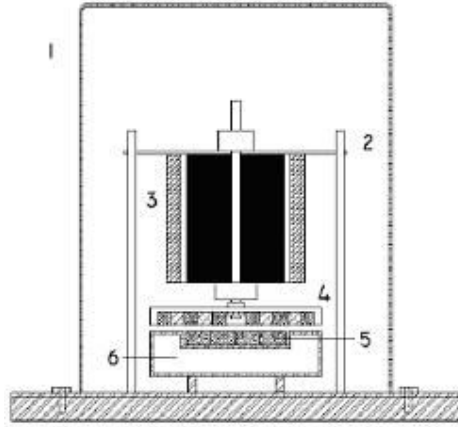


Figura 12: Corte do Protótipo de SAEC desenvolvido no LAUP/UFRJ.

Num próximo momento, será empregado no protótipo um mancal magnético do tipo “Evershed”[11], formado pela combinação de um MIP, desenvolvido para trabalhar como mancal auxiliar, e de um MMS.

A Figura 13 apresenta um corte do protótipo do SAEC utilizando um mancal do tipo “Evershed”, composto de um MIP, na parte superior do desenho, e um MMS, na parte inferior do desenho. O MIP é responsável pelo posicionamento radial e reduz a carga sobre o MMS. O MMS escora as partes girantes do sistema.

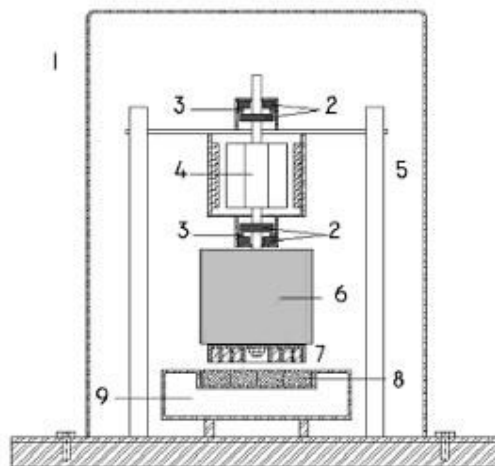


Figura 13: Corte do Protótipo de SAEC a ser desenvolvido no laboratório.

Os componentes enumerados da Figura 13 são: 1) Encapsulamento da Câmara de vácuo, 2) Mancal de Ímã Permanente (MIP), 3) Cunha de Alumínio, 4) Rotor da MRV, 5) Suporte do Estator da MRV e do MIP, 6) Volante de Inércia, 7) Rotor do MMS, 8) Blocos Supercondutores de YBCO, e 9) Criostato.

O MIP por si só não pode prover estabilidade para o sistema de mancais, conforme previsto pelo teorema de “Earnshaw” [12]. Assim, o MMS funciona como mancal de escora, proporcionando a força de sustentação para as partes girantes, e o MIP desempenha 2 papéis: o posicionamento radial e a redução da carga sobre o MMS.

O MIP foi projetado por programa computacional empregando-se o método de elementos finitos [13], e é capaz de produzir uma força axial de levitação de até 700 N com 2 mm de entreferro [14].

O MMS utilizado no protótipo consiste de um rotor de ímãs permanentes de NdFeB, montados na configuração fluxo concentrado [15] e fixados ao eixo do MRV, e de um estator formado por 9 blocos supercondutores de YBCO texturizados por fusão semeada, com 28 mm de diâmetro e 10 mm de altura, posicionados na parte superior cilíndrica do criostato, conforme Figura 14.

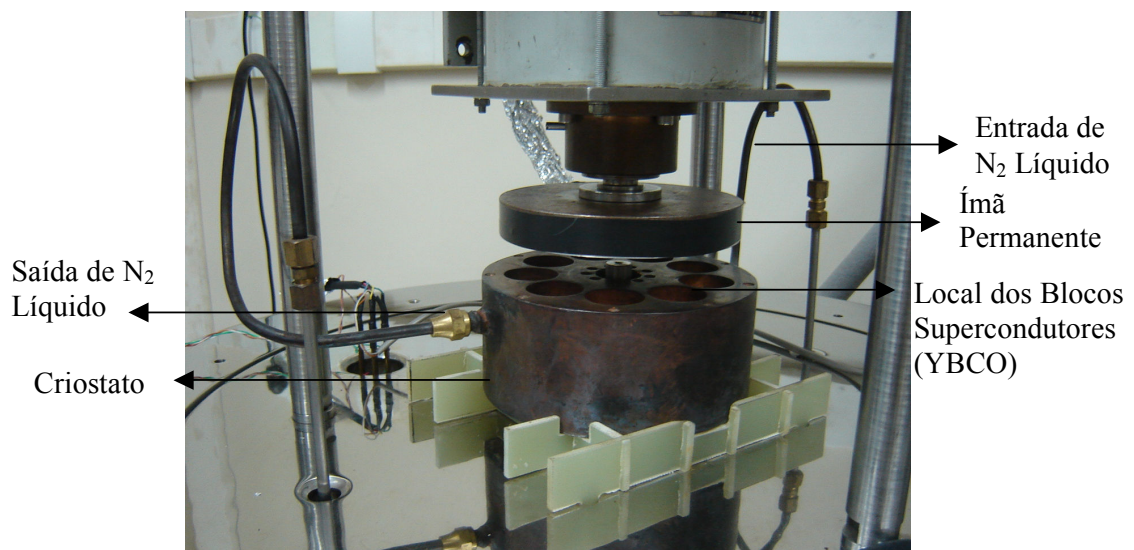


Figura 14: Local para Posicionamento dos Blocos Supercondutores.

Os blocos supercondutores, Figura 15, são mantidos na câmara de vácuo e refrigerados por condução térmica a partir da parte superior do criostato.



Figura 15: Blocos Supercondutores de YBCO.

O criostato é selado a fim de permitir que o nitrogênio líquido circule internamente sem vazamento para o interior da câmara de vácuo, Figura 16.

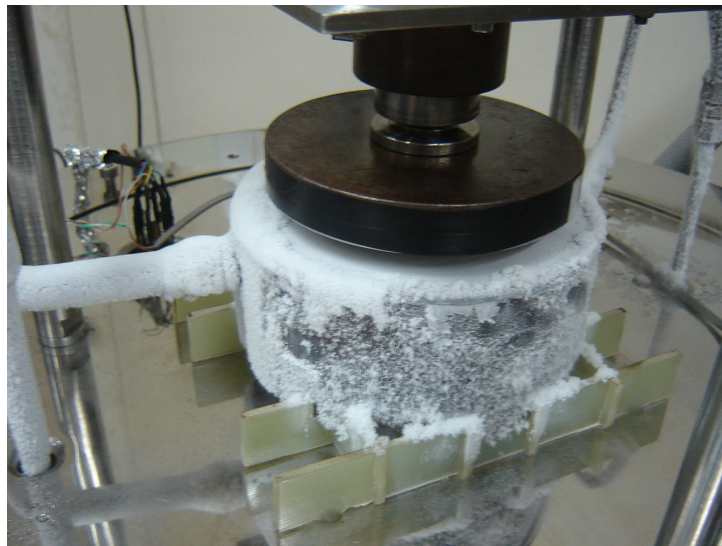


Figura 16: Criostato Resfriado pela Circulação de Nitrogênio Líquido.

As propriedades magnéticas dos supercondutores foram obtidas pelo processo de resfriamento na presença do campo, o que significa que eles são resfriados com o rotor de ímãs permanentes previamente posicionado a uma certa distância dos blocos supercondutores. Este procedimento reduz a força de levitação, mas aumenta a rigidez

axial e radial do mancal [16], o que proporciona maior estabilidade ao sistema de mancais. Há um ponto de equilíbrio para o entreferro de resfriamento e uma região de estabilidade em torno deste ponto, no qual haverá uma força de restauração sempre que houver um deslocamento no sistema. Fora desta região, o sistema de mancais perde sua estabilidade.

Como o SAEC opera a altas velocidades, para minimizar as perdas por atrito viscoso com o ar, e conseqüentemente aumentar a densidade de energia do sistema, as partes girantes do SAEC são inseridas dentro de uma câmara de vácuo, com pressão de aproximadamente 100  $\mu$ bar. No invólucro, Figura 17, construído em aço inox, há uma janela de vidro para observação do interior da câmara de vácuo, que é iluminado por um led de alta intensidade.



Figura 17: Câmara de vácuo.

## Capítulo 3: Análise Comparativa entre Elementos Armazenadores de Energia

Uma comparação entre diversos tipos de dispositivos armazenadores de energia existentes e em desenvolvimento é questão muito importante, que deve ser verificada cuidadosamente antes de cada aplicação.

Não só as densidades de energia por volume ( $\text{kJ/m}^3$ ) ou por massa ( $\text{kJ/kg}$ ) devem ser analisadas. Há também outros fatores que devem ser apreciados, sempre se observando cada tipo de aplicação. Dentre estes fatores pode-se citar: densidade de potência, custo, vida útil, perfil de operação, local de emprego, entre outros.

### 3.1. Densidade Energética dos Elementos Armazenadores de Energia

#### 3.1.1 SAECs ou *Flywheels*

A energia armazenada num volante de inércia é dada pela Equação (1), aqui repetida.

$$E_c = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \quad (1)$$

Considerando-se um cilindro, de raio  $r$ , volume  $V_o$ , e densidade de massa do material  $\rho$ , o Momento de Inércia  $J$  é dado pela Equação (3):

$$J = \frac{M \cdot r^2}{2} = \frac{\rho \cdot V_o \cdot r^2}{2} \quad (3)$$

Logo, a densidade de energia por volume é dada pela Equação (4), onde  $v$  é a velocidade tangencial.

$$\frac{E_{saec}}{V_o} = \frac{\rho \cdot r^2 \cdot \omega^2}{4} = \frac{\rho \cdot v^2}{4} \quad (4)$$

Atualmente, consegue-se obter velocidades da ordem  $v = 900 \text{ m/s}$  e densidade  $\rho = 7.000 \text{ kg/m}^3$ . Logo, a densidade volumétrica de energia  $E_{SAEC}/V_o$  de um SAEC atual está em torno de  $1,42 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ .

### 3.1.2 Capacitores

Um capacitor  $C$ , a uma tensão  $V$ , armazena energia em seu campo elétrico, dada pela Equação (5):

$$E_{cap} = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad (5)$$

Para um capacitor de placas paralelas, a capacitância é dada pela Equação (6), onde  $\varepsilon$  é a permissividade do meio dielétrico,  $A$  é a área paralela das placas metálicas, e  $d$  a distância entre as placas.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad (6)$$

Logo, a densidade volumétrica de energia volumétrica de um capacitor é dada pela Equação (7):

$$\frac{E_{cap}}{V_o} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (7)$$

Um dielétrico de um capacitor pode chegar a suportar um campo elétrico de até 200 MV/m, e possuir uma permissividade  $\varepsilon$  de  $8,85 \times 10^{-11}$  F/m, que corresponde a 10 vezes a permissividade do vácuo  $\varepsilon_o$ . Com isso, é possível obter para um capacitor uma densidade  $E_{cap}/V_o$  igual a  $1,76 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>.

Atualmente, os supercapacitores podem apresentar densidade  $E_{cap}/V_o$  40 vezes maior, atingindo  $0,7 \times 10^8$  J/m<sup>3</sup>.

### 3.1.3 Indutores

A energia armazenada num indutor é igual a:

$$E_{ind} = \frac{L \cdot i^2}{2} \quad (8)$$

A indutância é pode ser expressa das seguintes formas:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = \frac{N^2}{l/\mu \cdot A} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad (9)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (8), tem-se:

$$E_{ind} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A \cdot i^2}{2 \cdot l} = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot \mu \cdot A}{2 \cdot l} = \frac{H^2 \cdot l^2 \cdot \mu \cdot A}{2 \cdot l} = \frac{H^2 \cdot l \cdot \mu \cdot A}{2} = \frac{H^2 \cdot \mu \cdot A \cdot l}{2} = \frac{B^2 \cdot \mu \cdot A \cdot l}{2 \cdot \mu^2} = \frac{B^2 \cdot V_o}{2 \cdot \mu} \quad (10)$$

A densidade de energia armazenada nos indutores é dada pela Equação (11), onde  $B$  é a densidade de fluxo magnético,  $H$  a intensidade de campo magnético e  $\mu$  a permeabilidade magnética do material:

$$\frac{E_{ind}}{V_o} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu} \quad (11)$$

Em circuitos ferromagnéticos, os valores usuais de  $B$  são 1T e  $\mu$  igual a  $4\pi \times 10^{-4}$  H/m. Este  $\mu$  é mil vezes superior a permeabilidade do ar ( $\mu_o$ ). Com estes valores, tem-se uma densidade  $E_{ind}/V_o$  de  $0,40 \times 10^3$  J/m<sup>3</sup>.

Utilizando-se supercondutores para o armazenamento de energia no campo magnético, SMES (“Superconducting Magnetic Energy Storage”), densidades de campo magnético  $B$  de até 3,3 T podem ser obtidas no ar, o que conduz a uma densidade de energia  $E_{ind}/V_o$  de  $0,40 \times 10^7$  J/m<sup>3</sup>.

### 3.1.4 Baterias

As baterias de chumbo-ácido amplamente empregadas, e de menor custo, apresentam uma densidade volumétrica de energia  $E_{bat}/V_o$  em torno de  $1,55 \times 10^8$  J/m<sup>3</sup>.

As baterias de íon de lítio, que apresentam maior energia por volume, possuem  $E_{bat}/V_o$  de  $1,35 \times 10^9$  J/m<sup>3</sup>.

### 3.1.5 Represas

As represas também podem armazenar grande quantidade de energia, dada pela Equação (12), onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  a altura da represa ou da coluna de água.

$$\frac{E_{rep}}{V_o} = \rho \cdot g \cdot h \quad (12)$$

Tendo  $\rho_{\text{água}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , e  $h = 196 \text{ m}$  (altura barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu), chega-se a uma densidade de energia  $E_{rep}/V_o$  de  $1,92 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ . Entretanto, normalmente não se armazena água até a altura máxima da barragem, o que depende da incidência pluviométrica e do consumo de energia no período.

### 3.2. Comparação da Densidade Energética

A Tabela 1 apresenta a densidade de energia por volume dos dispositivos armazenadores de energia citados, podendo-se visualizar de forma clara e rápida, que as *Flywheels* de 3ª geração (item 1.3) apresentam a maior densidade volumétrica de energia, e conseqüentemente um grande potencial para inúmeras aplicações.

Tabela 1: Densidade Volumétrica de Energia

<b>Dispositivo Armazenador de Energia</b>	<b>Energia / Volume (J/m<sup>3</sup>)</b>
<i>Flywheel</i>	$1,42 \times 10^9 \text{ J/m}^3$
Bateria Íon de Lítio	$1,35 \times 10^9 \text{ J/m}^3$
Bateria Chumbo-ácido	$1,55 \times 10^8 \text{ J/m}^3$
SuperCapacitor	$0,7 \times 10^8 \text{ J/m}^3$
Indutor Supercondutor (SMES)	$0,40 \times 10^7 \text{ J/m}^3$
Represa Usina Hidrelétrica	$1,92 \times 10^6 \text{ J/m}^3$
Capacitor	$1,76 \times 10^6 \text{ J/m}^3$
Indutor	$0,40 \times 10^5 \text{ J/m}^3$

Outros dois itens devem ser avaliados: a densidade de energia e de potência por massa. A Tabela 2 ilustra a densidade de energia por massa das baterias de chumbo-ácido e dos SAECs de 2ª e 3ª Gerações (item 1.3).



Tabela 2: Densidade de Energia e de Potência por massa.

<b>Dispositivo Armazenador de Energia</b>	Densidade de Energia (Wh/kg)	Densidade de Potência (W/kg)
Baterias	35	150
SAECs de 2 <sup>a</sup> Geração	5.5	730
SAECs de 3 <sup>a</sup> Geração	56	670

Comparando-se as *Flywheels* de 2<sup>a</sup> geração com as baterias observa-se que as baterias possuem maior densidade de energia por massa, e os SAECs possuem maior densidade de potência por massa. Isto indica que cada um possui um nicho diferente no mercado, onde as baterias são indicadas para falhas de longa duração e as *Flywheels* são indicadas para suprir faltas de curta duração e maior potência. Entretanto, os SAECs de 3<sup>a</sup> geração estão se tornando alternativas promissoras para substituição das baterias, visto que possuem maior densidade de energia e de potência por massa. Resta diminuir os custos, que provavelmente serão alcançados após diluição dos gastos com pesquisa e desenvolvimento, e a produção em larga escala.

Em comparação com as baterias, um outro aspecto positivo para os SAECs é que as perdas durante a conversão da energia são menores no processo mecânico → elétrico do que no processo químico → elétrico, conforme Tabela 3.

Entretanto, as perdas ociosas são maiores nos SAEC do que nas baterias. Nas baterias, as perdas ociosas dizem respeito às correntes de fuga, enquanto nos SAECs dizem respeito ao atrito e as correntes parasitas.

Quando utilizados freqüentemente, os SAECs possuem considerável vantagem, pois as perdas ociosas são compensadas pelas perdas existentes no processo de conversão.

Outra vantagem significativa do SAEC é com relação à vida útil estimada em 25 anos, 5 vezes mais do que as baterias, conforme Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Baterias x SAECs.

	Baterias	SAECs
Tipo de Conversão	Química → Elétrica	Mecânica → Elétrica
Perdas na Conversão	~ 35 %	~ 10 %
Perdas Ociosas	0,05 %	1 a 3 %
Vida Útil	5 anos	25 anos

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre as Baterias de Chumbo-ácido, os SAECs, e os Superindutores (SMES)

Tabela 4: Bateria x SAEC x SMES [34] [35].

	Bateria Chumbo-Ácido	SAEC	SMES
<b>Forma de armazenamento</b>	Química	Mecânica	Eletromagnética
<b>Vida útil (anos)</b>	3 - 5	> 20	~ 20
<b>Tempo de recarga</b>	Lenta	Rápida	Rápida
<b>Tecnologia</b>	Provada	Promissora	Promissora
<b>Número de fabricantes</b>	~ 700	~ 10	~ 1
<b>Faixa de temperatura</b>	Limitada	Menos Limitada	Controlada
<b>Questões Ambientais</b>	Problemáticas	Insignificantes	Insignificantes
<b>Preço / kW (US\$)</b>	50 – 100	400 – 800	> 300

## **Capítulo 4: Aplicações para o SAEC**

Como citado no item 1.3 desta dissertação, o desenvolvimento tecnológico vem possibilitando a construção de SAECs de 3<sup>a</sup> geração, devido ao invento de novos materiais compósitos, ao emprego de sistemas a vácuo, à utilização de mancais magnéticos e ao avanço da eletrônica de potência. Isto está permitindo que os SAECs possam ser cada vez mais empregados como um excelente dispositivo para o armazenamento de energia em aplicações civis e militares.

Os SAECs estão sendo desenvolvidos para aplicações aeroespaciais (satélites e Estação Espacial Internacional [17]), para utilização em veículos híbridos, em dispositivos para melhoria da qualidade da energia elétrica e, no campo militar, em Sistemas de Catapultagem Eletromagnética, e, muito provavelmente, num futuro próximo, como fonte de alimentação para as armas eletromagnéticas, a laser e de microondas.

### **4.1. Qualidade de Energia Elétrica**

Atualmente, no mundo inteiro, há uma busca constante por uma utilização mais eficiente da energia elétrica, assim como, por uma melhoria na qualidade da energia fornecida pelas concessionárias. Entretanto, devido à grande complexidade do sistema elétrico e aos recursos limitados, uma alternativa aceitável é oferecer diferentes níveis de qualidade de energia a cada consumidor em função da necessidade de cada um, de acordo com o Conceito de “Custom Power”, proposto por Hingorani [18]. Para a implementação prática deste conceito, vários tipos de equipamentos podem ser utilizados como descrito em [19]. Alguns destes equipamentos podem ser dispositivos armazenadores de energia associados aos condicionadores de energia (conversores de eletrônica de potência). Deste modo, têm-se utilizado SAECs (Figura 18, Figura 19, Figura 20) como parte integrante de equipamentos destinados a compensar afundamentos de tensão, a suprir o aumento na demanda de energia, ou a manter a alimentação ininterrupta para cargas elétricas críticas. Por meio do SAEC é possível absorver energia da rede de forma suave nos momentos em que a potência requerida pela carga é pequena, de maneira a não provocar variações significativas de tensão, enquanto o volante de inércia é acelerado, e a energia cinética é armazenada. Nos

momentos necessários, parte desta energia pode ser devolvida à rede para compensar os distúrbios na carga.

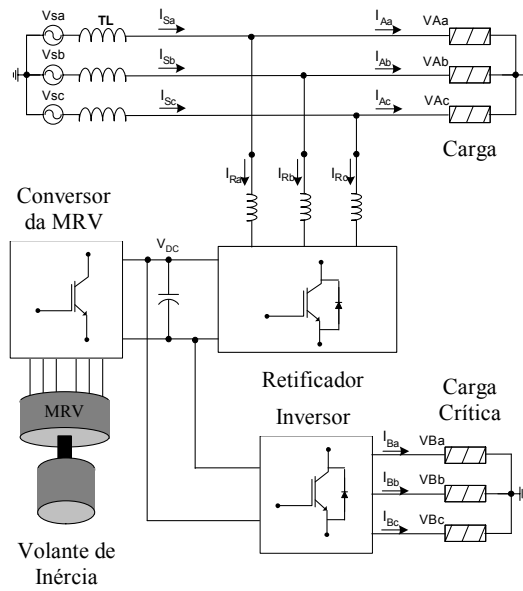


Figura 18: Fonte de Alimentação Ininterrupta.

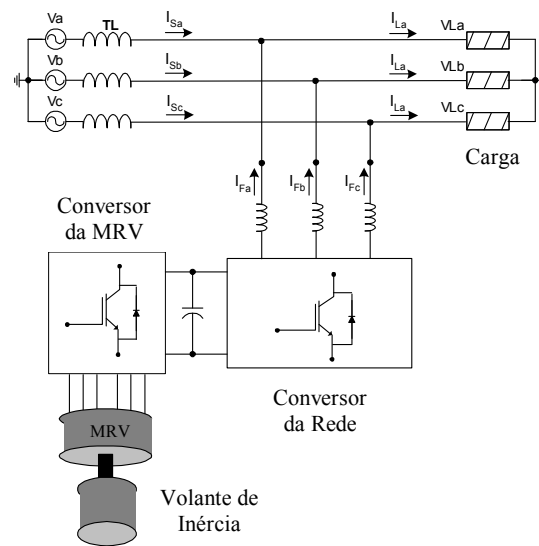


Figura 19: Compensador em derivação.

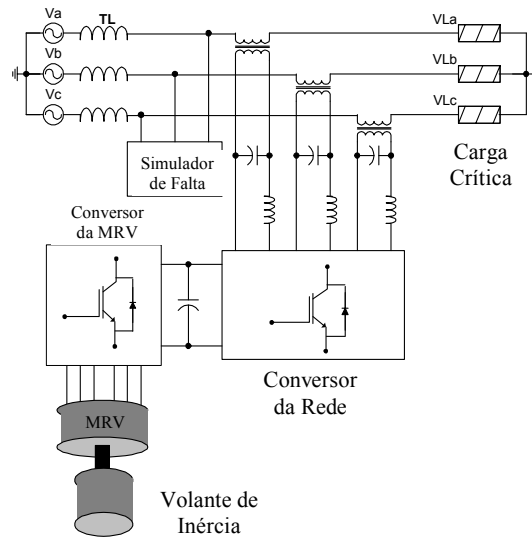


Figura 20: Compensador Série.

#### 4.2. Conceito *All-Electric Ship*

As Marinhas Americana e Inglesa vêm estudando e desenvolvendo o conceito *All-Electric Ship*, onde os sistemas auxiliares a vapor, hidráulicos, pneumáticos são substituídos por sistemas elétricos e combinados à planta de propulsão, também elétrica. Dentro deste conceito, está sendo implantado na nova geração de porta-aviões americanos o Sistema de Catapultagem Eletromagnético, e estão em desenvolvimento armas eletromagnéticas, a laser e de microondas, que integrarão os futuros Sistemas de Armas, e que terão como fonte de alimentação principal a energia elétrica.

O Sistema de Catapultagem Eletromagnético e as armas eletromagnéticas, a laser, e de microondas necessitam de muita energia elétrica em curtos intervalos de tempo (em forma de pulsos de energia), o que a princípio, se apresenta como um grande problema para os Sistemas de Geração e Distribuição de Energia Elétrica de bordo. Como gerar e distribuir estes pulsos de energia elétrica sem prejudicar os demais sistemas e cargas elétricas de bordo é uma questão importante.

Os equipamentos que precisam de pulsos de energia elétrica para o seu funcionamento devem possuir seu próprio Sistema Armazenador de Energia, que poderá ser localizado próximo à carga. Os SAECs apresentam-se como uma ótima solução, adequando-se ao perfil operacional destes equipamentos. Os SAECs podem ser

carregados e descarregados várias vezes sem o comprometimento de sua vida útil, o que não acontece com as baterias. Isto conduz a uma alta tolerância ao ciclo de trabalho.

A propulsão elétrica tem uma importância fundamental no conceito *All-Electric Ship*, pois representa a maior carga de bordo, e associa uma série de vantagens deste tipo de propulsão com a possibilidade de utilização de diversos acionamentos elétricos, mais eficientes e com maior nível de controlabilidade.

Dentre as vantagens da propulsão elétrica pode-se citar [20]:

**a) Redução do consumo de combustível**

Conforme um estudo realizado pela Marinha Americana [21], há um aumento em torno de 17% na eficiência energética em relação à propulsão mecânica convencional.

Num outro estudo sobre Propulsão Diesel-Elétrica [22], foram comparados 3 tipos de instalações propulsoras para um mesmo navio durante um ano de operação, e a propulsão elétrica apresentou melhores resultados em relação ao consumo de combustível.

Isto ocorre porque na propulsão elétrica o motor primário pode operar sempre no ponto de melhor rendimento independente da velocidade de rotação do hélice, ou seja, independente do perfil de operação do navio, evitando desperdício de combustível e desgaste mecânico do motor diesel.

**b) Redução da tripulação**

A substituição dos sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos por sistemas acionados eletricamente proporciona uma maior grau de controlabilidade, possibilitando um incremento de automação, e conseqüentemente, uma redução da tripulação e do custo operacional.

**c) Flexibilidade de projeto**

Os equipamentos da propulsão elétrica são modulares. Por isso, não necessitam ser posicionados próximos uns dos outros. Devido a esta flexibilidade, torna-se desnecessário concentrar equipamentos em praças de máquinas, sendo possível espalhar as máquinas por diversos compartimentos, otimizando o espaço disponível a bordo.

**d) Aumento da capacidade de sobrevivência do navio**

A modularidade permite que sejam desenvolvidos sistemas de geração e de propulsão redundantes, distribuídos e reconfiguráveis. Desta forma, as conseqüências de possíveis avarias causadas por um incêndio ou alagamento a bordo podem ser minimizadas, redirecionando-se a energia elétrica de bordo para suas respectivas cargas.

**e) Aumento da vida útil do navio**

Cada vez mais, os navios de guerra são equipados com sensores e armas de elevada complexidade tecnológica, o que acarreta um aumento nos custos de aquisição do meio. Para isto, o navio deve ter um tempo de vida útil que justifique esta elevação nos investimentos.

Com o crescimento da automação a bordo dos navios, mais equipamentos elétricos e eletrônicos estão sendo incorporados aos navios, aumentando a demanda por energia elétrica. A futura adoção de armas elétricas, que atualmente estão em desenvolvimento, tende a agravar esta situação. Desta forma, os geradores com capacidades mais elevadas devem ser instalados a bordo.

Entretanto, com a adoção da propulsão elétrica, a geração é projetada para atender ao navio em velocidade máxima, com todos os sistemas vitais em operação. Com isto, em velocidade de cruzeiro, o navio possui capacidade de geração em excesso, capaz de atender a todos os usuários com margem, assimilando sem dificuldades as futuras inclusões e alterações nas cargas elétricas. Isto permite um aumento na vida útil dos navios com propulsão elétrica.

**f) Redução dos custos de manutenção**

Sabe-se que os equipamentos elétricos exigem menos manutenção do que os mecânicos, o que implica em redução dos custos nos navios à propulsão elétrica.

**g) Redução da emissão de poluentes**

De acordo com o estudo [22], a propulsão elétrica gera menos poluentes do que os sistemas de propulsão a diesel, pois o motor opera constantemente no ponto ótimo de projeto, o que proporciona uma redução no consumo de combustível e conseqüente redução na liberação de gases poluentes.

#### h) Redução da assinatura acústica

Na propulsão elétrica é possível eliminar a utilização da engrenagem redutora para ligação do motor diesel ao hélice, reduzindo significativamente os níveis de ruído e vibração, e com isso, a possibilidade de ser detectado.

À medida que os sistemas e equipamentos mecânicos forem sendo substituídos por elétricos, ocorrerá uma diminuição da assinatura acústica total do navio, pois as máquinas elétricas produzem menos vibração e ruído do que as máquinas mecânicas.

#### 4.2.1 Sistema de Catapultagem Eletromagnético

O Sistema de Catapultagem Eletromagnético, mais conhecido pelo nome em inglês, *Electromagnetic Aircraft Launch System* (EMALS), poderá vir a substituir o consagrado sistema de catapultagem a vapor nos atuais e futuros porta-aviões.

Os limites operacionais das catapultas a vapor vêm sendo rapidamente alcançados pelos requisitos de lançamento das aeronaves, que vão se tornando mais pesadas e rápidas. Desta forma, aumenta a pressão pela substituição dos atuais sistemas de catapultagem a vapor pelos sistemas eletromagnéticos.

A Marinha Americana utilizará o EMALS para o lançamento de aviões em seus navios aeródromos da próxima geração, os CVNX. O primeiro da classe, cuja construção foi iniciada em 2007, deverá estar em operação em 2014. O CVN-78, da classe CVN-21, irá substituir USS Enterprise (CVN-65), que na época deverá ter 53 anos. Esta próxima geração de porta-aviões e navios de guerra deverá ser capaz de gerar até 104MVA de potência, o que é equivalente a ser capaz de alimentar aproximadamente 82.500 casas com padrão de consumo americano (907 kWh/mês) [23].

O sistema EMALS, conforme ilustrado na Figura 21, é subdividido em 4 partes:

- subsistema de armazenamento de energia: consiste no acionamento de um volante de inércia a alta velocidade (SAEC);
- subsistema de condicionamento de energia: formado pelos conversores eletrônicos, com a finalidade de adequar a energia elétrica aos padrões de tensão, frequência e corrente necessários ao funcionamento do sistema;



- subsistema da máquina de lançamento: consiste num motor síncrono linear, cuja armadura móvel, acoplada a uma sapata, impulsiona a aeronave; e
- subsistema de controle: o cérebro do sistema, responsável pelo controle e funcionamento global do sistema.

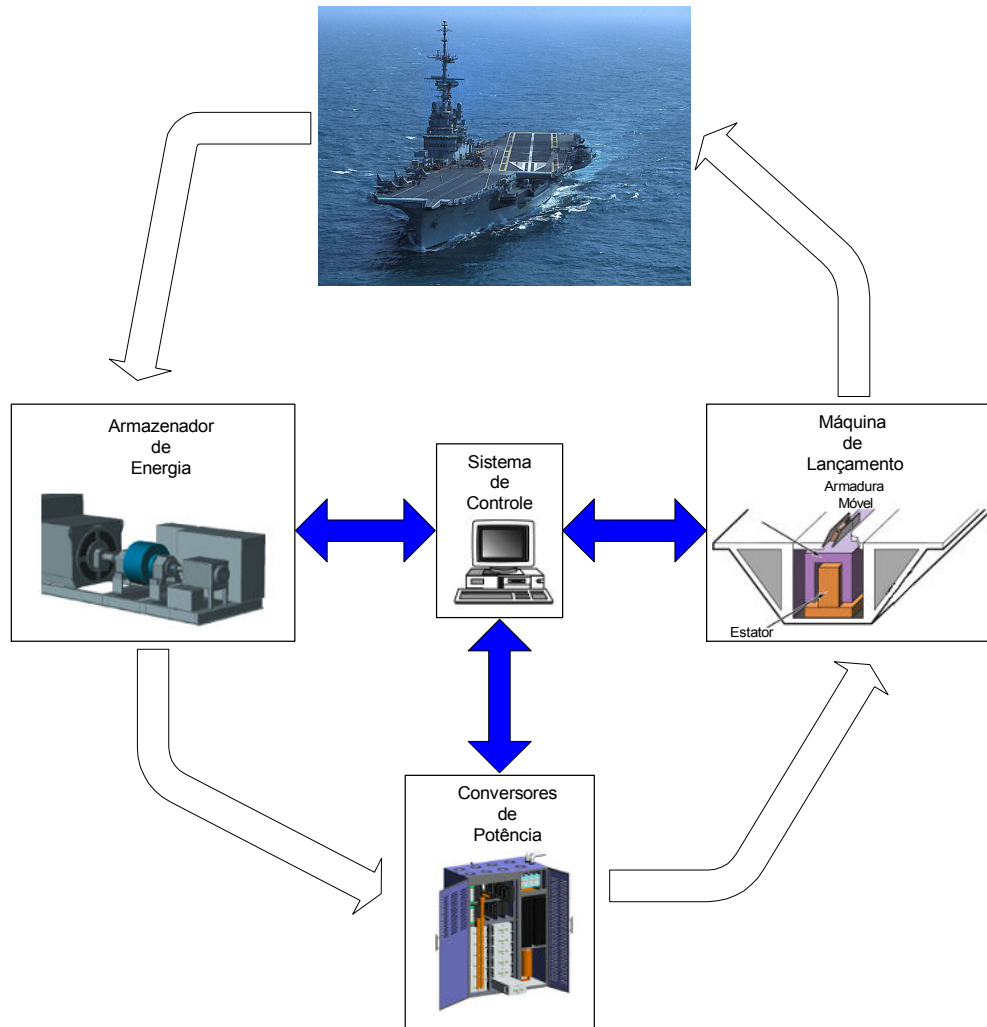


Figura 21: Sistema EMALS.

Dentre as vantagens do EMALS [24], pode-se citar:

- redução do peso e volume do sistema de catapultagem, quando comparado com os pesados e volumosos sistemas a vapor;
- maior flexibilidade na alocação das partes do sistema de catapultagem no navio, diferentemente do sistema a vapor, no qual a maior parte dos equipamentos deve

ser localizada próxima ao convés de vôo, isto é, na parte superior do casco do navio, o que prejudica a estabilidade do meio;

- menor exigência de manutenção, com redução do número de pessoas para sua operação e manutenção; e
- melhor controlabilidade, visto que no EMALS há uma malha de realimentação, o que permite controlar melhor a energia no lançamento, diminuindo os custos com manutenção das aeronaves, que têm sua fuselagem (estrutura) comprometida com os lançamentos ao longo do tempo.

O EMALS, que será implantado nos futuros porta-aviões americanos, utiliza um motor síncrono linear para o lançamento das aeronaves, que é alimentado por SAECs. Conversores eletrônicos de potência condicionam o sinal de alimentação. O sistema de armazenamento de energia deste EMALS, desenvolvido pela Optimal Energy Systems Inc., é formado por um arranjo de 4 módulos idênticos de SAEC, no qual cada módulo consiste de um conjunto formado por um volante de inércia; uma máquina síncrona trifásica de ímãs permanentes e de entreferro axial, com 2 estatores em paralelo, um de cada lado do volante de inércia/rotor, e um rotor; conversores eletrônicos; e um sistema de controle para gerenciar o fluxo de energia. O rotor, formado por ímãs permanentes de terras raras na configuração de 3 pares de pólos, funciona como fonte de campo eletromagnético. A alimentação necessária para acelerar o conjunto volante de inércia/rotor é suprida pela rede de energia elétrica do navio, que pode ser em CC ou em CA. A máquina síncrona opera como motor ou gerador, em função do sentido do fluxo de energia. As *Flywheels* são montadas numa estrutura aos pares e girando em sentidos opostos, para reduzir o efeito giroscópico.

Cada estator da máquina síncrona opera com resistência de 3,8 m $\Omega$ /fase e indutância de 67  $\mu$ H/fase. A densidade de fluxo média em cada entreferro é de 0,18 T, e a tensão de linha de pico máxima é de 1.750 V. Na velocidade operacional máxima, um módulo pode fornecer 84,3 MW para a carga, sendo a frequência do sinal de saída de 351 Hz. O conjunto volante de inércia/rotor de cada módulo opera a velocidade máxima de 7.018 rpm, e armazena 126 MJ de energia. Cada módulo pesa 2.646 kg, incluindo: volante de inércia, a máquina síncrona e a estrutura da carcaça. A densidade de energia é de 47,6 kJ/kg (13 Wh/kg), incluindo a estrutura da carcaça.

O perfil operacional cada módulo de SAEC no EMALS é baseado no fornecimento de uma corrente de saída de pico por fase no valor de 6.400 A por 2,8 s. A velocidade do rotor cai de 7.018 rpm para 5.614 rpm, entregando 42,6 MJ para a carga. Nestas condições, a eficiência total do módulo é de 94%. A elevação de temperatura do enrolamento de cobre é dissipada nos 30 primeiros segundos do intervalo de tempo necessário para a recuperação da velocidade nominal, que é de 45 s.

De acordo com [24], o volume de um sistema de catapultagem a vapor de um porta-aviões é de cerca de 1.133 m<sup>3</sup>, e apresenta um peso de aproximadamente 486 t. O limite de energia está em torno de 95 MJ. O sistema EMALS ocupa um volume em torno de 425 m<sup>3</sup>, possui um peso de 225 t, e o limite de energia de lançamento está por volta de 122 MJ. A Tabela 5 destaca estes dados.

Tabela 5: Comparação entre Sistemas de Catapultagem

Sistemas de Catapultagem	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (t)	Energia (MJ)
Vapor	1.133	486	95
Eletromagnético	425	225	126

Outra possibilidade para a redução nas dimensões, o que é sempre muito perseguido nas aplicações navais, é a utilização de semicondutores “Wide Band Gap” nos conversores de potência. Possuem inúmeras vantagens, dentre as quais: maior densidade de potência, operam a temperaturas mais altas, requerem menos resfriamento, suportam tensões de bloqueio maiores e trabalham com frequências de chaveamento mais altas, o que permite a utilização de transformadores e indutores menores. Estes avanços nos dispositivos de eletrônica de potência traduzem-se em menores peso e volume para conversores eletrônicos de potência equivalente.

O Sistema EMALS apresentam alguns inconvenientes, que devem ser tratados com muita atenção:

- os motores eletromagnéticos de alta potência alimentados por pulsos de alta frequência podem produzir interferência eletromagnética (EMI) nos demais equipamentos eletrônicos. No caso do EMALS, há um sensível conjunto de equipamentos eletrônicos da aeronave bem acima do motor de lançamento. Os equipamentos de bordo próximos também podem ser afetados. Logo, é

imprescindível um minucioso estudo de compatibilidade eletromagnética e um adequado projeto para o sistema de blindagem eletromagnética; e

- a alta velocidade de rotação da máquina de acionamento que gira a 7.018 rpm, em uma plataforma onde requisitos de choque, vibração e ruído devem ser rigorosamente atendidos. Por isso, deve-se ter muita atenção no projeto dos mancais, e no balanceamento das partes girantes.

Desta forma, os objetivos com a implantação do sistema EMALS são: redução da tripulação, redução no custo de vida-útil, aumento em disponibilidade operacional e redução no tamanho e peso quando comparado às atuais catapultas a vapor.

#### 4.2.2 Rail Gun

A *Rail Gun* é uma arma eletromagnética em desenvolvimento que consiste basicamente num grande circuito elétrico composto por três partes:

- uma fonte de alimentação capaz de fornecer pulsos de energia elétrica;
- um par de trilhos condutores paralelos; e
- uma armadura metálica condutora que serve de união entre os trilhos e de recipiente para o projétil.

Algumas *Rail Guns* utilizam uma armação de plasma, que consiste numa fina lâmina de metal acoplada à parte traseira de um projétil não-condutor, que, quando percorrida pela corrente elétrica, se evapora e se torna plasma, transportando a corrente elétrica.

