



Universidade Federal de Itajubá
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Proposta de um Gerador de Afundamentos Momentâneos de Tensão Baseado em Componentes Simétricos

Renato Takahashi

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jose Antonio Cortez
Co-orientador: Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva

Itajubá, Agosto de 2008.

Dedicatória

À minha família,
pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela força dada durante toda minha vida, principalmente nessa importante fase pessoal e profissional.

À CAPES, pelo suporte financeiro durante o período do mestrado.

À minha família, pelo apoio e incentivo em todas as horas, sobretudo nas mais difíceis. Mesmo quando distante, as palavras de força sempre, de algum modo, me ajudaram a encarar esse desafio.

Aos professores Jose Antonio Cortez e Valberto Ferreira da Silva, que sempre acreditaram em mim e deram liberdade a mim, tanto nos trabalhos desta dissertação quanto nas oportunidades profissionais que realizei no período do mestrado.

Ao professor Edson da Costa Bortoni, pela ajuda em outras atividades que enriqueceram meu conhecimento técnico, científico e profissional.

Aos amigos Marco Antonio Conti Craveiro e Rafael Vivarelli Molina, pelo companheirismo durante os dois anos do mestrado e pelas experiências profissionais que fizeram parte desse tempo.

Aos amigos Denis de Carvalho Braga, Liverson Batista da Cruz e Vinicius Carvalhal Scarpa, que de certa forma, ajudaram nesse trabalho.

iv

Ao professor Augusto Nelson Carvalho Viana e ao funcionário Júlio Santos, pela prontidão em me ajudar sempre que possível, sobretudo com os equipamentos utilizados na coleta de dados.

Ao Grupo de Qualidade de Energia Elétrica, representado pelo professor Marcel, pelo empréstimo emergencial da fonte de tensão controlada.

Aos professores Angelo Rezek e Enio Ribeiro e todo o Grupo de Pesquisa em Eletrônica de Potência e Aplicações (GPEPA).

Aos funcionários do Laboratório de Eletrônica, que sempre me auxiliaram nas atividades desse trabalho de dissertação.

“Sem saber que era impossível, foi lá e fez.”

Resumo

TAKAHASHI, R. (2008), *Proposta de um Gerador de Afundamentos Momentâneos de Tensão Baseado em Componentes Simétricos*, Itajubá. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá.

A qualidade da energia elétrica vem se tornando um assunto de grande repercussão nos últimos anos. Tal preocupação deve-se aos efeitos causados pela falta de qualidade na energia elétrica, principalmente na indústria brasileira. Dentre diversos temas abrangendo qualidade de energia, tais como harmônicos, ruídos e outros, o estudo dos afundamentos momentâneos de tensão é importante devido aos efeitos que esse tipo de distúrbio pode causar nas indústrias, sobretudo.

Atualmente muitos processos industriais são controlados eletronicamente e esses equipamentos são mais sensíveis aos afundamentos de tensão. O estudo das características e de métodos de mitigação de afundamentos já vem sendo estudado há anos. O trabalho em questão aborda outra vertente desse tema: a geração dos afundamentos de tensão. Como existem muitas cargas sensíveis, é importante testar até que nível e duração de afundamento de tensão essas cargas suportam.

A topologia do gerador proposto é baseada na injeção de tensão em série com a tensão da rede, modificando exclusivamente a tensão nos terminais da carga. As tensões injetadas são formadas pela soma de três tensões: seus componentes simétricos (seqüência positiva, negativa e zero). A geração dessas tensões é feita por inversores de frequência monofásicos configurados de acordo com o tipo de afundamento de tensão.

O trabalho leva em consideração os tipos de afundamentos de tensão propostos por Math Bollen. Além de resultados de simulação em Matlab/Simulink[®], essa dissertação de mestrado conta também com resultados experimentais coletados de um protótipo projetado e desenvolvido para baixa potência. A análise dos resultados experimentais foi realizada por um software desenvolvido em LabVIEW[®], que permite fazer análise em frequência dos sinais e também permite observar as principais características de cada tipo de afundamento de tensão.

Palavras-chave

Qualidade da energia, Afundamentos momentâneos de tensão, Geradores de afundamentos de tensão, Componentes simétricos, Eletrônica de potência.

Abstract

TAKAHASHI, R. (2008), *Proposal of a Voltage Sag Generator Based on Symmetrical Components*, Itajubá. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação, Universidade Federal de Itajubá.

Power quality has currently been one of the most discussed energy themes. The reason for this is due to the effects that power quality problems cause costumers, mainly industrial. Among all power quality problems, the voltage sag study is important because voltage sags causes much damage to electronic equipment that is installed in many industrial plants.

Much research has been carried out about voltage sag characteristics and voltage sag mitigation. However, this dissertation explores another issue of voltage sag theme: the voltage sag generation. As many electric sensitive loads are being used in industries, it's interesting to test the electric sensitive equipment when voltage sag occurs.

The voltage sag generator topology is based on the injection of a specific voltage in series with the source voltage, modifying the voltages in load terminals. Besides, the injection voltage is composed of three other voltages based on their symmetrical components: positive, negative and zero. Symmetrical component voltages are generated by single-phase frequency inverters that are configured according to the type of the desired voltage sag.

This dissertation considers all voltage sags types proposed by Math Bollen. In addition to simulation results done in Matlab/Simulink[®], some experimental results were collected using a projected and developed low power voltage sag generator prototype. Experimental results analyses were done with a software developed in LabVIEW[®]. This software makes possible voltages frequency response analyses and observations of specific characteristics of each voltage sag type.

Keywords

Power quality, Voltage sag, Voltage sag generator, Symmetrical components, Power electronics.

Sumário

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 – Contextualização do Trabalho	1
1.2 – Conteúdo da Dissertação	5
CAPÍTULO 2	7
QUALIDADE DA ENERGIA E AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	7
2.1 – Conceitos em Qualidade da Energia	7
2.1.1 – Transitórios	7
2.1.2 – Variações de Curta Duração	8
2.1.3 – Variações de Longa Duração	10
2.1.4 – Desequilíbrios de Tensão	11
2.1.5 – Distorção	11
2.1.6 – Flutuações de Tensão	13
2.1.7 – Variações de Frequência	13
2.1.8 – Resumo Geral dos Conceitos	14
2.2 – Afundamentos Momentâneos de Tensão	15

2.2.1 – Conceitos e Definições-----	15
2.2.2 – Normalização Aplicável -----	16
2.2.3 – Origem dos Afundamentos de Tensão-----	18
2.2.4 – Medição da Magnitude do Afundamento de Tensão -----	19
2.2.5 – Tensão Pré-falta-----	19
2.2.6 – Duração dos Afundamentos de Tensão-----	20
2.2.7 – Frequência de Ocorrência -----	20
2.2.8 – Sistemas Trifásicos com Falhas -----	21
2.2.8.1 – Falhas Monofásicas -----	21
2.2.8.2 – Falhas Bifásicas-----	22
2.2.8.3 – Falhas Trifásicas -----	24
2.2.9 – Conexões de Transformadores-----	24
2.2.10 – Influência do Tipo de Falta, do Tipo de Carga e das Conexões de Transformadores em Afundamentos de Tensão -----	26
2.2.11 – Classificação dos Afundamentos de Tensão -----	28
2.2.11.1 – Falhas Bifásicas a Terra-----	30
2.2.12 – Resumo dos Tipos de Afundamentos de Tensão -----	32
CAPÍTULO 3 _____	33
 GERADOR DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO BASEADO EM COMPONENTES SIMÉTRICOS _____	33
3.1 – Funcionamento e Topologia -----	33
3.1.1 – Componentes Simétricos -----	33
3.1.2 – Topologia -----	36
3.2 – Equacionamento -----	37
3.2.1 – Afundamento Tipo A-----	37
3.2.2 – Afundamento Tipo B-----	39
3.2.3 – Afundamento Tipo C-----	41
3.2.4 – Afundamento Tipo D-----	42
3.2.5 – Afundamento Tipo E-----	44
3.2.6 – Afundamento Tipo F-----	46
3.2.7 – Afundamento Tipo G-----	47
 CAPÍTULO 4 _____	49
 PROJETO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA _____	49
4.1 – Projeto dos Inversores de Frequência-----	49

4.1.1 – Inversor de Frequência Tipo Ponte H-----	49
4.1.1.1 – Topologia -----	49
4.1.1.2 – Técnicas de Modulação PWM -----	50
4.1.2 – Modos de Operação -----	51
4.1.2.1 – Semi-ciclo Positivo -----	51
4.1.2.2 – Semi-ciclo Negativo -----	54
4.1.3 – Dimensionamento dos Componentes -----	51
4.1.3.1 – Chaves Semicondutoras -----	56
4.1.3.2 – Diodos -----	57
4.1.3.3 – <i>Snubber</i> -----	57
4.1.3.4 – Filtro LC -----	58
4.2 – Especificação do Transformador Série -----	59
4.2.1 – Tensão do Primário do Transformador Série V_1 -----	60
4.2.1.1 – Especificação de Acordo com a Magnitude do Afundamento de Tensão --	60
4.2.1.2 – Especificação de Acordo com o Salto de Ângulo do Afundamento-----	60
4.2.1.3 – Especificação de Acordo com o Tipo do Filtro-----	61
4.2.2 – Corrente do Primário do Transformador Série -----	62
4.2.3 – Potência do Transformador Série-----	62
4.2.4 – Relação de Transformação -----	62
4.3 – Projeto das Chaves <i>Bypass</i> -----	63
4.4 – Valores Adotados para o Projeto -----	63
4.5 – Configuração da Simulação -----	64
4.5 – Resultados de Simulação -----	66
4.5.1 – Afundamento de Tensão Tipo A-----	67
4.5.2 – Afundamento de Tensão Tipo B-----	68
4.5.3 – Afundamento de Tensão Tipo C-----	70
4.5.4 – Afundamento de Tensão Tipo D-----	71
4.5.5 – Afundamento de Tensão Tipo E-----	73
4.5.6 – Afundamento de Tensão Tipo F-----	75
4.5.7 – Afundamento de Tensão Tipo G-----	76
CAPÍTULO 5 _____	79
PROTÓTIPO PARA OPERACAO EM BAIXA POTÊNCIA E RESULTADOS	
EXPERIMENTAIS _____	79
5.1 – Inversores de Frequência -----	79