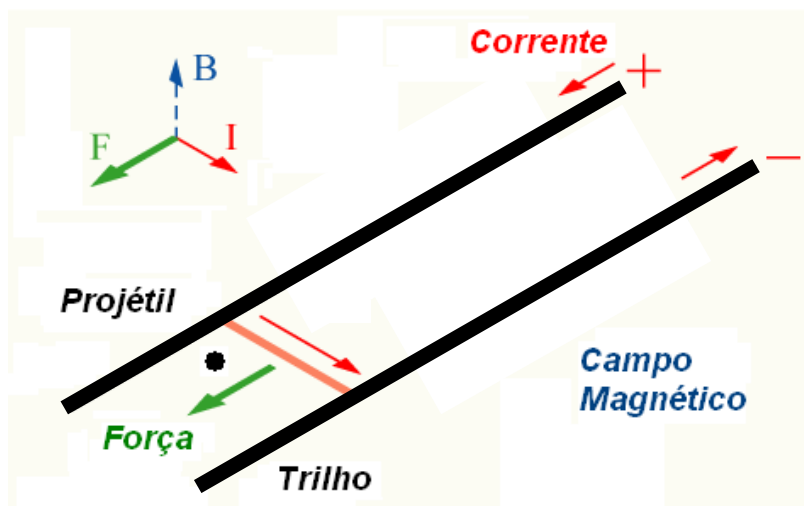


Figura 22: Rail Gun.

O princípio de funcionamento é bastante simples e se baseia na Força de Lorentz, Equação (13):

$$\vec{F} = (\vec{i} \times \vec{B}) \cdot L \quad (13)$$

Onde,  $\vec{F}$  é a força resultante,  $\vec{i}$  é a corrente,  $\vec{B}$  é a densidade de fluxo magnético, e  $L$  é a distância entre os trilhos, ou seja, o comprimento da armadura metálica. A Força de Lorentz é perpendicular ao campo magnético e à direção da corrente que passa pela armadura, atuando paralela aos trilhos, e afastando o projétil da fonte de alimentação. A magnitude da força é determinada pela Equação (13), e para elevá-la, basta aumentar o afastamento entre os trilhos ou a intensidade da corrente elétrica.

Como trilhos longos criam problemas no “design”, a maioria das *Rail Guns* em testes usa correntes muito altas para gerar uma força de lançamento de grande magnitude. Após o lançamento do projétil, o circuito elétrico é interrompido, e corta-se o fluxo da corrente.

Para disparar projéteis a velocidades Mach 6, ou mais altas, as *Rail Guns* precisam de elevadas correntes de alimentação. Isso é um problema 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*, esta necessidade de alimentação de determinadas cargas por pulsos de elevada energia será prevista, e fornecida por elementos armazenadores de energia, onde o SAEC já possui emprego garantido, como já foi visto no Sistema “EMALS”.

As *Rail Guns* foram sugeridas como importantes componentes da Iniciativa de Defesa Estratégica, mais conhecida como Programa Guerra nas Estrelas, na década de 80, que era um programa do governo americano responsável pela pesquisa e desenvolvimento de um sistema espacial de defesa nacional contra ataques de mísseis balísticos estratégicos. Neste contexto, as *Rail Guns* poderiam disparar projéteis para interceptar os mísseis de outros países.

Em 2003, o Ministério da Defesa do Reino Unido realizou um teste em escala de 1:8, no qual uma *Rail Gun* atingiu a velocidade de Mach 6 (2.040 m/s) no momento em que o projétil saiu da arma.

No início de 2008, a empresa BAE Systems entregou para a Marinha Americana (U.S. Naval Surface Warfare Center in Dahlgren) um Laboratório para Testes de uma

*Rail Gun* de 32 MJ. Este é mais um passo no caminho do desenvolvimento de uma *Rail Gun* para emprego em navios de guerra com 64 MJ de energia.

Será muito pouco provável que um navio de guerra totalmente elétrico consiga disparar projéteis com uma *Rail Gun* antes de 2015. Entretanto, a tecnologia é promissora.

As informações deste item foram baseadas nas referências [25] - [28].

#### **4.2.3 Armas de Microondas de Alta Potência**

As Armas de Microondas de Alta Potência [29], conhecidas também como armas de negação ativa ou “raios de dor”, são projetadas para emitir um raio de energia eletromagnética, com o intuito de aquecer a pele dos inimigos sem causar danos permanentes às pessoas atingidas. Assim, poderá ser utilizada como uma alternativa às armas convencionais, sendo especialmente útil nos casos em que há inocentes espalhados entre os inimigos. O raio parte de um transmissor de microondas, causando uma sensação de queimação intensa que continua até que o transmissor seja desligado, ou que o indivíduo saia do campo de alcance. Embora o tamanho e o campo de alcance do raio ainda sejam confidenciais, sabe-se que foi projetado para uso de longo alcance.

As ondas penetram muito superficialmente na pele (0,4 mm), não danificando nenhum órgão do corpo humano. A preocupação seria quanto aos possíveis danos que a arma pode causar aos olhos. Porém, representantes das forças armadas alegam que as pessoas atingidas provavelmente fechariam os olhos antes que houvesse qualquer dano.

O Corpo de Fuzileiros Navais dos EUA planeja desenvolver uma versão do sistema capaz de ser montada sobre veículos, que seria chamada de VMADS (Sistema de Negação Ativa Montada em Veículos), podendo ser adaptadas em navios e aviões.

A tecnologia do raio de energia não letal está em desenvolvimento como uma resposta para a necessidade, levantada pelo Departamento de Defesa dos EUA, dos soldados terem outras opções além do uso da força letal. Esta nova tecnologia está sendo desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea e pela Diretoria Conjunta para Armas Não Letais do Departamento de Defesa dos EUA.

Por requerer alimentação elétrica sob a forma de pulsos de elevada energia para operação, este tipo de armamento necessita de um dispositivo armazenador de energia de forma a não comprometer o bom funcionamento do Sistema de Geração e

Distribuição Elétrica. E, como estas armas possuem um ciclo de trabalho altamente intermitente, o SAEC pode vir a ser uma excelente e viável fonte de energia, já que seu tempo de vida útil é independente dos ciclos de carga/descarga, o que não ocorre com as baterias eletroquímicas. Este requisito e esta possibilidade de aplicação para o SAEC se estendem às demais armas citadas a seguir: *E-Bomb* e Armas a Laser.

#### 4.2.4 *E-Bomb*

A bomba eletromagnética ou *E-Bomb* [29] e [30] é uma arma pertencente à mesma categoria das Armas de Microondas de Alta Potência, projetada para destruir, ou tornar temporariamente inoperante, a maior parte dos equipamentos eletro-eletrônicos, por meio da transmissão de um intenso campo eletromagnético.

As correntes elétricas geram campos magnéticos, e campos magnéticos variáveis induzem correntes elétricas em condutores que porventura estejam ligados a circuitos elétricos. Estes condutores podem funcionar como antenas, captar os sinais eletromagnéticos transmitidos pela *E-Bomb*, e conduzi-los até equipamentos eletrônicos provocando a queima de dispositivos semicondutores, a explosão de baterias, o curto-circuito em transformadores.

Desta forma, como o mundo, atualmente, é totalmente dependente da energia elétrica, dos sistemas de comunicações, das redes de computadores, o impacto sobre a vida seria enorme, provocando perda de produtividade para as empresas e indústrias, deterioração dos alimentos, falta de capacidade de governabilidade, entre outros.

Há inúmeras possibilidades de ataque: emprego de pulsos eletromagnéticos de baixa intensidade poderiam causar interferências temporárias em sistemas eletrônicos, pulsos mais intensos poderiam corromper importantes dados digitais, e ondas eletromagnéticas de alta potência poderiam queimar equipamentos elétricos e eletrônicos completamente. Assim, em missões de combate, uma bomba eletromagnética poderia, sem registrar muitas vítimas, efetivamente neutralizar:

- sistemas de controle de veículos;
- sistemas de mira de mísseis e bombas;
- sistemas de comunicação;
- sistemas de navegação; e
- sistemas de rastreamento de curto e longo alcances.

O emprego de dispositivos semicondutores comercialmente disponíveis ao público civil em equipamentos militares, que são altamente sensíveis a qualquer oscilação de corrente elétrica, pode tornar uma força armada bastante vulnerável ao ataque por bombas eletromagnéticas. Na verdade, uma tecnologia mais rudimentar como a das válvulas eletrônicas apresenta mais chances de resistir a um ataque de bomba eletromagnética.

Embora sejam geralmente consideradas não-letais, estas armas podem facilmente matar pessoas se fossem direcionadas contra alvos específicos como: hospitais, aeronaves, entre outros.

#### **4.2.5 Armas a Laser**

As armas que se baseiam em reações químicas para propelir projéteis têm dominado os cenários de guerra há séculos. Porém, esta primazia dos armamentos atuais pode passar por mudanças com os avanços que vêm sendo alcançados no campo das armas eletromagnéticas e a laser.

Dentro do conceito do *All-Electric Ship*, que vem sendo estabelecido com a construção dos navios classes CVN-21 (Porta-aviões) e DDX (*Destroyers*), ambos dos EUA, e das Fragatas *Type 45*, da Inglaterra, a capacidade de geração e distribuição de energia elétrica vem crescendo bastante, possibilitando ainda mais o embarque de armas a laser alimentadas por eletricidade a bordo dos navios de guerra.

Os níveis de potência não são os únicos fatores importantes para se mensurar a maturidade tecnológica das armas a laser. Uma arma a laser efetiva precisa estar totalmente integrada ao sistema de armas para detectar, acompanhar e destruir o alvo, bem como, estar em completa harmonia com a capacidade de potência e controle da plataforma que a transporta.

As pesquisas desenvolvidas pelos EUA concentram-se em 3 diferentes tipos de armas a laser: químicas, de estado sólido e de elétron livre. Devido às características técnicas e ao estágio de desenvolvimento de cada tecnologia, cada tipo de arma laser possui uma aplicação operacional específica e uma determinada disponibilidade no estado da arte atual [31], [32].



**a) Lasers Químicos**

O *Tactical High Energy Laser* (THEL) e o *Airborne Laser* (ABL) fazem parte das armas lasers cuja fonte de energia primária são reações químicas que produzem intensa radiação infra-vermelha. Esta radiação é concentrada em feixes de luz, e direcionada sobre o alvo. Dentro da família das armas a laser, as químicas são as mais potentes (centenas de kW, podendo atingir MW), e as que apresentam a maior maturidade tecnológica. Requerem grandes quantidades de combustível químico para funcionarem.

Os lasers químicos podem operar em um único comprimento de onda (1,315 $\mu$ M-ABL) ou numa faixa de comprimentos de onda (3,5 a 3,9  $\mu$ M-THEL). Os comprimentos de onda maiores permitem melhor penetração em atmosferas turbulentas, possibilitando a operação em uma variedade de condições atmosféricas, e ainda, que a energia refletida não prejudique o olho humano.

Em 2004, foi testado com sucesso um novo armamento denominado Laser Tático de Alta Energia (THEL – *Tactical High Energy Laser*) [33]. A arma, construída pela empresa Northrop Grumman para os exércitos norte-americano e israelense, utiliza raios laser de alta energia para destruir foguetes, projéteis de artilharia, mísseis de cruzeiro, e mísseis balísticos de curto alcance, bem com veículos aéreos. Testes foram realizados com vários tipos de alvos, incluindo o foguete russo “Katyusha”.

**b) Lasers de Estado-Sólido (SSL)**

Significantes progressos vêm sendo obtidos no desenvolvimento desta tecnologia de arma laser que é alimentada por eletricidade. Diferentemente do laser químico, o SSL opera com um único comprimento de onda mais curto, apresentando mais dificuldades de penetrar em atmosferas turbulentas, além de ser prejudicial aos olhos humanos. Embora, menos potentes do que os lasers químicos (em dezenas de kW, nos dias de hoje), melhorias recentes apontam que num futuro próximo, este tipo de arma a laser poderá ser efetivamente empregado em plataformas de combate como aviões, navios e veículos terrestres. Em laboratório, a potência obtida até o momento é de aproximadamente 25 kW, embora, segundo o Departamento de Defesa dos EUA (DoD), para o emprego tático efetivo sejam necessários 100 kW.

c) Lasers de Elétron Livre (FEL)

A Marinha Americana está desenvolvendo o FEL, que também utiliza eletricidade para gerar diferentes comprimentos de onda de luz laser, a fim de se adequar às diversas condições de ambiente no mar. Pesquisadores da marinha americana acreditam que a FEL é mais adequada para aplicações navais do que o laser de estado sólido, visto que este possui apenas um único comprimento de onda.

Significantes progressos têm sido obtidos em termos de potência ( $\approx 10$  kW), e os testes indicam que os FELs são mais atrativos do que os SSLs no uso da eletricidade para alcançar níveis mais altos de potência. Entretanto, ainda há inúmeros desafios a serem vencidos para a utilização dos FELs, como por exemplo, o grande volume deste armamento, o que permite que sejam embarcados somente em grandes navios, e dificultando também a instalação em navios operativos.

### **4.3. Contribuições do Desenvolvimento Bélico**

As conseqüências de uma guerra sempre são sentidas em todas as áreas do conhecimento, sobretudo na Ciência. E por sua vez, a guerra também depende da Ciência, estabelecendo-se assim, uma relação de interdependência.

Uma guerra sempre significa uma mobilização extraordinária da indústria e da ciência, para a fabricação de armas convencionais e para o desenvolvimento de novas tecnologias necessárias às não-convencionais. O desenvolvimento da indústria bélica, impulsiona a ciência e a tecnologia, e acaba repercutindo em projetos com aplicações no cotidiano. O computador, a Internet, e até a viagem do homem à Lua são, de certa forma, frutos da guerra. Com a mesma tecnologia de um míssil balístico intercontinental, os russos colocaram em órbita no espaço o primeiro satélite artificial.

O microcomputador começou a ser desenvolvido com o objetivo de acelerar e dar maior precisão aos cálculos de trajetória dos disparos de canhão.

A Internet, que se tornou uma ferramenta para comunicação, construção do conhecimento, lazer e até mesmo a realização dos mais variados tipos de negócios, remonta sua origem à Guerra Fria, quando os Estados Unidos disputavam com a extinta União Soviética a supremacia entre as grandes potências. O projeto inicial dos militares americanos era fazer com que um computador que controlava armamentos pudesse se comunicar com outro.

Na medicina, pesquisadores americanos retomaram uma descoberta dos anos 20, e conseguiram produzir em escala industrial a penicilina. A fabricação do primeiro antibiótico está na lista dos grandes esforços de guerra dos Aliados. Os Estados Unidos consideravam a nova droga como medicamento de uso estratégico e militar, e proibiram sua exportação. O medo era de que o remédio, que combatia infecções e recuperava soldados rapidamente, caísse nas mãos dos exércitos inimigos – Alemanha, Itália e Japão. Após o fim da guerra, a produção de penicilina se disseminou pelo mundo, beneficiando populações de todos os continentes.

A sopa pronta, que compramos no supermercado, é fruto de pesquisas dos cientistas da Nasa. Durante a corrida espacial, devido às limitações de espaço e volume de carga a ser transportada nas missões, foi desenvolvido pelos pesquisadores da agência espacial americana o processo de produção de comida pronta. Para saborear uma refeição, o tripulante apenas precisava adicionar água à sopa em pó. Em poucos anos, este produto já estava acessível a qualquer pessoa nas prateleiras dos supermercados.

A necessidade de vitória nos campos de batalha coloca governantes e cientistas lado a lado, cabendo aos primeiros, proporcionar as condições para que os pesquisadores desenvolvam novas armas a serem usadas em combate.

O mais surpreendente é que, no geral, os avanços científicos e tecnológicos gerados pelo esforço militar terminam incorporados pela sociedade. A incorporação de tais avanços tecnológicos pela chamada sociedade civil é explicada, em parte, pela necessidade de retorno dos grandes investimentos. Após a guerra, concluída a função militar de um dispositivo ou produto, chega à hora de se obter lucros. O campo de batalha funciona como um grande laboratório, no qual eventuais falhas são descobertas e corrigidas. Com isso, o consumidor tem à disposição uma mercadoria ou serviço testado sob as condições mais adversas possíveis.

## Capítulo 5: Estratégias de Controle

Duas estratégias de controle para emprego num SAEC são apresentadas neste capítulo:

- 1) Controle da tensão CC pelo Conversor da MRV e Controle da velocidade pelo Conversor da Rede; e
- 2) Controle da tensão CC pelo Conversor da Rede e Controle da velocidade pelo Conversor da MRV.

A primeira estratégia foi desenvolvida inicialmente para compensar afundamentos de tensão e harmônicos da rede de energia elétrica, sendo publicada anteriormente em vários artigos [14], [36], [37]. A estratégia do item nº2 foi desenvolvida para a aplicação proposta nesta dissertação, que é o fornecimento ininterrupto de energia para uma carga elétrica, como uma nova opção para o controle do SAEC.

Foram realizadas simulações do SAEC empregando-se a segunda estratégia, considerada, pelo autor, a mais adequada à aplicação proposta pela simplicidade de implementação em relação à primeira. Com esta estratégia, cada conversor controla diretamente uma determinada grandeza. Em condições normais de funcionamento da fonte de alimentação principal, o Conversor da Rede atua mantendo a tensão do elo CC constante e no valor de referência, e o Conversor da MRV atua mantendo a velocidade de rotação no valor de referência. Porém, na Estratégia nº 1, para aumentar a velocidade é necessário transferir, primeiramente, energia da rede para o capacitor do elo, para em seguida, o controle do Conversor da MRV detectar o aumento da tensão no elo CC, e só então, transferir o excedente de energia presente no capacitor para o volante de inércia. Além disto, para aplicação proposta a ser simulada e implementada em laboratório não é necessário utilização da Teoria “pq”, visto que não será compensada nenhuma parcela indesejada de potência real instantânea, e sim, fornecida alimentação ininterrupta para uma carga crítica.

### 5.1. Controle da tensão CC pelo Conversor da MRV e Controle da velocidade pelo Conversor da Rede

Esta estratégia não será objeto de estudo deste trabalho. Entretanto, será apresentada para que o leitor possa conhecer uma outra possibilidade de controle para o SAEC, que está baseada no controle da tensão de referência do elo CC.

Quando a tensão do elo CC for inferior ao valor de referência, o Sistema de Controle comanda o Conversor da MRV de maneira que a energia cinética seja transferida do volante de inércia para o capacitor, elevando seu nível de energia e conseqüentemente sua tensão. Neste momento, a MRV funciona como gerador. Caso a tensão no elo CC ultrapasse o valor de referência, o Conversor da MRV receberá os sinais de chaveamento do Sistema de Controle para que a energia elétrica seja transferida do capacitor para o volante de inércia, diminuindo a tensão no elo CC e aumentando a velocidade do sistema. Neste momento, a MRV estará funcionando como motor. Paralelamente, a malha de controle de velocidade associada ao Conversor da Rede recebe o sinal de velocidade do “*Encoder*” acoplado ao eixo da MRV. Enquanto a velocidade de rotação do volante de inércia está inferior ao valor de referência, o Conversor da Rede é chaveado de modo a carregar o capacitor, elevando o nível de tensão do elo. O Sistema de Controle ao perceber este aumento na tensão CC, comanda as chaves do Conversor da MRV de maneira a transferir este excedente de energia presente no capacitor para a massa girante, até que esta atinja sua velocidade nominal. E o processo inverso ocorre quando há um aumento na velocidade.

Os distúrbios na carga são detectados por sensores de tensão e corrente, e enviados para o DSP TMS320F2812 da Texas Instruments, onde são processados nas coordenadas alfa-beta. Utilizando-se a “Teoria pq” [38] nestes cálculos, obtém-se a parcela de potência real alternada  $\tilde{p}$  (que circula entre fonte e carga, devido às harmônicas de corrente) e a potência imaginária  $q$ , que devem ser compensadas, e a parcela de potência média convencional  $\bar{\Delta p}$ , que deve ser fornecida, para que o volante de inércia seja mantido na velocidade de referência. Estas parcelas de potência serão utilizadas para calcular as correntes que deverão ser sintetizadas, de forma a compensar os distúrbios na carga e a manter a velocidade de rotação nominal fora do período de regeneração. Deve-se destacar ainda que com esta estratégia o Conversor da Rede atua também como um filtro ativo de potência, compensando as parcelas  $\tilde{p}$  e  $q$ .

As Figura 23 e Figura 24 ilustram esta estratégia de controle para o SAEC, para que o leitor possa compreender melhor o que foi anteriormente explicado.

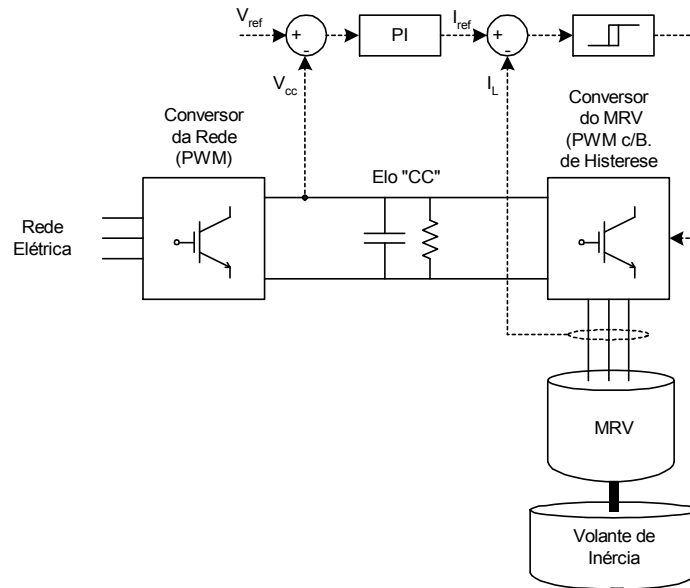


Figura 23: Controle do Conversor da MRV.

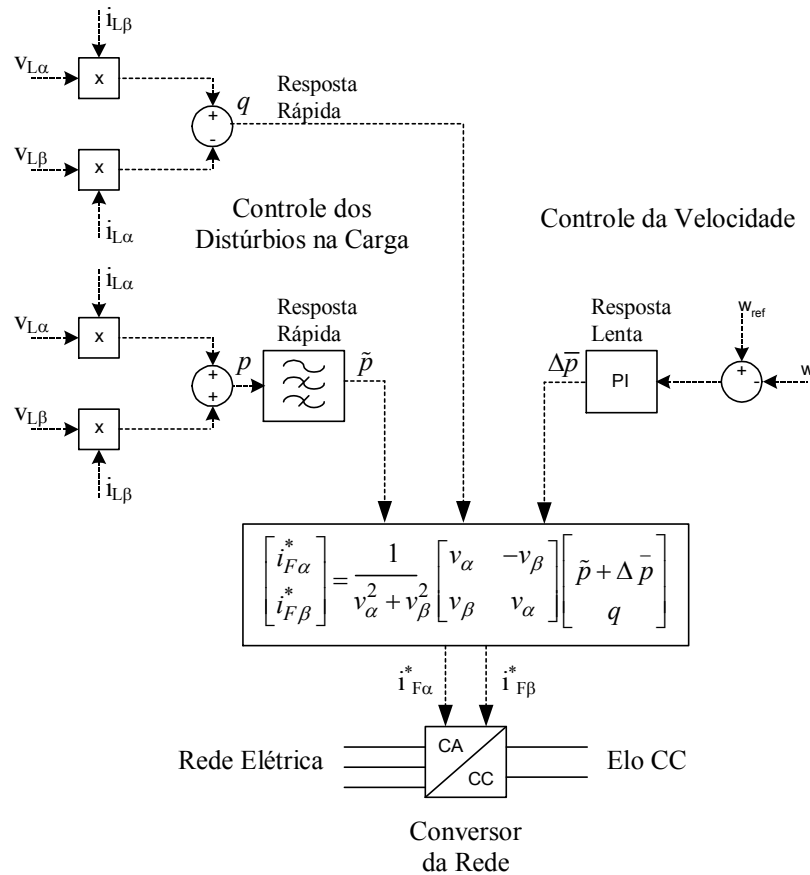


Figura 24: Controle do Conversor da Rede.

## **5.2. Controle da tensão CC pelo Conversor da Rede e Controle da velocidade pelo Conversor da MRV**

Esta estratégia foi concebida para a aplicação proposta nesta dissertação, que é o fornecimento ininterrupto de energia elétrica pelo SAEC na falta da alimentação principal. A descrição minuciosa da simulação, do funcionamento e os resultados são apresentados no Capítulo 6. A implementação prática e os testes em laboratório são objeto do trabalho [3]. Entretanto, alguns resultados experimentais são apresentados no Capítulo 7.

Nesta estratégia, o controle da tensão no elo CC é feito por meio do Conversor da Rede, enquanto que o controle de velocidade é realizado por meio do Conversor da MRV, exceto durante a falta de energia, quando controle da tensão no elo CC passa a ser realizado por meio do Conversor da MRV.

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”. Em seguida, dando continuidade ao processo de inicialização, a “Malha de Controle de Velocidade”, comanda o Conversor da MRV, que aciona a MRV 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 inicializado e pronto para atender 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. Ao longo do tempo em que a falta é simulada, o controle da MRV passa da “Malha de Controle de Velocidade” para a “Malha de Controle de Tensão durante a Falta”, 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, injetando correntes no sistema, se

ligado como compensador em derivação, ou fornecendo tensões apropriadas, se ligado como compensador série.

A Figura 25 ilustra esta estratégia de controle auxiliando na compreensão de seu funcionamento.

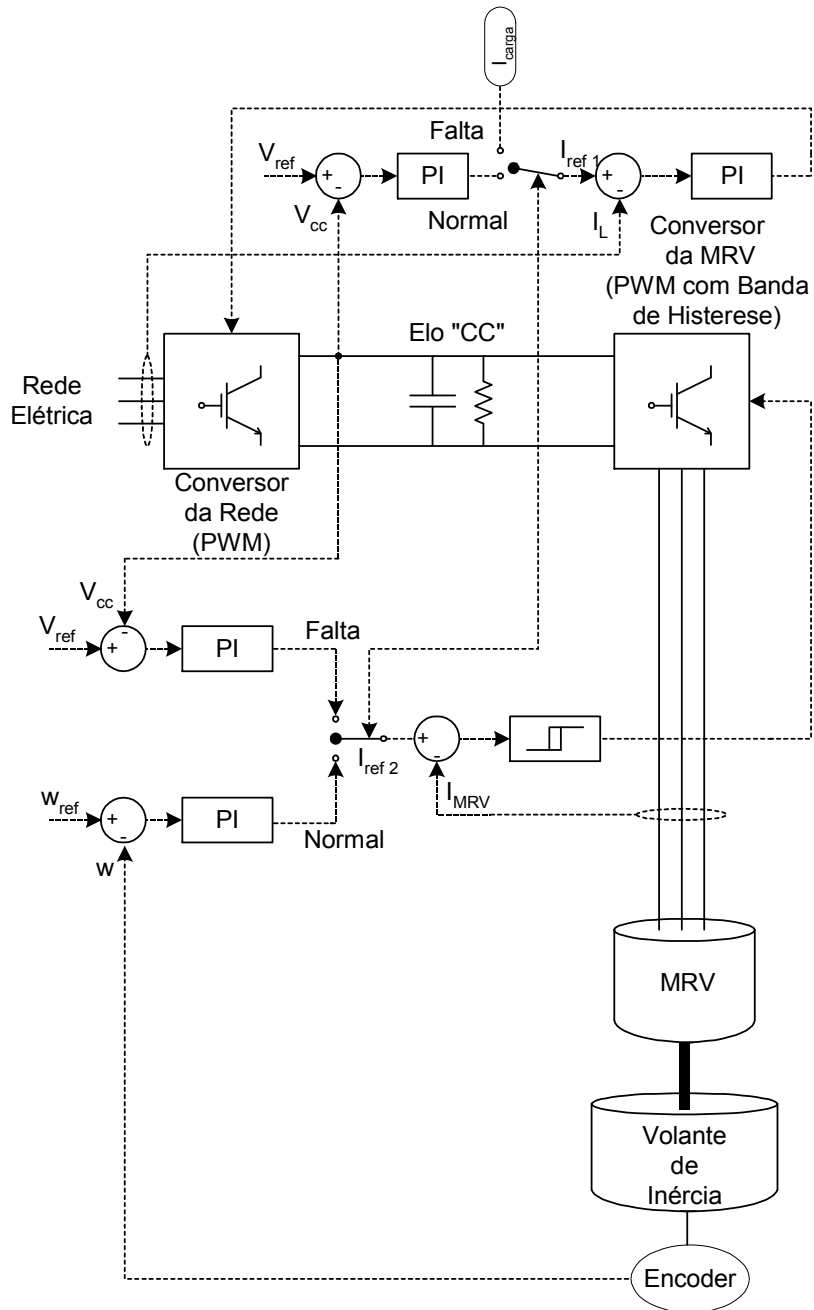


Figura 25: Estratégia de Controle Adotada.



Cabe ressaltar, que nem toda energia armazenada no volante de inércia/rotor da MRV pode ser convertida em energia elétrica. Há uma limitação em função da Equação (14), onde  $P$  é potência,  $T$  é torque e  $\omega$  é velocidade angular. Desta forma, à medida que a velocidade angular diminui de valor, o torque deve aumentar para que seja possível manter constante a potência entregue a carga. A partir de certo momento, os valores de corrente tornam-se impraticáveis para as características nominais da máquina e dos conversores de potência. Esta é uma limitação de proteção para o sistema.

$$P = T \cdot \omega \quad (14)$$

### 5.2.1 Controle do Conversor da MRV

Uma ponte assimétrica é usada como circuito de potência para controle da corrente na MRV. A principal característica desta topologia é a operação em dois quadrantes, permitindo a reversibilidade da tensão aplicada com sentido unidirecional da corrente. Como a direção do fluxo magnético não influencia o perfil de indutância ao longo da posição angular, a polaridade da corrente que circula pela fase não é importante. Entretanto, um circuito bipolar em tensão é muito importante para o correto controle da corrente no modo regeneração e para a rápida extinção da corrente no modo motorização.

Para o controle da corrente da MRV, a estratégia adotada é o controle PWM com banda de histerese. A corrente de fase acompanha a referência dentro de uma banda de tolerância em uma malha fechada de controle.

A seqüência de chaveamento para o Conversor da MRV é caracterizada por 3 diferentes estados, que são estabelecidos de acordo com o sentido do fluxo de potência desejado, com a posição angular do rotor da MRV e com o valor da corrente de fase da MRV, conforme Figura 26.

O estado 1, Figura 26a, é caracterizado pela condução dos IGBT T1 e T2, e pela tensão CC aplicada de forma a forçar a corrente a circular no sentido positivo. Neste caso, a energia armazenada no capacitor do elo CC flui para a MRV.

O estado 2, Figura 26b, é caracterizado por T2 e D2 conduzindo. Neste caso, a corrente cai livremente, se o torque e a velocidade forem positivos no intervalo angular de condução, ou tende a crescer, se a velocidade for positiva e o torque negativo, devido

ao fator  $\frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$  (tensão de velocidade). Este termo pode ser visto como tensão de

velocidade a partir da expansão de  $\frac{\partial \lambda(\theta_r, i)}{\partial t}$ , da Equação (16).

O estado 3, Figura 26c, é caracterizado pela condução dos diodos D1 e D2 que são responsáveis por aplicar uma tensão negativa sobre o enrolamento de fase, forçando a corrente a decrescer.

Em todos os 3 estados a corrente flui pelas fases da MRV no mesmo sentido.

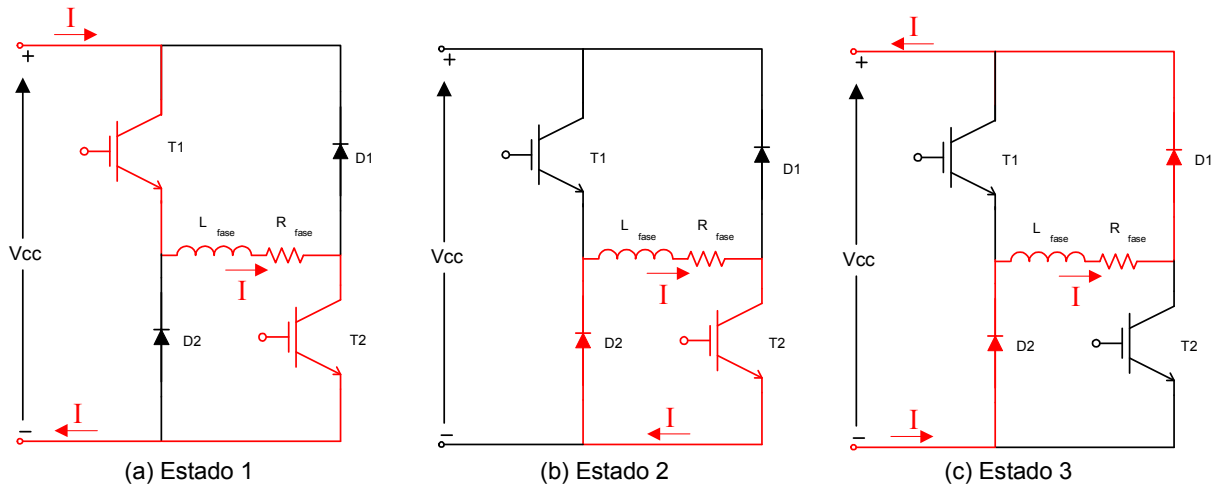


Figura 26: Estados de Condução do Conversor da MRV.

### 5.2.2 Controle do Conversor da Rede

Os distúrbios da carga são detectados pelos sensores de tensão e corrente, e processados no sistema de coordenadas “ $\alpha\beta$ ”, podendo ser utilizada a “Teoria pq” [38], para cálculo das parcelas indesejáveis de potência que devem ser eliminadas, e da potência ativa que deve ser adicionada ou subtraída do sistema para o controle da velocidade. Neste trabalho, não foi utilizada a “Teoria pq” em função da aplicação proposta, que não exige o emprego de tal ferramenta para operação.

Na simulação, o Conversor da Rede é controlado por uma malha de controle de tensão por meio de um regulador PI, cuja saída é um sinal de amplitude de corrente (“ $I_{amp}$ ”) cujo valor é determinante para o controle da tensão no elo CC e para o controle da corrente na rede CA. A compensação da falta é realizada por meio da configuração do valor de “ $I_{amp}$ ” de acordo com a tensão que se deseja obter na carga, utilizando-se para cálculo deste valor os parâmetros do sistema nas Equações (15) e (16).

Os sinais de controle são enviados para o Conversor da Rede, que durante a operação normal da rede elétrica funciona como um Retificador Fonte de Tensão PWM com Regulação de Corrente. Durante o período de falta de alimentação principal, o Conversor da Rede opera como Inversor Fonte de Tensão PWM, a fim de impor na saída as correntes de acordo com a compensação desejada. As correntes injetadas são sincronizadas com as tensões de linha por meio de um algoritmo PLL.

## Capítulo 6: Simulações – Modelo do SAEC e Resultados

Foram simuladas, no PSCAD, 4 configurações de SAEC, que são apresentadas na seqüência em que foram desenvolvidas:

- 1º) Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede Monofásico (CC/1 $\phi$ );
- 2º) Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede Monofásico (CA/1 $\phi$ );
- 3º) Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede Trifásico (CC/3 $\phi$ ); e
- 4º) Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede Trifásico (CA/3 $\phi$ ).

Esta seqüência de desenvolvimento foi adotada, por seguir uma ordem crescente de complexidade na implementação das configurações a serem simuladas e montadas em laboratório. Cabe ressaltar que, mesmo cada configuração sendo uma evolução da anterior no desenvolvimento deste trabalho, cada uma possui uma aplicação própria, não devendo ser considerada apenas como uma etapa no desenvolvimento do SAEC.

Primeiramente, será apresentada uma descrição do modelo de SAEC com Regeneração para a Rede Trifásica CA simulado no PSCAD. Optou-se pela descrição deste modelo por ser o mais completo dentre as configurações simuladas. Assim, o perfeito entendimento desta configuração conduz à compreensão das demais.

Em seguida, serão apresentados os resultados de simulação para que sejam observados o funcionamento de cada configuração, e o comportamento das grandezas físicas do sistema ao longo de sua operação.

Nesta dissertação, não são apresentados resultados de simulações explorando os limites do sistema, como potência e velocidade de rotação bem mais elevadas. Procurou-se adequar a simulação aos limites operacionais do protótipo, visto que o objetivo final era contribuir para a colocação em funcionamento do modelo experimental. Entretanto, foram testados outros valores de velocidade de rotação, potência e tensão no elo CC (aqui não apresentados) nas simulações, constatando-se uma grande dificuldade no ajuste dos parâmetros dos reguladores PI para se obter uma operação satisfatória e estável do SAEC, devido às não-linearidades do sistema.

## 6.1. Descrição do Modelo do SAEC para Simulação

Conforme comentado anteriormente, será descrita a simulação do SAEC na configuração de Regeneração para a Rede Trifásica CA.

Primeiramente, para que o leitor tenha conhecimento da seqüência de eventos da simulação, são apresentados os principais instantes de tempo durante as simulações:

- $t_0 = 2,5s$ , Tempo de Início de Aceleração da MRV. Corresponde ao instante em que se inicia o acionamento da MRV;
- $t_1 = 16s$ , Tempo de Desligamento do Disjuntor da Fonte de Alimentação. → Disjuntor da fonte de alimentação principal aberto, SAEC que alimenta a carga;
- $t_2 = 18s$ , Tempo de Religamento do Disjuntor da Fonte de Alimentação → fechamento do disjuntor da fonte de alimentação principal, falta extinta.

### Conversor da Rede

O Conversor da Rede, Figura 27, é um conversor eletrônico em ponte completa a IGBTs, bidirecional em potência, responsável pela interface entre a rede elétrica e o elo CC, mantendo a tensão do elo constante durante o funcionamento normal do sistema elétrico.

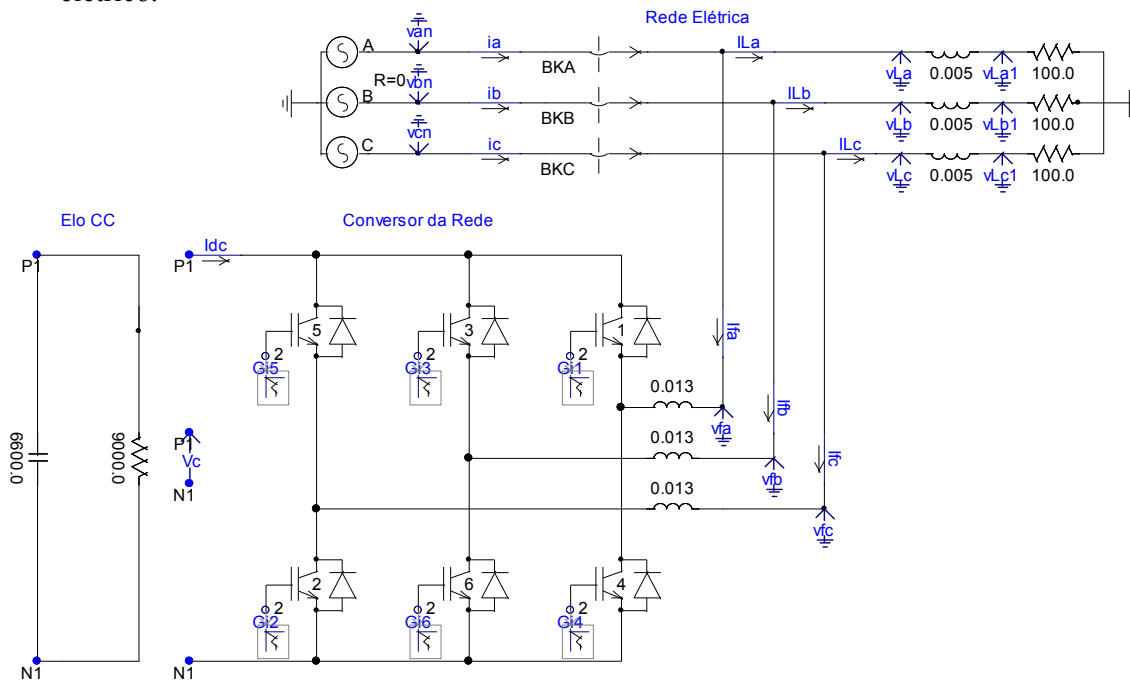


Figura 27: Circuito com Rede Elétrica, Conversor da Rede e Elo CC.

A “Malha de Controle da Tensão CC”, Figura 28, associada ao Conversor da Rede, tem como saída um sinal de amplitude de corrente, “Iamp”, proporcional e integral à diferença entre os sinais de referência e medido da tensão do elo CC, e com polaridade positiva ou negativa, dependendo do sentido do fluxo de potência ativa requerido pelo regulador PI.

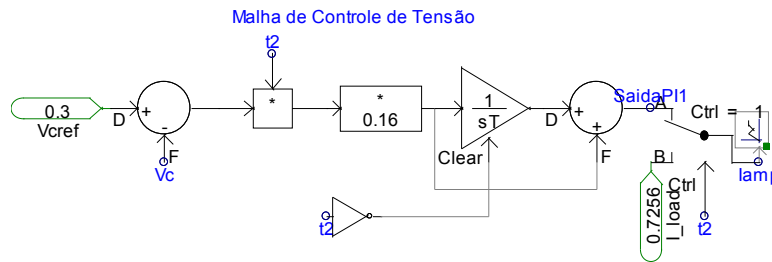


Figura 28: Malha de Controle da Tensão CC.

A amplitude de corrente “Iamp” é utilizada para gerar as correntes de referência que deverão ser sintetizadas pelo Conversor da Rede ao controlar a tensão do elo CC. Para isto é utilizado um circuito PLL e funções seno, possibilitando gerar correntes de referência (“iaref”, “ibref”, “icref”) em fase com as tensões da fonte de alimentação CA, conforme Figura 29.

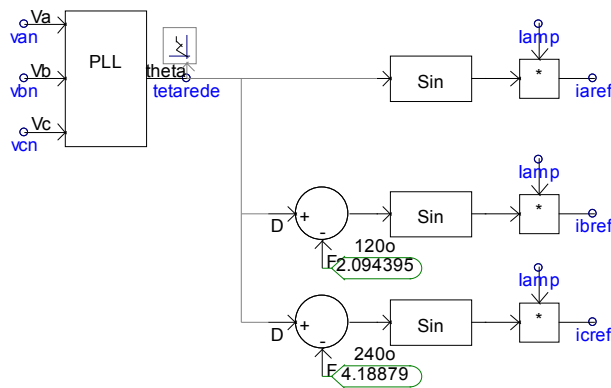


Figura 29: Geração das Correntes de Referência.

As correntes de referência e medidas são transformadas para o sistema de coordenadas “dq”, por meio do ângulo de transformação “tetarede”, que é a saída do bloco PLL do PSCAD, e entra como argumento do bloco de transformação “dq” do PSCAD, mostrado pela Figura 30.

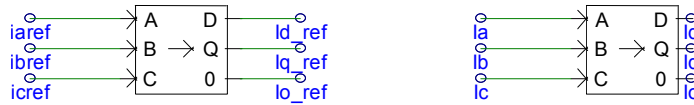


Figura 30: Transformação para as Coordenadas “dq”.

As correntes, nas coordenadas “dq”, passam por blocos reguladores “PIs”, Figura 31, cujas saídas são os sinais de tensão que irão modular o sinal da portadora (onda triangular), realizando assim um chaveamento PWM. Porém, antes de ser comparado com a portadora, estes sinais de tensão (varef, vbref, vcref) são normalizados, conforme Figura 32. O bloco RMS do PSCAD fornece o valor eficaz do sinal, que multiplicado por  $\sqrt{2}$ , fornece a amplitude destes sinais. Desta forma, os sinais de tensão são normalizados pelo valor de pico.

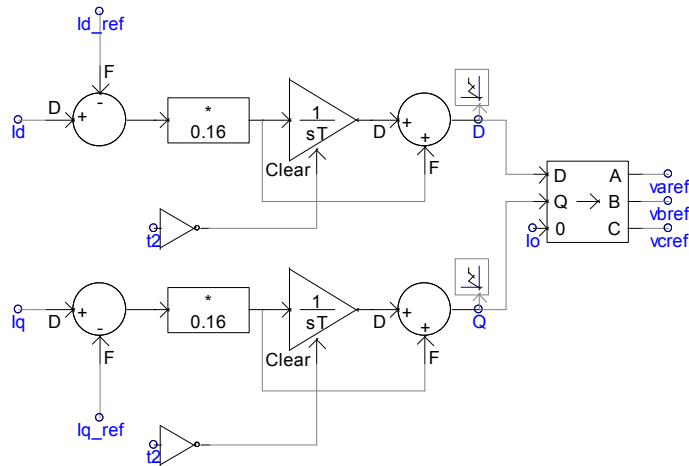


Figura 31: Geração dos Sinais de Modulação.



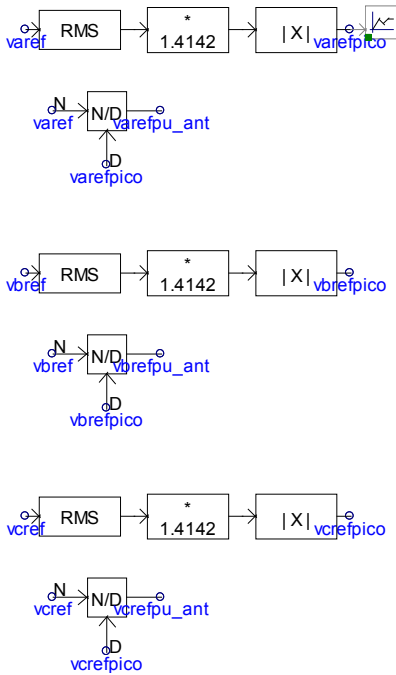


Figura 32: Normalização dos Sinais de Modulação - PWM.

Após a normalização, estes sinais de tensão são enviados para os módulos de interpolação de pulsos do PSCAD, juntamente com o sinal da portadora, Figura 33, para comparação e geração dos sinais de chaveamento que são transmitidos às portas dos IGBTs do Conversor da Rede.

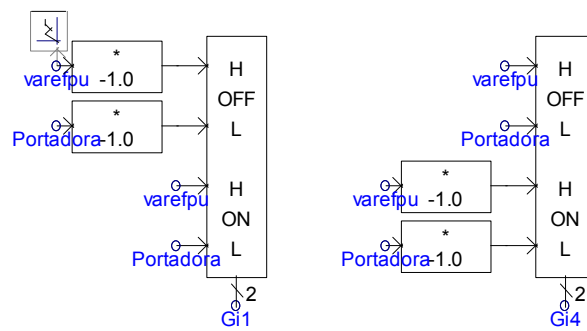


Figura 33: Interpolador de Pulsos PSCAD - PWM.

A transformação das grandezas elétricas para as coordenadas “dq” permite que se trabalhe com sinais de valores constantes e que a componente “0” seja nula, facilitando implementação e operação do sistema de controle do sistema.

Após a tensão do elo CC estar controlada e estabilizada no valor de referência, inicia-se o processo de aceleração do volante de inércia por meio do controle do Conversor da MRV.

### **Modelagem da MRV**

Antes de se iniciar sobre a explicação sobre o controle do Conversor da MRV/MRV será mostrado como a MRV foi modelada para utilização na simulação.

A operação da MRV é baseada no princípio da mínima relutância. Quando o enrolamento de uma fase é excitado, forças são exercidas sobre o circuito magnético que tende a trazê-lo para a posição onde a relutância seja mínima, e conseqüentemente, a indutância seja máxima. Se o enrolamento de uma fase é desenergizado e o enrolamento da próxima fase é energizado, pouco tempo antes desta posição ser alcançada, um movimento contínuo do rotor pode ser obtido.

A MRV utilizada neste trabalho possui 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor, caracterizando uma MRV de configuração 6/4.

O torque eletromagnético produzido por um enrolamento é dado pela Equação (15), onde  $T_e$  é o torque eletromagnético,  $\theta_r$  é a posição angular do rotor,  $\lambda$  é o fluxo enlaçado pelo enrolamento, e  $i$  a corrente no enrolamento de cada fase.

$$T_e(\theta_r, i) = \frac{\partial}{\partial \theta_r} \left[ \int_0^i \lambda(\theta_r, i) di \right] \quad (15)$$

Como as duas relações  $\lambda(\theta_r, i)$  e  $T_e(\theta_r, i)$  são altamente não-lineares, torna-se difícil desenvolver um modelo matemático analítico para a MRV. Desta forma, ao invés de tentar obter um modelo analítico, a metodologia adotada neste trabalho utiliza tabelas de dados para as relações  $\lambda(\theta_r, i)$  e  $T_e(\theta_r, i)$ , que podem ser obtidos por meio de medições experimentais estáticas ou métodos computacionais por elementos finitos. As tabelas utilizadas nesta dissertação são provenientes de simulações pelo método de elementos finitos realizadas no *software* ANSYS. As tabelas abrangem uma faixa suficiente para cobrir qualquer situação que possa ocorrer nas simulações dinâmicas. Os

dados das tabelas são usados diretamente na solução das Equações (15), (16) e (17), conforme [39], [40] e [41].

$$v = r_s \cdot i + \frac{\partial \lambda(\theta_r, i)}{\partial t} \quad (16)$$

$$J \cdot \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = T_e - T_m \quad (17)$$

Para que seja possível executar as simulações no PSCAD/EMTDC, é necessário se manipular os dados da tabela de  $\lambda(\theta_r, i)$ , para se obter a relação inversa  $i(\theta_r, \lambda)$ .

Os valores intermediários das tabelas  $\lambda(\theta_r, i)$  e  $T_e(\theta_r, i)$  são obtidos por meio de interpolação linear. Este modelo, apresentado pela Figura 34, reproduz com acurácia a dinâmica da MRV quando acionada por um conversor de potência por PWM, conforme referência [39].

A indutância de cada fase da MRV é modelada no PSCAD, referência [39], como uma fonte de corrente controlada pela tensão medida no enrolamento de fase “ $v_L$ ” e pela posição angular do rotor (“Trgon1,2,3”). A tensão medida em cada enrolamento de fase “ $v_L$ ” passa por um integrador, tendo como resultado o enlace de fluxo “ $\lambda$ ”. Com os valores de enlace de fluxo “ $\lambda$ ” e de posição angular do rotor “ $\theta_r$ ”, obtém-se por meio da tabela “ $i_L(\theta_r, \lambda)$ ”, utilizando a ferramenta PSCAD “XYZ Transfer Function”, o valor da corrente de fase. Entrando-se com os dados de corrente de fase e posição angular na tabela “ $T_e(\theta_r, i_L)$ ”, obtém-se o Torque Eletromagnético de cada fase. Em seguida, os torques de cada fase são somados para obtenção do torque total da MRV. A Figura 34, descrita no item, ilustra o modelo da MRV.

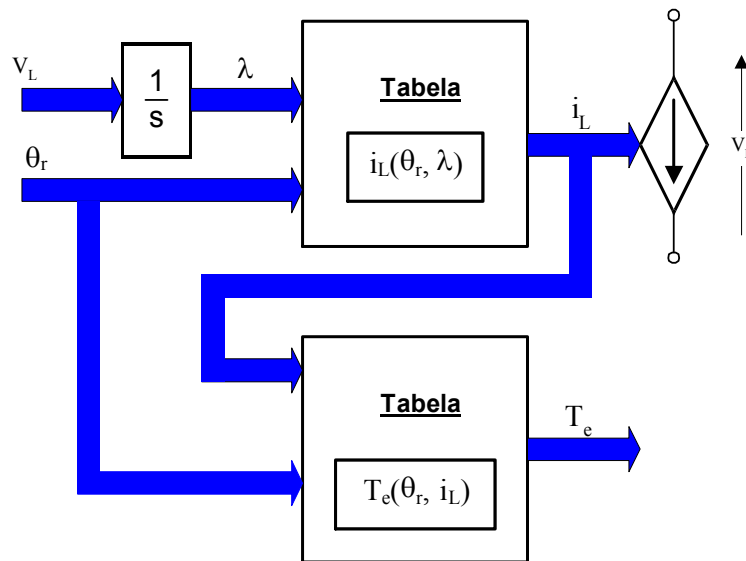


Figura 34: Modelo da MRV.

### Conversor da MRV

O Conversor da MRV, Figura 35, é formado por 2 módulos em ponte completa de IGBTs, onde em cada perna do conversor, apenas um IGBT é chaveado, enquanto o outro tem seu *gate* desconectado do circuito de chaveamento. Este conversor alimenta as 3 fases da MRV de configuração 6/4. O conjunto MRV/Conversor da MRV realiza a interface entre o volante de inércia e o elo CC, sendo responsável pela conversão da energia mecânica em elétrica e vice-versa.

A estratégia adotada na simulação para controlar a MRV e o sentido do fluxo de potência é baseada no controle PWM com banda de histerese, devendo seguir uma seqüência de chaveamento determinada por 3 diferentes estados para o circuito do conversor.

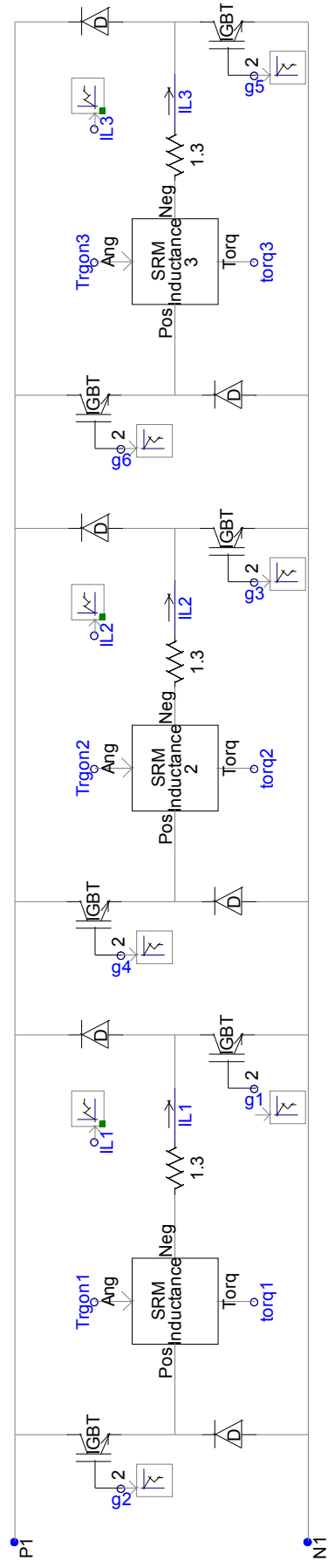


Figura 35: Conversor da MRV .

O estado 1, Figura 36, é caracterizado pela condução dos IGBTs T1 e T2, e pela tensão CC aplicada de forma a forçar a corrente a circular no sentido positivo. Neste estado, a energia proveniente do elo CC flui para o indutor.

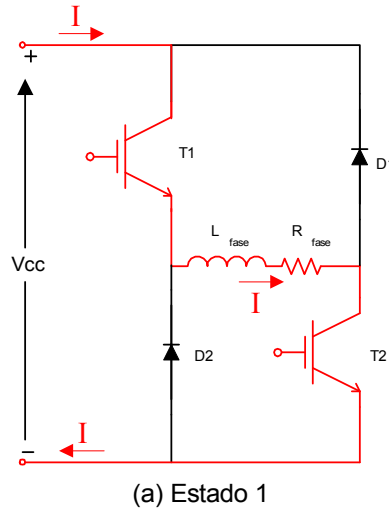


Figura 36: Estado 1 de uma fase do Conversor da MRV.

O estado 2, Figura 37, é caracterizado por T2 e D2 conduzindo. Neste caso a corrente cai livremente, se no intervalo angular de condução, o torque e a velocidade forem positivos, ou tende a crescer, se a velocidade for positiva e o torque negativo,

devido ao fator  $\frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$ . Este termo pode ser visto como tensão de velocidade a partir da expansão do termo  $\frac{d\lambda(\theta_r, i)}{dt}$  da Equação (16).

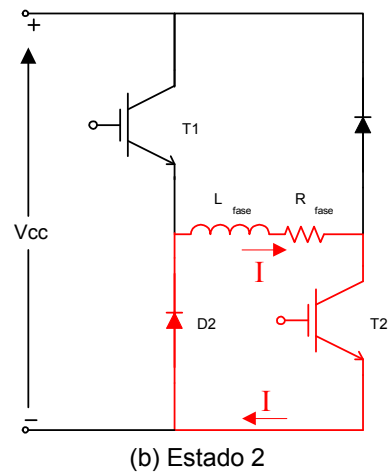


Figura 37: Estado 2 de uma fase Conversor da MRV.

O estado 3, Figura 38, é caracterizado pela condução dos diodos D1 e D2 que são responsáveis por aplicar uma tensão negativa sobre o enrolamento de fase, forçando a corrente a decrescer.

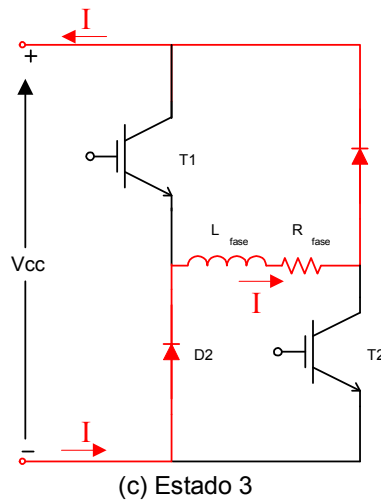


Figura 38: Estado 3 de uma fase Conversor da MRV.

Em todos os 3 estados a corrente flui pelas fases da MRV no mesmo sentido.

A Figura 39, extraída de uma das simulações executadas, apresenta como a corrente de fase da MRV é controlada, utilizando os estados de condução do Conversor do MRV para a situação de motorização. A Figura 40 mostra a mesma corrente de fase da MRV, porém no período de regeneração da energia.

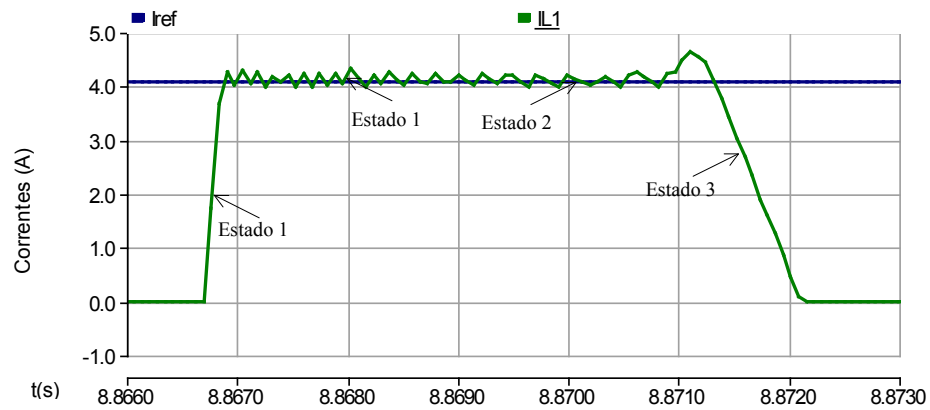


Figura 39: Corrente de Referência e da Fase 1 da MRV durante a motorização.

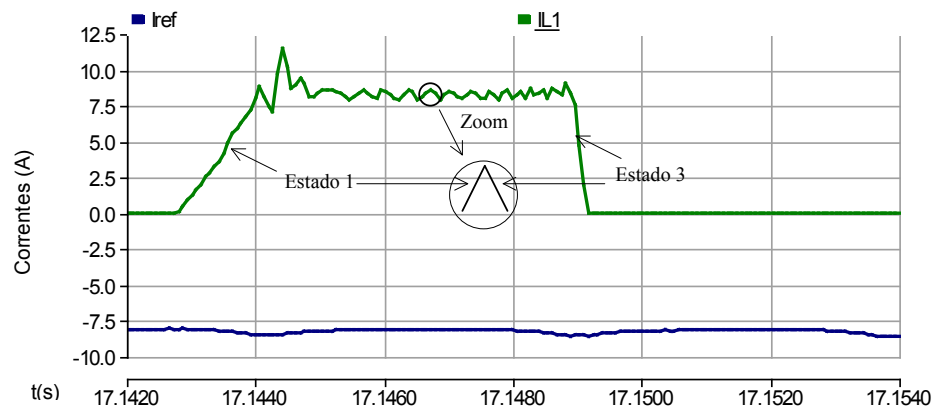


Figura 40: Corrente de Referência e da Fase 1 da MRV durante regeneração (de 16 a 18s).

A “Malha de Controle de Velocidade”, Figura 41, recebe os sinais de velocidade de referência e medida, produzindo na saída um sinal que corresponde a amplitude de corrente “Iref”, proporcional à diferença entre as velocidades, e com polaridade positiva ou negativa, em função do valor da velocidade de referência ser maior ou menor do que o medido.

Durante o período de aplicação da falta, por meio da abertura de disjuntores ligados a fonte de alimentação principal, a MRV e o Conversor da MRV passam a ser controlados pela “Malha de Controle de Tensão durante a Falta”, que gera o mesmo sinal de amplitude de corrente “Iref”. Neste instante, a MRV transforma a energia cinética em elétrica, e o conversor transfere esta energia para o elo, mantendo a tensão CC constante para alimentar uma carga neste barramento, ou possibilitar ao Conversor da Rede a operação como inversor, fornecendo alimentação em CA com a tensão e a frequência desejadas.



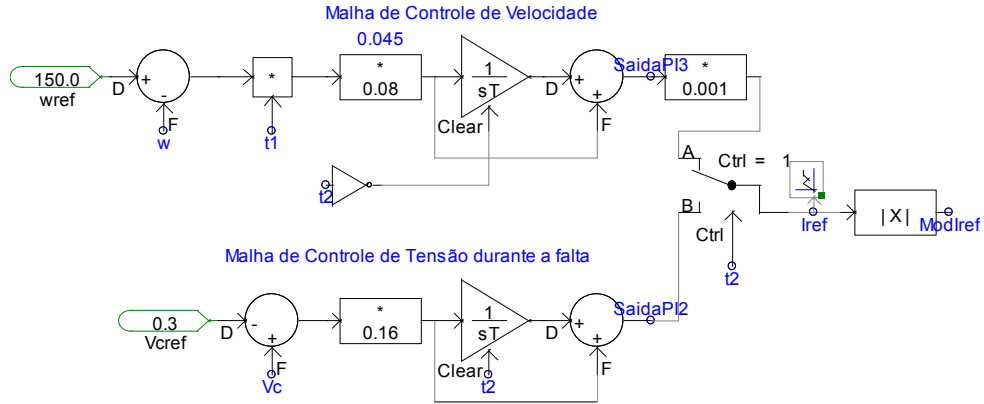


Figura 41: Malha de Controle de Velocidade e Malha de Controle de Tensão durante a Falta.

O bloco “Acelera ou Regenera”, Figura 42, recebe o sinal “Iref”, juntamente com os tempos “TON” ( $15^\circ$ ) e “TOFF” ( $45^\circ$ ), corrigidos proporcionalmente a velocidade. As saídas deste bloco são os ângulos “ton” (início da condução) e “toff” (término da condução) e a variável “sw”. Quando a velocidade está abaixo do valor de referência, os ângulos “ton” e “toff” são ajustados pela rotina deste bloco de forma a se situarem na parte da curva de indutância versus posição angular do rotor da MRV ( $L(\theta_r, i) \times \theta_r$ ) cuja derivada é positiva, permitindo que a MRV seja motorizada, Figura 43. Quando a velocidade de rotação está acima da referência, os ângulos “ton” e “toff” são ajustados para que estejam dentro da faixa de valores da curva  $L(\theta_r, i) \times \theta_r$  cuja derivada seja negativa, permitindo que a MRV seja freada, operando como gerador, e assim permitindo a regeneração da energia, de acordo com Figura 43. Devido à simetria da MRV utilizada, as tabelas que representam o modelo da MRV podem ser simplificadas, onde são necessários somente os dados das posições angulares entre  $0$  a  $45^\circ$ . O bloco “Acelera ou Regenera” auxilia nesta simplificação ao permitir que a partir da polaridade da amplitude “Iref”, possam ser determinados os ângulos de início e fim de condução das fases da MRV.

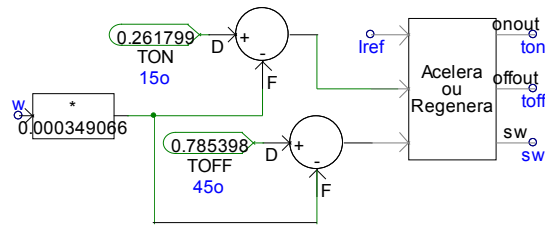


Figura 42: Controle dos ângulos de condução das fases da MRV.

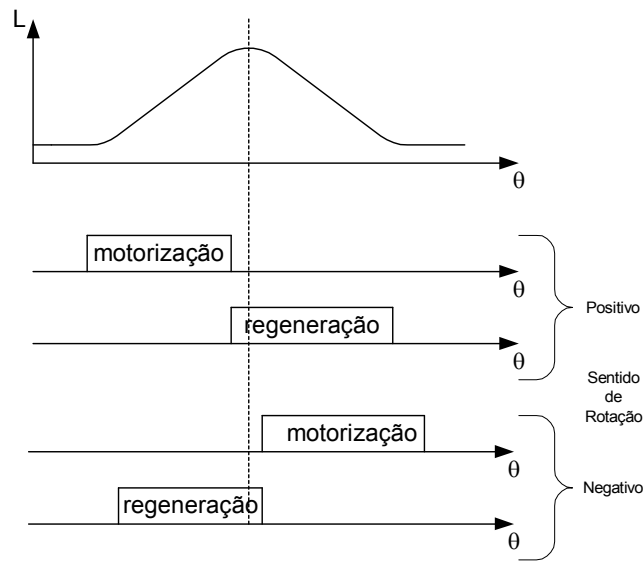


Figura 43: Curva de  $L \times \theta_r$  e modos de operação da MRV.

O circuito da Figura 44 descreve a equação mecânica da MRV (17), sendo obtido como saída da malha o ângulo “teta”. O ângulo “teta” corresponde à posição angular do rotor. Porém, este ângulo “teta” registra o deslocamento angular do rotor a partir da posição inicial, e precisa-se de uma posição angular com valores compreendidos entre 0 e  $90^\circ$ , que é o passo polar do rotor da MRV 6/4. A cada  $90^\circ$  de rotação mecânica, o perfil de indutância de cada fase da MRV se repete. Assim, o bloco PSCAD “Módulo 1.570796”, Figura 45, produz um sinal dente-de-serra na saída, que varia de 0 a  $90^\circ$ . A rotina deste bloco fornece como saída o resto da divisão entre “teta” e o valor 1.570796 rad ( $90^\circ$ ). Mais dois sinais semelhantes são gerados com defasagem de  $30^\circ$  entre eles, e que vão atender as outras duas fases. Como as fases 2 e 3 são

defasadas de  $60^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente, da fase 1, os sinais “Trgon2” e “Trgon3” devem ser defasados de  $60^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente, em relação ao sinal “Trgon1”. Isto se deve à geometria da MRV 6/4 (Figura 8).

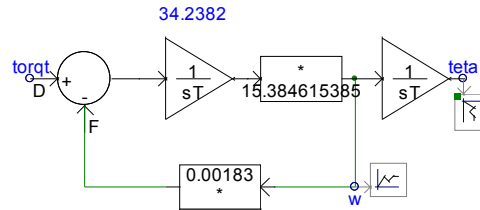


Figura 44: Malha da Equação Mecânica da MRV.

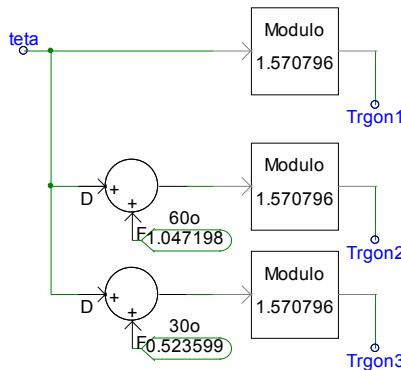


Figura 45: Obtenção dos sinais “Trgon<sub>1,2,3</sub>” para chaveamento do Conversor da MRV.

Conforme a Figura 46, os sinais “ton”, “toff” e “Trgon<sub>1,2,3</sub>” são enviados para o módulo Interpolador de Pulsos do PSCAD, que funciona do seguinte modo: quando o sinal na entrada “H<sub>ON</sub>” for maior do que o sinal na entrada “L<sub>ON</sub>” um comando “liga” é enviado para o *gate* do IGBT correspondente. A partir do instante em que o sinal em “H<sub>OFF</sub>” for maior do que em “L<sub>OFF</sub>”, um comando de “desliga” é enviado para o *gate* do IGBT.

Então, “Trgon<sub>1,2,3</sub>”, um sinal dente-de-serra que varia de 0 a  $90^\circ$ , é comparado com o sinal “ton”, aproximadamente constante ao longo do tempo, porém com pequenas variações no seu valor devido ao fator de correção da velocidade, conforme pode ser visto pela Figura 47. Quando “Trgon<sub>1,2,3</sub>” é maior do que “ton”, um sinal de “liga” é transmitido ao IGBT correspondente.



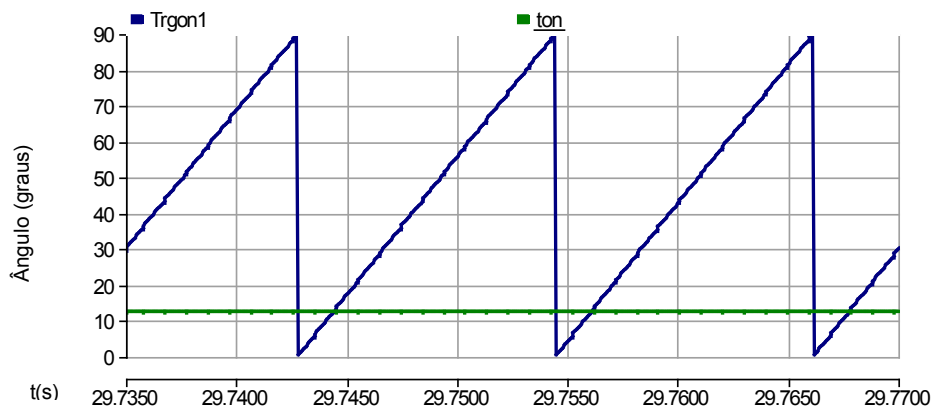


Figura 48: Comparação entre “Trgon1” e “ton”.

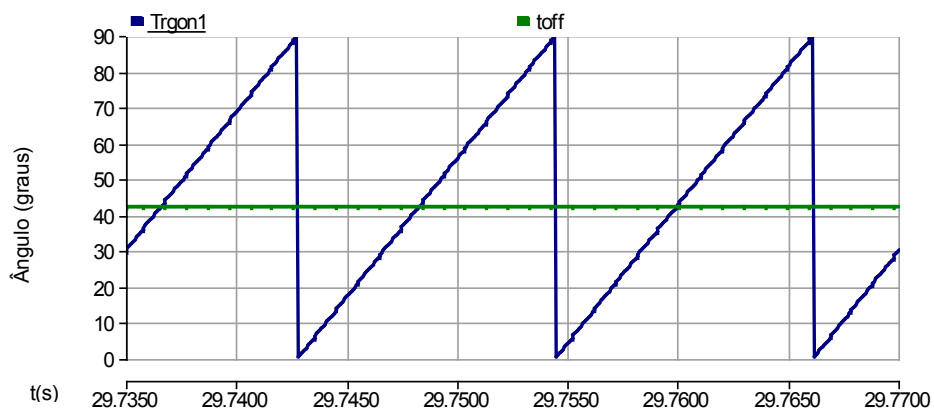


Figura 49: Comparação entre “Trgon1” e “toff”.

As Figura 50 e Figura 51 indicam que, durante a falta na rede elétrica (de 16 a 18 s), os ângulos “ton” e “toff” são aproximadamente 45 e 85°, respectivamente.

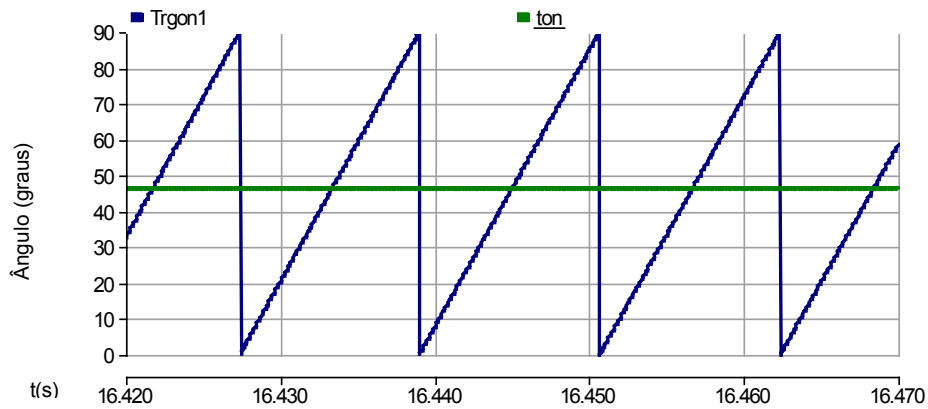


Figura 50: Comparação entre “Trgon1” e “ton” durante a falta (de 16 a 18s).

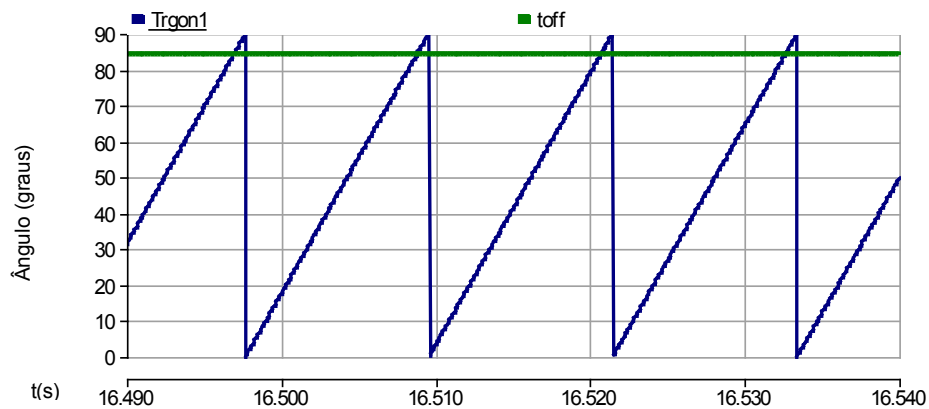


Figura 51: Comparação entre “Trgon1” e “toff” durante a falta (de 16 a 18s).

O controle dos IGBTs pares (parte superior do Conversor da MRV - Figura 35) é por banda de histerese. A Figura 52 mostra o diagrama que calcula o erro entre a corrente de referência “Iref” e a corrente de fase medida “ $I_{L1,2,3}$ ”. Como as correntes de fase “ $I_{L1,2,3}$ ” circulam sempre no mesmo sentido (adotado positivo), a comparação deve ser feita com o módulo de “Iref”, (“ModIref”), para que se descubra se a corrente na fase da MRV está maior ou menor do que o módulo da referência.

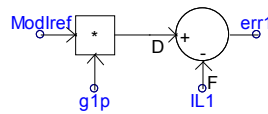


Figura 52: Cálculo do erro entre o módulo da corrente de referência “Iref” (“ModIref”) e a corrente de fase medida “ $I_{L1,2,3}$ ”.

Assim, quando a corrente de fase medida da MRV for menor do que o módulo da corrente “Iref”, o sinal de erro “ $err_{1,2,3}$ ” será positivo. De acordo com a Figura 53, quando o erro for positivo e maior do que a constante “hb” (banda de histerese), o módulo Interpolador de Pulsos do PSCAD irá comandar o acionamento do IGBT par correspondente (parte superior do Conversor da MRV - Figura 35), para que uma tensão positiva seja aplicada sobre a fase (Estado 1), fazendo com que a corrente “ $I_{L1,2,3}$ ” cresça até que o sinal de erro seja negativo, e que seu valor absoluto seja maior do que “hb”. Então, o IGBT par correspondente é desligado, fazendo que nenhuma tensão seja aplicada na fase, e a corrente cai livremente, caracterizando o Estado 2, na condição de motorização.

Durante o período da falta, processo semelhante de chaveamento é realizado, porém com alternância entre os Estados 1 e 3. O Estado 3 é fundamental para o controle da corrente “ $I_{L1,2,3}$ ” e para que possa ocorrer a regeneração da energia armazenada.

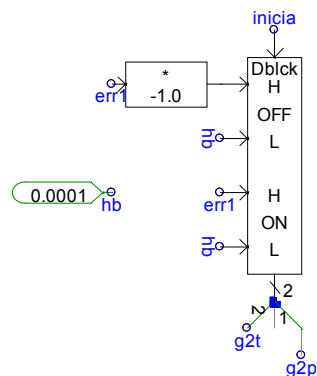


Figura 53: Chaveamento por Banda de Histerese dos IGBTs pares.

Como os IGBTs ímpares de uma perna do Conversor da MRV são controlados por PWM, e os IGBTs pares de outra perna são chaveados por banda de histerese, tem-se um controle PWM com Banda de Histerese para o Conversor da MRV.

O bloco da Figura 54 recebe os sinais “tempo”, “sw” (saída do bloco “Acelera ou Regenera” - Figura 42), e os pulsos “g1p”, “g1t”, “g2p”, “g2t” (saídas do Interpolador de pulsos do PSCAD), para que então, de acordo com a programação interna deste bloco, elaborada em função da seqüência de eventos da simulação, possa gerar os sinais de chaveamento adequados para os IGBTs. A seqüência de eventos das simulações obedece a seguinte ordem no tempo:

- $t_0 = 2,5s$ , Tempo de Início de Aceleração da MRV. Corresponde ao instante em que se inicia o acionamento da MRV;
- $t_1 = 16s$ , Tempo de Desligamento do Disjuntor da Fonte de Alimentação. Define o momento em que o disjuntor da fonte de alimentação principal, que alimenta a carga e o SAEC, é aberto; e
- $t_2 = 18s$ , Tempo de Religamento do Disjuntor da Fonte de Alimentação. Corresponde ao instante em que a falta é extinta, fechando-se o disjuntor da fonte de alimentação principal.

De acordo com a rotina interna deste bloco, quando o tempo for inferior a 2,5 s, os pulsos para os IGBTs do Conversor da MRV são zerados, desabilitando o chaveamento do Conversor da MRV, o que já é feito pela variável “inicia”, que só habilita o Interpolador em  $t = 2,5$  s. A partir de 2,5 s de simulação, a rotina deste bloco de controle avalia se o valor de “sw” é positivo ou negativo. Caso seja positivo, o Conversor da MRV é chaveado no modo motorização, alternando entre os estados 1 e 2. Durante a excitação de cada fase da MRV, o IGBT ímpar correspondente permanece ligado, enquanto o IGBT par correspondente é chaveado para o controle da corrente na fase por banda de histerese. Caso “sw” seja negativo, a MRV é freada, funcionando como gerador, e o Conversor da MRV é chaveado entre os estados 1 e 3, o que corresponde aos IGBTs pares e ímpares de cada fase estarem ligados ou desligados ao mesmo tempo. Para cada fase da MRV, existe um Bloco de Controle dos pulsos como o da Figura 54.



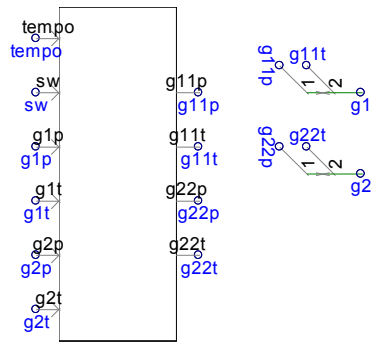


Figura 54: Determinação dos tempos  $t_0$ ,  $t_1$  e  $t_2$ .

O bloco “Controle Geral” e o bloco PSCAD “Single Input Level Comparator”, Figura 55, definem os tempos  $t_0$ ,  $t_1$  e  $t_2$  de cada evento na simulação.

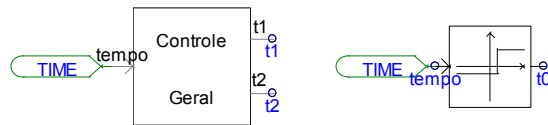


Figura 55: Bloco de Controle dos pulsos para o Conversor da MRV.

## 6.2. Resultado das Simulações

Neste item, são apresentados os resultados mais importantes obtidos nas simulações realizadas com cada configuração do SAEC.