5.1.1 – Circuito de Potência	79
5.1.2 – Circuito de Controle	80
5.2 – Chaves <i>Bypass</i>	81
5.2.1 – Circuito de Potência	81
5.2.2 – Circuito de Controle	81
5.3 – Interface Homem-Máquina	82
5.4 – Implementação do Controle dos Inversores no DSP	84
5.4.1 – DSP e Placa de Desenvolvimento	84
5.4.2 – Técnica Unipolar	85
5.4.3 – Fluxogramas do Programa	92
5.5 – Estrutura Física do Protótipo	94
5.6 – Resultados Experimentais	95
5.7 – Resultados Experimentais com Fonte de Tensão Ideal	97
5.7.1 – Análise do Conteúdo Harmônico das Formas de Ondas Geradas	98
5.7.2 – Afundamento Tipo A	99
5.7.3 – Afundamento Tipo B	101
5.7.4 – Afundamento Tipo C	103
5.7.5 – Afundamento Tipo D	104
5.7.6 – Afundamento Tipo E	106
5.7.7 – Afundamento Tipo F	108
5.7.8 – Afundamento Tipo G	110
5.8 – Resultados com Distorção Harmônica na Tensão da Rede	112
5.8.1 – Afundamento Tipo C	113
5.8.2 – Afundamento tipo D	114
5.9 – Comparação dos Resultados de Simulação e Experimentais	115
CAPÍTULO 6	118
CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	118
6.1 – Conclusão	118
6.2 – Trabalhos Futuros	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Gerador de afundamento de tensão com transformadores (Carvalho, 1997) -----	2
Figura 1.2 – Reator controlado por tiristores (Chung, 2002) -----	3
Figura 1.3 – Gerador de afundamento de tensão com inversor (Dokic, 2002) -----	4
Figura 1.4 – Gerador de afundamento de tensão com inversor em série (Chung, 2004) -----	4
Figura 2.1 – Transiente ou transitório impulsivo (Seymor, 2005) -----	8
Figura 2.2 – Transientes oscilatórios (Seymor, 2005) -----	8
Figura 2.3 – Interrupção-----	9
Figura 2.4 – Afundamento de tensão-----	9
Figura 2.5 – Elevação de tensão -----	10
Figura 2.6– Harmônicos -----	11
Figura 2.7 – Corte (<i>Notch</i>)-----	12
Figura 2.8 – Ruídos -----	12
Figura 2.9 – Desvio do nível CC-----	13
Figura 2.10 – Flutuação de tensão -----	13
Figura 2.11 – Variações de frequência-----	14
Figura 2.12 – Afundamento de tensão em um sistema real (Leborgne, 2003) -----	16
Figura 2.13 – Curva de tolerância da SEMI F47-0200 (Leborgne, 2003) -----	17
Figura 2.14 – Curva CBEMA de 2000 (Leborgne, 2003)-----	18
Figura 2.15 – Diagrama fasorial de falta monofásica – tensões fase-neutro -----	22
Figura 2.16 – Diagrama fasorial de falta monofásica com carga em delta – tensões fase-fase	22
Figura 2.17 – Diagrama fasorial para faltas bifásicas – tensões fase-neutro -----	23

Figura 2.18 – Diagrama fasorial para carga em delta – tensões fase-fase -----	23
Figura 2.19 – Diagrama fasorial para faltas trifásicas -----	24
Figura 2.20 – Quatro primeiros tipos de afundamentos de tensão -----	29
Figura 2.21 – Três últimos tipos afundamentos de tensão -----	31
Figura 3.1 – Componentes simétricos-----	35
Figura 3.2 – Gerador de afundamento de tensão proposto-----	36
Figura 3.3 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo A -----	38
Figura 3.4 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo B -----	40
Figura 3.5 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo C -----	41
Figura 3.6 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo D -----	43
Figura 3.7 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo E-----	45
Figura 3.8 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo F-----	46
Figura 3.9 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo G -----	48
Figura 4.1 – Inversor em Ponte H -----	49
Figura 4.2 – Modulação PWM (a) bipolar (b) unipolar (Pinheiro, 2005) -----	50
Figura 4.3 – Etapa 1 do semi-ciclo positivo-----	52
Figura 4.4 – Etapa 2 do semi-ciclo positivo-----	52
Figura 4.5 – Etapa 3 do semi-ciclo positivo-----	53
Figura 4.6 – Etapa 4 do semi-ciclo positivo-----	53
Figura 4.7 – Etapa 1 do semi-ciclo negativo -----	54
Figura 4.8 – Etapa 2 do semi-ciclo negativo -----	54
Figura 4.9 – Etapa 3 do semi-ciclo negativo -----	55
Figura 4.10 – Etapa 4 do semi-ciclo negativo -----	55
Figura 4.11 – Principais formas de onda (Pinheiro, 2005)-----	56
Figura 4.12 – Snubber-----	58
Figura 4.13 – Transformador série -----	59
Figura 4.14 – Diagrama de fasores -----	60

Figura 4.15 – Tipos de filtros	61
Figura 4.16 – Diagramas no Simulink	65
Figura 4.17 – Simulação do afundamento A	68
Figura 4.18 – Simulação do afundamento B	69
Figura 4.19 – Simulação do afundamento C	71
Figura 4.20 – Simulação do afundamento D	73
Figura 4.21 – Simulação do afundamento E	74
Figura 4.22 – Simulação do afundamento F	76
Figura 4.23 – Simulação do afundamento G	77
Figura 5.1 – Circuito eletrônico da ponte H utilizada	80
Figura 5.2 – Circuito de comando dos inversores	80
Figura 5.3 – Tiristores em antiparalelo	81
Figura 5.4 – <i>Driver</i> de potência para tiristores em antiparalelo	82
Figura 5.5 – Diagrama de blocos da IHM	82
Figura 5.6 – Painel de comando da IHM	83
Figura 5.7 – Diagrama blocos do DSP	84
Figura 5.8 – Kit de desenvolvimento do DSP	85
Figura 5.9 – Tempos de transição	86
Figura 5.10 – Onda triangular e meio-seno armazenadas	87
Figura 5.11 – Interpolação da meia-onda senoidal	88
Figura 5.12 – Esquema de estruturas do DSP	89
Figura 5.13 – Fluxograma do programa principal desenvolvido no DSP	92
Figura 5.14 – Rotina de cálculo dos tempos de transição	93
Figura 5.15 – Foto da estrutura do gerador	94
Figura 5.16 – Estrutura do gerador para uma seqüência	95
Figura 5.17 – Tela do software de análise dos dados coletados	96
Figura 5.18 – Tela do software de análise dos dados coletados – análise de frequência	96
Figura 5.19 – Tela do software de análise dos dados coletados	97
Figura 5.20 – Análise da tensão gerada pelos inversores (8V)	98
Figura 5.21 – Análise da tensão gerada pelos inversores (2,7V)	99
Figura 5.22 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo A	100
Figura 5.23 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo B	102
Figura 5.24 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo C	104
Figura 5.25 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo D	106

Figura 5.26 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo E-----	107
Figura 5.27 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo F-----	109
Figura 5.28 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo G -----	111
Figura 5.29 – Tensão da rede distorcida -----	112
Figura 5.30 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo C com distorção harmônica -----	114
Figura 5.31 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo D com distorção harmônica -----	115

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo dos conceitos em qualidade da energia-----	14
Tabela 2.2 – Tipo de afundamento e conexão de transformadores -----	27
Tabela 2.3 – Fasores dos quatro primeiros tipos de afundamentos de tensão -----	29
Tabela 2.4 – Variação dos afundamentos de tensão de acordo com a carga -----	29
Tabela 2.5 – Variação dos afundamentos de tensão de acordo com conexão do transformador	30
Tabela 2.6 – Fasores dos três últimos tipos de afundamentos de tensão-----	31
Tabela 2.7 – Resumos dos sete tipos de afundamentos de tensão -----	32
Tabela 3.1 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento A	39
Tabela 3.2 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento B	40
Tabela 3.3 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento C	42
Tabela 3.4 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento D	44
Tabela 3.5 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento E	45
Tabela 3.6 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento F	47
Tabela 3.7 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento G	48
Tabela 4.1 – Especificações do afundamento de tensão-----	63
Tabela 4.2 – Especificações da carga -----	63
Tabela 4.3 – Especificações dos inversores -----	64
Tabela 4.4 – Valores adotados em simulações e protótipo-----	64
Tabela 4.5 – Tensões nos inversores afundamento tipo A 50%-----	67
Tabela 4.6 – Tensões nos inversores afundamento tipo B 50% -----	69
Tabela 4.7 – Tensões nos inversores afundamento tipo C 50% -----	70
Tabela 4.8 – Tensões nos inversores afundamento tipo D 50%-----	72
Tabela 4.9 – Tensões nos inversores afundamento tipo E 50% -----	73
Tabela 4.10 – Tensões nos inversores afundamento tipo F 50%-----	75
Tabela 4.11 – Tensões nos inversores afundamento tipo G 50% -----	77
Tabela 5.1 – Fasores trifásicos dos componentes simétricos das tensões a serem injetadas ---	90

Tabela 5.2 – Vetor de magnitudes -----	91
Tabela 5.3 – Vetor de ângulos (em graus)-----	91
Tabela 5.4 – Parâmetros experimentais-----	95
Tabela 5.5 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento A)-----	101
Tabela 5.6 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento B)-----	102
Tabela 5.7 – Tensões das seqüências e injetada -----	103
Tabela 5.8 – Tensões das seqüências e injetadas (Afundamento D)-----	105
Tabela 5.9 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento E) -----	108
Tabela 5.10 – Tensões das seqüências e injetadas (Afundamento F)-----	108
Tabela 5.11 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento G) -----	110
Tabela 5.12 – Comparação dos dados (amplitude em pu) -----	116

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Os estudos de afundamentos de tensão, no Brasil, iniciaram-se por volta das décadas de 70 e 80, juntamente com os grandes projetos da Engenharia, como a “Ferrovia Carajás” e o “Sistema de Transmissão de Itaipu”. Uma intensificação destes estudos aconteceu à medida em que a eletrônica foi assumindo um papel primordial na automação de processos industriais. Os primeiros trabalhos desenvolviam-se em relação ao estudo e caracterização dos afundamentos de tensão. Estudavam-se as principais causas desses fenômenos, quais os efeitos consideráveis nas indústrias, como eles propagam-se pela rede elétrica, os cálculos para se determinar a profundidade e o formato do afundamento de tensão (Carvalho, 1997).

Após identificar as características desse distúrbio elétrico, estudaram-se quais métodos de mitigação poderiam ser utilizados. Para corrigir ou restaurar o nível da tensão de um barramento, freqüentemente empregam-se os chamados restauradores dinâmicos de tensão - DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), que é um equipamento eletrônico que detecta se houve queda de tensão em determinado barramento do sistema e, para restabelecer seu valor, injeta o nível de tensão necessário.

Apesar da importância dos métodos de mitigação, não menos importante é conhecer os limites dos equipamentos na ocorrência de afundamentos de tensão. Existem curvas e regras que estabelecem esses limites, porém é fundamental o teste real desses equipamentos quando

sujeitos a esses distúrbios. Não há modo de se experimentar o equipamento sem o uso de uma fonte que gere o afundamento, já que esses distúrbios são fenômenos aleatórios e dependem de vários fatores, sobretudo do nível cerâmico da região em que se encontra o equipamento eletrônico. O estudo de geração de afundamentos de tensão é mais recente e envolve diversos tipos de geradores.

Os mais simples geradores de afundamentos de tensão (*Voltage Sag Generator – VSG*) utilizam um transformador que altera a tensão a ser injetada de acordo com a seleção de tap. O gerador proposto em Carvalho (1997) utiliza essa topologia. A figura 1.1 ilustra o esquema do circuito de potência desse tipo de gerador. O circuito é constituído da tensão da rede, de um autotransformador e um circuito de comutação construído com tiristores em antiparalelo.

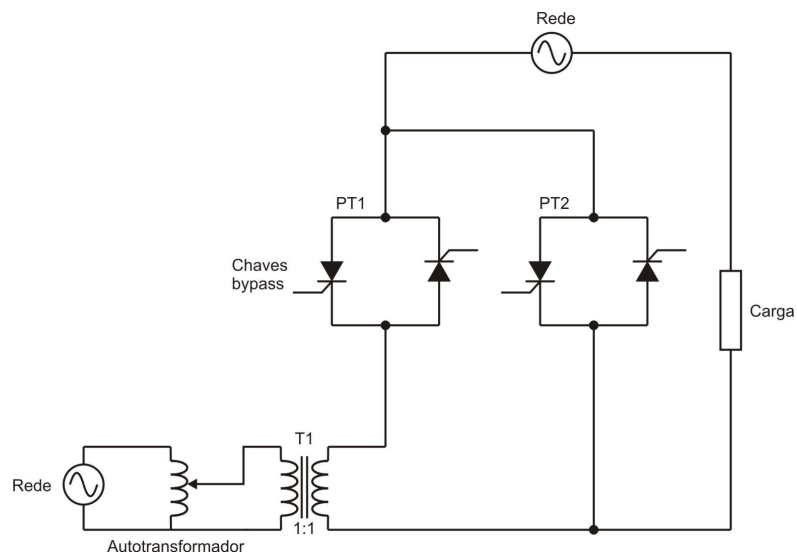


Figura 1.1 – Gerador de afundamento de tensão com transformadores (Carvalho, 1997)

Para que a tensão na carga seja igual à rede, o conjunto de tiristores PT2 é comutado, enquanto que PT1 é mantido desligado. No momento em que se deseja o afundamento de tensão, invertem-se os estados de PT1 e PT2. Logo, a tensão da rede será subtraída ou somada (quando se desejar gerar elevação de tensão) do valor da tensão ajustada no autotransformador T1.

Como muitos afundamentos também são causados por ligamento de cargas de grande potência, existem tipos de geradores que utilizam dessa topologia, chaveando reatores. Segundo Chung (2002), a técnica utilizada nesse tipo de gerador de afundamento de tensão tem como principal característica o seu baixo custo de desenvolvimento e implementação. Além disso, essa técnica possibilita a implementação em potências maiores (alguns MVAs), o que não ocorre com os outros tipos de geradores de afundamentos de tensão.

O gerador é composto basicamente por um reator e um circuito de disparo com tiristores (*Thyristor Controlled Reactor – TCR*), como ilustrado na figura 1.2. A corrente que passa pelo reator é controlada pelo ângulo de disparo dos tiristores.

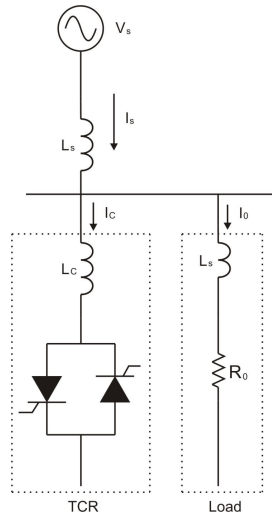


Figura 1.2 – Reator controlado por tiristores (Chung, 2002)

Os tipos de geradores mais versáteis são o que se utilizam de inversores de frequência para controlar a tensão a ser gerada para causar o afundamento de tensão. O gerador de afundamento de tensão proposto em Dokic (2002) é composto de um inversor de frequência, como ilustrado na figura 1.3, em que o afundamento de tensão é conseguido variando-se os parâmetros de controle do inversor. Os estudos foram concentrados na simulação computacional do gerador de afundamento de tensão sob diversas configurações do sistema.

Os parâmetros do afundamento de tensão a ser gerado foram:

- amplitude da tensão do afundamento entre 0% a 90% da tensão nominal,
- duração do afundamento entre meio-ciclo da rede até alguns segundos,
- combinações seqüenciais de amplitudes e durações de modo a gerar afundamentos com formatos não-retangulares.
- ângulo de ocorrência do afundamento de tensão entre 0 e $\pm 180^\circ$,
- ângulos de início e final do afundamento entre 0 e 360° .

Para que os parâmetros do gerador de afundamento de tensão pudessem ser controlados, o gerador foi dividido em três partes:

- na primeira parte retifica a tensão CA criando um barramento CC,
- na segunda parte encontra-se o inversor que gera os afundamentos nas características desejadas,

- na terceira parte, finalmente, encontra-se o filtro projetado para produzir, na saída do inversor, a forma de onda mais senoidal possível.

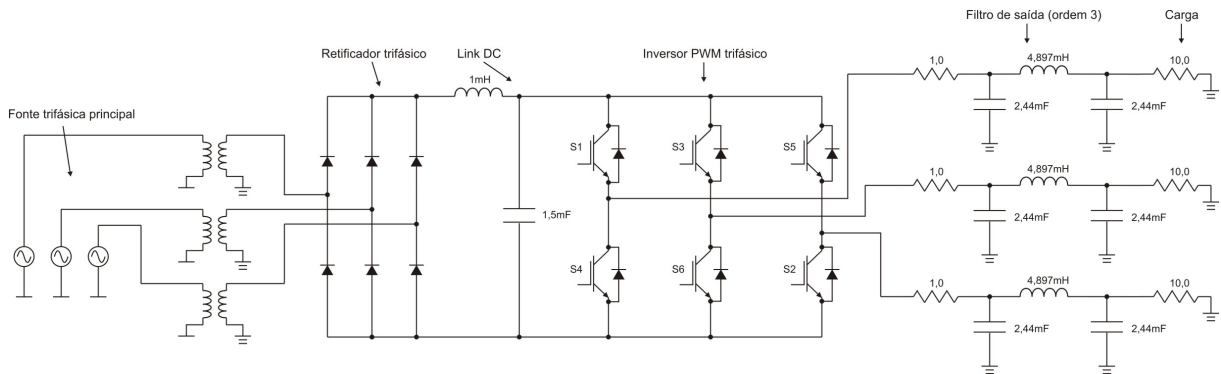


Figura 1.3 – Gerador de afundamento de tensão com inversor (Dokic, 2002)

O gerador proposto em Chung (2004) também é composto de inversores de frequência, porém as tensões dos inversores são injetadas em série nas respectivas tensões da rede. Chung (2004) propõe esse tipo de gerador para testar e validar diversos tipos de equipamentos elétricos sob determinadas condições de afundamentos, interrupções e outras perturbações elétricas. O sistema da figura 1.4 foi projetado para potência de 2 MVA e é composto basicamente de inversor de frequência com filtro LC, capacitor CC, retificador, circuito de grampeamento de tensão (R_a , D_a e S_a), transformador em série T_s e outro em paralelo T_p . Essa topologia é similar a de um DVR, com exceção da potência do transformador T_p e do circuito de retificação. Além de gerar afundamentos de tensão, este sistema pode gerar também elevações de tensão (*Voltage Swell*). Durante afundamentos de tensão, a energia é absorvida pelo inversor e dissipada no circuito de grampeamento. Por outro lado, quando em elevação de tensão, a energia é suprida pelo transformador T_p e pelo retificador.

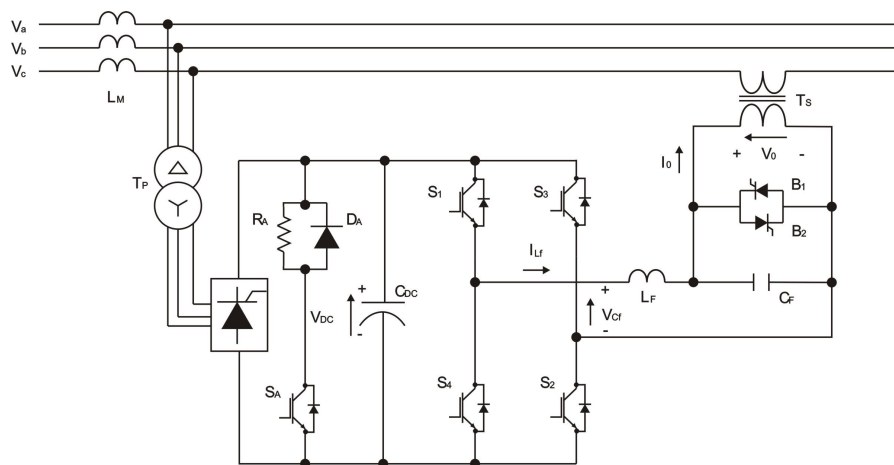


Figura 1.4 – Gerador de afundamento de tensão com inversor em série (Chung, 2004)

O gerador proposto neste trabalho de dissertação possui topologia semelhante à utilizada em Chung (2004). O gerador é baseado na injeção de tensão em série utilizando inversores de frequência, como em Chung (2004). Contudo, a topologia não consta de apenas um inversor por fase. O gerador de afundamentos proposto utiliza-se de três inversores de frequência por fase, que irão compor a tensão a ser injetada na rede. A formação da tensão injetada baseia-se em seus componentes simétricos. Logo, cada inversor corresponde a um determinado componente simétrico:

- de seqüência positiva,
- de seqüência negativa,
- e de seqüência zero.

Trata-se de uma topologia usual na aplicação de inversores de frequência em série, mas inédita em relação ao emprego da topologia em componentes simétricos.

1.2 – CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Nesse capítulo 1 é apresentada uma contextualização do trabalho, com uma síntese da história do desenvolvimento dos estudos relativos a afundamentos de tensão e dos tipos de geradores de afundamentos de tensão existentes na literatura.