### 6.2.1 Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede 1 $\phi$ (CC/1 $\phi$ )

#### Dados da simulação:

Tempo de simulação:	35 s
Passo de simulação:	5 $\mu$ s
Passo de plotagem:	70 $\mu$ s
Velocidade de referência:	150 rad/s
Tensão de referência do elo CC:	300 V
Instante da conexão da carga no elo CC:	13 s
Período de aplicação da falta:	entre 16 e 18 s

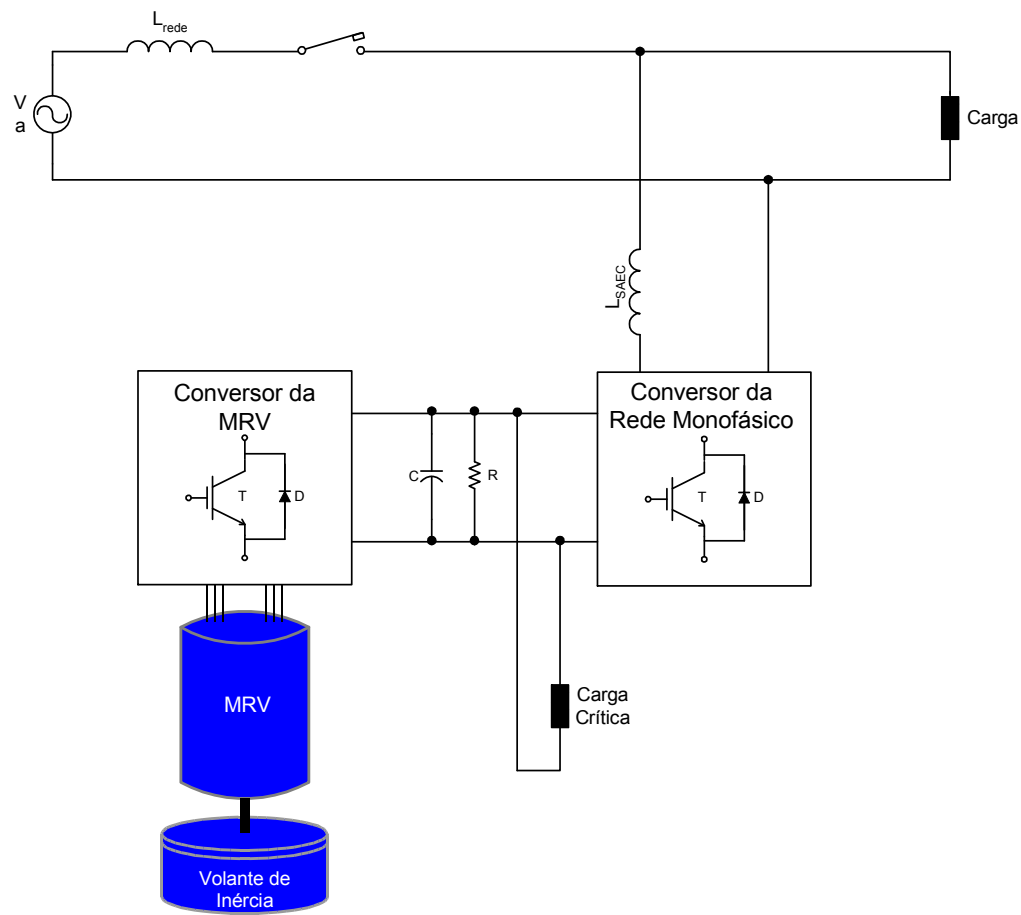


Figura 56: Configuração CC/1 $\phi$ .

A Figura 57 apresenta o comportamento da velocidade do volante de inércia. Inicialmente, a MRV funciona como motor para acelerar a massa girante até a velocidade de referência (150 rad/s). Quando a velocidade de referência é atingida, é aplicada uma falta, desligando-se o disjuntor da fonte de alimentação (Figura 56), e a energia mecânica armazenada no volante de inércia é transformada e transferida para a carga elétrica conectada ao elo CC. Em  $t=18$  s, a falta é extinta, e inicia-se o processo de motorização para recuperação da velocidade, de forma que o SAEC esteja pronto para atender uma nova situação de falha na rede elétrica.

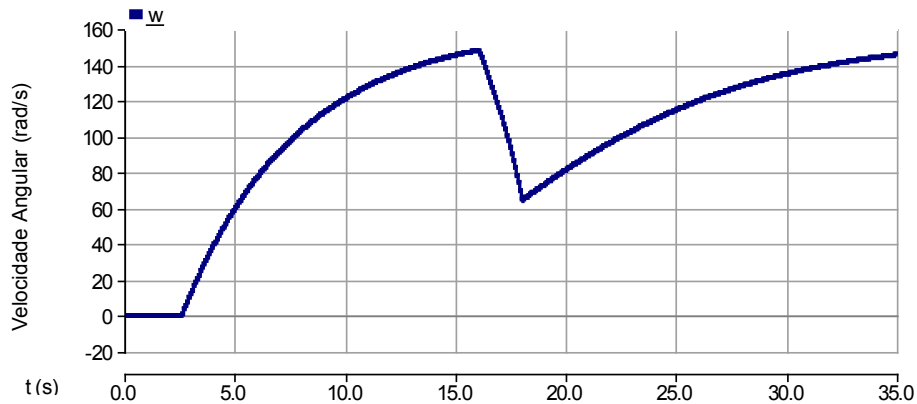


Figura 57: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CC/1 $\phi$ ).

A Figura 58 ilustra o comportamento do Torque da MRV. Assim como na figura anterior, também é possível observar que durante o período da falta (entre 16 e 18 s) ocorre a regeneração da energia durante o intervalo de tempo em que o torque é negativo. Durante a falta, a MRV opera como gerador. Obedecendo a Equação (14), à medida que a velocidade angular decai, o torque aumenta para que a potência constante requerida pela carga possa ser suprida pelo SAEC. Após a velocidade atingir o valor de referência e ser mantida constante, o torque produzido pela máquina corresponde somente ao valor necessário para suprir as perdas por atrito viscoso com o ar e atrito por contato nos mancais, Figura 58.

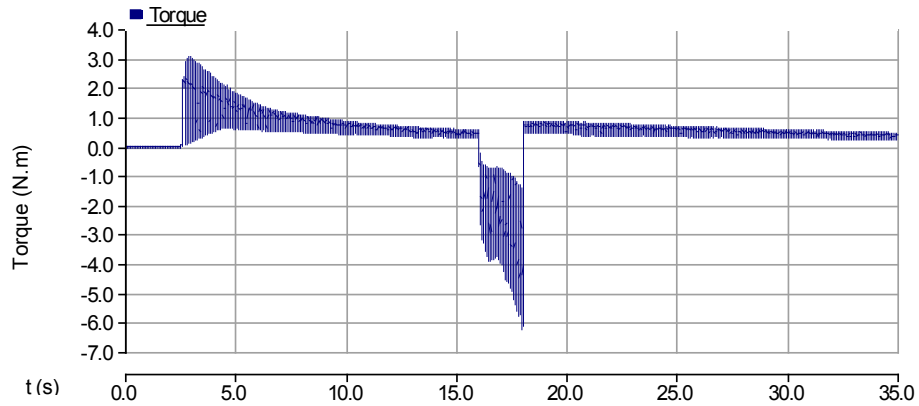


Figura 58: Curva de Torque da MRV (CC/1φ).

A Figura 59 apresenta um “zoom” de um intervalo da curva de torque, para que seja possível observar o torque pulsante da MRV.

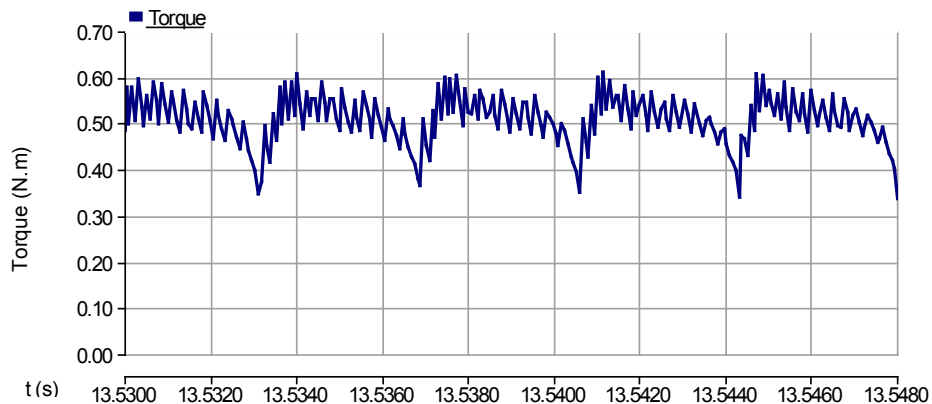


Figura 59: Zoom na Curva de Torque da MRV (CC/1φ).

A tensão no elo CC é mantida constante durante o funcionamento do SAEC. Nos instantes em que a carga é conectada ao elo CC, em que a falta é aplicada e em que a falta é extinta ocorrem pequenos transitórios, conforme pode ser observado pela Figura 60. Nestes momentos, a tensão no elo CC sofre uma variação na amplitude até que o sistema de controle atue corrigindo a diferença em relação ao valor de referência.

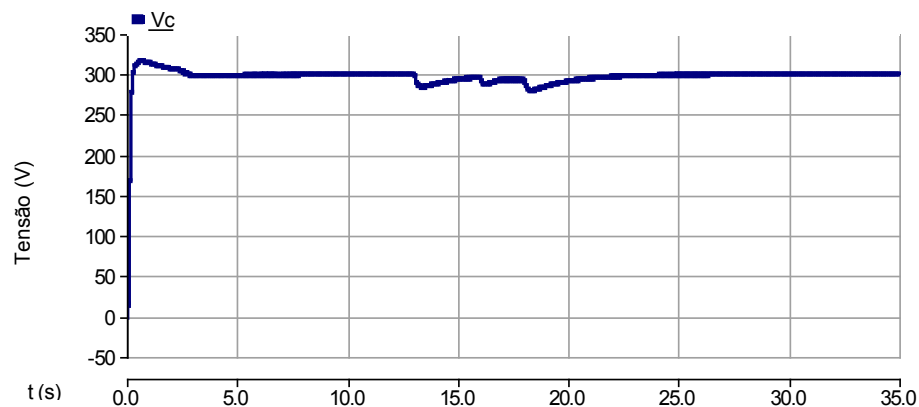


Figura 60: Curva de Tensão no elo CC (CC/1φ).

A Figura 61 apresenta um “zoom” na curva de tensão no elo CC, no intervalo que compreende a ligação da carga ao elo CC ( $t = 13$  s), e a aplicação ( $t = 16$  s) e extinção ( $t = 18$  s) da falta. Pode-se observar que o máximo transitório da tensão, não excede os 6,7% em relação ao valor de referência.

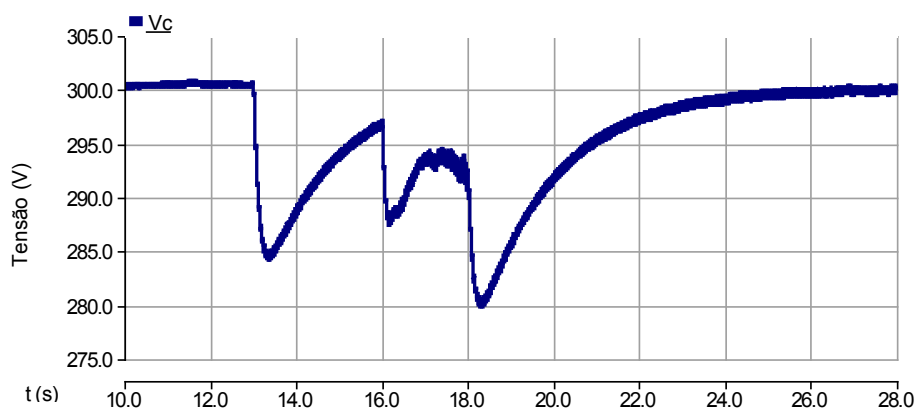


Figura 61: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CC/1φ).

A Figura 62 mostra que a corrente medida da rede “ $i_a$ ” está sendo sintetizada de acordo com a corrente de referência “ $i_{aref}$ ”. O sinal “ $I_{amp}$ ” representa a amplitude da corrente “ $i_{aref}$ ”, sendo o sinal de saída da “Malha de Controle de Tensão”.

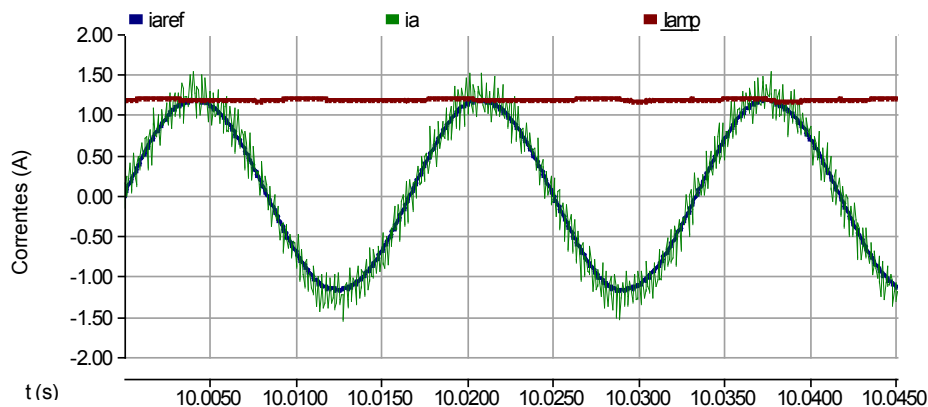


Figura 62: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) ( $CC/1\phi$ ).

As curvas das correntes de fase da MRV são apresentadas na Figura 63. Percebe-se que, no mesmo instante em que uma fase é desenergizada, a fase seguinte é excitada para se estabelecer uma rotação contínua, e tentando-se minimizar as pulsações do movimento. Porém, as correntes de fase da MRV levam um certo tempo para alcançarem o valor de referência e para serem extintas. Isto implica em um pequeno intervalo de Torque/fase negativo, enquanto a corrente de fase não é totalmente extinta.

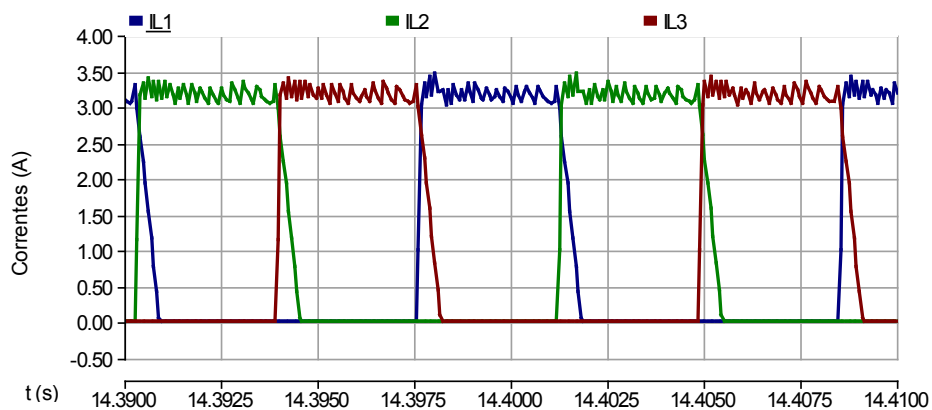


Figura 63: Correntes nas 3 fases da MRV ( $CC/1\phi$ ).

A Figura 64 apresenta o comportamento da corrente de referência da MRV, “Iref”, que é semelhante à curva de Torque. Seu valor determina a amplitude das

correntes de fase da MRV, e seu sinal indica o sentido do fluxo de potência, e do torque: positivo quando motorizando, isto é, acelerando ou mantendo constante a velocidade do volante de inércia, e negativo, quando operando como gerador, isto é, freando a massa girante para entregar a energia para o elo CC.

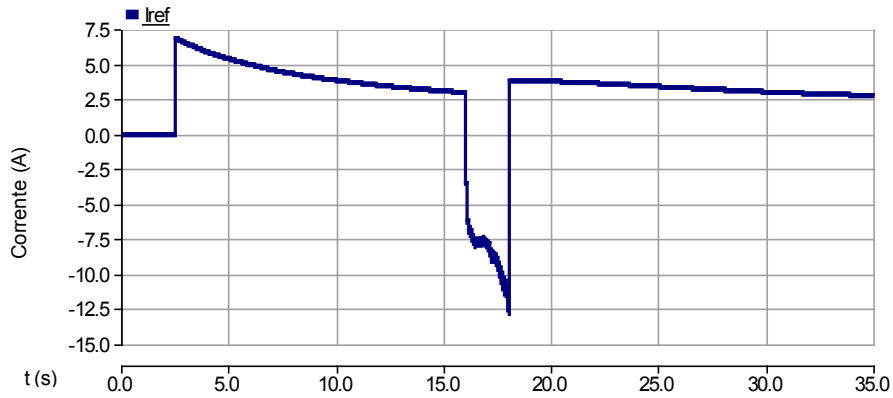


Figura 64: Corrente de Referência da MRV (CC/1 $\phi$ ).

As Figuras 65, 66, 67, 68 e 69 mostram os pulsos que são enviados às portas dos IGBTs da fase 1 do Conversor da MRV, obedecendo ao chaveamento dos Estados 1 e 2, durante a operação como motor, e aos Estados 1 e 3, durante a regeneração.

A Figura 65 apresenta, fora do período de aplicação da falta, o sinal de controle que é enviado para o *gate* do IGBT 1, enquanto o IGBT 2 é chaveado. Neste gráfico, podem ser observados os Estados 1 e 2 do Conversor da MRV. As Figuras 66 e 67 mostram cada sinal de *gate* separadamente, no mesmo intervalo de tempo.

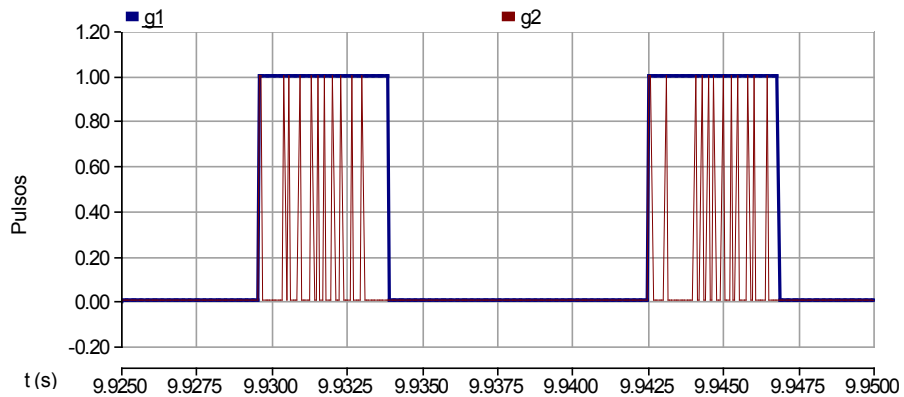


Figura 65: Pulsos nos *gates* dos IGBTs 1 e 2 (CC/1 $\phi$ ).

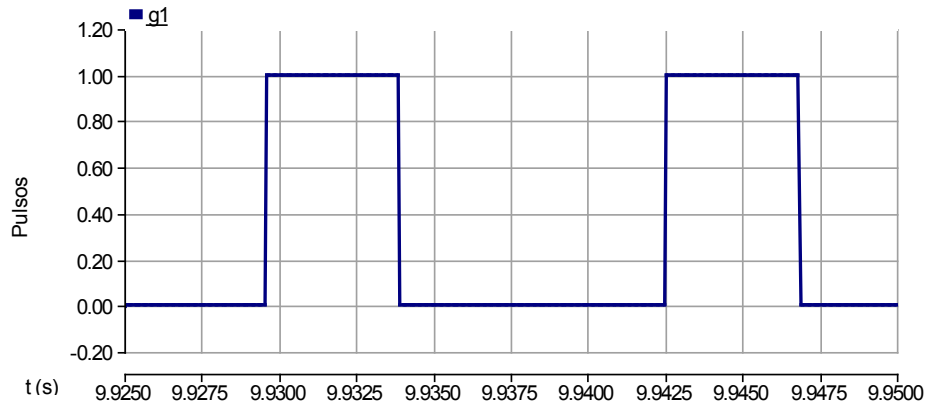


Figura 66: Pulsos no *gate* do IGBT 1 (CC/1 $\phi$ ).

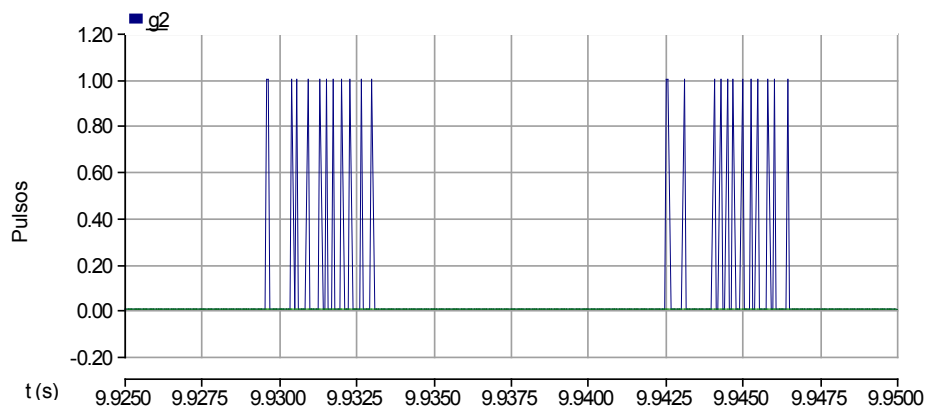


Figura 67: Pulsos no *gate* do IGBT 2 (CC/1 $\phi$ ).

A Figura 68 e a Figura 69 apresentam os pulsos enviados para os *gates* dos IGBTs 1 e 2 do Conversor da MRV durante o período de aplicação da falta. Pode-se observar que, ou ambos os IGBTs de cada fase estão conduzindo, ou ambos estão bloqueados, correspondendo aos Estados 1 e 3, respectivamente.



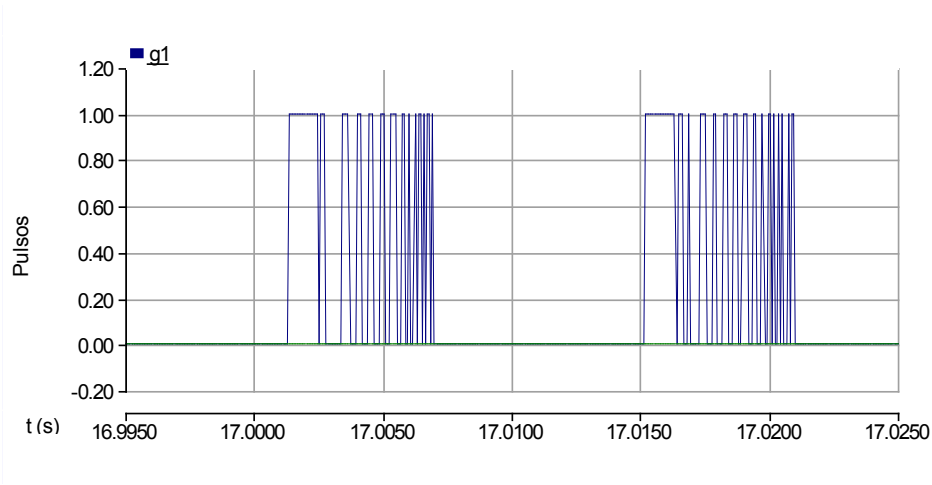


Figura 68: Pulsos no *gate* do IGBT 1 durante a falta (CC/1 $\phi$ ).

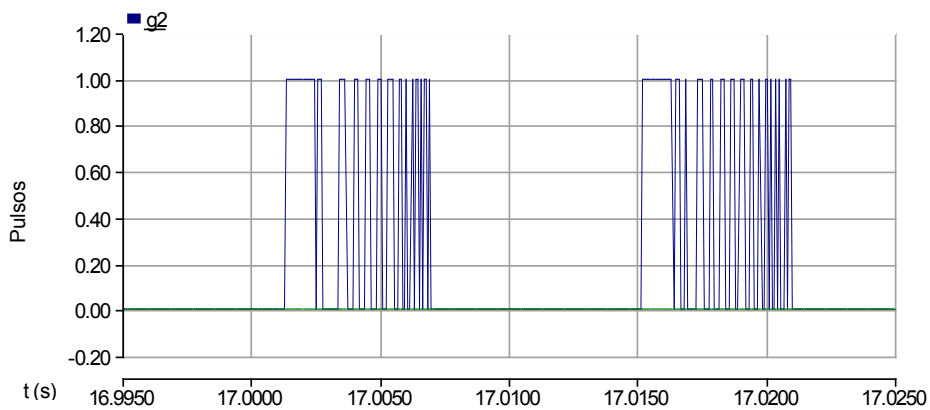


Figura 69: Pulsos no *gate* do IGBT 2 durante a falta (CC/1 $\phi$ ).

A Figura 70 apresenta a curva do ângulo “teta” em graus, resultado da equação mecânica da MRV (Equação (17) - Figura 44). Esta variável descreve o deslocamento angular do rotor desde o início da rotação. Como esta variável, não é zerada, a cada passo polar da MRV completado, esta variável é tratada pelo bloco PSCAD “Módulo 1.570796”, Figura 45, de forma a gerar os sinais “Trgon<sub>1,2,3</sub>”, que variam de 0 a 90°, e descrevem a posição angular do rotor em relação a cada fase da MRV. Assim, são obtidos os sinais “Trgon<sub>1,2,3</sub>”, Figura 71, que juntamente com “ton” e “toff”, formam a

entrada do circuito de chaveamento do Conversor da MRV. A configuração MRV empregada é 6/4, cujo passo polar é de  $90^\circ$ .

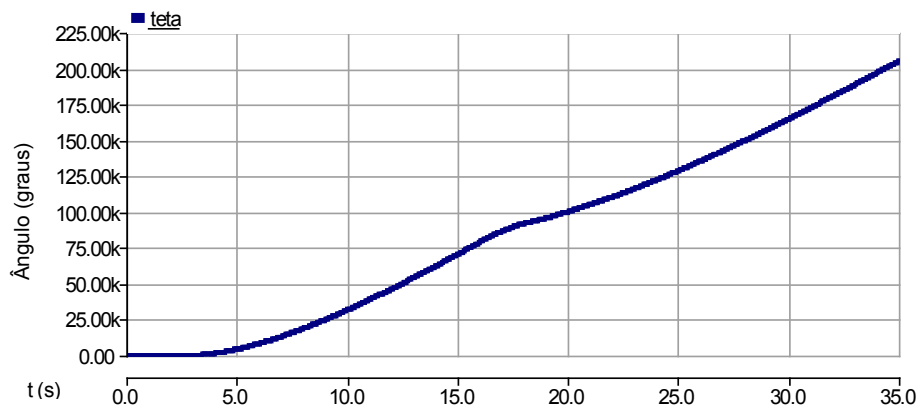


Figura 70: Ângulo “Teta” em graus (CC/1 $\phi$ ).

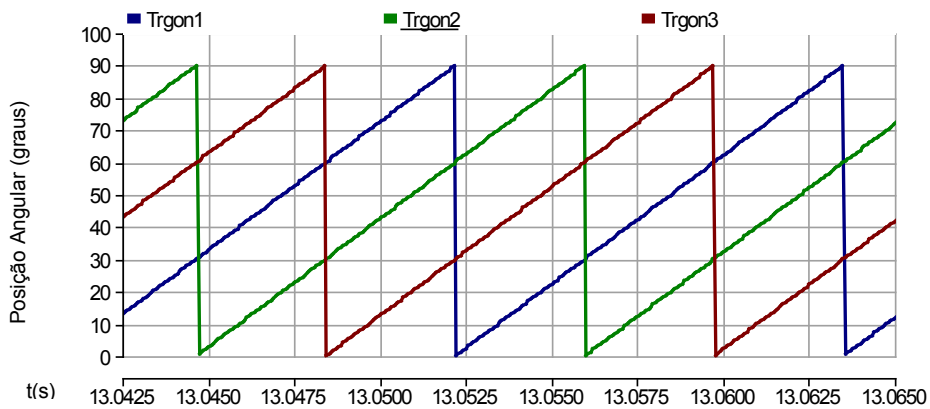


Figura 71: Posição Angular “Trgon<sub>1,2,3</sub>” em graus (CC/1 $\phi$ ).

As curvas do Ângulo “Teta” e da Posição Angular “Trgon<sub>1,2,3</sub>” (Figuras 70 e 71), ambas em graus, serão apresentadas somente para o caso CC/1 $\phi$ , pois não há diferença significativa que justifique sua apresentação nas simulações subseqüentes, e pelo fato das demais curvas já comprovarem o perfeito funcionamento dos outros casos simulados.

## 6.2.2 Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede 1φ (CA/1φ)

### Dados da simulação:

Tempo da simulação:	45 s
Passo de simulação:	5μs
Passo de plotagem:	70μs
Velocidade de referência:	150 rad/s
Tensão de referência do elo CC:	300 V
Período de aplicação da falta:	Entre 16 e 18 s

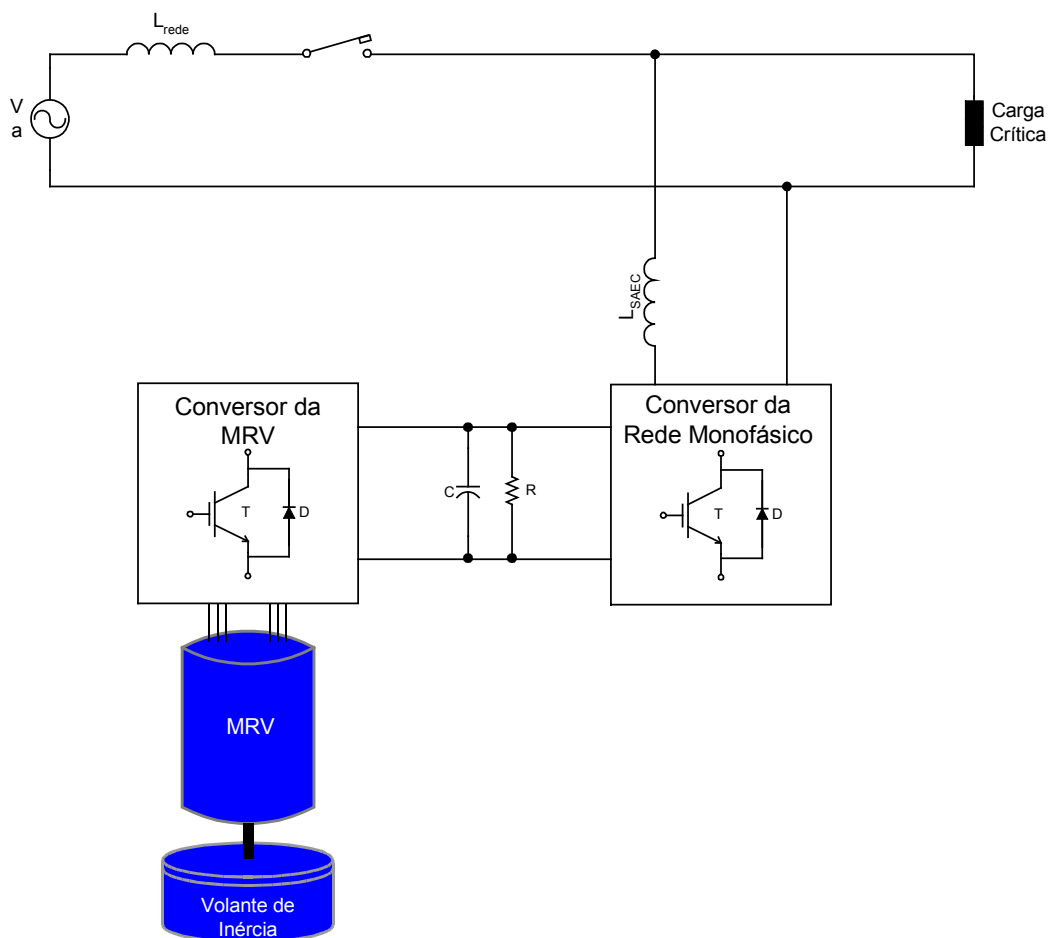


Figura 72: Configuração CA/1φ.

A Figura 73 indica o comportamento da velocidade do volante de inércia. As diferenças nos tempos de resposta e no formato da curva em relação à curva de velocidade das demais configurações devem-se a escolha dos parâmetros dos reguladores PIs das malhas de controle, de alterações no valor da carga e no sistema elétrico empregados na simulação. Anteriormente, uma carga elétrica (um resistor) era conectada em paralelo ao circuito do elo CC. Nesta simulação, a carga está inserida no lado CA, sendo parte de um sistema elétrico formado por uma fonte de alimentação CA monofásica, uma carga monofásica e pelo SAEC.

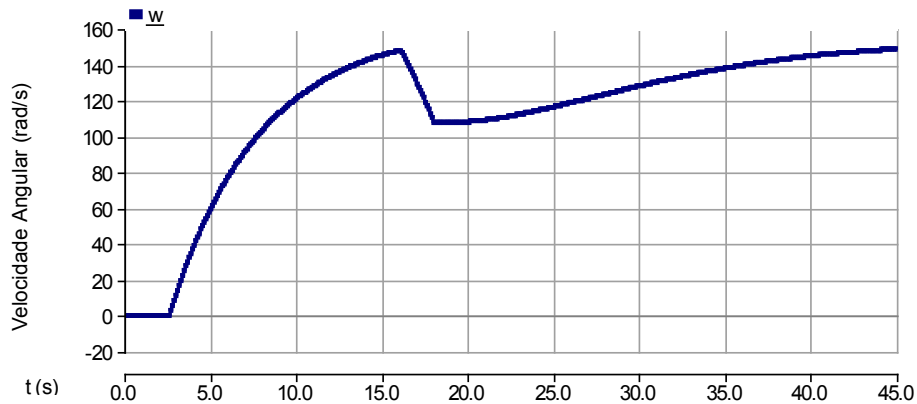


Figura 73: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CA/1 $\phi$ ).

As Figura 74 e Figura 75, respectivamente, apresentam a curva de Torque e um “zoom” em intervalo de tempo desta curva. O mesmo comportamento é observado em relação a simulação anterior.

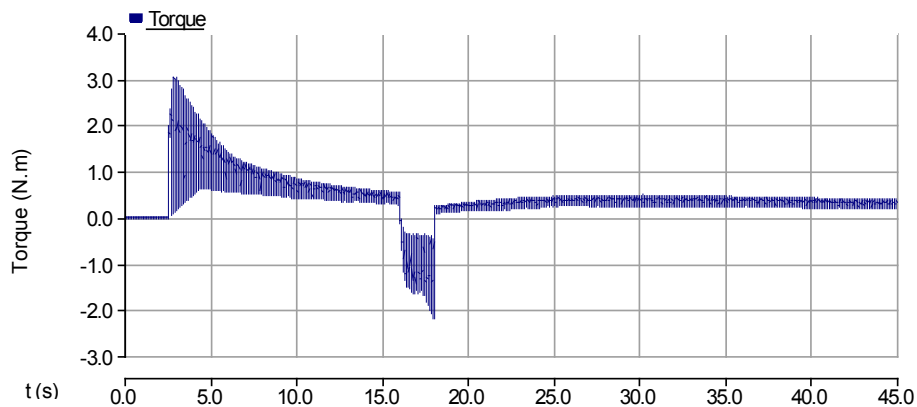


Figura 74: Curva de Torque da MRV (CA/1 $\phi$ ).

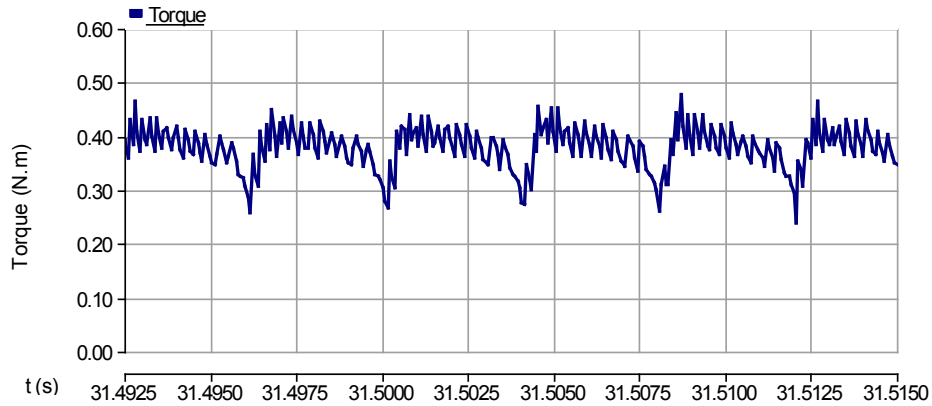


Figura 75: Zoom da Curva de Torque da MRV (CA/1φ).

A Figura 76 apresenta as curvas da potência média no SAEC e da potência média na carga. Pode-se observar, que o SAEC, inicialmente, recebe energia da rede para carregar o capacitor do elo CC, durante um curto intervalo de tempo. Em seguida, a partir de  $t = 2,5$  s, o SAEC recebe energia para acelerar a MRV, até que o conjunto rotor/volante de inércia alcance a velocidade de referência. Entre  $t = 16$  s e  $t = 18$  s, ocorre à abertura do disjuntor que isola a carga da fonte de alimentação da rede elétrica. Durante este período, o SAEC fornece a potência requerida pela carga. Após  $t = 18$  s, a rede elétrica fornece energia para a carga, para o SAEC e para suprir as perdas, que na simulação correspondem somente ao atrito por contato nos mancais e ao atrito viscoso com o ar, concentrados numa única constante (Figura 44). As perdas por chaveamento são desprezadas na simulação, pois os semicondutores estão configurados como ideais.

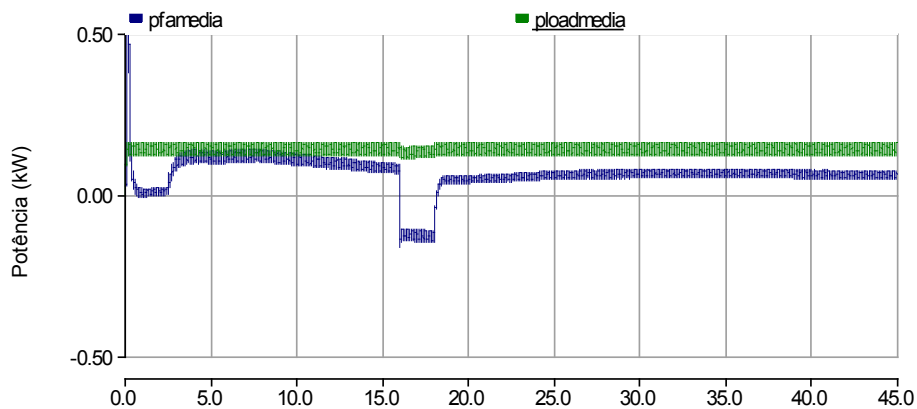


Figura 76: Curva da Potência no SAEC (pfamedia) e da Potência na Carga (ploadmedia) (CA/1φ).

Para manter o mesmo valor da tensão que é fornecida à carga pela fonte de alimentação da rede elétrica, foi calculado o valor de pico da tensão de controle “vcontrol” (senóide) que modula a onda portadora (triangular), por meio das expressões (18) e (19), referência [42].

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (18)$$

$$v_o = m_a \cdot V_c \cdot \sin(w_1 \cdot t) \quad (19)$$

Observa-se pelas Figuras 77 e 78, que a amplitude e frequência da tensão na carga foram mantidas pelo SAEC durante a falta de energia da rede elétrica. Pode-se observar também que, até o instante  $t = 16$  s, a forma de onda de tensão na carga não apresentava sinais da ocorrência de chaveamento, sendo uma senóide pura, fornecida pela fonte de alimentação da rede elétrica. Porém, a partir de  $t = 16$  s, a tensão é fornecida à carga, por meio de um conversor eletrônico de potência, que utiliza a tensão do elo CC para fornecer uma tensão CA senoidal. Devido à técnica de chaveamento empregada no Conversor da Rede, PWM, há uma redução na taxa de distorção harmônica, o que permite uma melhor forma de onda na saída.

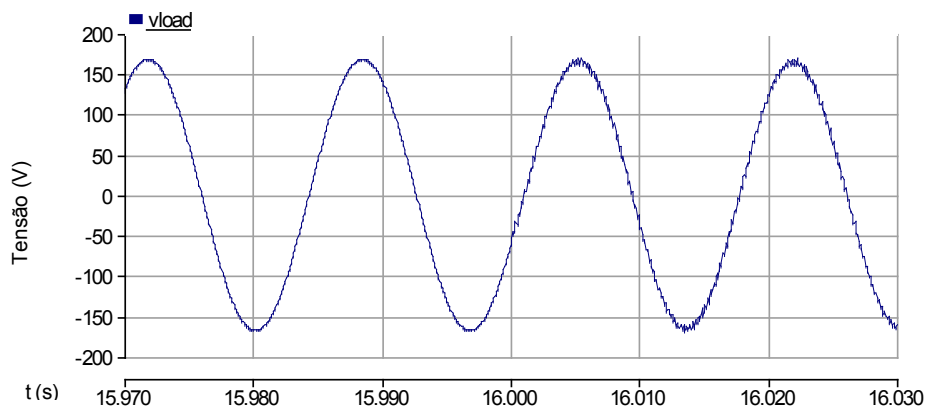


Figura 77: Curva da Tensão na Carga – Aplicação da falta em 16 s (CA/1φ).

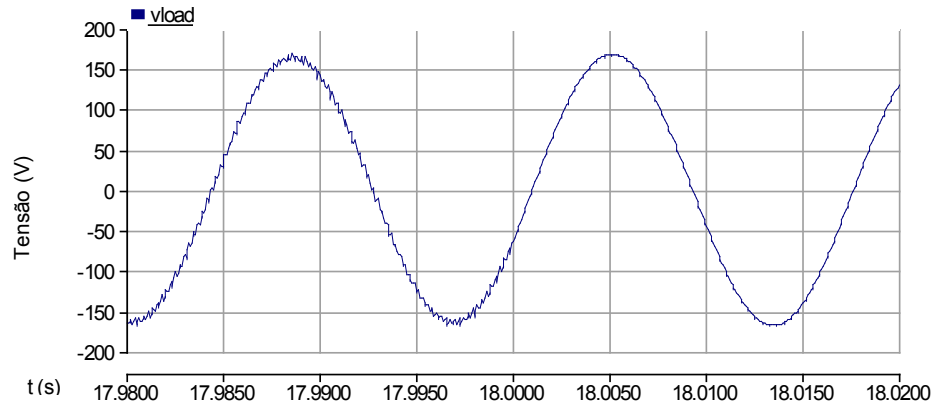


Figura 78: Curva da Tensão na Carga – Extinção da falta em 18 s (CA/1 $\phi$ ).

As Figuras 79, 80 e 81 apresentam a forma de onda de tensão entregue pelo SAEC ao sistema elétrico, antes do indutor de alisamento, no início, durante e no final do período da falta, respectivamente.

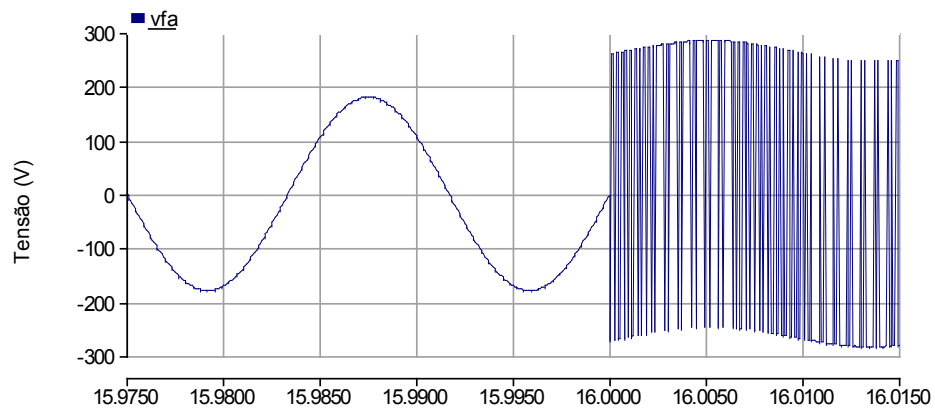


Figura 79: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Aplicação da falta em 16 s (CA/1 $\phi$ ).

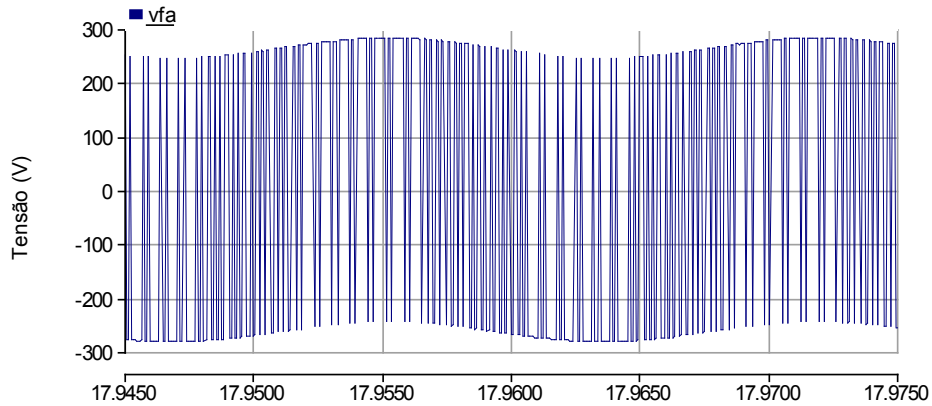


Figura 80: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Durante a falta (CA/1φ).

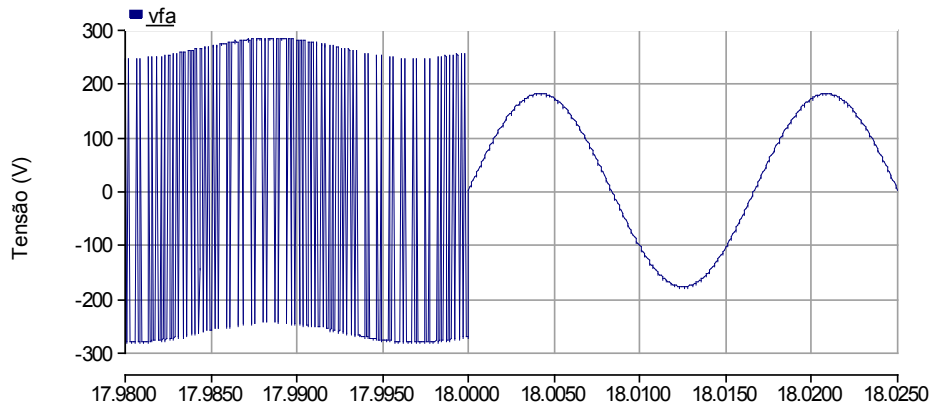


Figura 81: Curva da Tensão na Saída do SAEC – Extinção da falta em 18 s (CA/1φ).

Por meio da Figura 82, percebe-se que a tensão no elo CC é mantida constante, o que é imprescindível para que o Conversor da Rede opere satisfatoriamente como Inversor Fonte de Tensão com Controle da Corrente. Pela Figura 83, nota-se que ocorrem transientes na tensão do elo CC, nos instantes de aplicação ( $t = 16$  s) e de extinção ( $t = 18$  s) da falta. Porém, observa-se que os reguladores atuam buscando corrigir esta variação instantânea na tensão CC. O valor máximo do transiente não excede os 3,33% em relação ao valor de referência.



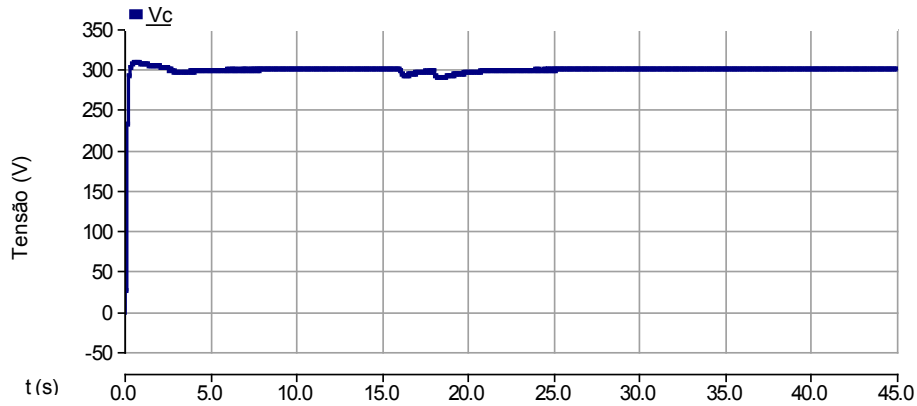


Figura 82: Curva de Tensão no elo CC (CA/1 $\phi$ ).

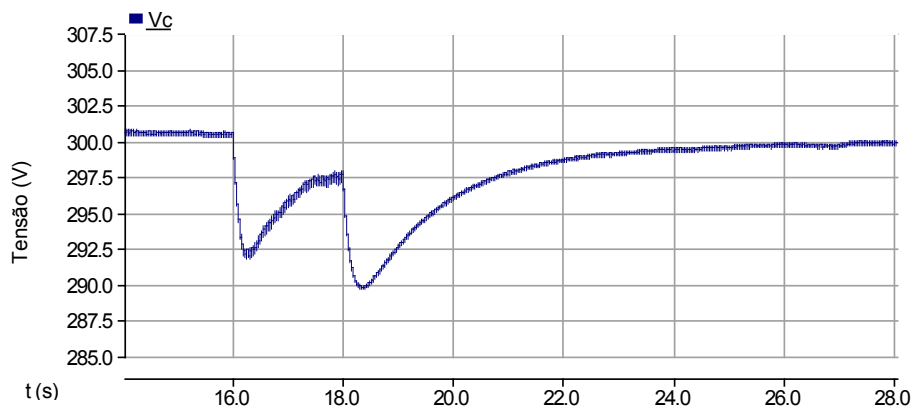


Figura 83: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CA/1 $\phi$ ).

Pela Figura 84, é possível observar a corrente medida da rede “ia” está sendo sintetizada de acordo com a corrente de referência “iaref”, cuja amplitude é o sinal “Iamp”. O sinal “Iamp” é a saída da “Malha de Controle de Tensão”. Desta forma, observa-se que há um controle da corrente da rede CA.

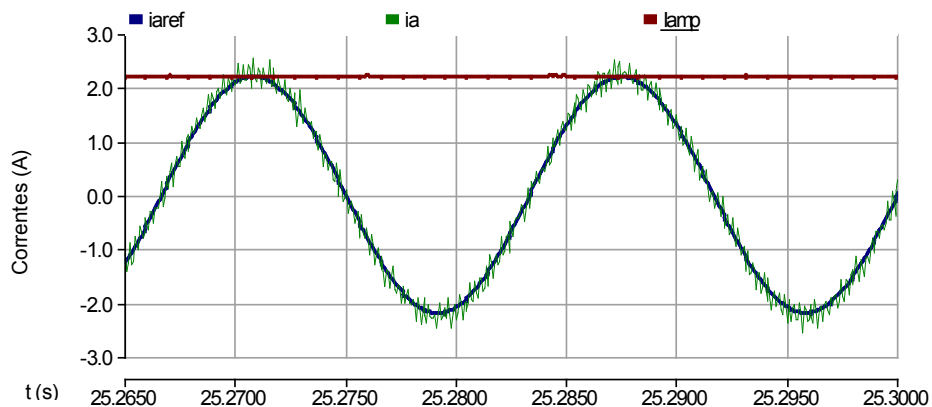


Figura 84: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) ( $CA/1\phi$ ).

As correntes de fase da MRV, Figura 85, apresentam a mesma forma de onda do caso simulado anteriormente, apresentada na Figura 63. Entretanto, as diferenças nos valores de amplitude e período do sinal de corrente em relação aos demais casos simulados devem-se ao instante de tempo amostrado no gráfico. Inicialmente, quando a MRV está partindo, a amplitude da corrente é muito alta, decrescendo à medida que a velocidade se aproxima do valor de referência. O período pelo qual cada fase permanece excitada também muda de acordo com a velocidade. Quanto mais rápida é a rotação angular, menor é o tempo que cada fase deve permanecer alimentada.

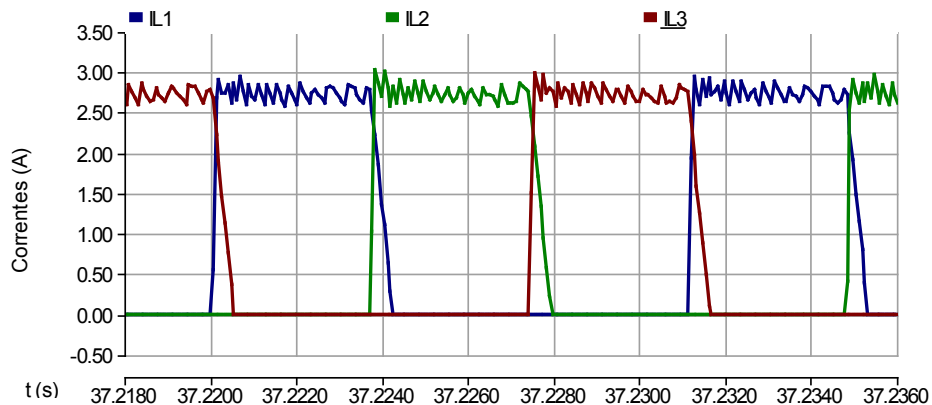


Figura 85: Correntes nas 3 fases da MRV ( $CA/1\phi$ ).

A Figura 86 ilustra o comportamento da corrente de referência “Iref”. O sinal “Iref” corresponde à saída da “Malha de Controle de Velocidade” fora do período da falta, ou à saída da “Malha de Controle de Tensão durante a Falta” durante o tempo de aplicação da falta. Desta forma, esta corrente de referência “Iref” serve como referência para o controle da velocidade quando a rede elétrica opera normalmente, ou como referência para controle da tensão no elo CC durante a falta.

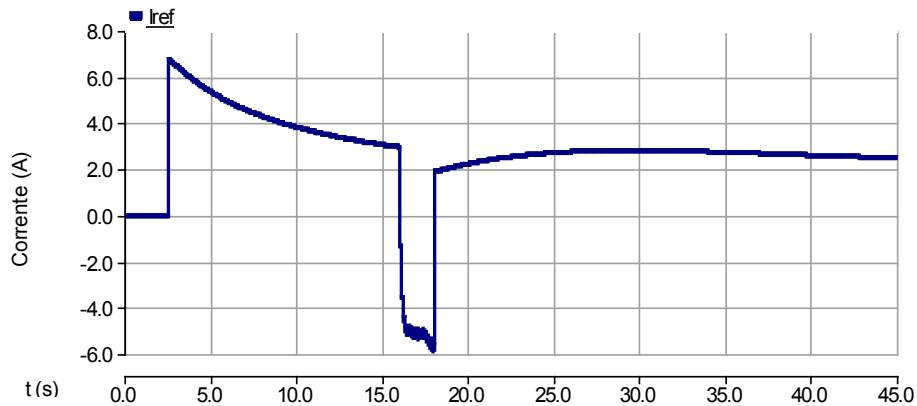


Figura 86: Corrente de Referência da MRV (CA/1φ).

Pela Figura 87, pode-se observar o comportamento dos pulsos aplicados aos *gates* “g1” e “g2” dos IGBTs do Conversor da MRV durante a operação normal do sistema elétrico.

A largura dos pulsos aplicados aos *gates* varia de acordo com o sinal “Iref”, que por sua vez varia em função da velocidade (modo Motorização) e da tensão no elo CC (modo Regeneração). No modo Motorização, os IGBTs pares (parte superior do conversor, Figura 35) são chaveados, enquanto os IGBTs ímpares (parte inferior do conversor, Figura 35) permanecem ligados. Na Figura 87, “g1” permanece em nível lógico alto, enquanto “g2” alterna entre os níveis lógicos alto e baixo). O chaveamento dos IGBTs pares neste modo é necessário para se manter o controle da corrente na fase da MRV. No modo Regeneração, Figura 88 e Figura 89, ou os IGBTs pares e ímpares de cada fase são ligados ou desligados simultaneamente. Isto é feito desta forma, para que seja possível entregar potência à carga, isto é, regenerar, e ainda assim, controlar a corrente de fase na MRV.

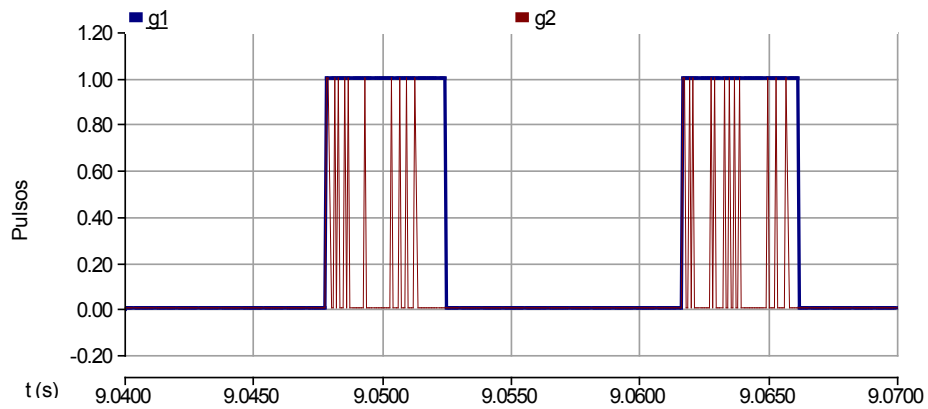


Figura 87: Pulsos nos *gates* dos IGBTs 1 e 2 (CA/1 $\phi$ ).

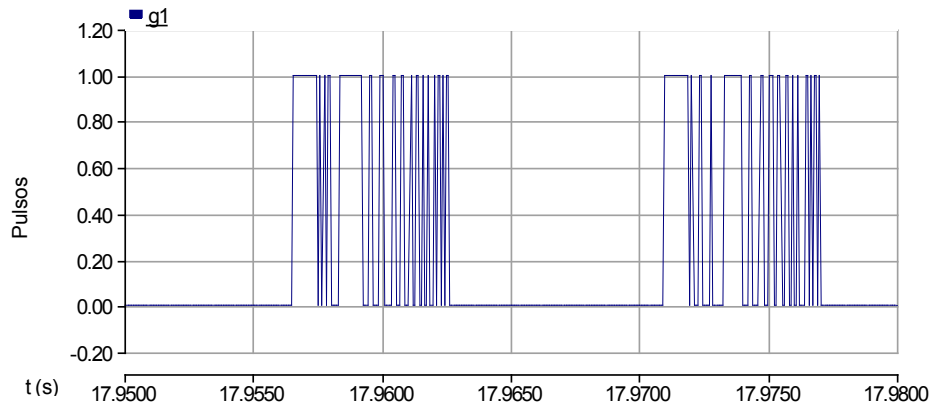


Figura 88: Pulsos no *gate* do IGBT 1 durante a falta (CA/1 $\phi$ ).

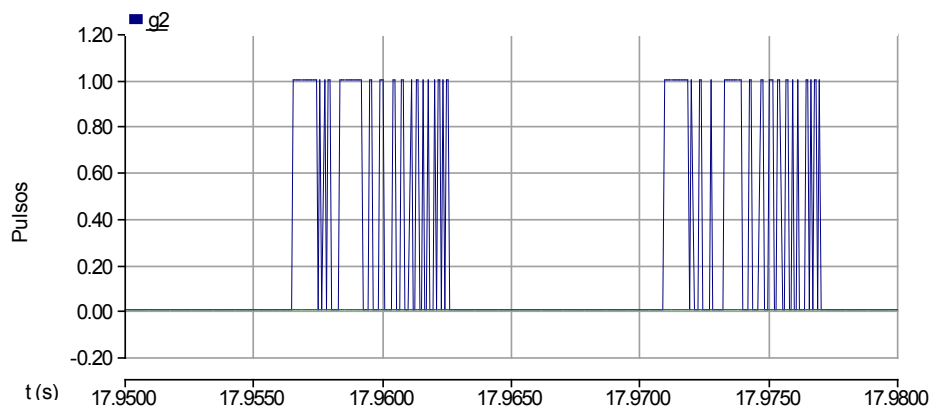


Figura 89: Pulsos no *gate* do IGBT 2 durante a falta (CA/1 $\phi$ ).

### 6.2.3 Regeneração para o elo CC com Conversor da Rede 3φ (CC/3φ)

#### Dados da simulação:

Tempo da simulação:	40 s
Passo de simulação:	5μs
Passo de plotagem:	70μs
Velocidade de referência:	150 rad/s
Tensão de referência do elo CC:	300 V
Instante da conexão da carga no elo CC:	13 s
Período de aplicação da falta:	entre 16 e 18 s

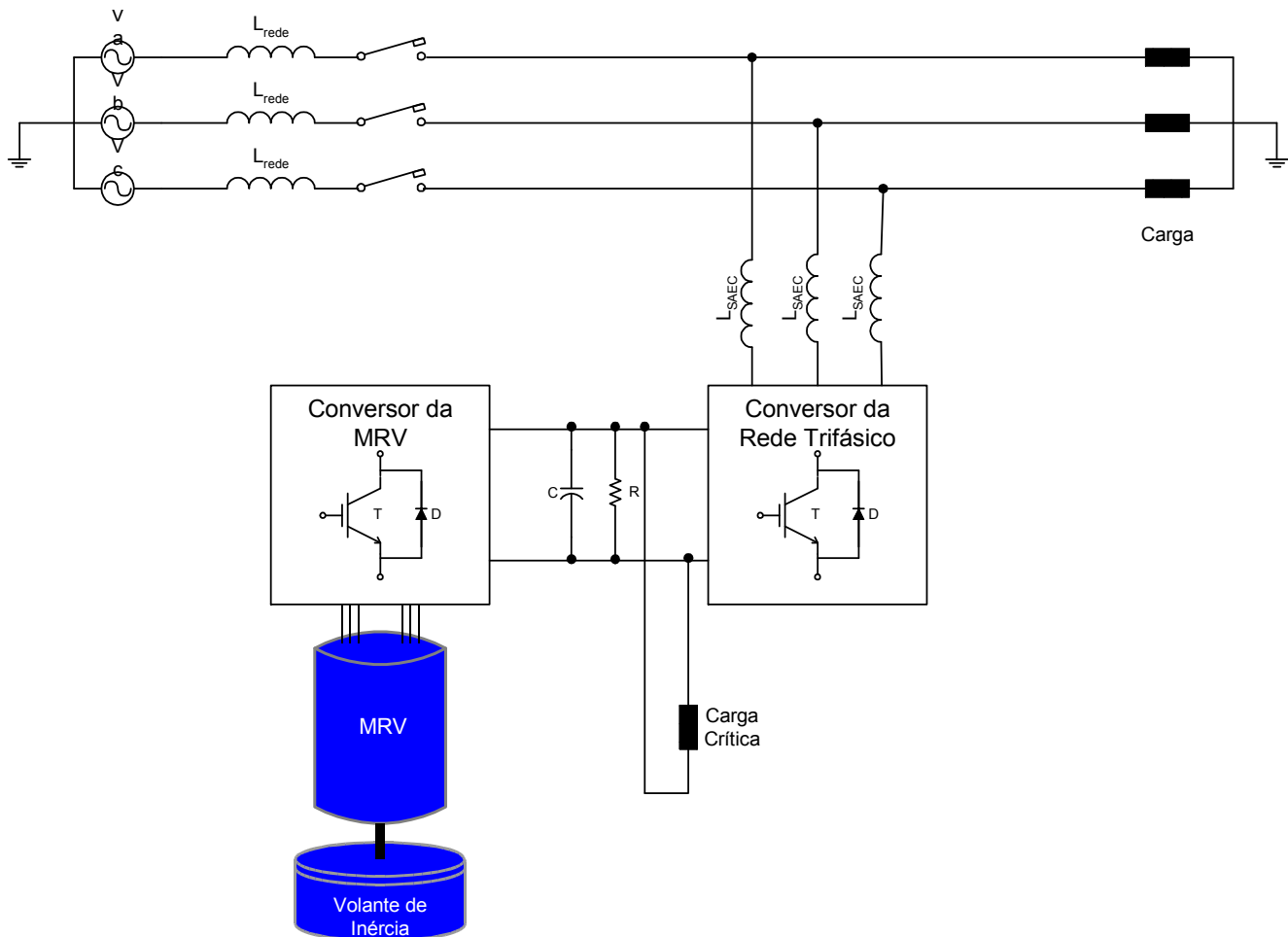


Figura 90: Configuração CC/3φ.

Pela Figura 91, observa-se que em  $t = 16$  s, logo após a MRV atingir a velocidade de referência, é aplicada uma falta (desligamento da fonte de alimentação por meio de disjuntor). Entre  $t = 16$  s e  $t = 18$  s, a energia é fornecida pelo SAEC à carga conectada ao elo CC. Em  $t = 18$  s, a falta é extinta, e a MRV começa a recuperar a velocidade acelerando o volante de inércia.

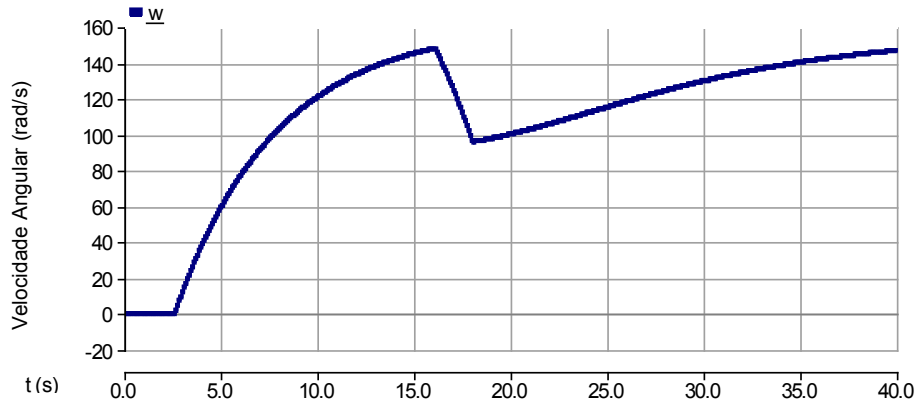


Figura 91: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CC/3 $\phi$ ).

A Figura 92 comprova que, durante o período da falta, o torque gerado pela MRV foi negativo, indicando que a MRV operou como gerador, e houve regeneração da energia cinética armazenada no conjunto rotor/volante de inércia.

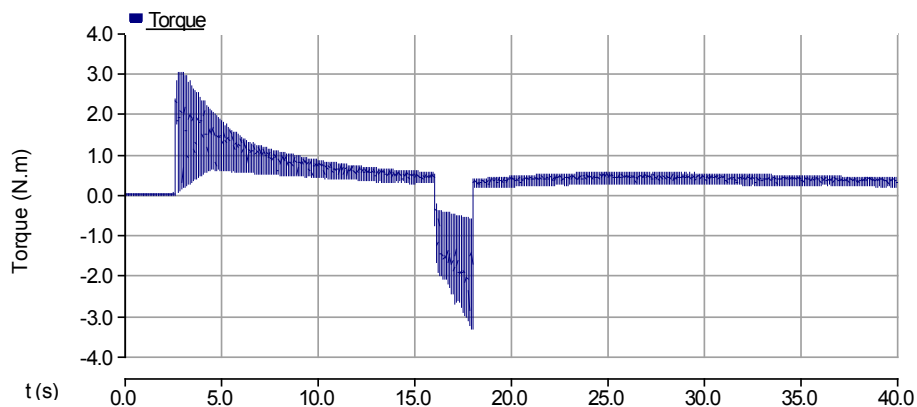


Figura 92: Curva de Torque da MRV (CC/3 $\phi$ ).

Na Figura 93, nota-se que a tensão no elo CC foi mantida no valor de referência, excetuando-se os transientes ocorridos nos momentos de conexão da carga no elo CC e de aplicação e extinção da falta.

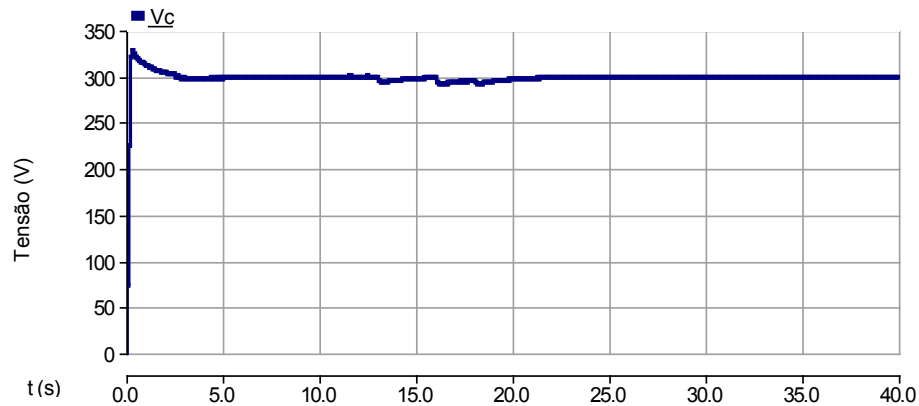


Figura 93: Curva de Tensão no elo CC (CC/3φ).

Um “zoom” na curva de tensão no elo CC, Figura 94, permite verificar que a maior variação ocorrida na tensão do elo CC não ultrapassou os 2,68% do valor de referência.

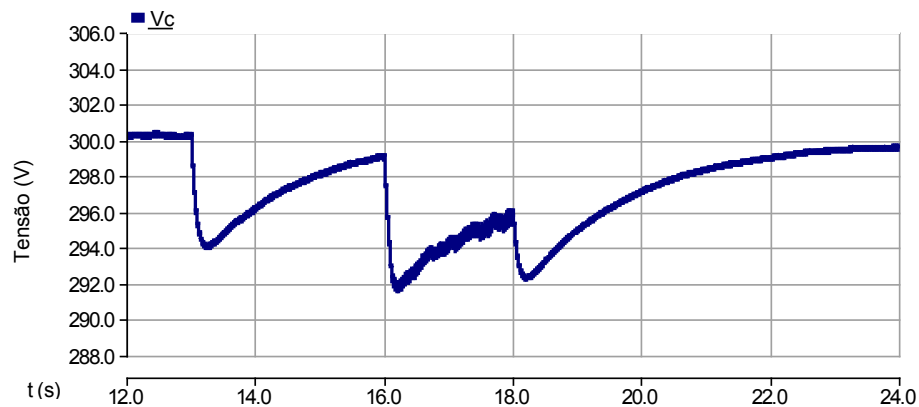


Figura 94: Zoom na Curva de Tensão no elo CC (CC/3φ).

Por meio da Figura 95, é possível observar que a corrente da fase “a” do Conversor da Rede é sintetizada de acordo com o sinal de referência “iaref”, mostrando o correto funcionamento do controle da corrente pelo Conversor da Rede.

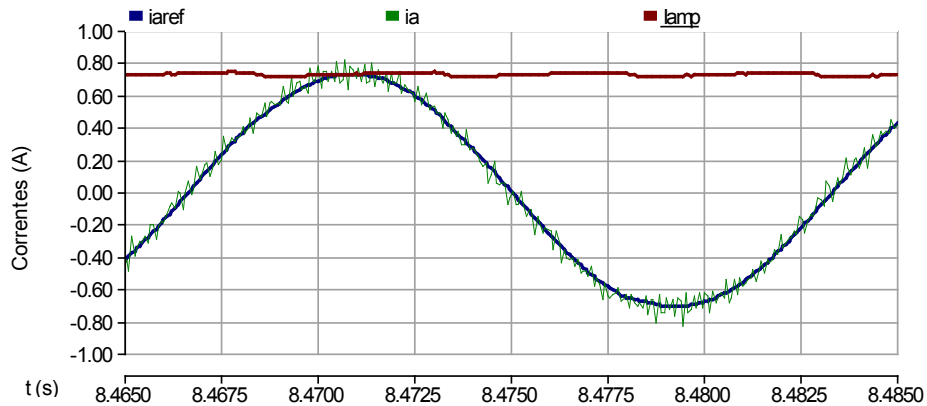


Figura 95: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) ( $CC/3\phi$ ).

A Figura 96 apresenta as 3 correntes de fase da MRV. A corrente de cada fase da MRV é controlada por PWM com Banda de Histerese, e sua amplitude está em torno do valor da corrente de referência “Iref”, Figura 97, que corresponde à saída da “Malha de Controle de Velocidade” ou da “Malha de Controle de Tensão durante a Falta”, dependendo do modo de operação do SAEC: Motorização ou Regeneração.

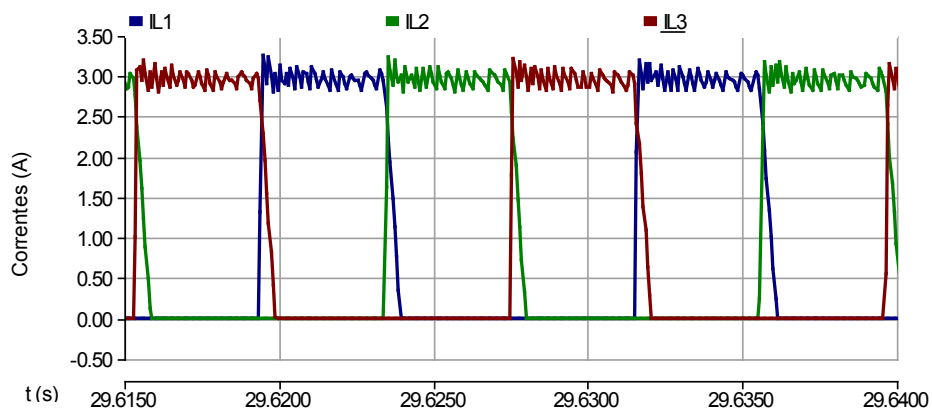


Figura 96: Correntes nas 3 fases da MRV ( $CC/3\phi$ ).



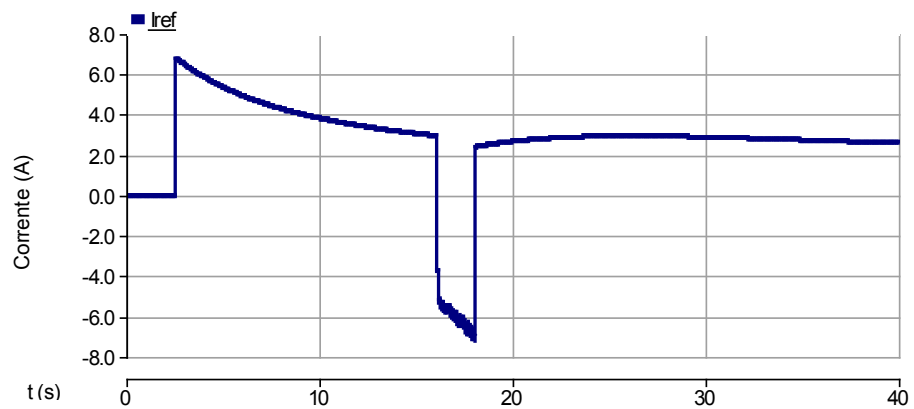


Figura 97: Corrente de Referência da MRV (CC/3 $\phi$ ).

## 6.2.4 Regeneração para a rede CA com Conversor da Rede 3φ (CA/3φ)

### Dados da simulação:

Tempo da simulação:	40 s
Passo de simulação:	5 μs
Passo de plotagem:	70 μs
Velocidade de referência:	150 rad/s
Tensão de referência do elo CC:	300 V
Período de aplicação da falta:	entre 16 e 18 s

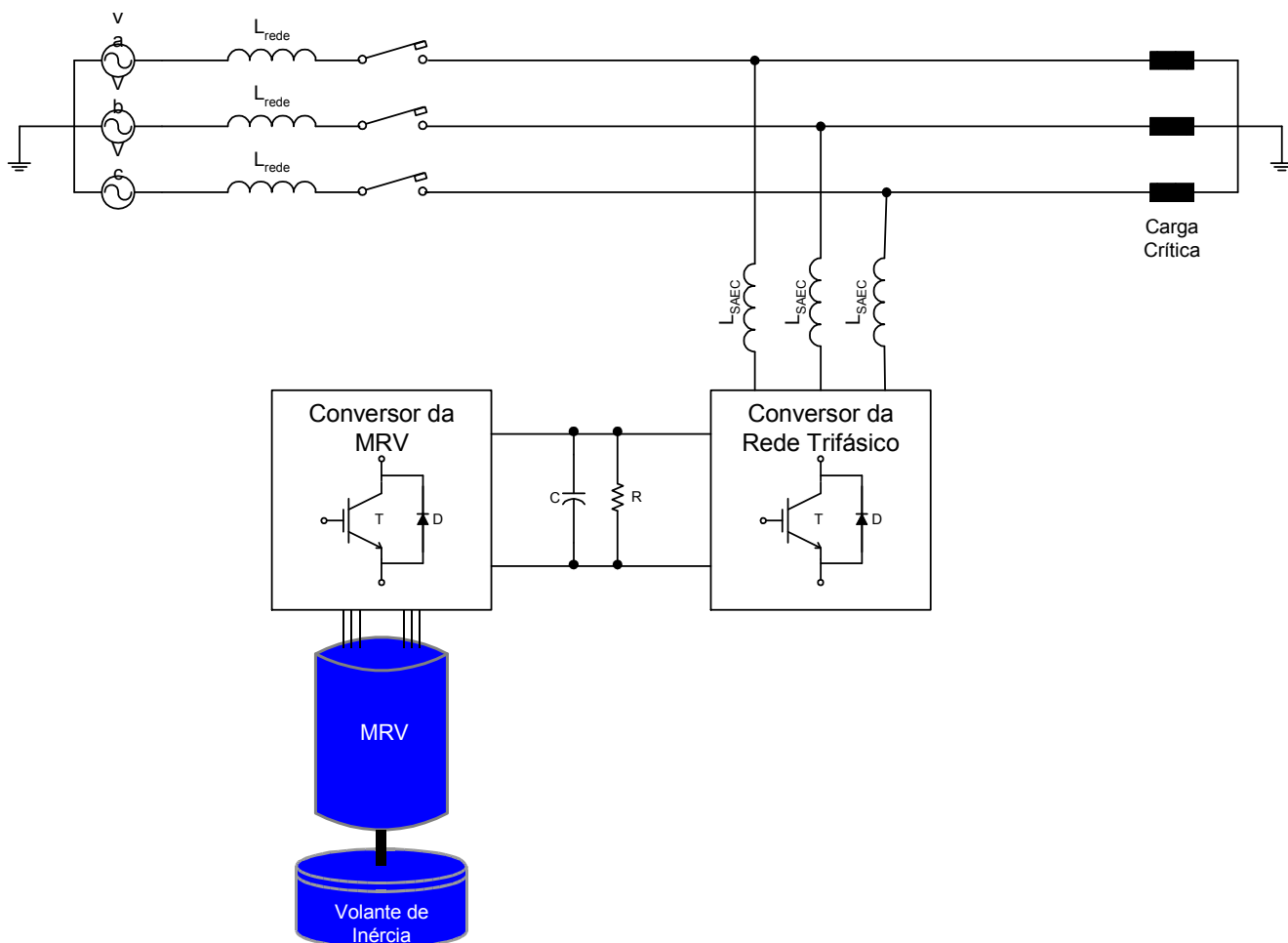


Figura 98: Configuração CA/3φ.

A Figura 99 mostra a curva da velocidade angular do conjunto rotor/volante de inércia. Pode-se perceber que a taxa de decaimento da velocidade durante a regeneração é bem mais acentuada do que a taxa de recuperação da velocidade nominal após a extinção da falta. A taxa de decaimento da velocidade está associada à potência requerida pela carga elétrica, enquanto a taxa de recuperação da velocidade está associada aos parâmetros do regulador PI, que são ajustados para que a velocidade seja recuperada lentamente, de forma a drenar pequenas parcelas de energia da rede ao longo do tempo, e não comprometer o Sistema Elétrico. O SAEC deve ser uma carga desprezível para o Sistema Elétrico, drenando pouquíssima corrente da rede. Porém, deve fornecer a potência requerida pela carga durante o tempo em que houver energia cinética armazenada na parte girante do SAEC, suficiente para alimentar a carga.

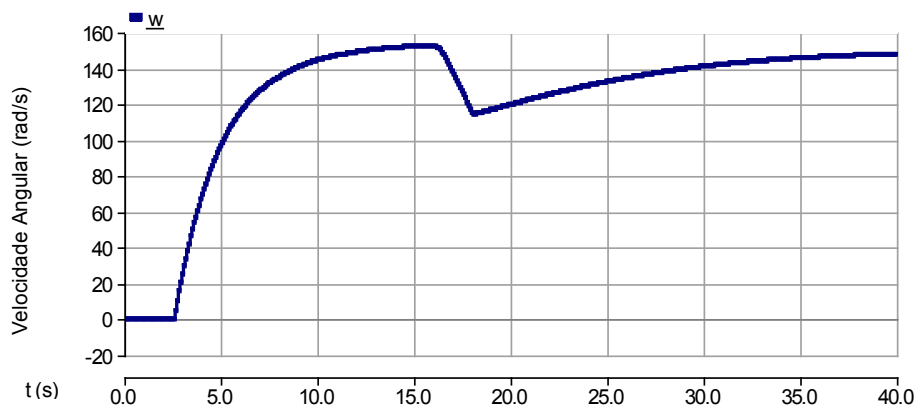


Figura 99: Velocidade Angular do Volante de Inércia (CA/3φ).

Na prática, há uma limitação para entrega de toda a energia armazenada no volante de inércia em função do máximo valor de corrente permissível para a MRV e respectivo conversor, pois conforme a Equação (14), para uma potência  $P$  da carga constante e um velocidade angular  $w$  tendendo a zero, o torque  $T$  tenderá ao infinito, e conseqüentemente a corrente na MRV e no conversor também ( $P_{\text{carga}} = \text{constante}$  e  $w \rightarrow 0 \Rightarrow T \rightarrow \infty \Rightarrow I_{\text{MRV}} \rightarrow \infty$ ).

A Figura 100 mostra o torque positivo durante todo o processo de motorização, e negativo durante o período de regeneração. Pode-se observar, ao se comparar esta Curva de Torque com as anteriores (Figura 58, Figura 74 e Figura 92), que o torque no início da operação é bem superior. Isto porque a velocidade de referência, Figura 99, foi

atingida mais rapidamente em comparação com os casos anteriores, Figura 57, Figura 73 e Figura 91, devido a parametrização dos reguladores PIs para uma rápida aceleração inicial, ao se inicializar o SAEC.