No capítulo 2 são mostrados quais os principais distúrbios em qualidade de energia e as características de afundamentos de tensão, tais como: origem, efeitos, formas de propagação e duração. Além disso, o capítulo expõe os tipos de afundamentos de tensão propostos por Bollen (2000), os quais serão adotados como os tipos de afundamentos a serem empregados como referências para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3 é apresentada a concepção do gerador de afundamentos de tensão, enfatizando sua topologia e os desenvolvimentos matemáticos necessários para produzir todos os tipos de afundamentos de tensão propostos.

No capítulo 4 é apresentado como foi feita a especificação e dimensionamento dos componentes do gerador de afundamentos. Além disso, são apresentadas algumas simulações, executadas no Matlab/Simulink[®], que permitiram fazer observações relativas às particularidades dos diversos tipos de afundamentos de tensão e da topologia proposta para o gerador.

No capítulo 5 é mostrado como o protótipo do gerador de afundamentos de baixa potência foi construído na prática. Além de especificação de componentes e circuitos eletrônicos, o capítulo mostra detalhes da programação do software de controle desenvolvido para o Processador Digital de Sinais (DSP) TMS320F2812. É feita ainda uma análise dos dados coletados a partir dos ensaios executados com o protótipo. Além da análise do afundamento de tensão em si, no capítulo 5 são feitas observações sobre a dinâmica de formação da tensão injetada, a partir das tensões de componente de seqüência positiva, negativa e zero.

No capítulo 6 são expostas as principais conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e dos resultados alcançados e são propostas algumas aberturas para futuros trabalhos.

No apêndice 1 são apresentados os artigos publicados durante o período de desenvolvimento da dissertação. O primeiro artigo, apresentado no 9º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP 2007 páginas 256-260), apresenta o funcionamento e a topologia do gerador proposto e as primeiras simulações realizadas. O segundo artigo, aprovado para a VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (Induscon 2008), mostra além dos primeiros resultados experimentais, as ferramentas e métodos utilizados na construção do protótipo.

No apêndice 2 são analisadas propagações de afundamentos de tensão em transformadores com diferentes tipos de conexão.

No apêndice 3 foram anexadas partes do código do programa desenvolvido para controle dos inversores do gerador proposto.

Capítulo 2

QUALIDADE DA ENERGIA E AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

2.1 – CONCEITOS EM QUALIDADE DA ENERGIA

2.1.1 – Transitórios

Transitórios são distúrbios de tensão em que as variações são de curta duração (menor que 1ms). Os transitórios são divididos em dois tipos:

- Transitórios impulsivos: são variações súbitas e unidirecionais (positiva ou negativa) do estado permanente da tensão e/ou corrente, como apresentado na figura 2.1. Esses distúrbios também são conhecidos como surtos ou *spikes*. As principais causas são: fenômenos atmosféricos (raios), aterramento pobre, chaveamento de cargas indutoras, descargas eletrostáticas. (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

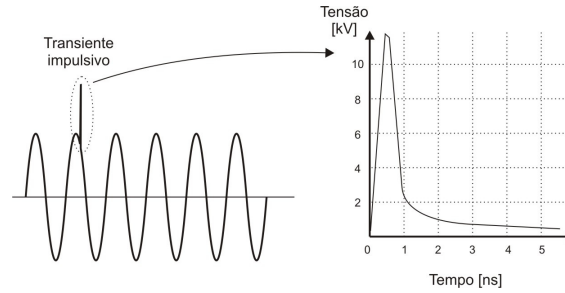


Figura 2.1 – Transiente ou transitório impulsivo (Seymor, 2005)

- Transitórios oscilatórios: são variações súbitas e bidirecionais (positiva e negativa) do estado permanente da tensão e corrente, sem alteração na frequência, conforme ilustra a figura 2.2. Esses fenômenos aparecem a partir de modificações na configuração elétrica do sistema, tais como manobras em linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores, ligamento de transformadores e outras (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

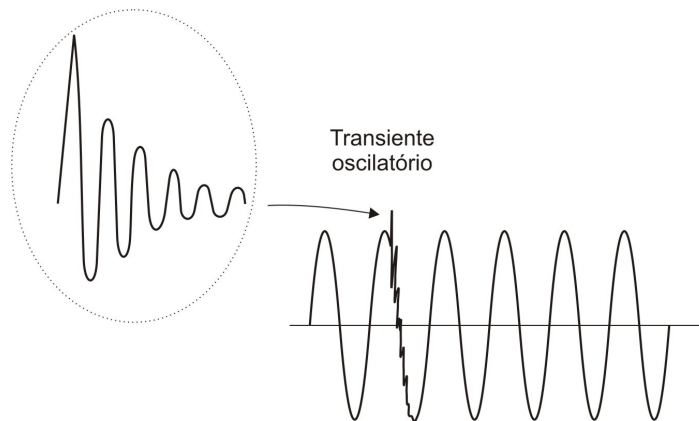


Figura 2.2 – Transientes oscilatórios (Seymor, 2005)

2.1.2 – Variações de Curta Duração

Esses distúrbios são caracterizados por variações de curta duração (geralmente menores que 1 minuto) na tensão. De acordo com o tempo de duração do fenômeno, são classificadas em: instantâneas, com durações de 0,5 a 30 ciclos da rede; momentâneas, com durações entre 30 ciclos da rede e 3 segundos e temporárias que duram de 3 segundos a 1 minuto. As origens desses distúrbios são diversas, entre as quais, citam-se as faltas elétricas no sistema (que podem ser ocasionadas por raios, ventos fortes, animais, árvores, acidentes com veículos) e o ligamento de grandes cargas (como motores de grande potência). Dependendo da localização da falta e das condições operacionais do sistema, podem-se ter

elevações de tensão (*Swell*), afundamentos de tensão (*Sag*) ou interrupções (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

- Interrupções: são reduções de tensão a valores menores que 0,1 pu com duração menor que 1 minuto, tal como a figura 2.3. As interrupções são causadas por faltas elétricas no sistema e originam-se da atuação de dispositivos de proteção após a ocorrência de uma falta ou sobrecarga (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

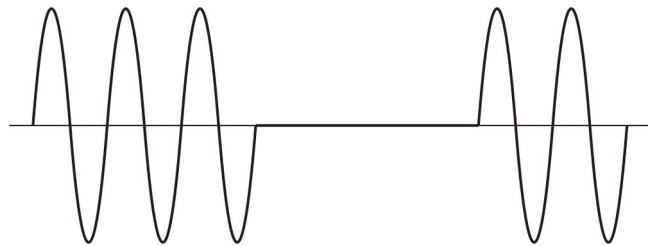


Figura 2.3 – Interrupção

- Afundamento de tensão (*sag*): são reduções momentâneas do valor eficaz da tensão da ordem de 0,1 a 0,9 pu, com duração de 0,5 ciclo da rede a 1 minuto, como ilustrado na figura 2.4. São causadas por descargas atmosféricas, curtos-circuitos e partidas de grandes cargas, como motores de grande potência. Normalmente, esses distúrbios causam o desligamento de equipamentos eletro-eletrônicos e conseqüentemente, a parada em processos produtivos. Os mesmos métodos de eliminação de interrupções podem ser utilizados para eliminar os afundamentos, acrescentando alguns equipamentos de potências, tais como DVR (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

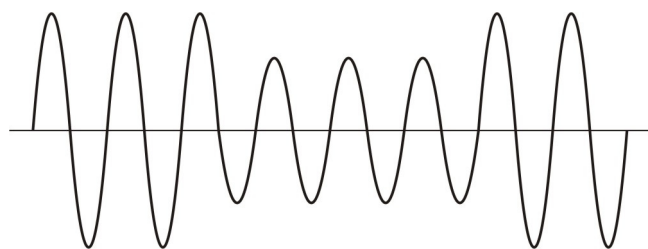


Figura 2.4 – Afundamento de tensão

Por serem o objeto de estudo dessa dissertação, os afundamentos de tensão serão analisados posteriormente.

- Elevações de tensão (*Swell*): são elevações no valor eficaz de tensão da ordem de 1,1 a 1,8 pu com durações de 0,5 ciclo de rede a 1 minuto, conforme apresentado na figura 2.5.

Elevações de tensão são oriundas de falta desequilibrada no sistema, desligamentos de grandes cargas e motores de grande potência e entrada de bancos de capacitores e causam falhas no isolamento e queimas de equipamentos eletro-eletrônicos (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

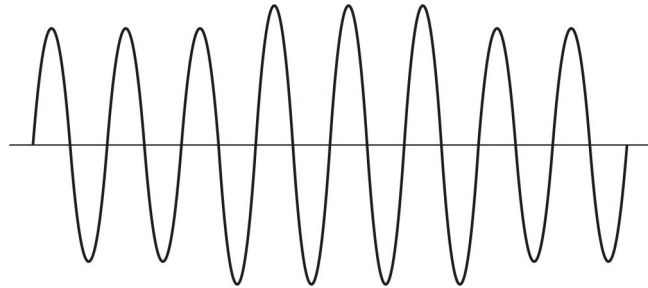


Figura 2.5 – Elevação de tensão

2.1.3 – Variações de Longa Duração

São variações na tensão eficaz da tensão com durações maiores que 1 minuto. Logo, são considerados distúrbios de regime permanente. São classificadas em: sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

- Interrupções sustentadas: são reduções de tensão a zero com durações maiores que 1 minuto. São de natureza permanente e requerem intervenção manual para restabelecimento da energia elétrica do sistema. Normalmente, ocorrem por faltas que não puderam ser recuperadas ou serviços de manutenção da própria concessionária (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

- Subtensões: são reduções da tensão eficaz de 0,8 a 0,9 pu com duração maior que 1 minuto. As causas principais desses distúrbios são: ligamento de grandes cargas, desligamento de bancos de capacitores e sobrecargas em alimentadores. A duração depende da atuação dos equipamentos de regulação da tensão, tais como transformadores com ajustes de *tap*, que retornam a tensão em seus valores nominais (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

- Sobretensões: são elevações da tensão eficaz de 1,1 a 1,2 pu com durações maiores que 1 minuto. As causas principais são: desligamento de grandes cargas, ligamento de bancos de capacitores e ajuste incorreto de *tap* de transformadores (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

2.1.4 – Desequilíbrios de Tensão

Desequilíbrios de tensão ocorrem em sistemas trifásicos quando as amplitudes das fases são desiguais entre si. Suas causas são: distribuição não uniforme de cargas monofásicas, anomalias em banco de capacitores (um fusível queimado em alguma fase), transformadores com impedâncias diferentes, contatos e conexões oxidados, entre outras (Carvalho, 1997) e (Souza, 2002).