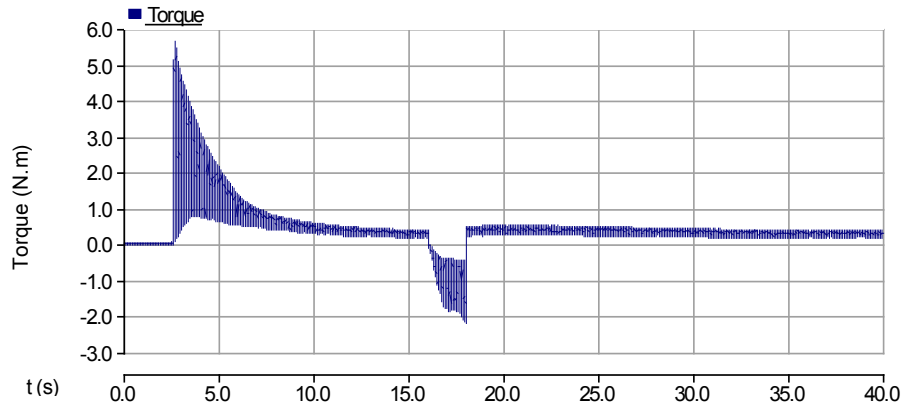


Figura 100: Curva de Torque da MRV (CA/3φ).

A Figura 101 apresenta o comportamento da curva de tensão no elo CC, que deve ser mantida constante no valor de referência para que o Conversor da MRV possa acionar a MRV de forma controlada (velocidade de rotação constante) e o Conversor da Rede possa fornecer um tensão senoidal a carga CA, operando como um Inversor Fonte de Tensão com Corrente Controlada.

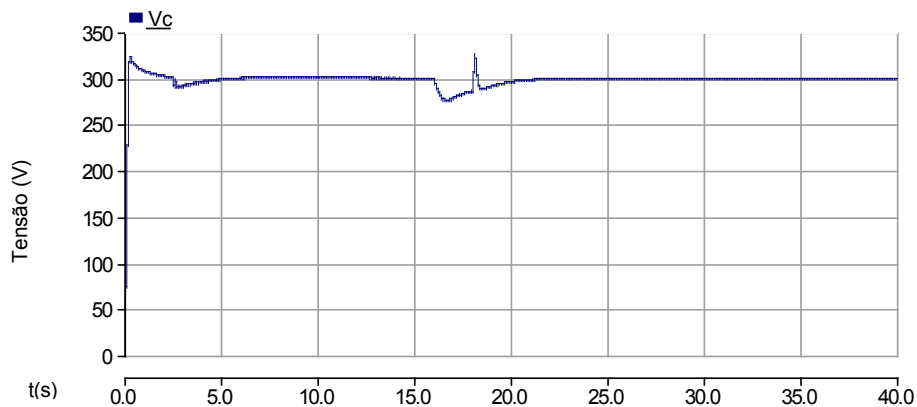


Figura 101: Curva de Tensão no elo CC (CA/3φ).

Pela Figura 102, nota-se que nos instantes em que a falta é aplicada e é extinta, ocorrem transientes que atingem a 8,67% do valor de referência. Um pequeno transiente

ocorre no instante em que a MRV começa a ser acelerada,  $t = 2,5$  s. Estes transientes podem ser minimizados ajustando-se os parâmetros dos reguladores PIs.

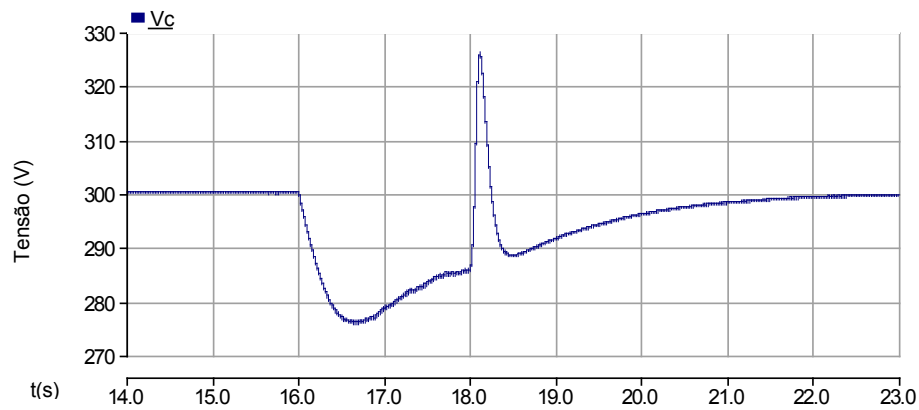


Figura 102: “Zoom” na Curva de Tensão no elo CC (CA/3φ).

Na Figura 103, observa-se a curva da potência média do SAEC. Durante o regime permanente, a potência consumida da rede CA é somente aquela necessária para suprir as perdas por chaveamento nos Conversores da Rede e da MRV (na simulação desprezadas – IGBTs ideais), as perdas por atrito nos mancais, e as perdas por atrito viscoso com o ar. Durante a regeneração, a potência fornecida pelo SAEC refere-se ao valor requerido pela carga mais o necessário para suprir as perdas já citadas. Estas perdas crescem com o aumento da velocidade angular, e com a frequência do sinal de saída senoidal CA. O *spike* na Curva de Potência média do SAEC deve-se a problemas de processamento do software de simulação, não sendo observado nos testes com o protótipo em laboratório.

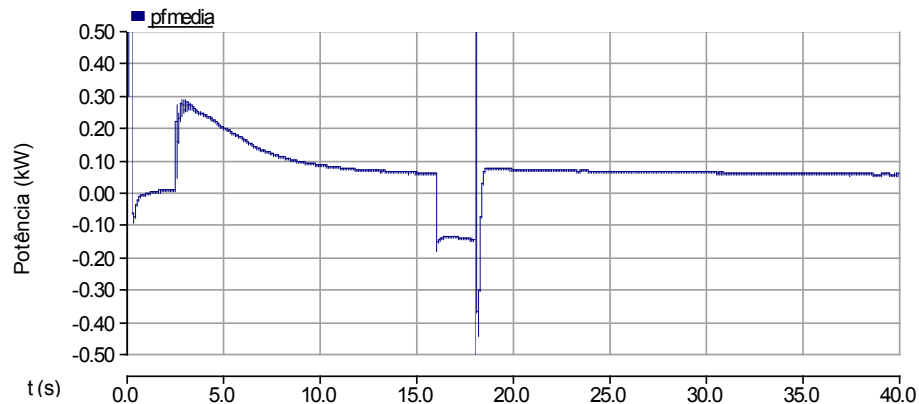


Figura 103: Curva da Potência do SAEC e da Potência na Carga (CA/3φ).

Na Figura 104, observa-se as tensões de cada fase sobre a carga resistiva do sistema elétrico. Até o instante  $t = 16$  s, a carga é alimentada pela rede elétrica. A partir deste instante, a alimentação para a carga é suprida pelo SAEC. Nota-se que, O SAEC mantém o sincronismo de fase com a alimentação principal, devido as correntes de referências serem sincronizadas com as tensões da rede CA a partir de um circuito PLL.

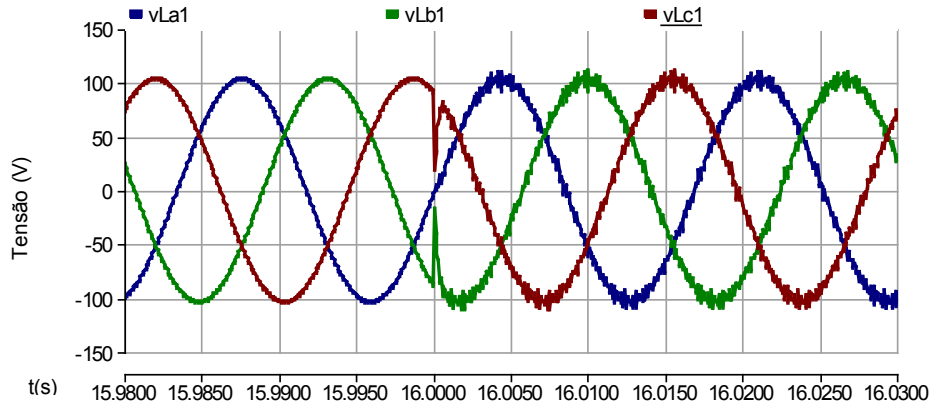


Figura 104: Tensões de Fase na Carga Trifásica (CA/3 $\phi$ ).

A Figura 105 mostra as correntes de fase na carga. A magnitude do sinal é mantida utilizando-se um valor de corrente de referência “ $I_{amp}$ ” constante calculado pelas equações (18) e (19), referência [42]. Desta forma, o SAEC pode fornecer a mesma corrente que vinha sendo fornecida antes da ocorrência da falta. A fase das correntes também é mantida devido ao sincronismo com a tensão de fase da rede CA, obtida por meio de um circuito PLL.

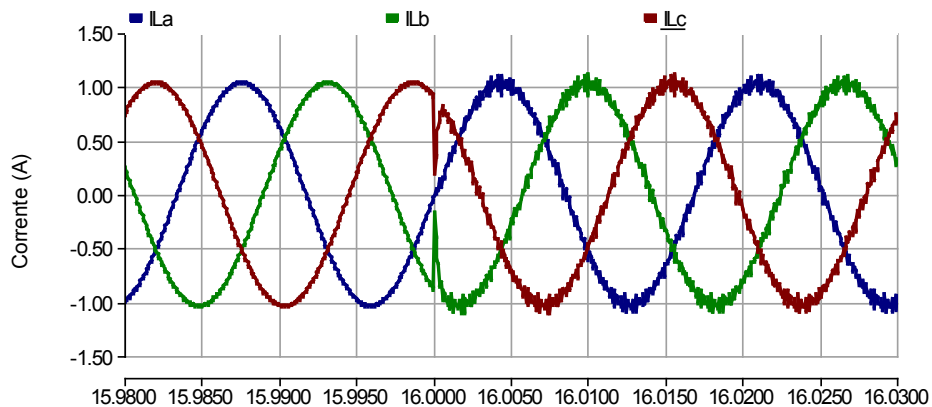


Figura 105: Correntes de Fase na Carga Trifásica (CA/3 $\phi$ ).

A Figura 106 mostra as curvas da tensão sobre a carga resistiva (vLa1) e sobre a carga resistiva-indutiva (vLa).

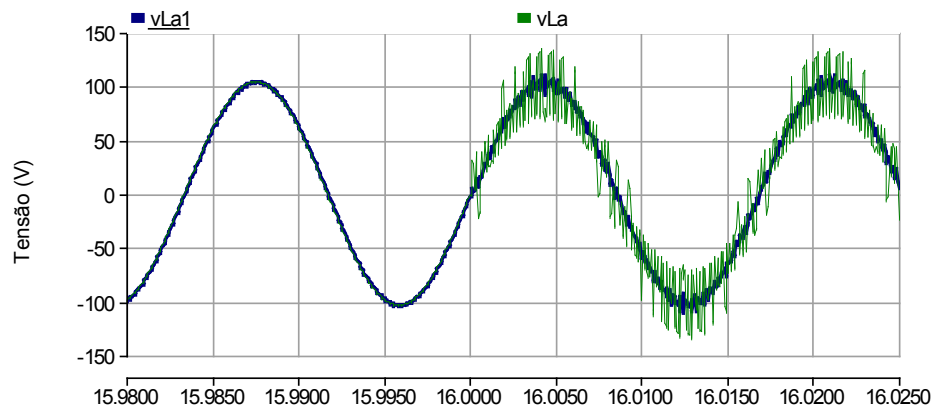


Figura 106: Tensão de Fase na Carga R e na Carga RL (CA/3 $\phi$ ).

A Figura 107 apresenta a corrente de fase no Conversor da Rede. Antes de  $t = 16$  s, a rede CA fornece alimentação ao SAEC para aceleração da parte girante e para suprir as perdas inerentes ao sistema, mantendo o conjunto rotor/volante de inércia na velocidade nominal. No instante  $t = 16$  s ocorre a falta. A partir deste momento, o SAEC começa a fornecer a energia requerida pela carga, e é possível observar um significativo aumento da corrente, por estar fornecendo energia à carga e suprimindo as perdas. Também se observa a partir deste instante, a inversão de fase das correntes, o que indica uma inversão no fluxo de potência no sistema.

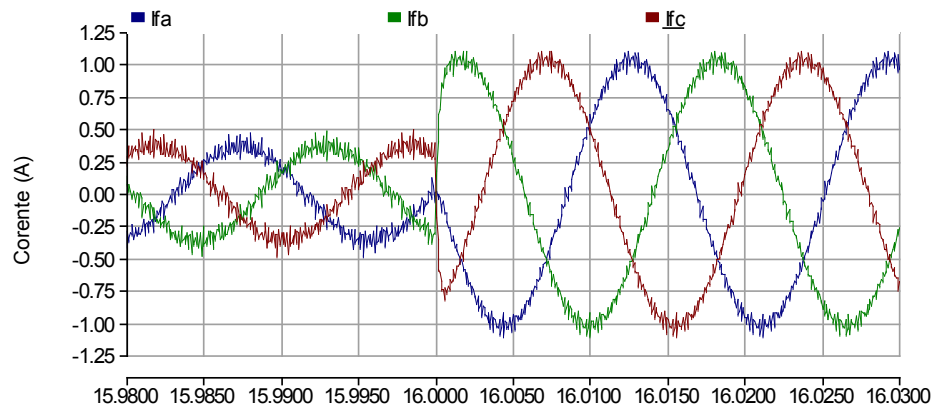


Figura 107: Correntes de Fase no SAEC (CA/3 $\phi$ ).

Na Figura 108, observa-se que a corrente da fase “a” do Conversor da Rede é sintetizada de acordo com o sinal de referência “iaref”, mostrando o correto funcionamento do controle da corrente pelo Conversor da Rede.

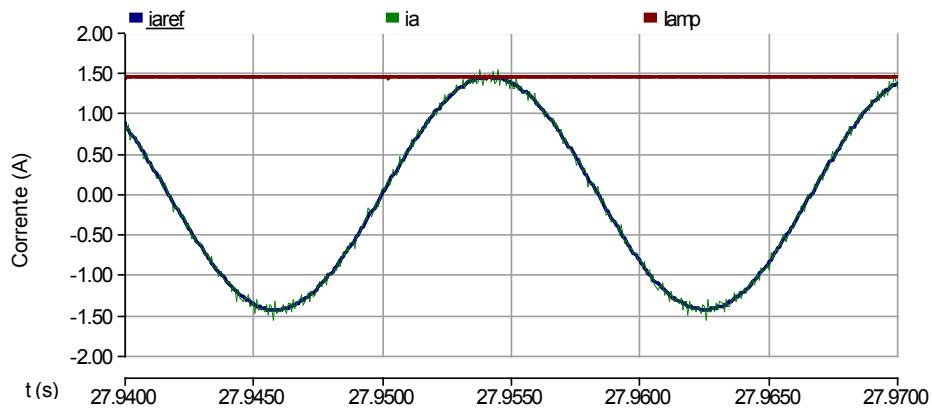


Figura 108: Corrente de Referência CA (“iaref”), Corrente da Rede CA (“ia”) e Amplitude de “iaref” (“Iamp”) ( $CA/3\phi$ ).

Na Figura 109, nota-se que a potência requerida pela carga exige uma corrente maior da MRV durante o período da regeneração (de 16 a 18s), para alimentar a carga e suprir as perdas do sistema.

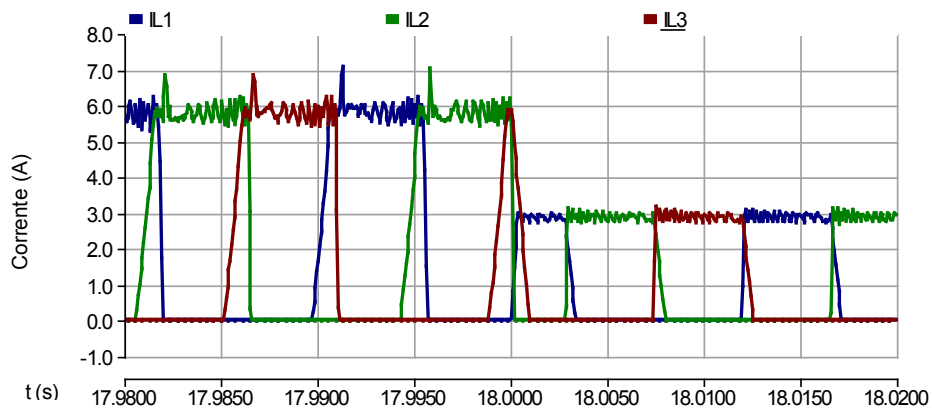


Figura 109: Correntes nas 3 fases da MRV ( $CA/3\phi$ ).



A Figura 110 apresenta a corrente de referência “Iref”, que corresponde ao sinal de saída da “Malha de Controle de Velocidade” (período sem falta) ou da “Malha de Controle de Tensão durante a Falta” (período com falta), Figura 41, definindo a forma de onda da Curva de Torque, e a magnitude da corrente da MRV.

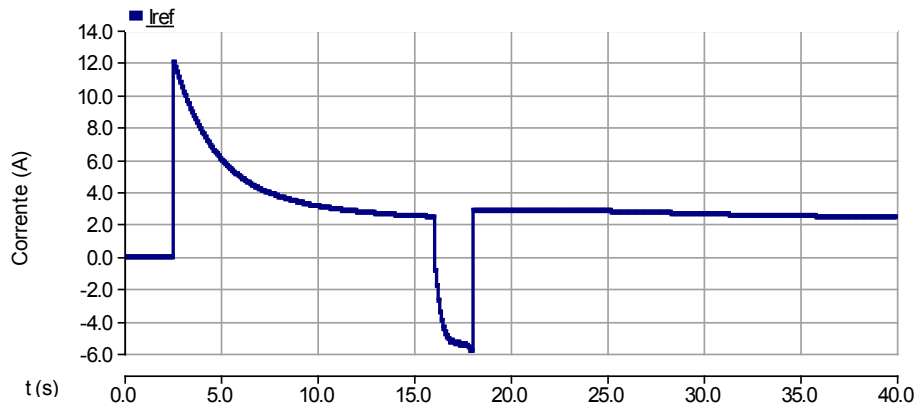


Figura 110: Corrente de Referência da MRV (CA/3 $\phi$ ).

Adicionalmente, serão apresentados os resultados provenientes das variações de carga e do Índice de Modulação em Amplitude ( $m_a$ ) nas Curvas de Tensão na Carga – Fase “a”, de Corrente na Carga – Fase “a” e de Corrente na Fase “a” do SAEC. No instante  $t= 17$ s, foi inserida uma resistência de igual valor em paralelo com a já existente na carga resistiva, dobrando-se o valor de carga do sistema.

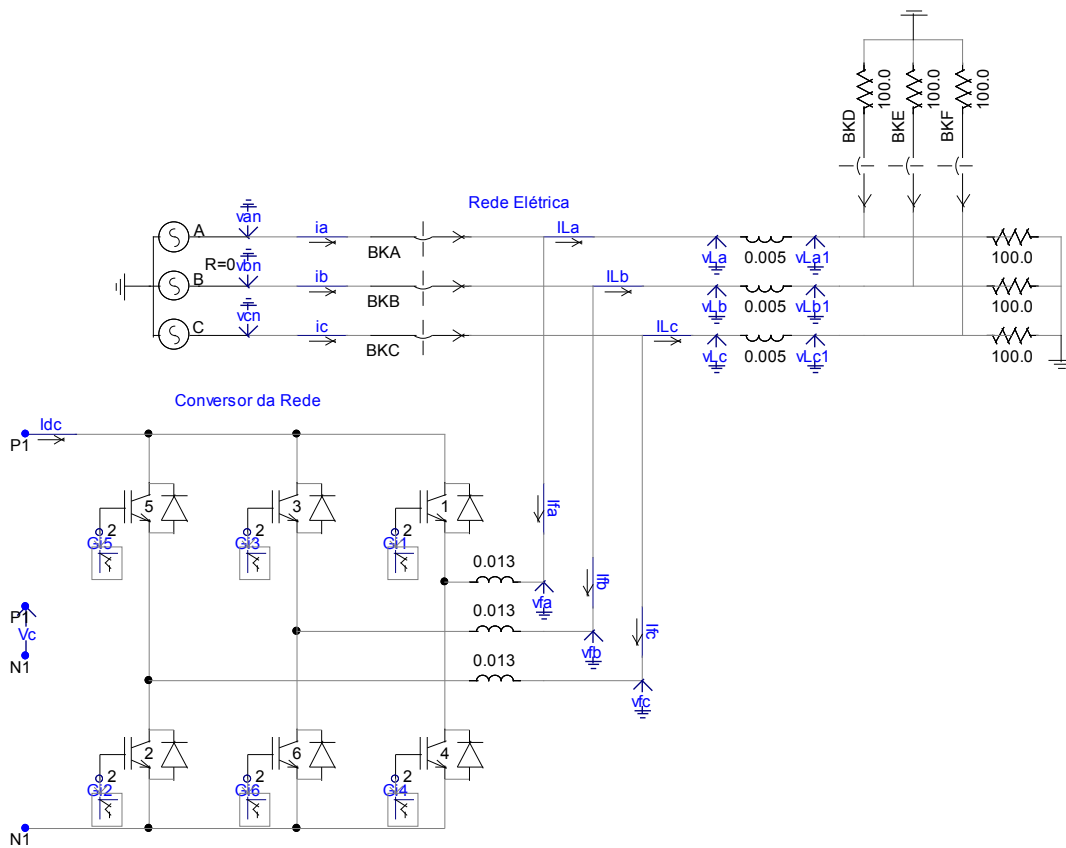


Figura 111: Configuração CA/3 $\phi$  - Variação de Carga em  $t = 17s$ .

Com o valor de “I<sub>amp</sub>” igual a 0,7256, calculado utilizando-se as Equações (15) e (16), para que a tensão na carga seja mantida no mesmo valor do momento anterior à falta, percebe-se por meio da Figura 112 a Figura 119, que o valor da tensão na carga é mantido constante mesmo com a variação da carga (valor da carga resistiva dividida por 2 em  $t = 17s$ ), e que as correntes na carga e no SAEC dobram de valor.

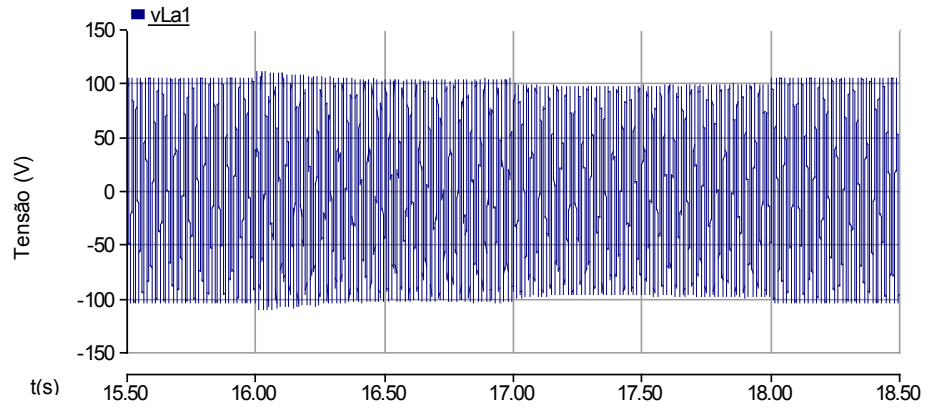


Figura 112: Tensão na Carga – Fase “a”– Período: 16 a 18s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,7256$ ).

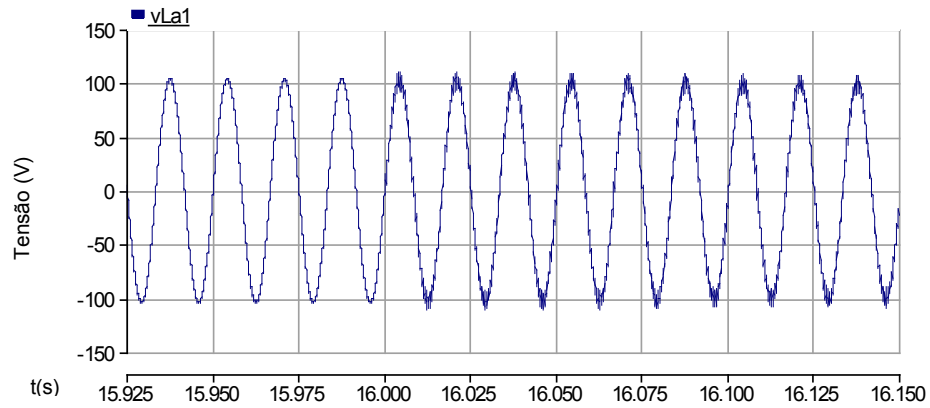


Figura 113: Tensão na Carga – Fase “a”– Instante: 16s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,7256$ ).

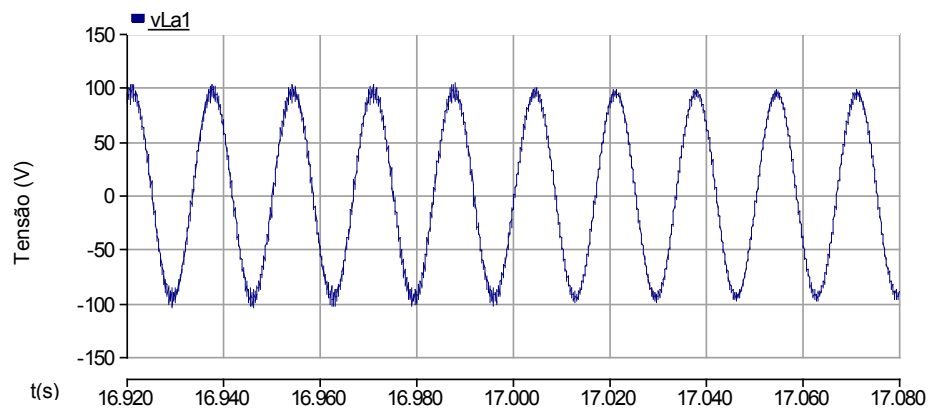


Figura 114: Tensão na Carga – Fase “a”– Instante: 17s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,7256$ ).

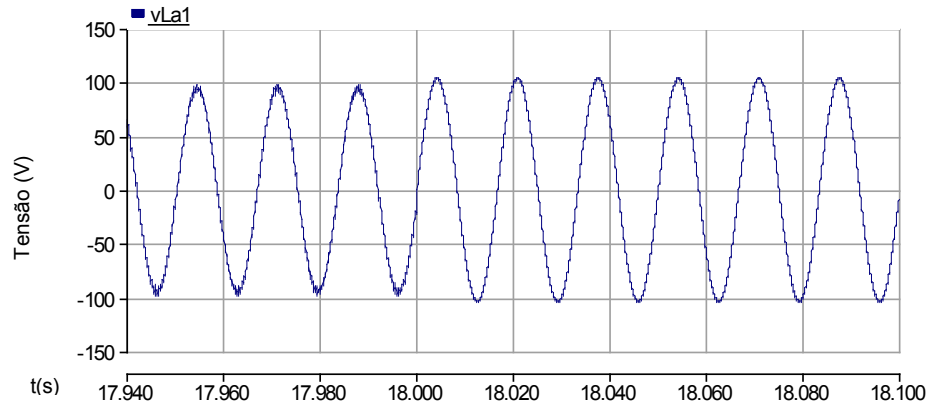


Figura 115: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,7256$ ).

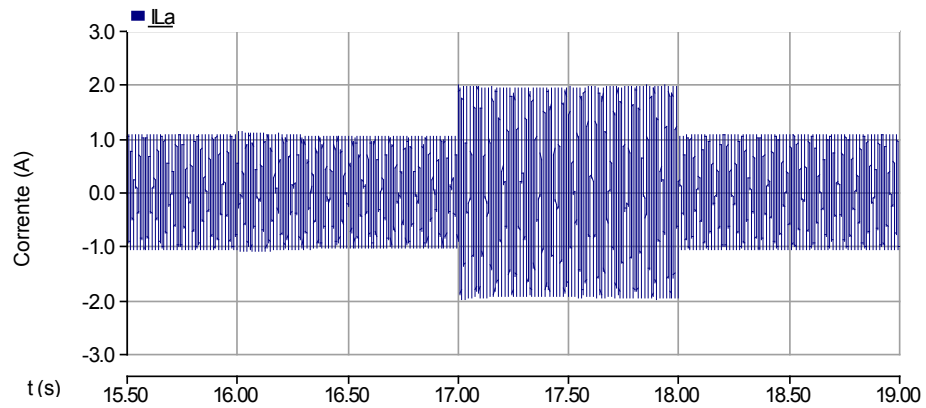


Figura 116: Corrente na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,7256$ ).

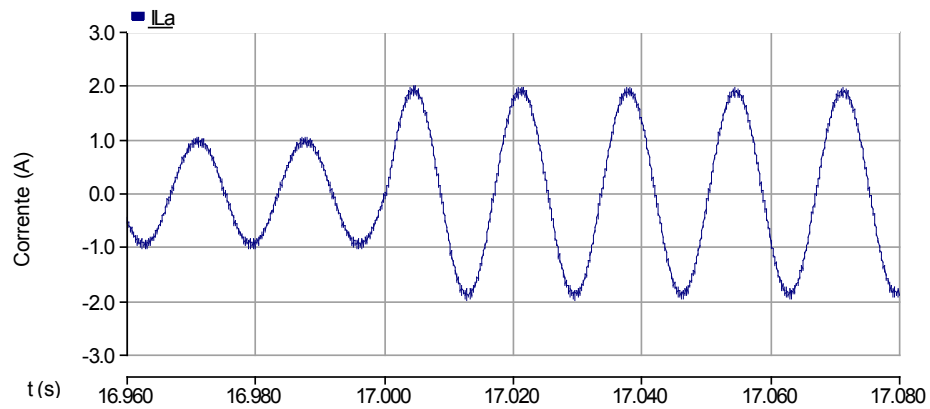


Figura 117: Corrente na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) ( $m_a=0,7256$ ).

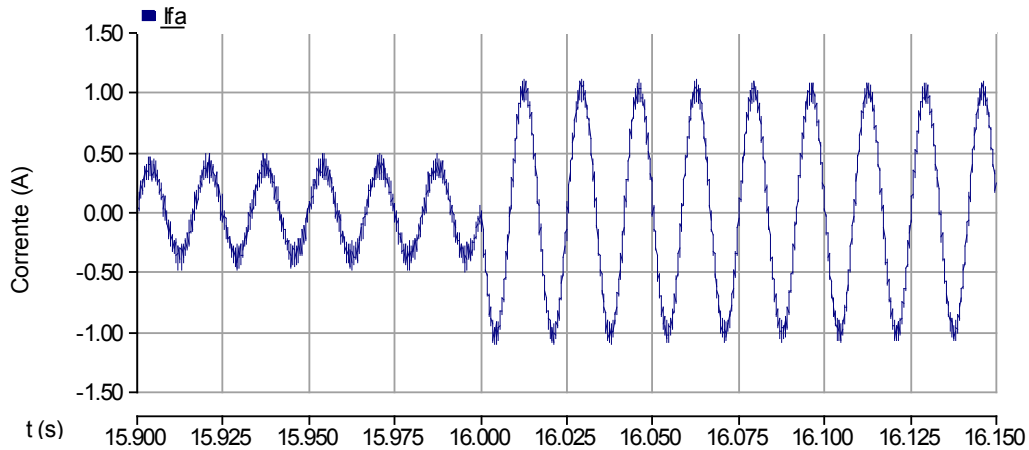


Figura 118: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 16s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,7256$ ).

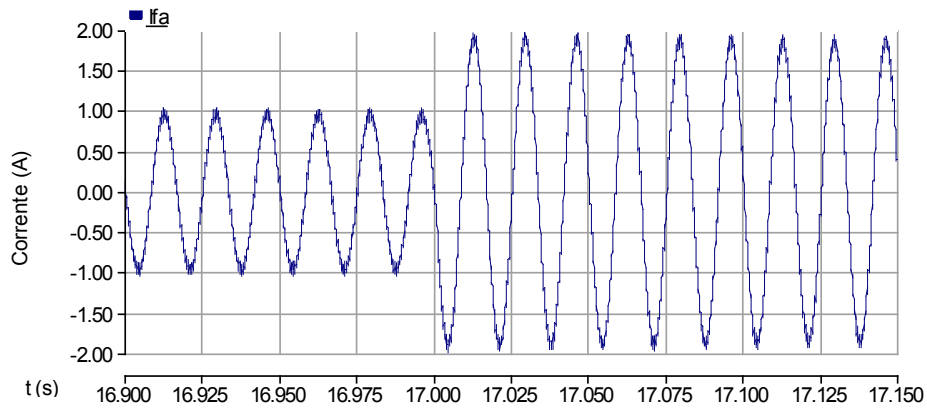


Figura 119: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,7256$ ).

Dividindo-se o valor anterior de “ $I_{amp}$ ” por 2, tem-se “ $I_{amp}$ ” igual a 0,3628, e percebe-se pela Figura 120 a Figura 127 , que o valor de tensão na carga foi reduzido à metade do valor em relação ao caso em que “ $I_{amp}$  era igual a 0,7256, da mesma forma que a corrente de saída do SAEC, que também foi reduzida pela metade. Quando uma resistência trifásica de valor igual a já existente é conectada em paralelo com a carga resistiva, em  $t = 17s$ , também se pode perceber o aumento das correntes na carga e no SAEC.

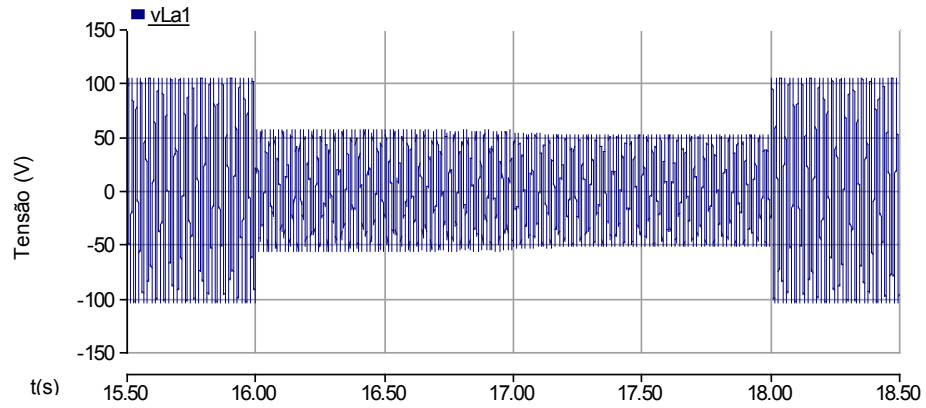


Figura 120: Tensão na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ).

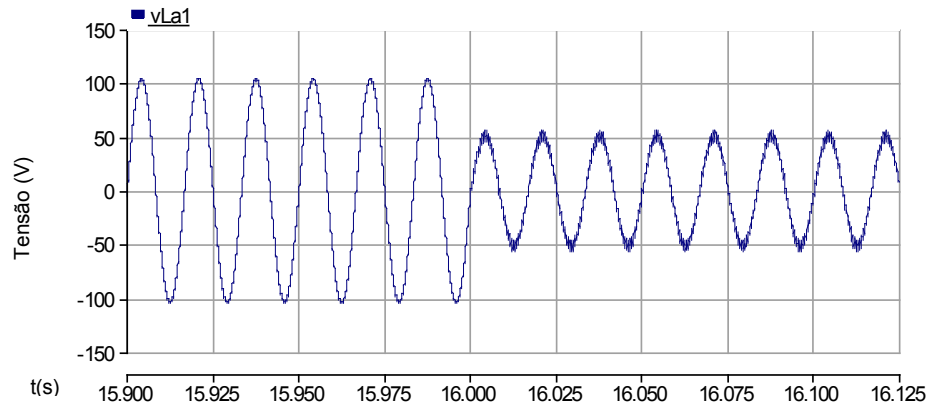


Figura 121: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 16s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ).

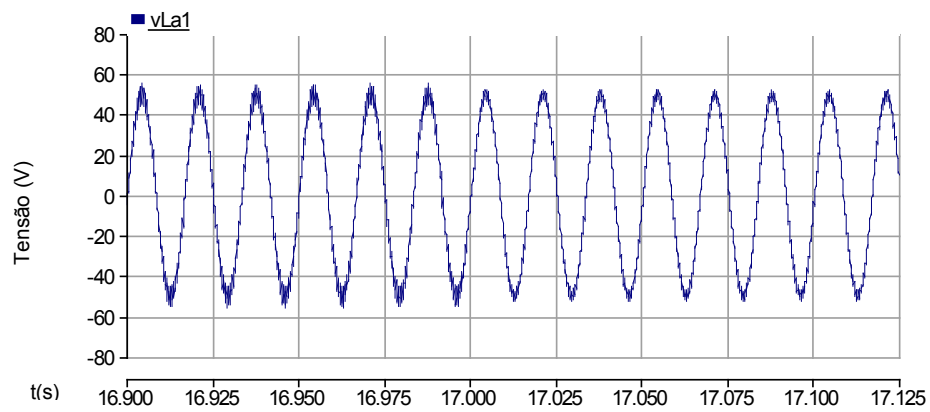


Figura 122: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3φ) ( $m_a=0,3628$ ).

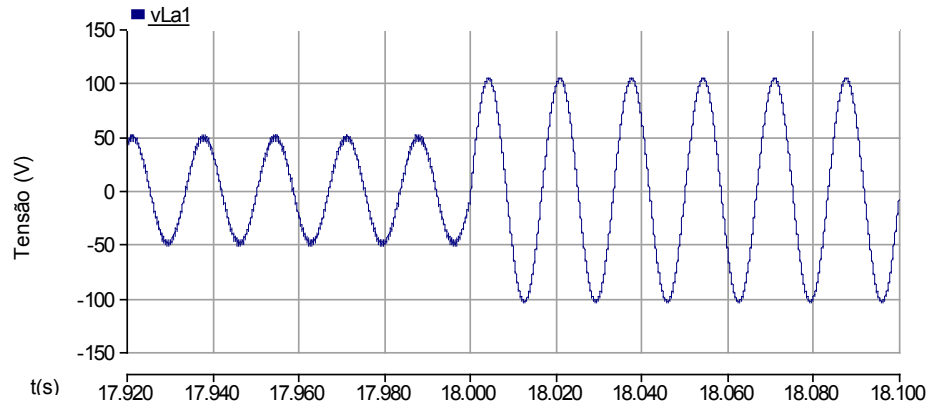


Figura 123: Tensão na Carga – Fase “a” – Instante: 18s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,3628$ ).

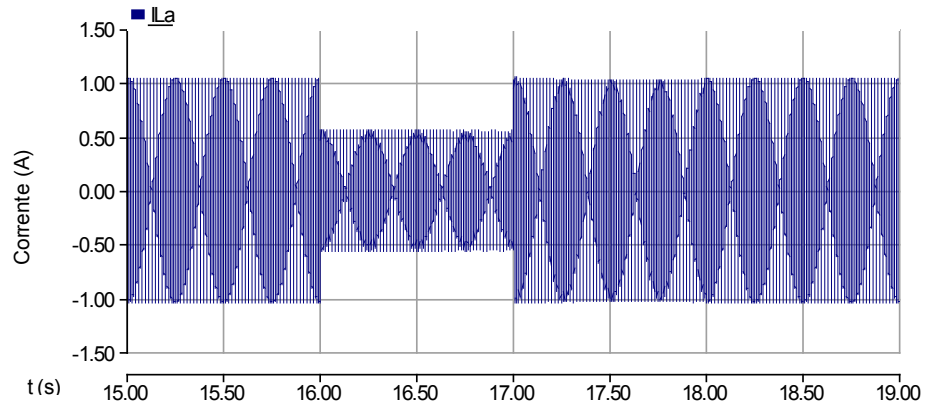


Figura 124: Corrente na Carga – Fase “a” – Período: 16 a 18s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,3628$ ).

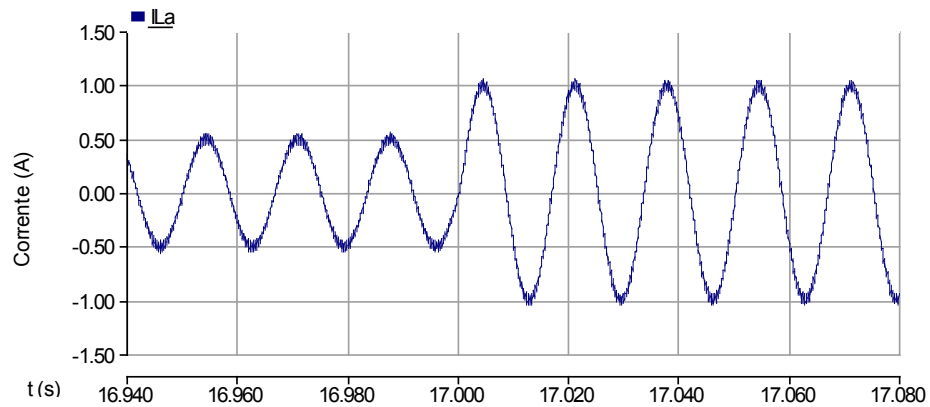


Figura 125: Corrente na Carga – Fase “a” – Instante: 17s (CA/3 $\phi$ ) ( $m_a=0,3628$ ).

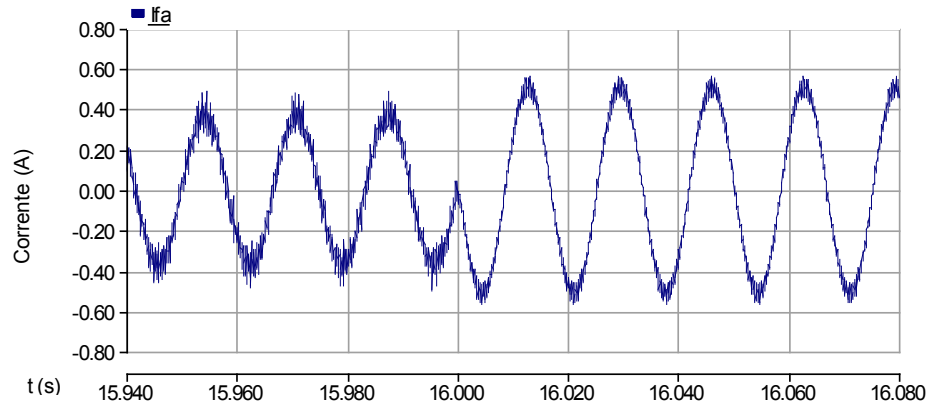


Figura 126: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 16s ( $CA/3\phi$ ) ( $m_a=0,3628$ ).

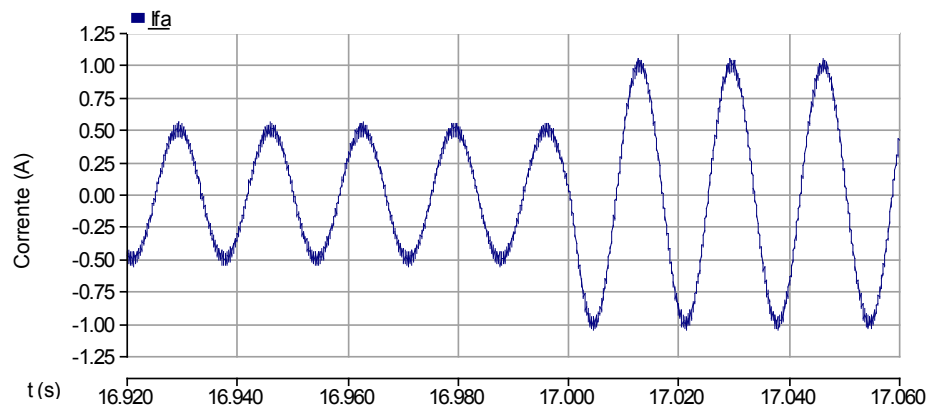


Figura 127: Corrente no SAEC – Fase “a” – Instante: 17s ( $CA/3\phi$ ) ( $m_a=0,3628$ ).



## Capítulo 7: Resultados Experimentais

Na referência [3] serão descritos em detalhes o protótipo, as experiências realizadas e os resultados obtidos. Entretanto, são apresentados, nesta dissertação, alguns resultados experimentais para que o leitor possa comprovar e comparar com o que foi obtido nas simulações.

Os resultados dos testes realizados com o protótipo do SAEC de 1,5 kW/350 Ws foram obtidos de duas maneiras: pelo osciloscópio e por uma placa de aquisição de dados, sendo os dados tratados e os gráficos traçados por meio do *software* MATLAB. A carga elétrica utilizada nos testes foi uma lâmpada incandescente de 60 W/127 V. O volante de inércia foi acelerado até 300 rad/s, entre  $t = 0$  s e  $t = 8$  s. De  $t = 8$  s a  $t = 15$  s, a rede elétrica forneceu alimentação à carga, e ao SAEC, a fim de suprir as perdas do sistema, e manter a rotação constante. Entre  $t = 15$  s e  $t = 20$  s, foi aplicada uma falta ao sistema, diminuindo-se rapidamente a tensão de saída do variac, cujo primário estava conectado à rede elétrica. Durante este período, o SAEC forneceu a alimentação para a lâmpada, com os mesmos valores de tensão e frequência anteriores à falta. Após  $t = 20$  s, não é mais possível a frenagem da MRV e conseqüente regeneração, pois a velocidade é muito pequena para que seja possível fornecer a potência constante requerida pela carga dentro das limitações de corrente da MRV e do conversor. Desta forma, o volante de inércia/rotor da MRV girou livremente sem a presença de nenhum torque contrário ao movimento. Esta seqüência de eventos e seus respectivos instantes de tempo, podem ser verificados na Figura 128.

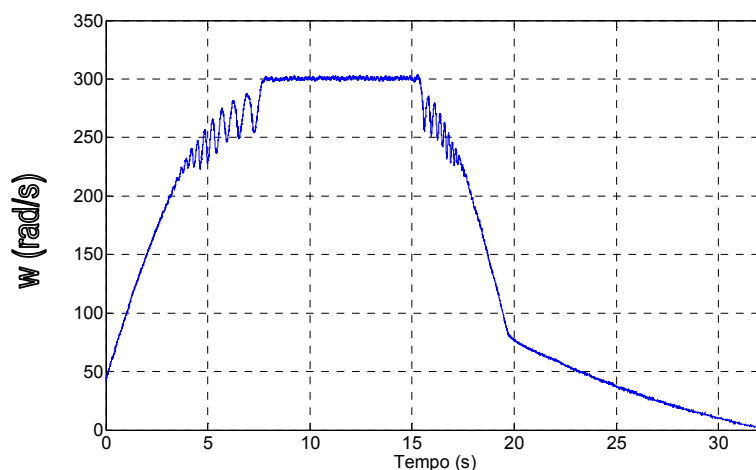


Figura 128: Curva da velocidade angular (Protótipo).

A rede elétrica fornece ao SAEC um determinado nível de potência para manter a massa girante em rotação. Este valor representa as perdas no sistema e cresce com o aumento da velocidade angular. Esta potência é ainda maior quando o conjunto volante de inércia/rotor da MRV está sendo acelerado. Durante o período em que a falta é aplicada, o SAEC supre a carga com potência elétrica constante, enquanto a tensão no elo CC é mantida constante.

Na Figura 129, pode-se observar o momento em que ocorre a falta ( $t = 15$  s), e o SAEC inicia o fornecimento de energia com os mesmos valores de tensão e frequência que vinham sendo supridos pela rede elétrica. A alimentação da rede foi ajustada em 90 Vrms/60Hz por meio de um variac. O valor da tensão alternada fornecida à carga pelo SAEC pode ser ajustado no programa computacional, por meio do ajuste do índice de modulação de amplitude (ma). Em função da ligação em derivação do SAEC com o sistema elétrico, este índice ajusta a amplitude da corrente a ser fornecida para a carga.

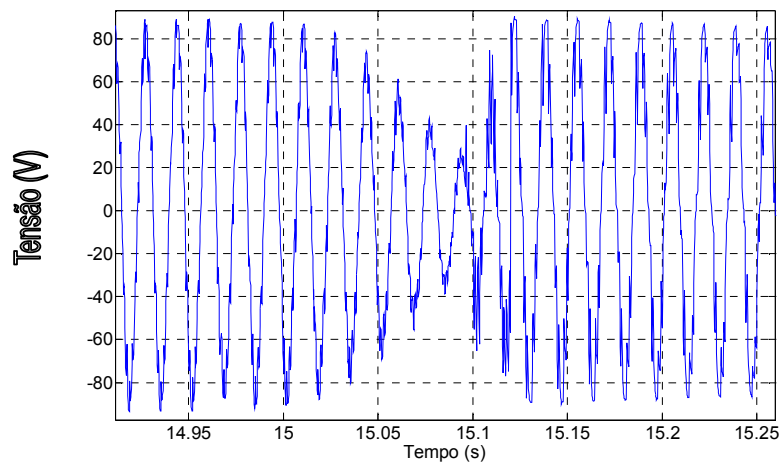


Figura 129: Tensão na carga – Momento da Falta (15 s).

A diferença entre as Figuras 77 e 104 e a Figura 129 com relação ao comportamento da tensão na carga no instante de aplicação da falta, deve-se ao fato de que, na simulação, a fonte de alimentação foi desligada da carga por meio de um disjuntor, enquanto que, no teste de bancada, a tensão da fonte de alimentação principal foi reduzida rapidamente até zero por meio de um variac. Foi utilizado um contator para

isolar a rede elétrica do SAEC durante o período em que este funcionava como fonte ininterrupta de energia elétrica, com a finalidade de se evitar um curto-circuito.

A corrente de uma fase da MRV, simulada no PSCAD/EMTC, é apresentada juntamente com a corrente medida no osciloscópio, Figura 130, mostrando o controle da corrente, que corresponde ao chaveamento entre os estados 1 e 2, quando no modo motorização (Figura 36 e Figura 37), e ao chaveamento entre os estados 1 e 3 (Figura 36 e Figura 38), quando no modo regeneração.

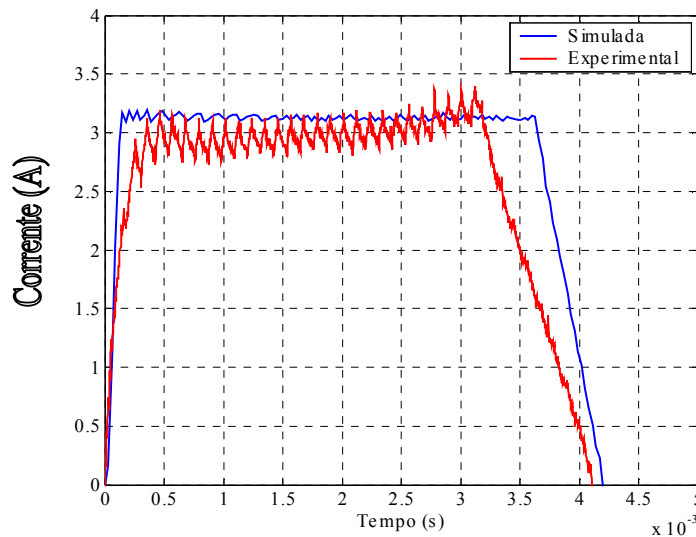


Figura 130: Correntes de Fase da MRV Simulada e Medida.

A diferença entre as Curvas de Corrente da MRV Simulada e Experimental resulta do fato de que na simulação foi empregada a técnica de chaveamento por PWM com controle de corrente por Banda de Histerese, enquanto no protótipo foi implementado PWM com controle de corrente por PI digital convencional para o acionamento da MRV.

## Capítulo 8: Conclusões e Trabalhos Futuros

### 8.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou um Sistema Armazenador de Energia Cinética – SAEC, que consiste de um volante de inércia acoplado mecanicamente a um motor/gerador elétrico, que tem como função converter a energia elétrica em mecânica, quando a demanda do sistema elétrico é relativamente pequena (acelerando o eixo), e transformar a energia cinética armazenada no volante em elétrica, quando solicitado. Neste acionamento elétrico, foi empregada uma MRV para transformação da energia elétrica em mecânica, e vice-versa. A energia cinética armazenada num volante é proporcional ao momento de inércia ( $J$ ) e ao quadrado da velocidade angular ( $\omega$ ).

O protótipo do SAEC em desenvolvimento no LASUP/UFRJ, a modelagem da MRV, a estratégia de controle adotada, e o modelo de SAEC empregado nas simulações foram descritos em detalhes.

Nas simulações, foram levadas em consideração as não-linearidades da MRV, utilizando-se tabelas de dados para as relações  $\lambda(\theta_r, i)$  e  $T_e(\theta_r, i)$ , obtidas por meio de método computacional de elementos finitos, realizado no *software* ANSYS.

A última geração de SAECs, por meio do emprego de novos materiais, novas técnicas de controle, e dispositivos eletrônicos mais modernos, demonstra que seu potencial para aplicação é enorme, podendo superar num futuro próximo a capacidade de energia e potência das baterias.

Os SAECs apresentam vantagens que estimulam as pesquisas sobre o tema e impulsionam seu emprego, devendo ser evidenciadas:

- o elevado ciclo de vida, aproximadamente 20 anos (baterias - 5 anos). Com isto, os custos iniciais podem ser diluídos ao longo dos anos;
- a frequência do ciclo de carga/descarga independente da necessidade de manutenção e do tempo de vida útil;
- a menor agressão ao meio ambiente, quando comparado com outras fontes de armazenamento de energia elétrica, em função dos materiais utilizados; e
- o baixo tempo de carga, em comparação com outros dispositivos de armazenamento de energia elétrica (dispositivos químicos).

Devido ao seu grande potencial de armazenamento de energia e as vantagens anteriormente citadas, os SAECs serão empregados no Sistema de Catapultagem Eletromagnético, que lançará as aeronaves da próxima geração de porta-aviões americanos. Em virtude da implantação do conceito *All-Electric Ship* pelas marinhas americana e inglesa, onde sistemas auxiliares a vapor, hidráulicos, pneumáticos são substituídos por sistemas elétricos, e combinados à planta de propulsão, também elétrica, os SAECs podem se confirmar como uma opção técnica-economicamente viável para a alimentação das armas eletromagnéticas, de microondas e a laser, que integrarão os futuros Sistemas de Armas a bordo dos navios de guerra, e que terão como fonte de alimentação principal a energia elétrica em forma de pulsos de alta energia.

Os resultados das simulações comprovaram que o SAEC é capaz de alimentar uma carga em CC e CA na ausência da alimentação principal, a partir da conversão da energia mecânica armazenada em energia elétrica. Tais resultados foram validados pelos resultados apresentados no Capítulo 7, confirmando o funcionamento do SAEC e mostrando, desta forma, a MRV como uma opção viável para operar o SAEC.

## 8.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- A) a implementação do período de livre rotação na simulação do SAEC, que se inicia a partir do instante em que a energia cinética armazenada no conjunto volante de inércia/rotor da MRV não é suficiente para fornecer potência constante para a carga dentro das limitações do máximo valor de corrente da MRV e seu conversor ( $P_{\text{carga}} = \text{constante}$  e  $w \rightarrow 0 \Rightarrow T \rightarrow \infty \Rightarrow I_{\text{MRV}} \rightarrow \infty$ );
- B) testes experimentais com o protótipo em desenvolvimento que serão apresentados em mais detalhes por [3];
- C) pesquisar novas possibilidades de estratégias de controle e a utilização de técnicas para estimativa dos parâmetros dos reguladores PI.
- D) a simulação de um SAEC alimentando uma carga alimentada por pulsos de energia, tal qual um Sistema EMALS, conectado a um Sistema de Geração e Distribuição de um navio de guerra; e

**E)** o emprego no protótipo de um mancal magnético do tipo “Evershed”[11], formado pela combinação de um MIP, desenvolvido para trabalhar como mancal auxiliar, e de um MMS, tornando possível testes em velocidades bem superiores.

## Referências Bibliográficas

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Gerald\\_R.\\_Ford\\_class\\_aircraft\\_carrier](http://en.wikipedia.org/wiki/Gerald_R._Ford_class_aircraft_carrier).
- [2] 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.
- [3] EL-MANN, M., *Sistema Armazenador de Energia Cinética – SAEC – Implementação Experimental*. Dissertação de M.Sc. a ser defendida em futuro breve, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [4] MIRANDA, U. de A., AREDES, M., ROLIM, L. G. B., “A DQ Synchronous Reference Frame Current Control for Single-Phase Converters”. In: *36th The IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Recife, PE, Brasil, 2005.
- [5] SOTELO, G. G., *Comparação de Estruturas de Máquinas de Relutância Variável Para Uso Em Armazenador Cinético de Energia*. Tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [6] 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.
- [7] LAWRENSON, P. J., STEPHENSON, J. M., BLENKINSOP, P. T., CORDA, J., FULTON, N. N., “Variable-speed switched reluctance motors”, *IEE Proceedings*, v. 1277, pp. 253-265, July 1980.
- [8] MILLER, T. J. E., *Switched Reluctance Motors and their Control*. Oxford: Magna Physics Publishing and Oxford Science Publications, 1993.
- [9] 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.
- [10] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JUNIOR., C., KUSKO A., *Máquinas Elétricas*. McGraw-Hill, Brasil, 1975.
- [11] CANSIZ, A., CAMPBELL, A. M., COOMBS, T. A., “An Evershed type superconducting flywheel bearing”, *Physica C: Superconductivity*, v. 390, issue 4, pp. 305-310, 2003.
- [12] ASPDEN, H., “Earnshaw’s Teorem”, *American Journal of Physics*, v. 55, n. 3, pp. 199-200, March 1987.

- [13] SOTELO, G. G., *Modelagem De Supercondutores Aplicada Ao Projeto De Mancais Magnéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [14] 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.
- [15] SOTELO, G. G., FERREIRA, A. C., ANDRADE JÚNIOR, R. de . “Halbach array superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 15, n. 2, pp. 2253-2256, 2005.
- [16] ANDRADE JÚNIOR, Rubens 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.
- [17] <http://technology.grc.nasa.gov/>.
- [18] HINGORANI, N.G., “Introducing Custom Power”, *IEEE Spectrum*, pp. 41-48, June 1995.
- [19] ARNOLD, R., “Solutions to Power Quality Problem”, *IEE Power Engineering Journal*, pp. 55-73, April 2001.
- [20] ALVES, RENATA NUNES, *Propulsão Elétrica em Navio*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [21] WHITMAN, E. C., “The IPS Advantage Electric Drive: A Propulsion System for Tomorrow’s Submarine Fleet?”, *Seapower Magazine*, July 2001.
- [22] PEREIRA, N. N., BRINATI, H. L., “Estudo do Impacto da Propulsão Diesel-Elétrica na Emissão de Gases Poluentes”, *21º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore* , SOBENA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [23] SWETT, D.W., BLANCHE, J.G., IV, “Flywheel charging module for energy storage used in electromagnetic aircraft launch system”, *12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, pp. 551 – 554, 25-28 May 2005.
- [24] 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.



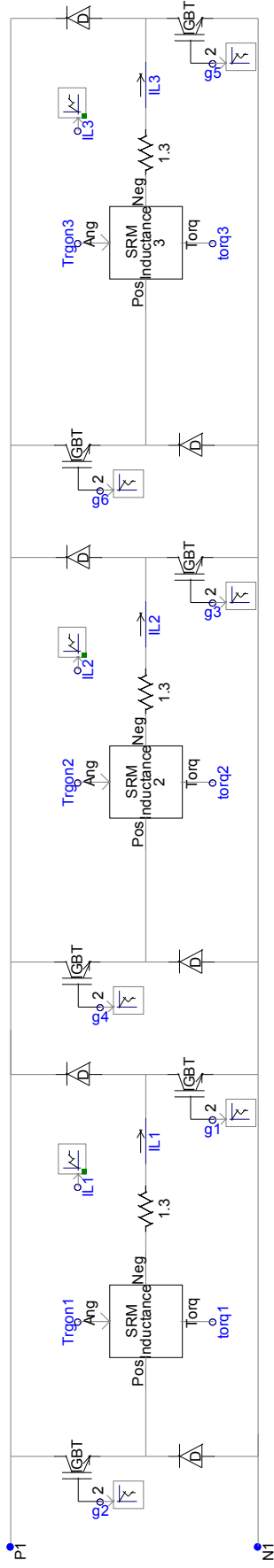
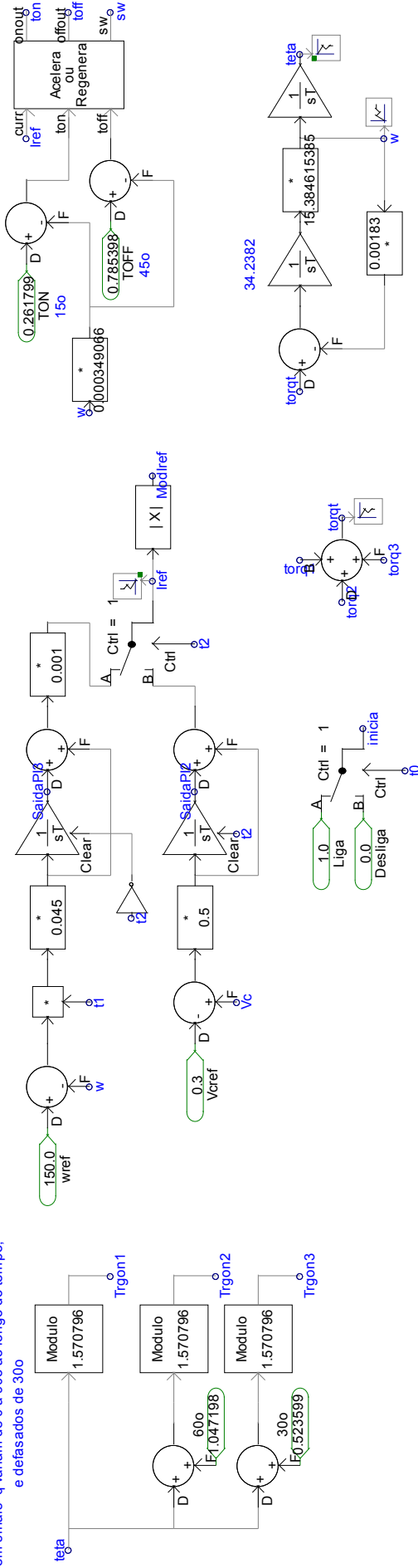
- [25] ADAMS, E., "Electromagnetic railgun", *Popular Science*, September 2005.
- [26] The Defence Science and Technology Ministry – UK.  
[http://www.dstl.gov.uk/pr/science\\_spot/off\\_the\\_rails.htm](http://www.dstl.gov.uk/pr/science_spot/off_the_rails.htm).
- [27] Office of Naval Research: Future Naval Capabilities – USA.  
[http://www.onr.navy.mil/fncs/aces/focus\\_elecweapons\\_rail.asp](http://www.onr.navy.mil/fncs/aces/focus_elecweapons_rail.asp).
- [28] PowerLabs Rail Gun Research: <http://www.powerlabs.org/railgun2.htm>.
- [29] Abrams, M., "The Dawn of the E-Bomb",  
<http://www.spectrum.ieee.org/archive/1543/1>.
- [30] High-power microwave (HPM) / E-Bomb.  
<http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/hpm.htm>
- [31] High Energy Laser Weapon Systems Applications. In: Report of Department of Defense of USA, June 2001.
- [32] DUNN, R. J., *Operational Applications of Laser Weapons*. In: Report of Analysis Center of Northrop Grumman, USA, September 2005.
- [33] CUPELLO FILHO, J., "Laser Tático de Alta Energia – LTAE", *Revista Âncoras e Fuzis do Corpo de Fuzileiros Navais*, ano VI, n.º. 29, pp. 11, Maio 2005.  
<http://www.mar.mil.br/cgcfm/downloads/ancorasefuzis/29ancfuz.pdf>.
- [34] <http://www.ntu.edu.sg/home5/PG01898441/flywheel.htm>.
- [35] HEBNER, R., BENO, J., WALLS, A., "Flywheel batteries come around again", *IEEE Spectrum*, v. 39, issue 4, pp. 46 – 51, April 2002.
- [36] ANDRADE JR., R., FERREIRA, A. C., SOTELO, G. G., SILVA NETO, J. L. da, ROLIM, L. G. B., SUEMITSU, W. I., STEPHAN, R. M., NICOLSKY, R., "Voltage Sags Compensation Using A Superconducting Flywheel Energy Storage System". In: *ASC'2004 – Applied Superconductivity Conference*, Jacksonville, FL, USA, 2004.
- [37] 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.
- [38] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits". *Proceedings of the IPEC'83 – Int. Power Electronics Conference*, pp. 1375-1386, Tokyo, Japan, 1983.

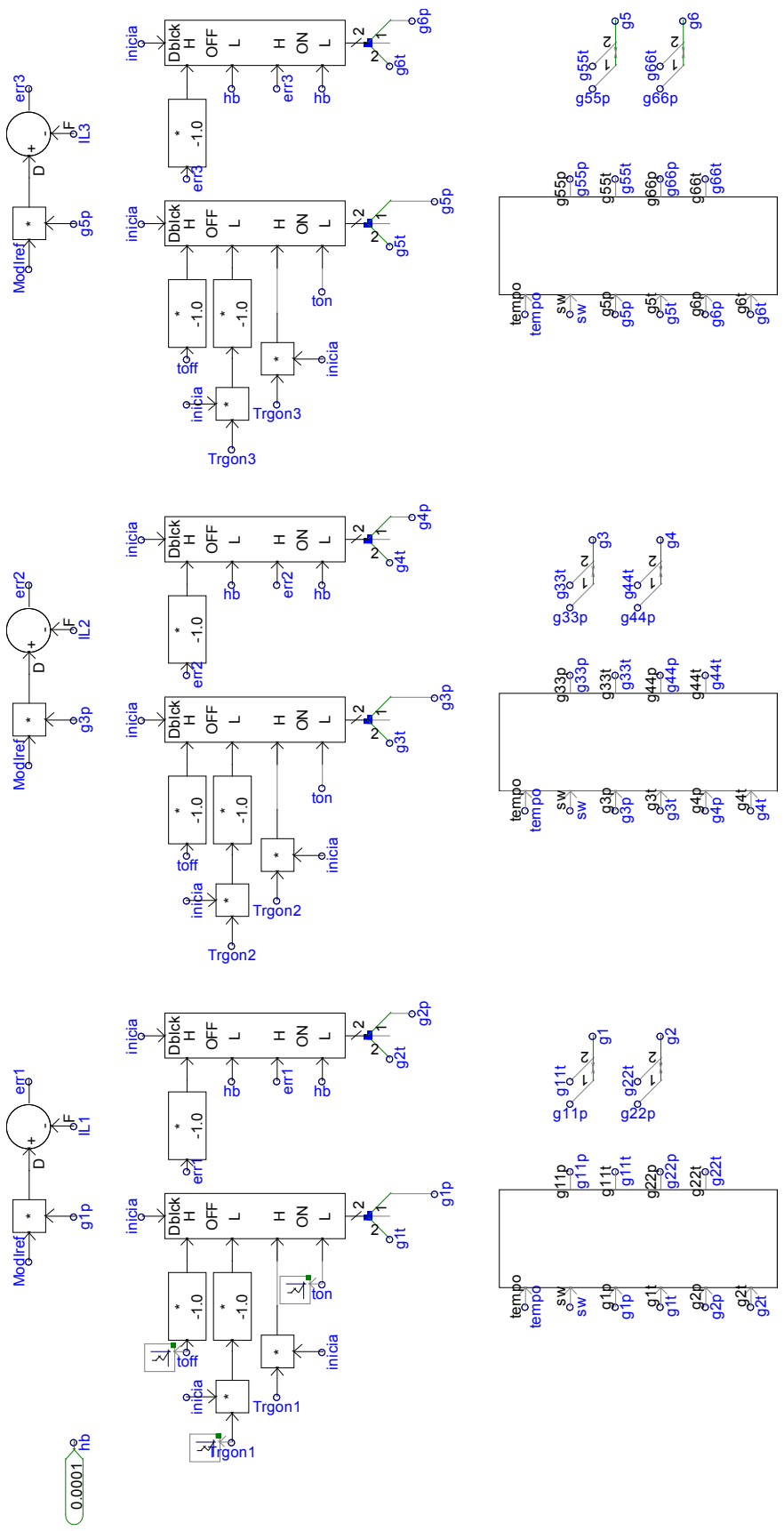
- [39] SILVA NETO, J. L. da, ANDRADE, R. de JR., ROLIM, L. G. B., FERREIRA, A. C., SUEMITSU, W. I., SOTELO, G. G., “Experimental Validation of a Dynamic Model of a SRM Used in Superconducting Bearing Flywheel Energy Storage System”. In: *Proceedings of ISIE 2006 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, v. 3, pp. 2492-2497, Montreal, Canada, 2006.
- [40] ROLIM, L. G. B., FERREIRA, A. C., SOTELO, G. G., ANDRADE JR., R. de, “Flywheel Generator with Switched Reluctance Machine”. In: *ICEM 2002 Conference Proceedings*, Bruges, Belgium, 2002.
- [41] FERREIRA, A. C., SILVA NETO, J. L. da, ROLIM, L. G. B., ANDRADE JR., R. de, “Dynamic Model of a SRM based Flywheel Energy Storage System”, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, v. 3, pp. 1718-1723, 2004.
- [42] MOHAN, N., UNDELAND, TORE. M., ROBINS, WILLIAM. P., *Power Electronics - Converters, Applications and Design*, 3 ed. New York, Wiley, 2003.

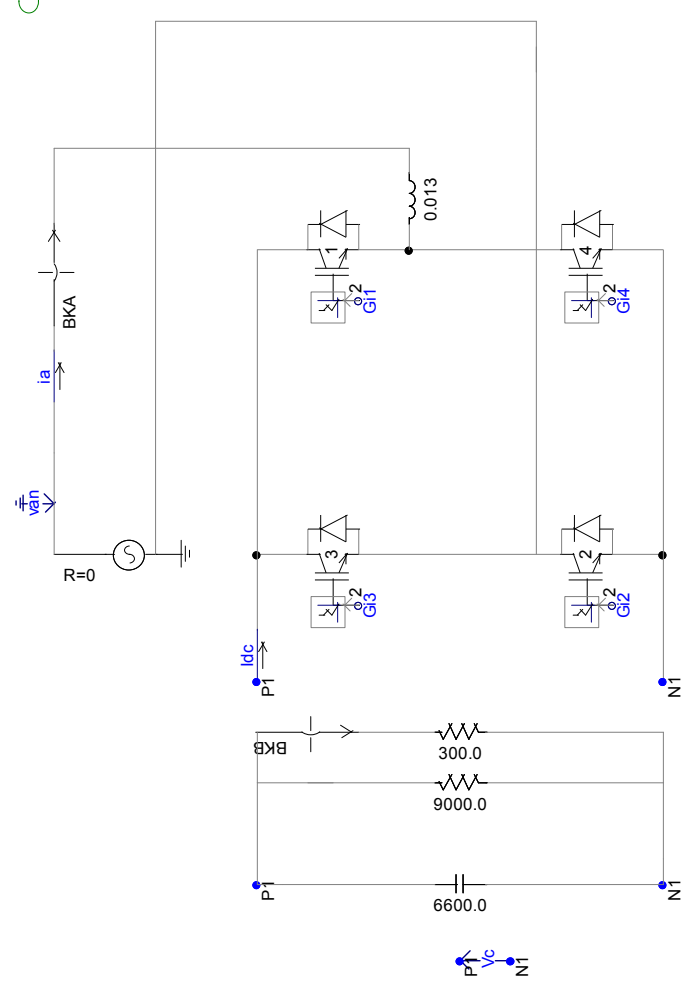
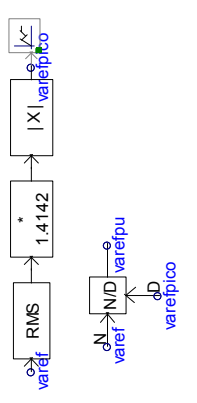
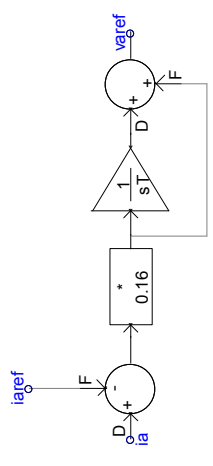
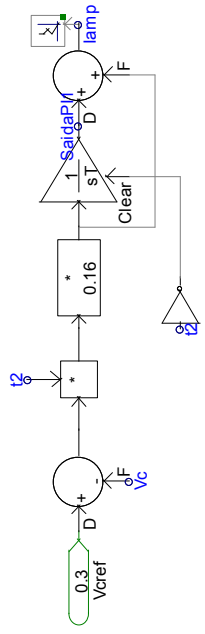
## ANEXO A – SAEC\_Monofasico\_CC.psc

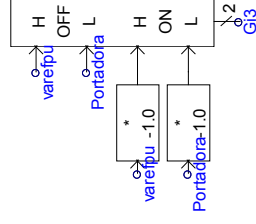
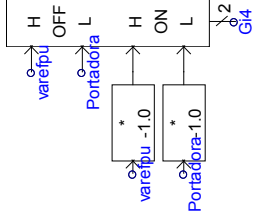
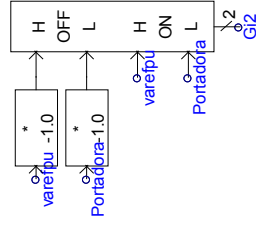
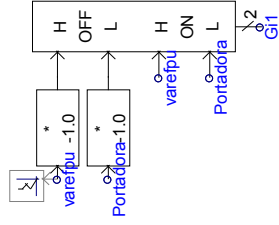
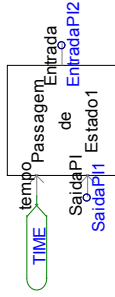
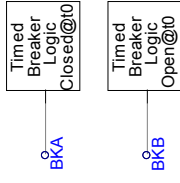
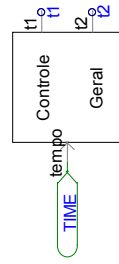
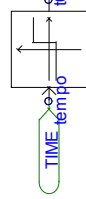
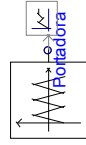
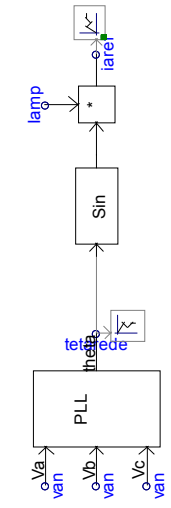
### Conversor da Rede 1φ e regeneração para o elo CC

Transforma a teia que cresce sem parar ao longo do tempo em sinais q variam de 0 a 90o ao longo do tempo, e defasados de 30o



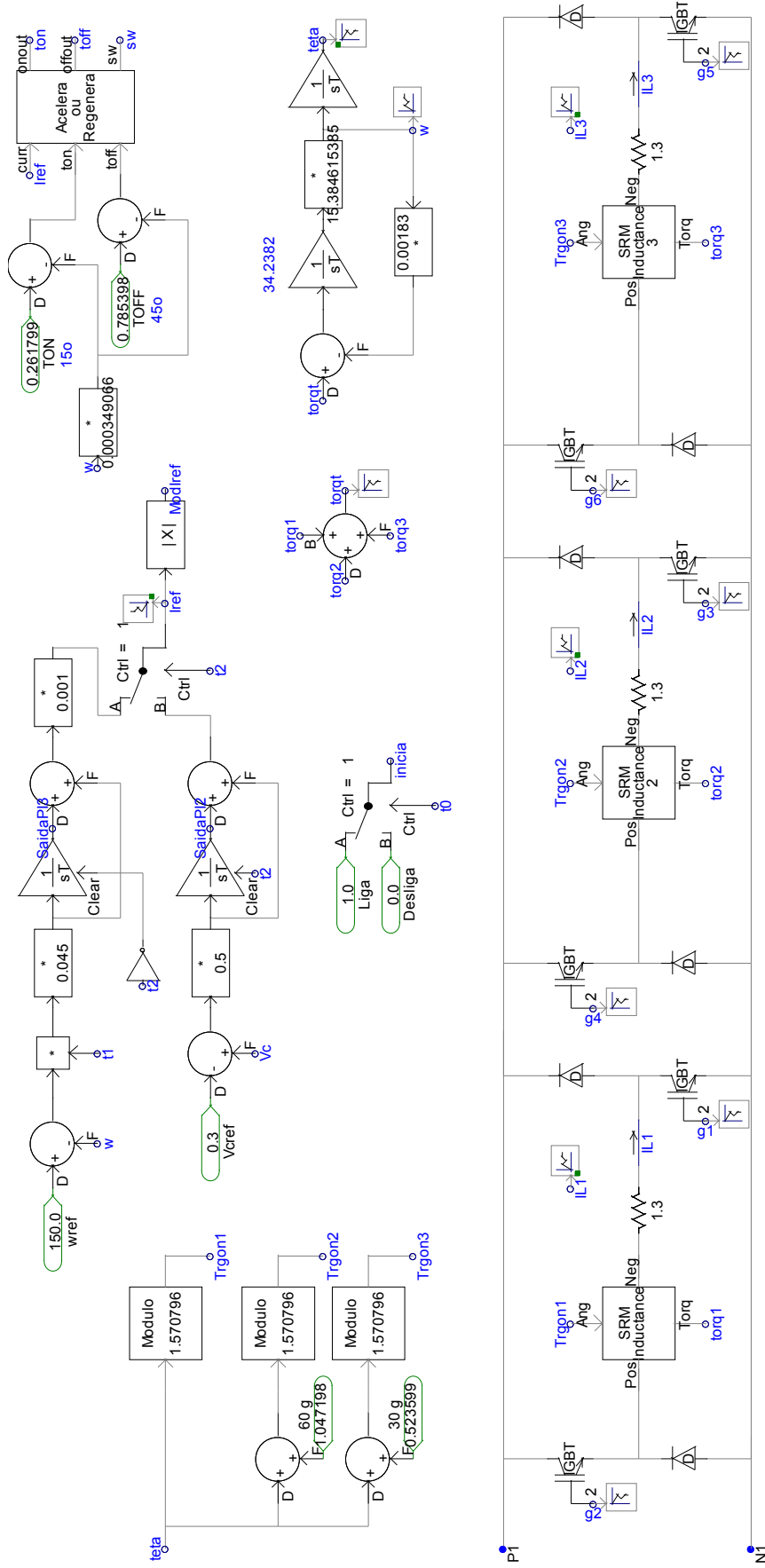


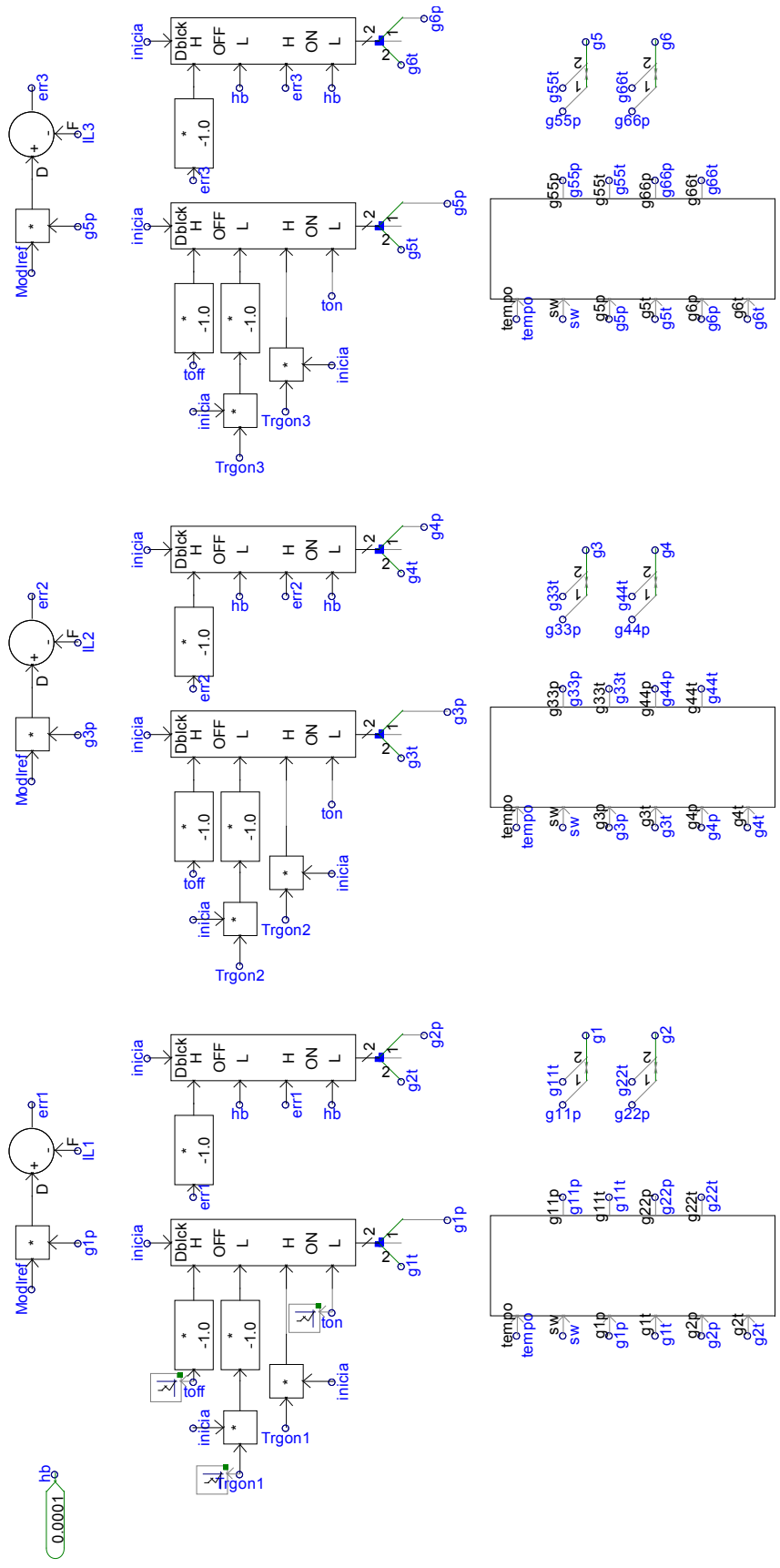




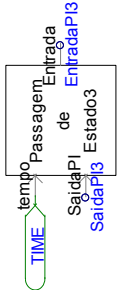
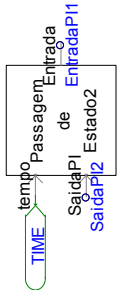
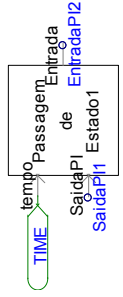
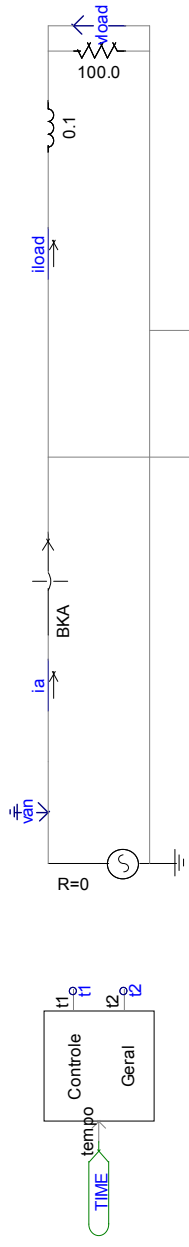
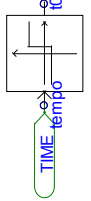
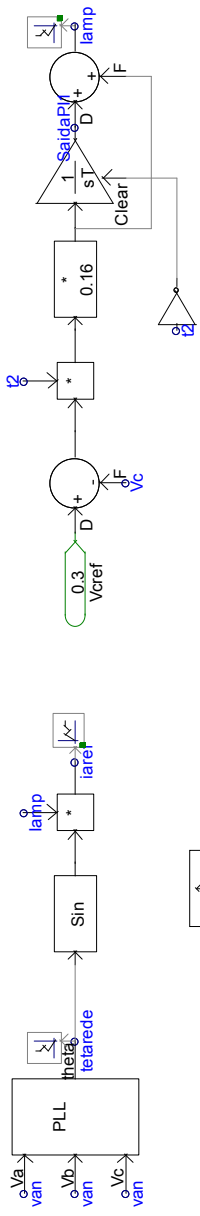
## ANEXO B – SAEC\_Monofasico\_CA.psc