Existem duas maneiras de avaliação do grau de desequilíbrio de um sistema trifásico. Uma forma é relacionar o valor da tensão medida em relação à média das tensões nas três fases. A outra maneira é relacionar os componentes simétricos, já que essa teoria afirma que um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados, sendo denominados seqüência positiva, negativa e zero. No capítulo 3 apresenta-se a teoria de componentes simétricos.

2.1.5 – Distorção Harmônica

A distorção harmônica relaciona o grau de variação da forma de onda da tensão em relação a uma referência senoidal pura. Pode haver os seguintes tipos de distorções: harmônicas e inter-harmônicas, corte (*notch*), ruídos, desvio no nível CC (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

- Harmônicos: são formas de onda de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, conforme a forma de onda da figura 2.6(a). Os harmônicos, como se vê na figura 2.6(b), somam-se à componente fundamental causando a distorção da forma de onda resultante. Os harmônicos aparecem devido a utilização de cargas não-lineares tais como fornos de indução, conversores estáticos, maquinas de solda, lâmpadas fluorescentes, etc.

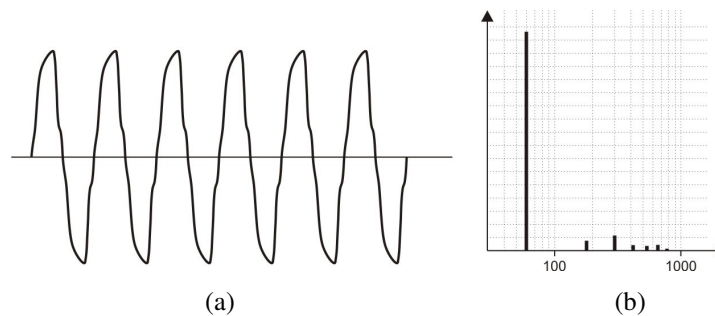


Figura 2.6– Harmônicos

- Inter-harmônicos: são sinais cujas frequências não guardam relação direta com a frequência nominal. Inter-harmônicos podem aparecer em frequências discretas ou em um espectro de banda larga e têm como origens conversores estáticos de frequência, sistemas de comunicação que utilizam as linhas de energia como meio de transmissão (*carriers*) e motores de indução. Quando as frequências que surgem são menores que a fundamental, são denominadas sub-harmônicos.

- Corte (*Notch*): normalmente, surgem da operação de equipamentos de eletrônica de potência (em especial os conversores trifásicos), quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante esse período, ocorre um curto-circuito momentâneo entre as duas fases. A tensão fica distorcida como na figura 2.7.

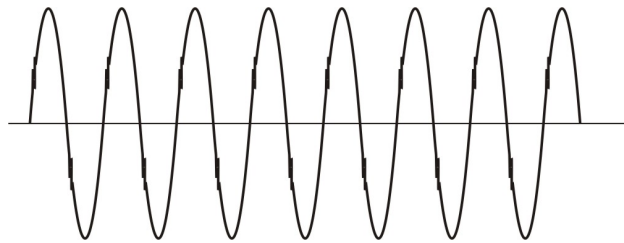


Figura 2.7 – Corte (*Notch*)

- Ruídos: são quaisquer sinais indesejados com amplo espectro de frequências (menor que 200kHz) e baixas amplitudes, como ilustrado na figura 2.8. Os ruídos são causados por comutadores eletrônicos, fornos a arco, equipamentos de solda, resultados de instalações inadequadas de componentes no sistema da concessionária, etc. Ruídos podem ser minimizados por meio de blindagens eletrostáticas e filtros convenientemente projetados e instalados.

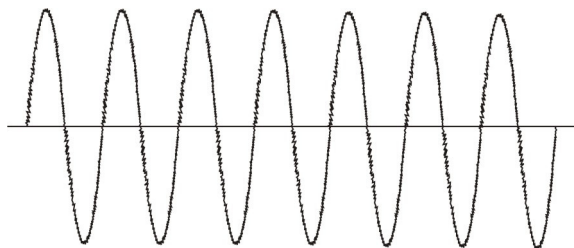


Figura 2.8 – Ruídos

- Desvio do nível CC: é a presença de tensão ou corrente CC em sistemas CA e ocorrem devido ao efeito de retificação de meia onda, conforme a figura 2.9. Seus efeitos são: saturação de transformadores, danos em isolações e outros.

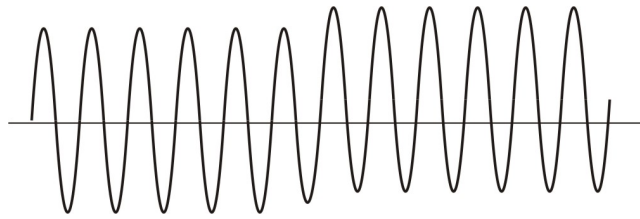


Figura 2.9 – Desvio do nível CC

2.1.6 – Flutuações de Tensão

Flutuações de tensão são variações cíclicas ou aleatórias da amplitude da tensão na faixa de 0,95 a 1,05 pu, como mostrado na figura 2.10. Cargas que apresentam variação de corrente, tais como fornos a arco, laminadores e máquinas de soldas, são as principais causadoras desse fenômeno. Flutuações de tensão podem ser notadas pelo olho humano em sistemas de iluminação e recebem a denominação de *Flicker* (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

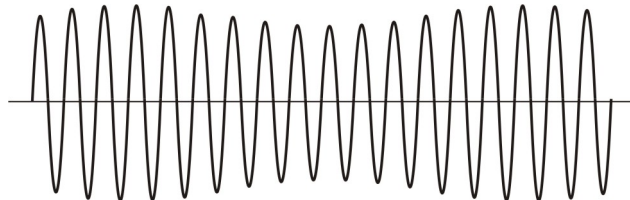


Figura 2.10 – Flutuação de tensão

2.1.7 – Variações de Freqüência

Variações de freqüência são desvios da freqüência de um sinal em relação à freqüência nominal, como ilustrado na figura 2.11. Em sistemas elétricos, a freqüência é relacionada pela rotação do gerador. Por esse motivo, esse fenômeno é mais comum em sistemas isolados e pequenos sistemas de geração, onde grandes variações de carga tendem a frear o gerador, cujo regulador de velocidade não é rápido o suficiente para corrigir a rotação. Em sistemas de geração maiores, isso não ocorre devido ao grande número de geradores operando em paralelo (Carvalho, 1997), (Souza, 2002) e (Seymor, 2005).

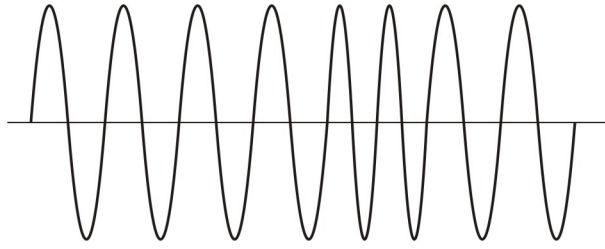


Figura 2.11 – Variações de frequência

2.1.8 – Resumo Geral dos Conceitos

A tabela 2.1 apresenta um resumo dos conceitos de qualidade da energia.

Tabela 2.1 – Resumo dos conceitos em qualidade da energia

Categorias	Duração	Magnitude
Transitórios		
Impulsivos	5 ns a 1 ms	
Oscilatórios	5 us a 50 ms	0-4 pu
Variações de curta duração		
Interrupção	0,5 ciclo a 1 minuto	< 0,1 pu
Afundamento de tensão	Idem	0,1 a 0,9 pu
Elevação de tensão	Idem	1,1 a 1,8 pu
Variações de longa duração		
Interrupção sustentada	> 1 minuto	0,0 pu
Subtensão	Idem	0,8 a 0,9 pu
Sobretensão	Idem	1,1 a 1,2 pu
Desequilíbrios	Estado permanente	0,01 a 0,02 pu
Distorção de forma de onda		
Harmônicos	Estado permanente	0 a 0,2 pu
Corte	Idem	
Ruídos	Idem	0 a 0,01 pu
Desvio de nível CC	Idem	0 a 0,001 pu
Flutuação de tensão	Intermitente	0,001 a 0,07 pu
Variações de frequência	< 10 segundos	

2.2 – AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO

2.2.1 – Conceitos e Definições

Existem duas entidades que definem os conceitos relacionados a afundamentos de tensão: o *Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE) e a *International Electrotechnical Commission* (IEC). Embora tratem do mesmo tema, existem algumas divergências entre as definições e conceitos de cada entidade (Carvalho, 1997) e (Leborgne, 2003).

O IEEE, por meio da norma IEEE 1159 (1995), define afundamento de tensão como sendo uma redução no valor eficaz da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 pu, durante um período de tempo entre 0,5 ciclo da rede e 60 segundos. De acordo com a duração da perturbação, o IEEE a classifica em três tipos:

- Instantâneos: duração entre 0,5 ciclo e 30 ciclos,
- Momentâneos: duração entre 30 ciclos e 3 segundos,
- Temporários: duração entre 3 segundos e 60 segundos.

Segundo o IEEE a intensidade ou profundidade do afundamento de tensão é definida pela menor tensão remanescente durante a ocorrência da perturbação, ou seja, um afundamento de tensão de 0,8 pu significa que a tensão foi reduzida para o patamar de 0,8 pu. Quando a perturbação é inferior a 0,1 pu é considerada uma interrupção.

Por outro lado, a IEC define a intensidade do afundamento de tensão como sendo a queda de tensão, em valores eficazes, entre 0,1 e 0,99 pu durante um período de tempo de 0,5 ciclo até alguns segundos. Nesse caso, um afundamento de tensão de 0,8 pu significa que a tensão foi reduzida para 0,2 pu. Perturbações com intensidades maiores que 0,99 pu, ou seja, tensão remanescente menor que 0,01 pu são consideradas interrupções.

Para este trabalho, as definições e conceitos estabelecidos pelo IEEE serão tomados como referências. Na figura 2.12 é mostrado um afundamento de tensão ocorrido em um sistema trifásico real em que a intensidade foi de 0,2 pu e duração de aproximadamente 110 ms.

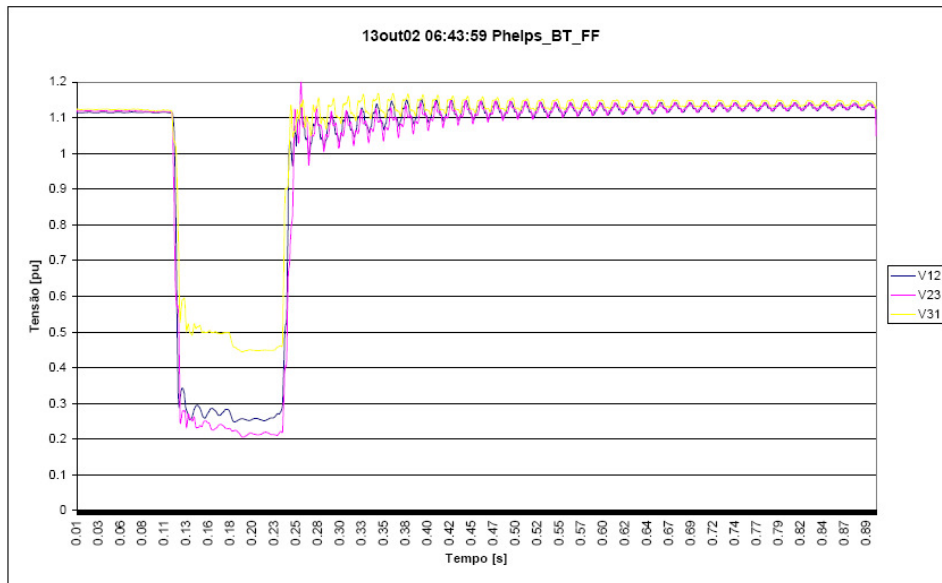


Figura 2.12 – Afundamento de tensão em um sistema real (Leborgne, 2003)

2.2.2 – Normalização Aplicável

As normas que tratam de afundamentos de tensão são variadas. Serão citadas algumas que possuem maior relevância para o trabalho desenvolvido (Leborgne, 2003).

- IEEE 1159 (1995) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”: o objetivo da norma é auxiliar na monitoração e interpretação dos resultados obtidos na medição de perturbações da qualidade de energia elétrica. A norma define cada perturbação em função das características dos eventos registrados, tais como intensidade e duração.

- IEEE 446 (1995) “IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power System for Industrial and Commercial Applications”: a norma apresenta os conceitos de afundamentos de tensão com enfoque na sensibilidade de equipamentos e os efeitos de partidas de motores.

- IEEE 493 (1997) “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power System”: a norma propõe metodologias para cálculo de parâmetros de afundamentos de tensão, tais como intensidade, duração e frequência de ocorrência. A intensidade do afundamento pode ser obtida pelo cálculo do curto-circuito quando se conhece os valores das impedâncias da rede, impedância e localização da falta. A duração pode ser estimada conhecendo-se os tempos de atuação dos sistemas de proteção. E, por meio de estatísticas de faltas, pode-se estimar a quantidade de afundamentos em determinada barra do sistema.

- IEEE 1250 (1995) “IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances”: a norma descreve os efeitos de afundamentos de tensão em computadores e demais equipamentos sensíveis que possuem dispositivos de estado sólido para conversão de energia.

- IEEE 1346 (1998) “IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment”: a norma apresenta uma metodologia para avaliação técnica e financeira, quando da ocorrência de afundamentos de tensão, da compatibilidade entre a rede e os processos industriais.

- IEC 61000 “Electromagnetic Compatibility”: o objetivo é descrever fenômenos e fornecer parâmetros que auxiliem fabricantes e usuários de equipamentos eletro-eletrônicos com relação à compatibilidade eletromagnética.

- IEC 61000-2-1 (1990) clause 8 “Voltage Dips and Short Interruption”: a norma descreve brevemente os afundamentos de tensão, considerando os parâmetros intensidade e duração; além de analisar as causas e os efeitos de afundamentos de tensão sobre equipamentos sensíveis.

- IEC 61000-4-11 (1994) “Testing and Measuring Techniques – Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests”: a norma descreve os procedimentos e equipamentos a serem testados para avaliação de imunidade eletromagnética.

- SEMI F47-0200 “Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”: a norma indica o nível de imunidade que os processos de fabricação de semicondutores devem possuir. A figura 2.13 ilustra a curva de tolerância especificada para afundamentos de tensão com duração entre 50 ms e 1 s.

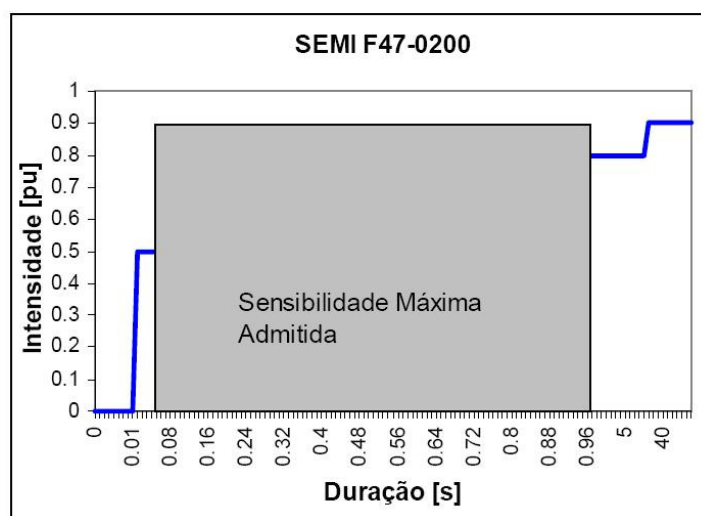


Figura 2.13 – Curva de tolerância da SEMI F47-0200 (Leborgne, 2003)

- SEMI F42-0999 “Test Method for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity”: a norma define a metodologia de teste para determinar a tolerância dos equipamentos frente a afundamentos de tensão, visando o atendimento da SEMI F47.

- Norma industrial CBEMA: a norma foi proposta pela Indústria da Tecnologia da Informação (ITI), antiga Associação dos Fabricantes de Equipamentos de Computação (CBEMA) e define as tolerâncias de afundamentos de tensão que os equipamentos fabricados pelas empresas da associação devem possuir. A curva da figura 2.14 define no plano tensão x tempo duas áreas: uma área superior onde se encontram os eventos que não devem sensibilizar os equipamentos e uma área inferior onde se encontram os eventos que podem afetar o funcionamento normal dos equipamentos.

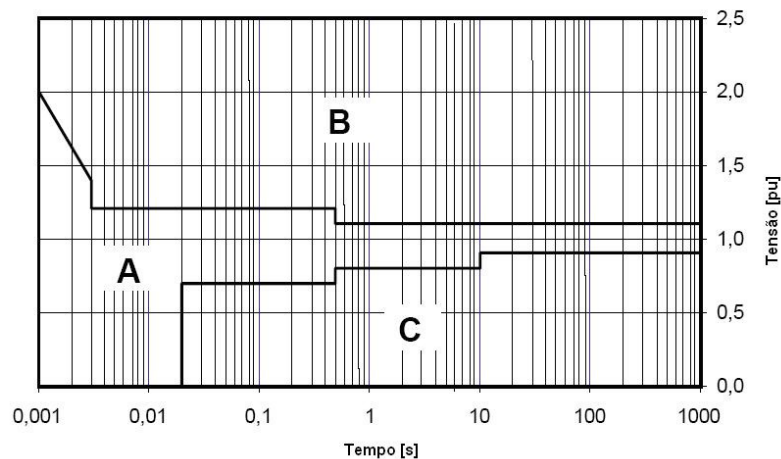


Figura 2.14 – Curva CBEMA de 2000 (Leborgne, 2003)

2.2.3 – Origem dos Afundamentos de Tensão

As origens dos afundamentos de tensão estão relacionadas com partida de motores de grande potência, ligamento de transformadores e ocorrência de curtos-circuitos na rede (faltas elétricas) (Bollen, 2000) e (Leborgne, 2003).

Entre essas causas, as faltas elétricas são as principais causadoras devido aos milhares de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e distribuição. As faltas em linhas aéreas ocorrem principalmente devido a incidência de descargas atmosféricas. Logo, a ocorrência de afundamentos de tensão está intimamente relacionada com o nível cerâmico da região em que as linhas de transmissão e distribuição estão instaladas. Além disso, curtos-circuitos podem ocorrer devido a queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves, contaminação de isoladores, falhas humanas e outros.

As faltas elétricas são classificadas em: trifásicas (FFF), trifásicas a terra (FFFT), bifásicas (FF), bifásicas a terra (FFT) e fase-terra (FT). As faltas trifásicas e trifásicas a terra são simétricas e por isso também geram afundamentos de tensão simétricos e, embora produzam afundamentos de tensão mais severos, são mais raras de acontecer.

As faltas bifásicas, bifásicas a terra e fase-terra são mais frequentes e geram afundamentos de tensão menos severos, porém assimétricos e desequilibrados.

A localização da falta elétrica influencia no impacto do afundamento de tensão nos consumidores. Por abrangerem uma maior extensão territorial, as faltas no sistema de transmissão afetam mais consumidores que as do sistema de distribuição.

2.2.4 – Medição da Magnitude do Afundamento de Tensão

Atualmente o método mais usual para medição da magnitude de um afundamento de tensão é a medida da tensão eficaz, que é feita a partir dos dados amostrados por meio de um coletor de dados (Bollen, 2000). A partir desses dados da tensão em função do tempo, calcula-se a tensão eficaz de acordo com a equação 2.1.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (2.1)$$

Onde N é o número de amostras por ciclo e v_i são as amostras da tensão em função do tempo.

Para os cálculos, é recomendado utilizar meio ciclo ou múltiplo de meio ciclo. Cálculos com duração diferente dessa recomendação produzirão oscilações com frequência igual ou duas vezes a da fundamental. A escolha da duração do período de cálculo influencia nas transições do afundamento de tensão: quanto menor a duração, mais rápida será a transição.

2.2.5 – Tensão Pré-falta

Normalmente, utiliza-se a tensão pré-falta como 1 pu. Entretanto, as concessionárias fornecem energia dentro da faixa de 0,95 a 1,05 pu. Por isso, a consideração da tensão pré-

falta e escolha da tensão base é importante para evitar más interpretações de resultados na ocorrência de afundamentos de tensão (Bollen, 2000) e (Leborgne, 2003).

Para a tensão base pode-se usar a tensão nominal, a tensão imediatamente antes do afundamento ou a tensão de fornecimento estabelecida por contrato. Para evitar más interpretações, recomenda-se utilizar a tensão imediatamente antes do afundamento como tensão base. Desse modo, sabe-se qual realmente foi a magnitude do afundamento.

2.2.6 – Duração dos Afundamentos de Tensão

A duração do afundamento de tensão gerado por um curto-circuito está relacionada aos tempos de sensibilidade e de atuação dos sistemas de proteção e de duração do arco elétrico nos disjuntores. Conforme o IEEE, a duração de um afundamento de tensão pode ser de meio-ciclo da rede a até 60 segundos (Bollen, 2000) e (Leborgne, 2003).