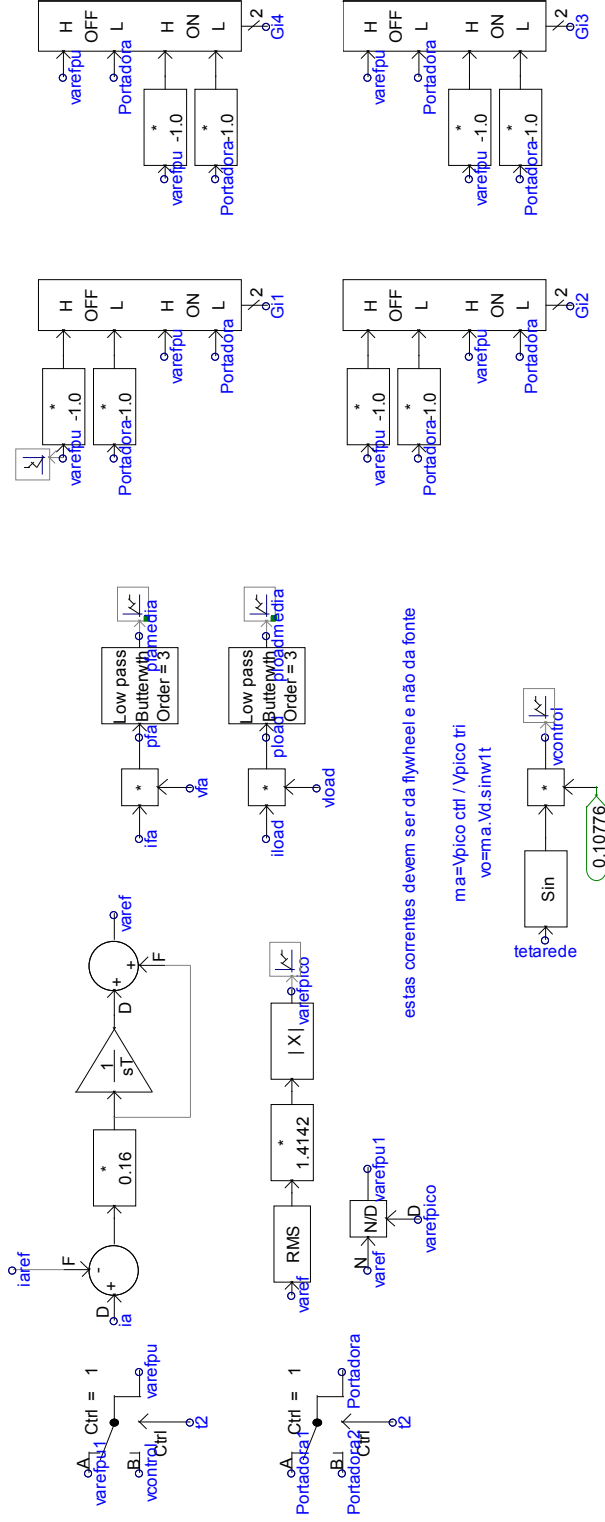
Conversor da Rede 1φ e regeneração para a rede CA









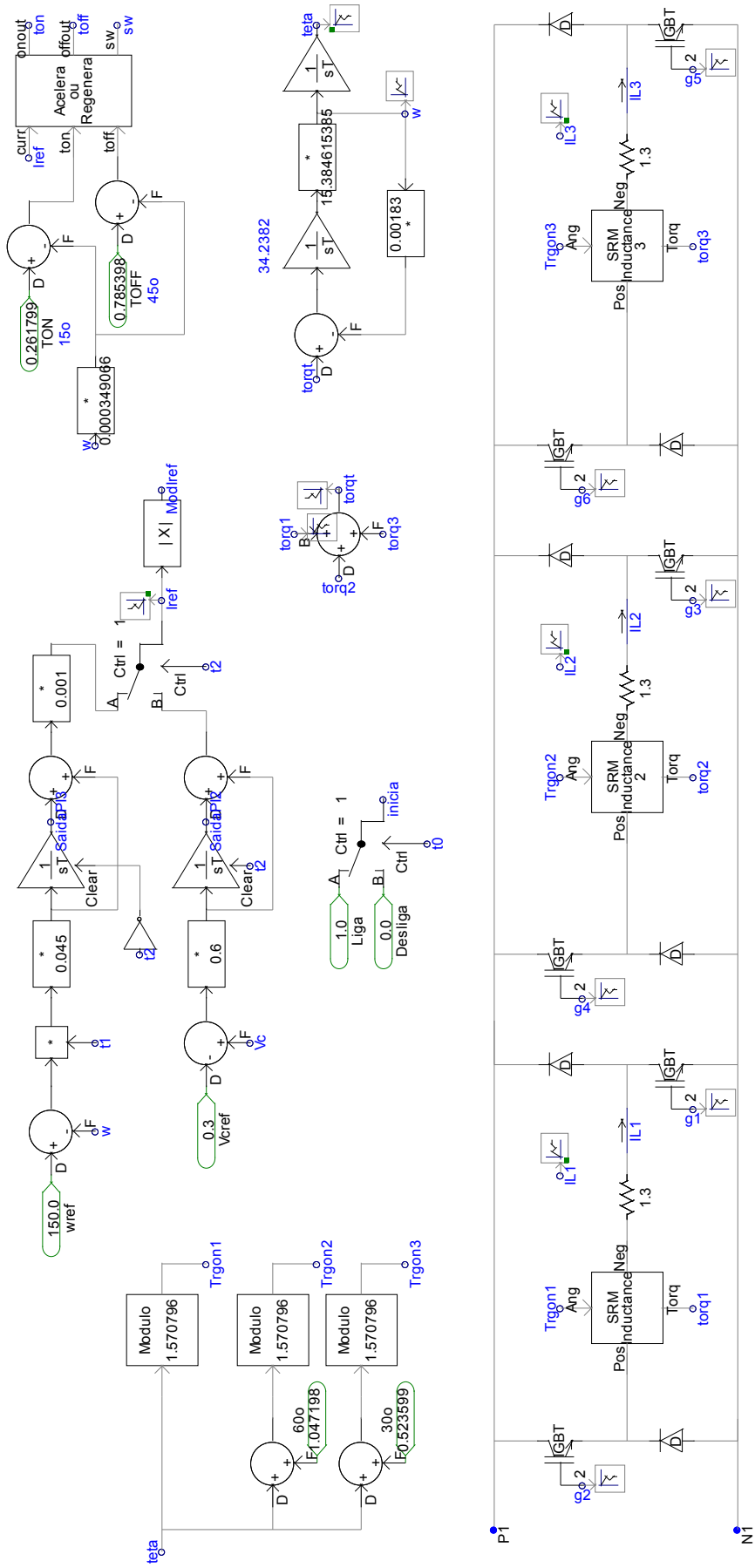


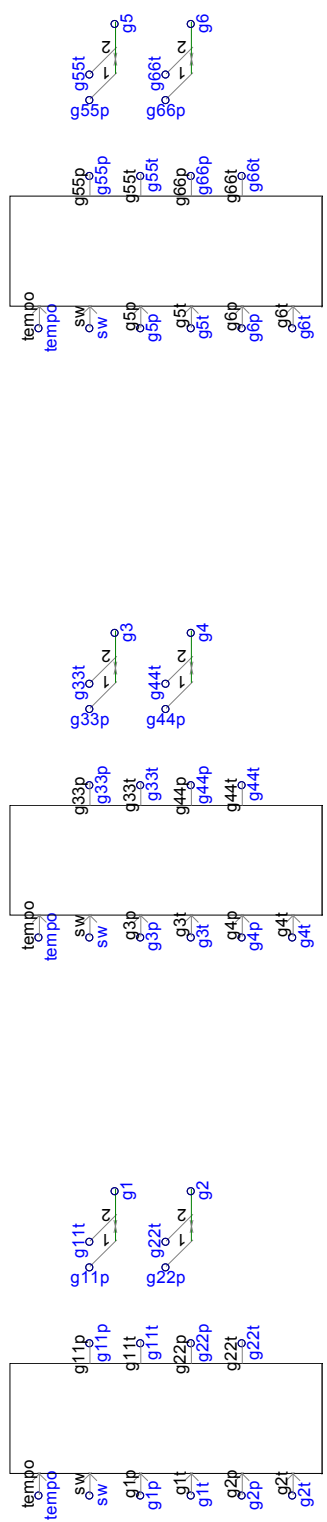
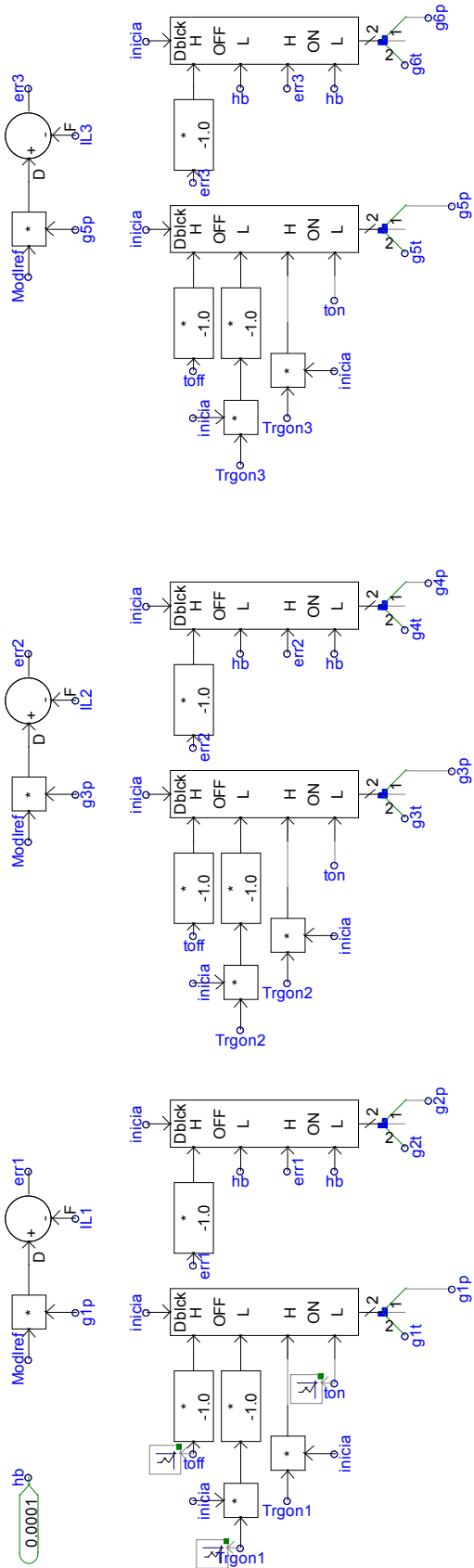
estas correntes devem ser da flywheel e não da fonte

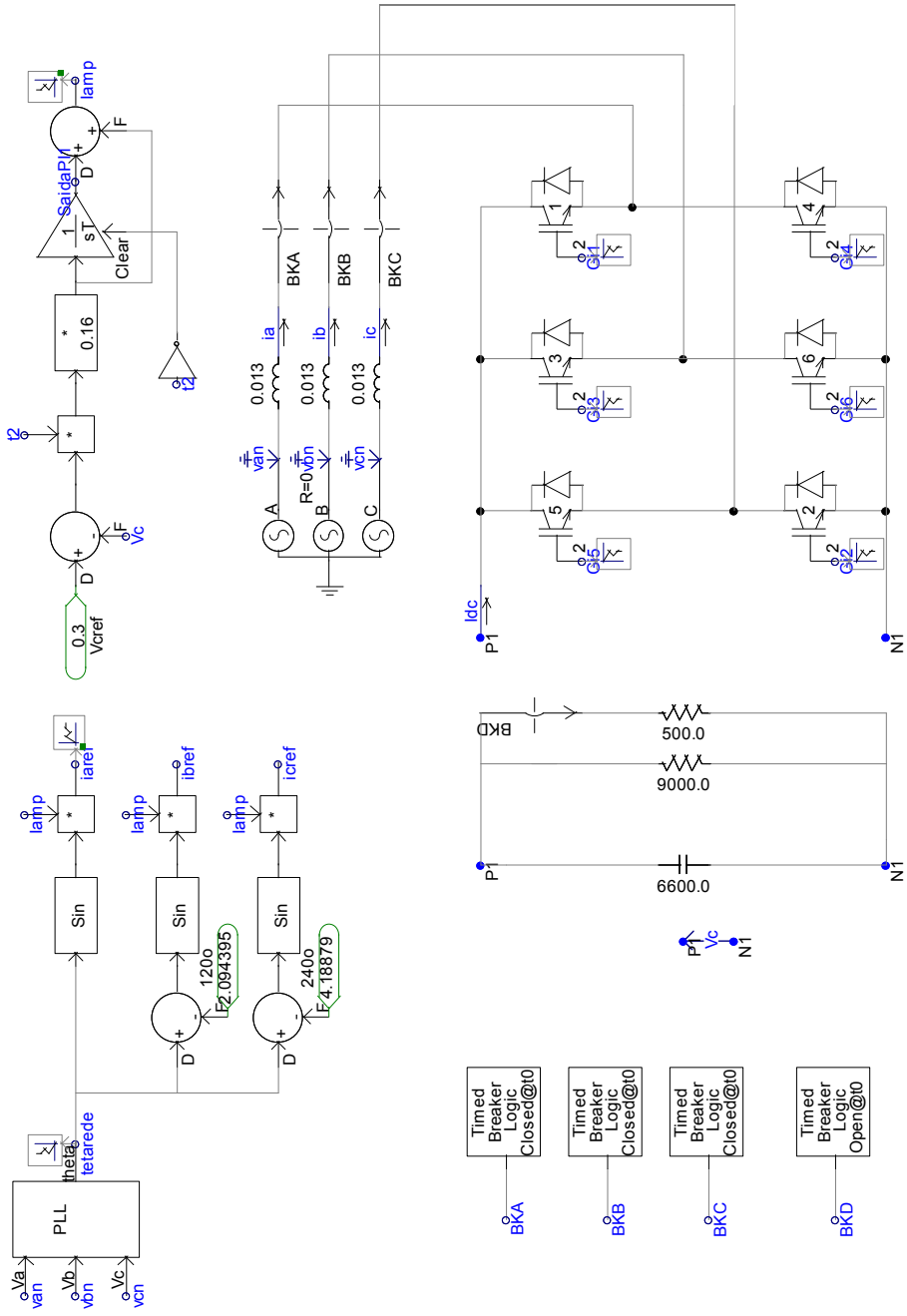
$ma = V_{pico\ ctri} / V_{pico\ tri}$   
 $vo = ma \cdot V_d \cdot \sin w1t$

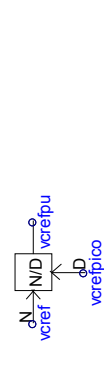
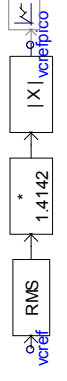
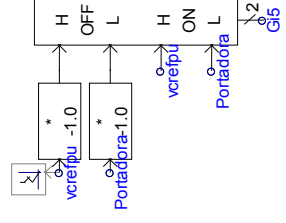
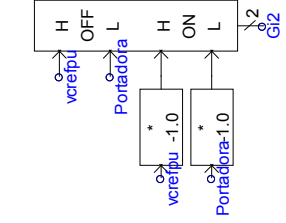
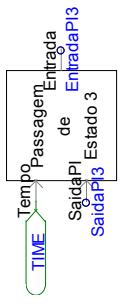
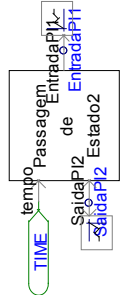
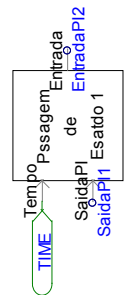
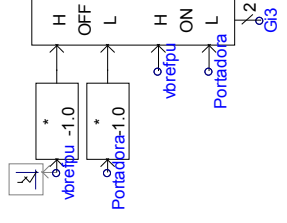
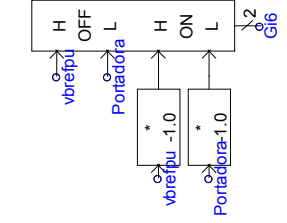
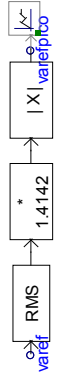
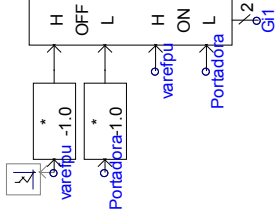
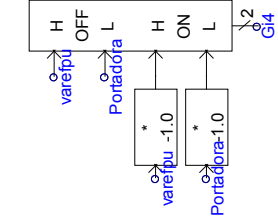
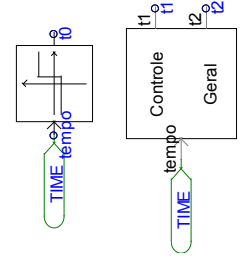
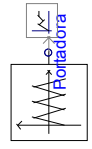
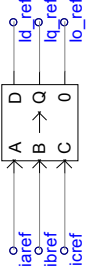
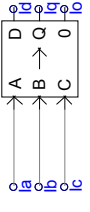
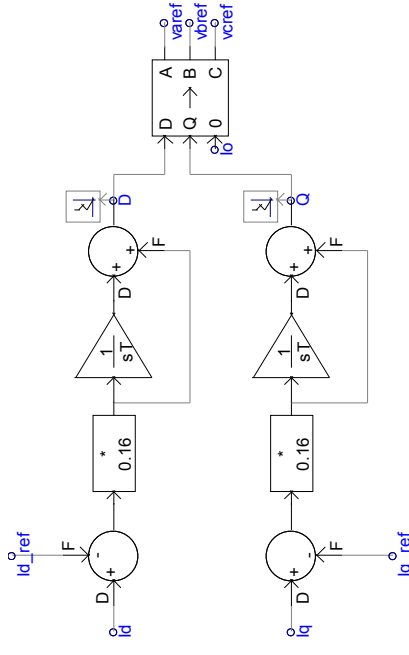
## ANEXO C – SAEC\_Trifasico\_CC.psc

Conversor da Rede 3φ e regeneração para o elo CC



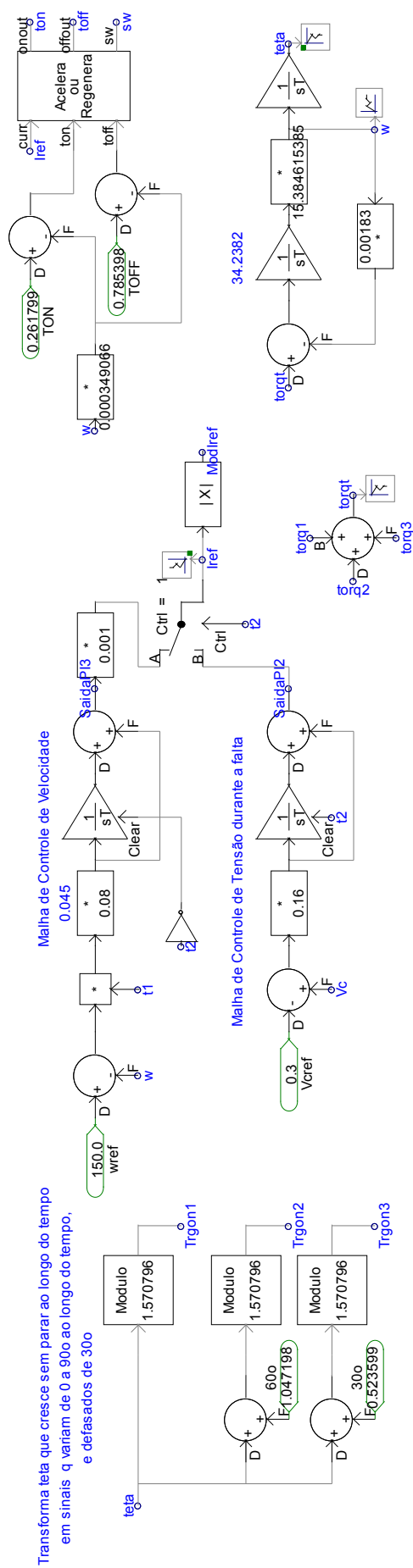




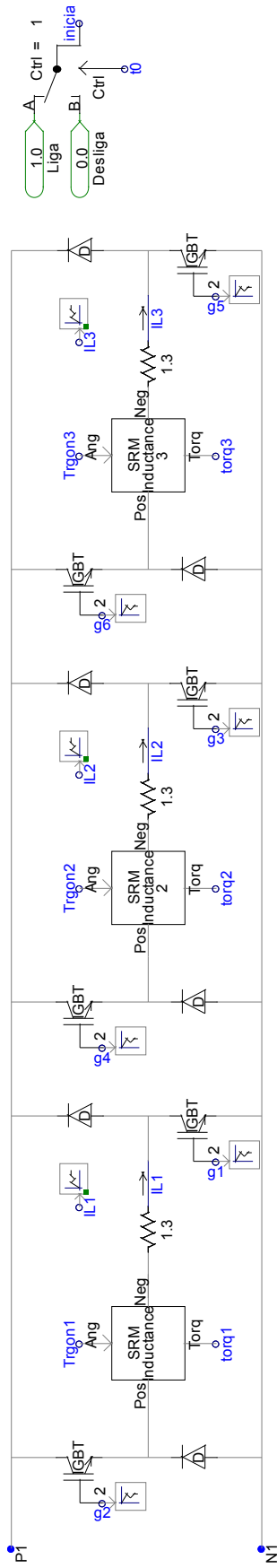


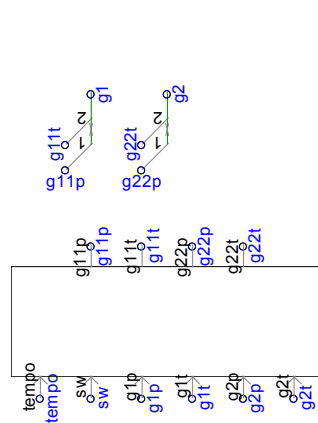
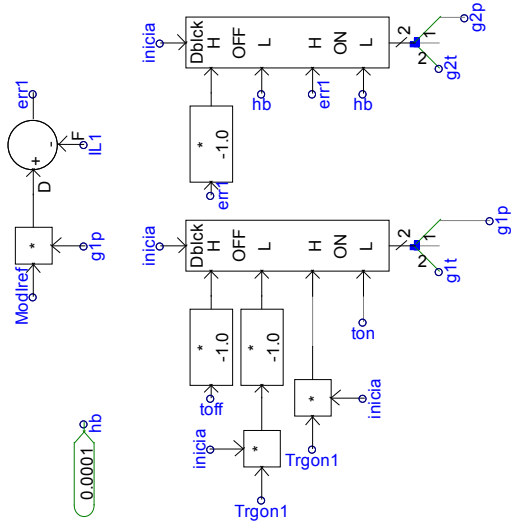
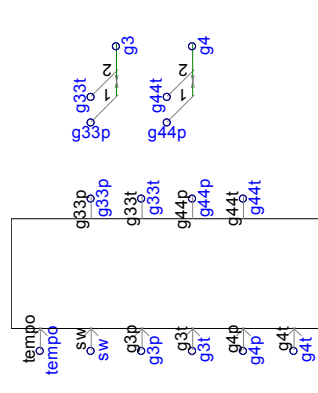
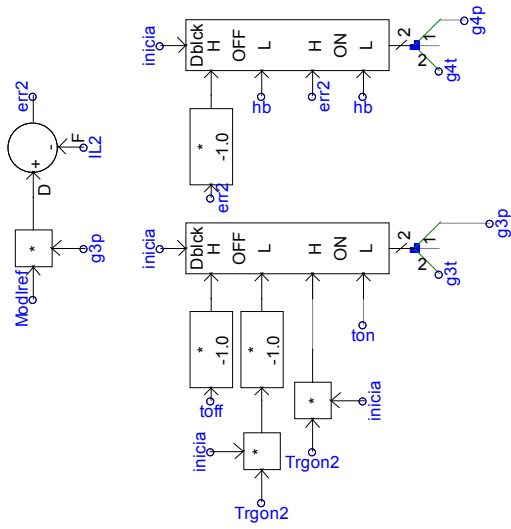
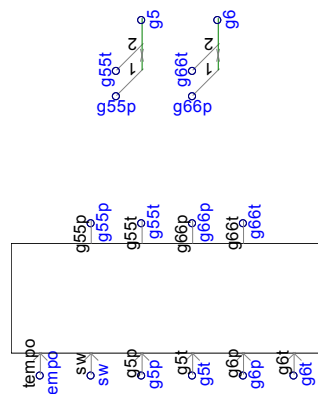
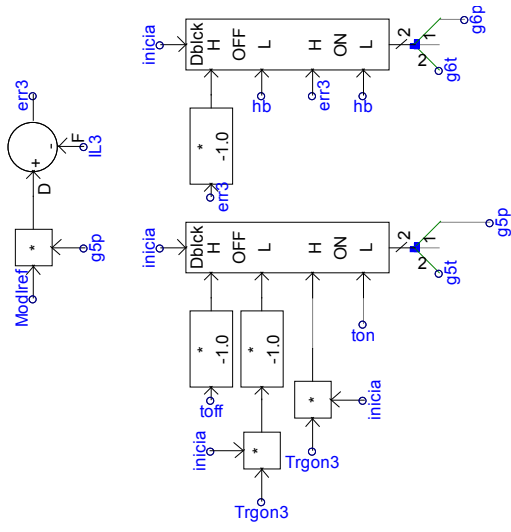
## ANEXO D – SAEC\_Trifasico\_CA.psc

### Conversor da Rede 3φ e regeneração para a rede CA

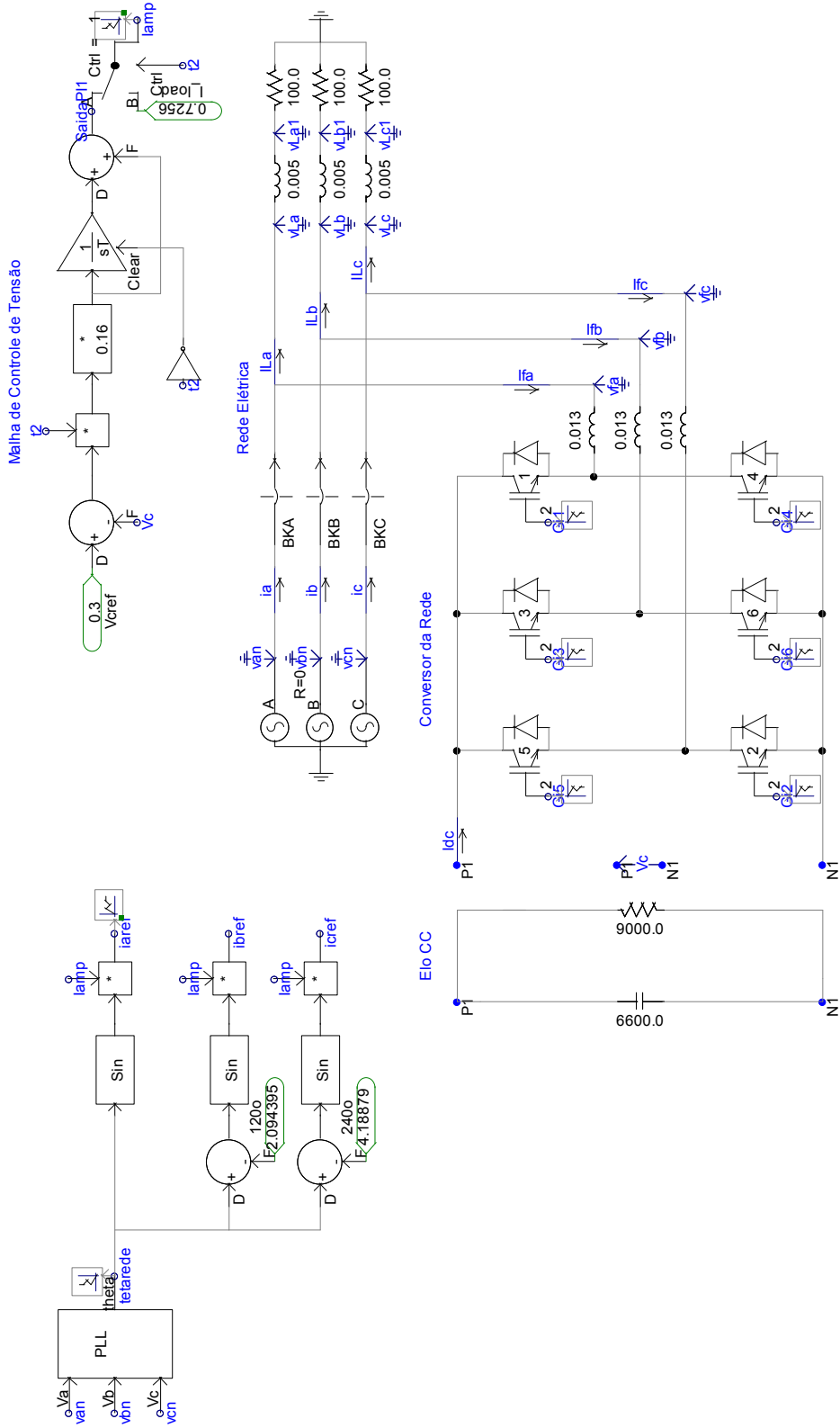


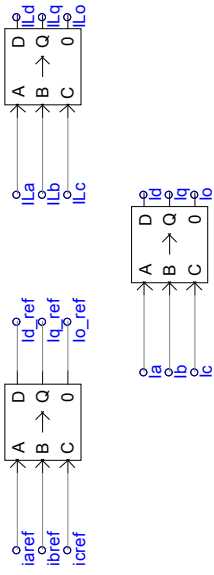
Conversor da MRV



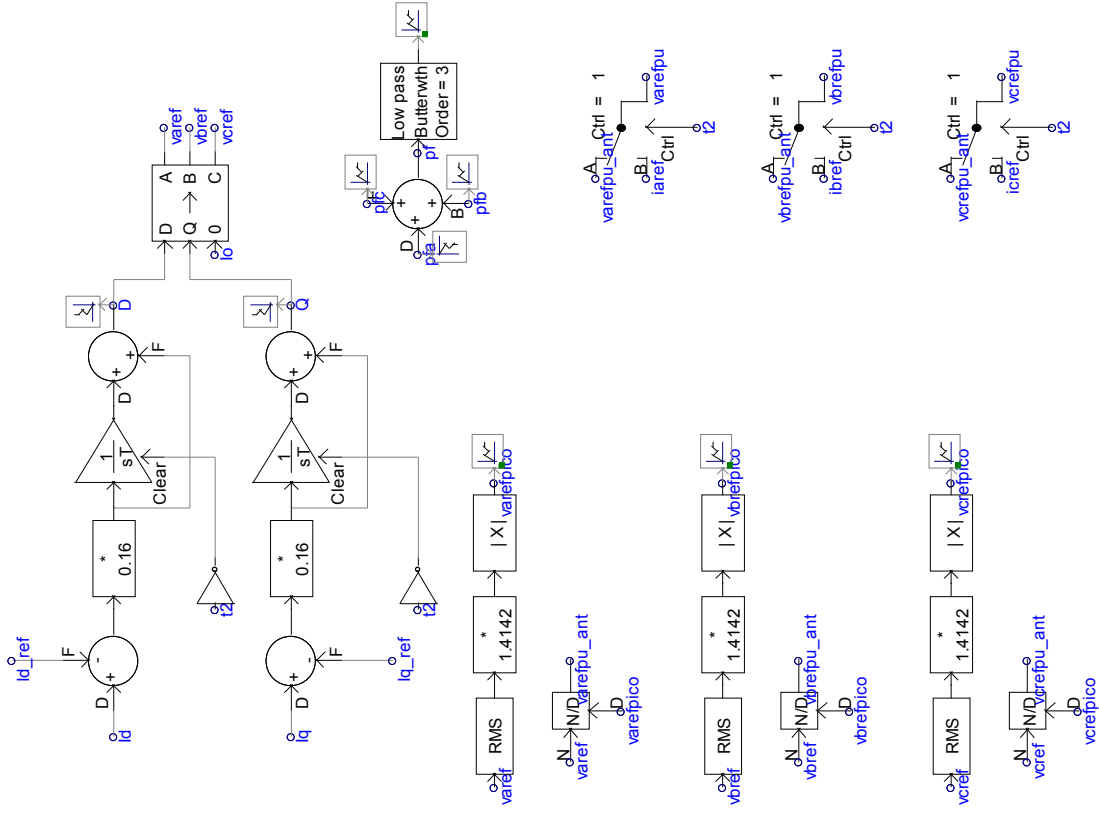
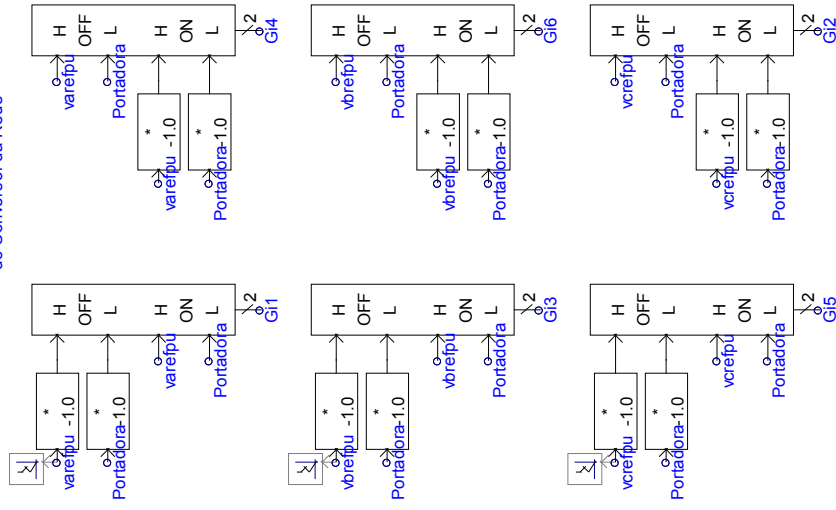


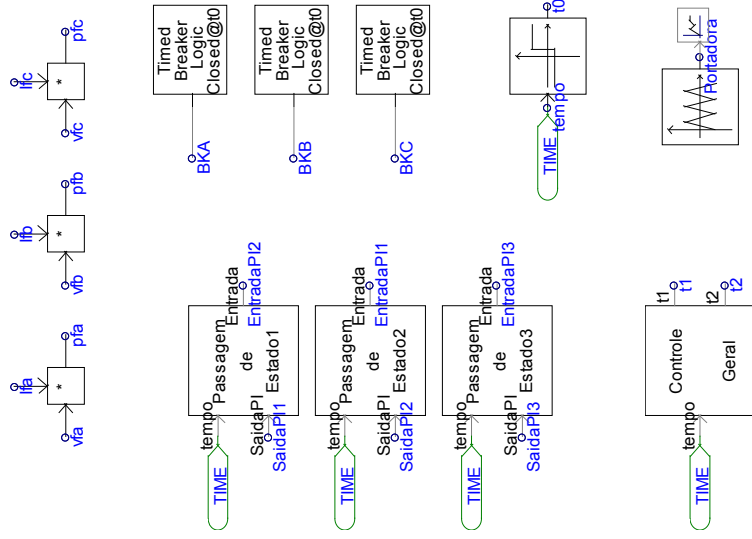






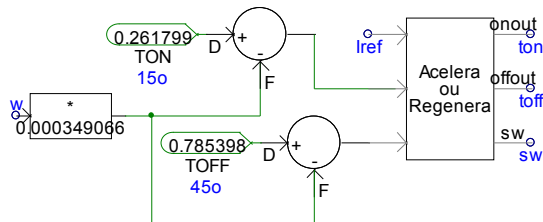
Circuito de Chaveamento do Conversor da Rede





## ANEXO E – Rotinas de Blocos de Controle da Simulação

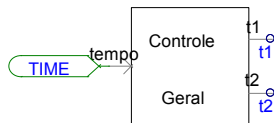
### A) Bloco Acelera ou Regenera



```

IF ($curr .LT. 0.0) THEN
    $onout = $ton + 0.523598776 + 0.06981317 !0.523598776=30o e
    0.06981317=4o e 0.20943951=12o
    $offout = $toff + 0.523598776 + 0.20943951
    $sw = -1.0
ELSE
    $onout = $ton
    $offout = $toff
    $sw = 1.0
ENDIF
    
```

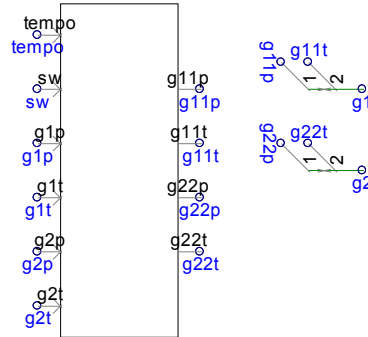
### B) Bloco de Controle Geral



```

!
IF ($tempo .LT. 2.5) THEN
    $t1=0
    $t2=1
ENDIF
IF (($tempo .GE. 2.5) .and. ($tempo .LT. 16.0)) THEN
    $t1=1
    $t2=1
ENDIF
IF (($tempo .GE. 16) .and. ($tempo .LT. 18.0)) THEN
    $t2=0
ENDIF
IF ($tempo .GE. 18) THEN
    $t2=1
ENDIF
!
    
```

### C) Bloco de Controle dos Pulsos de Disparo do Conversor da MRV



!

```

IF (($tempo .GT. 0.6) .and. ($tempo .LT. 2.5)) THEN
    $g11p = 0
    $g11t = 0
    $g22p = 0
    $g22t = 0

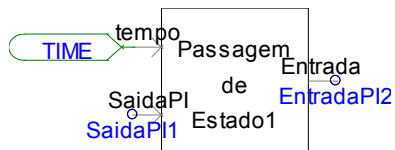
ELSE
    IF ($sw .EQ. 1.0) THEN
        $g11p = $g1p
        $g11t = $g1t
    ELSE
        $g11p = $g2p
        $g11t = $g2t
    ENDIF
    $g22p = $g2p
    $g22t = $g2t

```

ENDIF

!

### D) Bloco de Controle Geral



```

IF (($tempo .GE. 17.8) .and. ($tempo .LE. 17.9)) THEN
    $EntradaPI1=SaidaPI2
ENDIF

```