Geralmente, faltas em sistemas de transmissão duram menos que faltas em sistemas de distribuição e, por isso, são utilizados circuitos de proteção mais rápidos. Por isso, os afundamentos de maiores durações acontecem na ocorrência de faltas no sistema de distribuição.

2.2.7 – Frequência de Ocorrência

O afundamento de tensão é um evento totalmente aleatório, cuja frequência de ocorrência de afundamentos de tensão está relacionada com a origem dos curtos-circuitos (Leborgne, 2003).

Existem duas maneiras de quantificar afundamentos de tensão. A primeira considera a quantidade total de afundamentos de tensão, resultando em um número sobre-estimado de eventos. O segundo modo é associar os afundamentos de tensão à falta que lhes deram origem. Por exemplo, no caso de uma falta no sistema de distribuição, vários consumidores sentirão o fenômeno e cada afundamento sentido será adicionado à quantidade total de afundamentos, levando ao número sobre-estimado de afundamentos de tensão, sendo que todos foram causados pela mesma falta elétrica.

2.2.8 – Sistemas Trifásicos com Falhas

Os afundamentos de tensão são oriundos de falhas elétricas tais como: falhas trifásicas, bifásicas, bifásicas a terra e monofásicas. Cada tipo de falta resulta em um determinado arranjo das três tensões do sistema trifásico, dependendo das características da carga e das conexões de transformadores. Os tipos listados nessa seção são referentes aos afundamentos medidos nos terminais do equipamento (Bollen, 2000).

A classificação é baseada em algumas considerações:

- as impedâncias positiva e negativa são idênticas,
- a componente de seqüência zero da tensão não se propaga nos terminais no equipamento, resultando em tensões fase-neutro,
- as correntes na carga antes, durante e após a falta são desprezadas.

2.2.8.1 – Falhas Monofásicas

As tensões fase-neutro devido a uma falta monofásica são dadas pela equação 2.2. Todas as equações estão em pu e “V” é o valor da magnitude do afundamento de tensão, também em pu.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

O diagrama fasorial desse sistema é mostrado na figura 2.15 e representam as tensões nos terminais de um equipamento ligado em estrela.

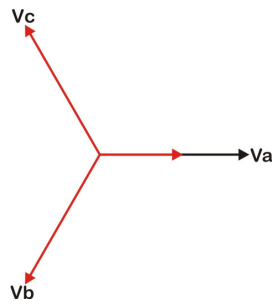


Figura 2.15 – Diagrama fasorial de falta monofásica – tensões fase-neutro

Caso a carga esteja conectada em delta, têm-se os fasores das equações 2.3, Mais detalhes da transformação em (Bollen, 2000, Cap. 4, pág. 188).

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)\sqrt{3}j \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)\sqrt{3}j
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

O diagrama fasorial das tensões fase-fase da equação 2.3 é representado na figura 2.16.

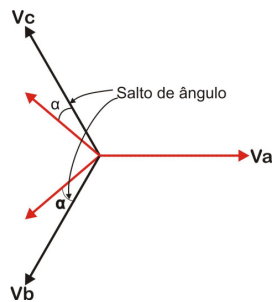


Figura 2.16 – Diagrama fasorial de falta monofásica com carga em delta – tensões fase-fase

Os fasores mostram que numa carga conectada em delta, duas fases sofrem com o afundamento causado por falta monofásica. Além disso, ocorre também salto de ângulo nas duas fases que são afetadas.

2.2.8.2 – Falta Bifásicas

Em uma falta bifásica, as tensões fase-neutro na carga ficarão de acordo com a equação 2.4.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

O diagrama fasorial da figura 2.17 representa os fasores fase-neutro da equação 2.4.

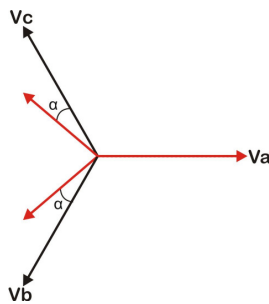


Figura 2.17 – Diagrama fasorial para faltas bifásicas – tensões fase-neutro

Para uma carga em delta, as tensões entre fases durante uma falta bifásica são representadas na equação 2.5.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V \\
 V_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j \\
 V_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Na figura 2.18 são representados os fasores fase-fase da equação 2.5.

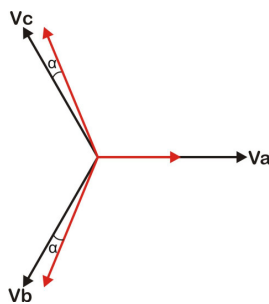


Figura 2.18 – Diagrama fasorial para carga em delta – tensões fase-fase

Observa-se que, para uma falta bifásica, uma carga em estrela tem duas fases alteradas e a máxima profundidade do afundamento é de 50% (quando $V=0$) e uma carga em delta tem suas três fases alteradas, sendo que uma pode chegar a tensão remanescente nula.

2.2.8.3 – Faltas Trifásicas

Em uma falta trifásica, as tensões alteram-se simetricamente, como na equação 2.6.

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj \\ V_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj \end{aligned} \quad (2.6)$$

O diagrama de fasores da equação 2.6 é representado na figura 2.19.

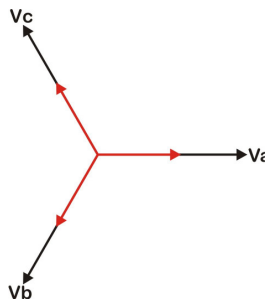


Figura 2.19 – Diagrama fasorial para faltas trifásicas

As faltas bifásicas a terra serão analisadas no item 2.2.11.1, após a definição dos tipos de afundamento de tensão baseados em faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas.

2.2.9 – Conexões de Transformadores

Existem muitas variações de conexão em transformadores. Contudo, para explicar o que ocorre durante um afundamento de tensão, é suficiente explicar três tipos de transformadores (Bollen, 2000), (Leborgne, 2003), (Brito) e (Leão, 2005).

1) Transformadores que não filtram a componente de seqüência zero e não causam defasagem angular. As conexões típicas são: $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$, $Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$. Esse modelo de transformador será denotado por tipo 1.

2) Transformadores que apenas filtram a componente de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental e são fabricados de modo a não introduzir defasagem angular. As conexões são: Y-Y, Δ - Δ , Y_{aterrado} -Y, Y- Y_{aterrado} . Os transformadores com essas características serão nomeados por tipo 2.

3) Transformadores cujas tensões nas bobinas em um dos enrolamentos é função da diferença fasorial entre duas tensões aplicadas nas bobinas do outro enrolamento. As conexões desses transformadores são: Y- Δ , Δ -Y, Y_{aterrado} - Δ , Δ - Y_{aterrado} . Esses transformadores filtram a componente de seqüência zero da tensão de freqüência fundamental e introduzem defasagem angular entre o primário e o secundário. Nesse caso, o transformador será denotado por tipo 3.

Esses três tipos de transformadores podem ser representados matematicamente pelas matrizes da equação 2.7.

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_2 &= \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \\ T_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

As tensões do secundário de um transformador V_a^2 , V_b^2 e V_c^2 serão como na equação 2.8.

$$\begin{bmatrix} V_a^2 \\ V_b^2 \\ V_c^2 \end{bmatrix} = T_x \cdot \begin{bmatrix} V_a^1 \\ V_b^1 \\ V_c^1 \end{bmatrix}, \text{ com } x=1, 2 \text{ ou } 3. \quad (2.8)$$

Onde V_a^1 , V_b^1 e V_c^1 são as tensões do primário do transformador.

A matriz T_1 é a matriz identidade e por isso, as tensões no secundário serão iguais às do primário. A matriz T_2 filtra a componente zero, que é definida por $\frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$. A matriz T_3 é uma transformação estrela-delta. Nota-se que aplicando a matriz T_3 duas vezes

obtem-se o mesmo resultado da aplicação de uma matriz T_2 , ou seja, $T_3^2=T_2$. Para a engenharia, usar dois transformadores Δ -Y em cascata tem o mesmo efeito de afundamento de tensão da utilização de um transformador Δ - Δ .

2.2.10 – Influência do Tipo de Falta, do Tipo de Carga e das Conexões de Transformadores em Afundamentos de Tensão

Um afundamento de tensão nos terminais da carga depende de vários fatores: tipo da falta, tipo de conexão da carga e o tipo de conexão do transformador (Bollen, 2000). Sendo assim, analisou-se como se comporta um afundamento de tensão frente a esses fatores de influência.

a) Falta monofásica, carga em estrela, sem transformador: esse afundamento de tensão tem o comportamento dos fasores da equação 2.2 e será denotado por AT1. Um transformador tipo 1 resultará no mesmo tipo de afundamento.

b) Falta monofásica, carga em delta, sem transformador: é o afundamento de tensão com o comportamento dos fasores da equação 2.3 e será denotado por AT2. Como no caso anterior, um transformador tipo 1 não alterará o comportamento do afundamento de tensão.

c) Falta monofásica, carga em estrela, transformador tipo 2: o transformador tipo 2 remove a seqüência zero das tensões, que é dada por $\frac{1}{3}(V-1)$, resultando no afundamento AT3, representado na equação 2.9.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V \\ V_b &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j \\ V_c &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j \end{aligned} \quad (2.9)$$

d) Falta monofásica, carga em delta, transformador tipo 2: As tensões fase-fase da carga em delta não possuem componente de seqüência zero. Por isso, não há influência do transformador. Portanto, o afundamento é do tipo AT2.

e) Falta monofásica, carga em estrela, transformador tipo 3: O transformador tipo 3 muda as tensões de fase para tensões de linha. Por isso, uma carga em estrela no secundário

sente o mesmo afundamento que uma carga em delta no primário. No caso, o afundamento tipo AT2.

f) Falta monofásica, carga em delta, transformador tipo 3: Nesse caso, há uma transformação da carga de estrela para delta e outra transformação do primário para o secundário. Ambas as transformações são descritas pela matriz T_3 e por isso, resulta em uma transformação T_2 . Por isso, o afundamento de tensão numa carga em delta é o mesmo que um afundamento de tensão numa carga em estrela e transformador T_2 , ou seja, um afundamento tipo AT3.

g) Falta bifásica, carga em estrela, sem transformador: esse afundamento possui o comportamento dos fasores da equação 2.4 e será denotado AT4.

h) Falta bifásica, carga em delta, sem transformador: esse afundamento possui o comportamento dos fasores da equação 2.5 e será denotado AT5.

i) Falta bifásica, carga em estrela, transformador tipo 2: não há nenhum efeito, pois faltas bifásicas não resultam em seqüência zero, ou seja, afundamento tipo AT4.

j) Falta bifásica, carga em delta, transformador tipo 2: Como no caso anterior, o afundamento é do tipo AT5.

k) Falta bifásica, carga em estrela, transformador tipo 3: Uma carga em estrela no secundário de um transformador tipo 2 sofre o mesmo afundamento de um carga em delta no primário, afundamento tipo AT5.

l) Falta bifásica, carga em delta, transformador tipo 3: Resulta em duas transformações T_3 , ou seja, uma transformação T_2 , que só elimina a seqüência zero. Como nesse caso não há seqüência zero na tensão, o afundamento é do tipo AT4.

A tabela 2.2 apresenta o que acontece com cada afundamento de tensão quando o mesmo se propaga pelos três tipos de transformadores.

Tabela 2.2 – Tipo de afundamento e conexão de transformadores

Tipo do afundamento	Tipo do transformador		
	1	2	3
AT1	AT1	AT3	AT2
AT2	AT2	AT2	AT3
AT3	AT3	AT3	AT2
AT4	AT4	AT4	AT5
AT5	AT5	AT5	AT4

No apêndice 2 é feita uma análise da propagação de um afundamento de tensão monofásico em uma malha elétrica qualquer (Carvalho Filho, 2007).

2.2.11 – Classificação dos Afundamentos de Tensão

A partir do estudo da influência do tipo de falta, conexão da carga e transformador, (Bollen, 2000) definiu sete tipos de afundamentos de tensão, denotados de A a G.

Os afundamentos denotados por AT2 e AT4 são semelhantes, pois substituindo V por $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$ em AT4, obtém-se AT2.

AT2

$$V_a = 1$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)\sqrt{3}j$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)\sqrt{3}j$$

AT4

$$V_a = 1$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj$$

O mesmo ocorre com AT3 e AT5.

AT3

$$V_a = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$$

$$V_b = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$V_c = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

AT5

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

Como resultado, têm-se três tipos de afundamentos de tensão: AT1, AT4 e AT5. Um quarto tipo de afundamento é o resultante de falta trifásica, como na figura 2.19. Desse modo, são definidos os primeiros quatro tipos de afundamentos de tensão, conforme ilustrado na figura 2.20 e representado fasorialmente na tabela 2.3.

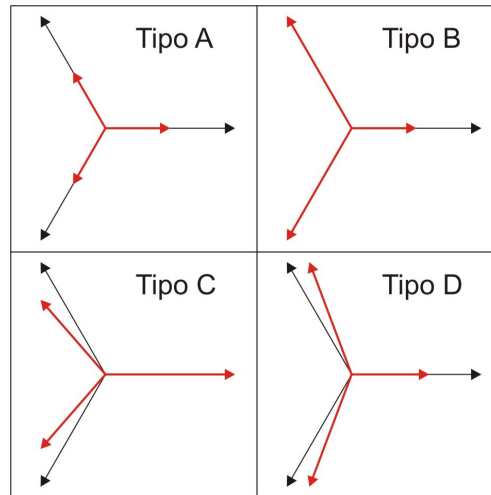


Figura 2.20 – Quatro primeiros tipos de afundamentos de tensão

Tabela 2.3 – Fasores dos quatro primeiros tipos de afundamentos de tensão

<p>Afundamento Tipo A</p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	<p>Afundamento Tipo B</p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$
<p>Afundamento Tipo C</p> $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	<p>Afundamento Tipo D</p> $V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$

As tabelas 2.4 e 2.5 representam como os afundamentos de tensão alteram-se de acordo com o tipo de conexão da carga e o tipo do transformador.

Tabela 2.4 – Variação dos afundamentos de tensão de acordo com a carga

Tipo da falta	Tipo do afundamento	
	Carga em estrela	Carga em Delta
Trifásica	A	A
Bifásica	C	D
Monofásica	B	C*

Tabela 2.5 – Variação dos afundamentos de tensão de acordo com conexão do transformador

Tipo do transformador	Afundamento			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
1	A	B	C	D
2	A	D*	C	D
3	A	C*	D	C

Nos casos em que o tipo do afundamento é acompanhado de *, substitui-se o valor da magnitude V por $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$.

2.2.11.1 – Falhas Bifásicas a Terra

No caso de falhas bifásicas a terra, as tensões remanescentes de um afundamento de tensão serão dadas por 2.10.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj \\
 V_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}Vj
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Após uma transformação T_3 , ou seja, na propagação por um transformador do tipo 3, as tensões serão como na equação 2.11.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V \\
 V_b &= -\frac{1}{2}V - \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{6}V \right)j \\
 V_c &= -\frac{1}{2}V + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{6}V \right)j
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Após duas transformações T_3 ou uma T_2 , têm-se os fasores da equação 2.12.

$$\begin{aligned}
 V_a &= \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V \\
 V_b &= -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\right)V - \frac{\sqrt{3}}{2}Vj \\
 V_c &= -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\right)V + \frac{\sqrt{3}}{2}V
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Esses três tipos de afundamentos são diferentes dos outros quatro e não há como alternar entre um e outro tipo, como mostrado na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Fasores dos três últimos tipos de afundamentos de tensão

Afundamento Tipo E	Afundamento Tipo F
$V_a = 1$	$V_a = V$
$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	$V_b = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$
$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	$V_c = +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V + \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$
Afundamento Tipo G	
$V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$	
$V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	
$V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	

A figura 2.21 ilustra os fasores dos afundamentos de tensão tipo E, F e G. Esses três tipos completam os sete tipos de afundamentos de tensão propostos em (Bollen, 2000).

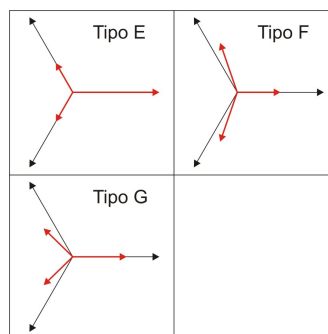






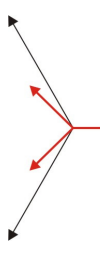


Figura 2.21 – Três últimos tipos afundamentos de tensão

2.2.12 – Resumo dos Tipos de Afundamentos de Tensão

A tabela 2.7 mostra o resumo dos sete tipos de afundamentos de tensão propostos por (Bollen, 2000) e que serão utilizadas para o equacionamento do gerador de afundamentos.

Tabela 2.7 – Resumos dos sete tipos de afundamentos de tensão

 <p>Tipo A $V_a = V$</p> $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	 <p>Tipo B $V_a = V$</p> $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
 <p>Tipo C $V_a = 1$</p> $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	 <p>Tipo D $V_a = V$</p> $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
 <p>Tipo E $V_a = 1$</p> $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	 <p>Tipo F $V_a = V$</p> $V_b = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$ $V_c = +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V + \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$
 <p>Tipo G $V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$</p> $V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	

Capítulo 3

GERADOR DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO BASEADO EM COMPONENTES SIMÉTRICOS

3.1 – FUNCIONAMENTO E TOPOLOGIA

3.1.1 – Componentes Simétricos

Componentes simétricos são particularmente úteis na análise de funcionamento de máquinas elétricas polifásicas, quando alimentadas por sistemas de tensões não equilibradas. O método é fundamentado no Teorema de Fortescue relativo ao desdobramento de sistemas não equilibrados em componentes simétricos (Kerchner, 1968).

O Teorema de Fortescue afirma que um sistema qualquer de fasores trifásicos não equilibrados pode ser resolvido em três sistemas equilibrados de fasores, sendo:

a) um sistema equilibrado de fasores trifásicos com a mesma seqüência de fase do sistema não equilibrado. Esse sistema é denominado de sistema de seqüência positiva,

b) um sistema equilibrado de fasores trifásicos com a seqüência de fase oposta ao sistema não equilibrado. Esse sistema é denominado de sistema de seqüência negativa,

c) um sistema de três fasores monofásicos que são iguais em módulo e a mesma posição em fase de tempo em relação a qualquer eixo de referência dado. A esse sistema, dá-se o nome de sistema de seqüência zero.

Um sistema trifásico não equilibrado possui módulos de seus fasores diferentes, podendo inclusive ser nulos, e fases diferentes de um fasor em relação aos outros. As tensões de um sistema não equilibrado serão denotadas por V_a , V_b e V_c .

Para simplificação na representação dos fasores, utilizar-se-á um operador “ a ”, que é um fasor unitário 120° adiantado em relação ao eixo de referência. Por consequência, “ a^2 ” é um fasor unitário 240° adiantado em relação à referência. A notação segue como na equação 3.1.

$$\begin{aligned} a &= 1/120^\circ \\ a^2 &= 1/240^\circ = 1/-120^\circ \end{aligned} \quad (3.1)$$

Desse modo, um sistema trifásico pode ser representado pela equação 3.2.

$$\begin{aligned} V_b &= aV_a \\ V_c &= a^2V_a = V_a/-120^\circ \\ V_a &= aV_b = V_b/120^\circ \end{aligned} \quad (3.2)$$

O sistema de seqüência positiva é um sistema trifásico equilibrado e por isso, seus fasores possuem o mesmo módulo e são equidistantes 120° um do outro. Na notação será adicionado um sub-índice 1: V_{a1} , V_{b1} , V_{c1} . Pode-se escrever o sistema de seqüência positiva como na equação 3.3.

$$\begin{aligned} V_{b1} &= aV_{a1} \\ V_{c1} &= a^2V_{a1} = V_{a1}/-120^\circ \\ V_{a1} &= aV_{b1} = V_{b1}/120^\circ \end{aligned} \quad (3.3)$$

O sistema de seqüência negativa é um sistema trifásico equilibrado com a seqüência oposta à do sistema não equilibrado. Seus fasores serão denotados por V_{a2} , V_{b2} e V_{c2} e são representados pela equação 3.4.

$$\begin{aligned} V_{b2} &= aV_{a2} \\ V_{c2} &= a^2V_{a2} = V_{a2}/-120^\circ \\ V_{a2} &= aV_{b2} = V_{b2}/120^\circ \end{aligned} \quad (3.4)$$

O sistema de seqüência zero é composto por três fasores idênticos em módulo e fase e serão denotados por V_{a0} , V_{b0} e V_{c0} , com a representação da equação 3.5.

$$\begin{aligned} V_{a0} &= V_{a0} \\ V_{b0} &= V_{a0} \\ V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Os fasores V_a , V_b e V_c são obtidos a partir da soma dos seus respectivos componentes simétricos, conforme equação 3.6.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

A figura 3.1 representa graficamente como são dispostas as tensões V_a , V_b e V_c e seus correspondentes componentes simétricos.

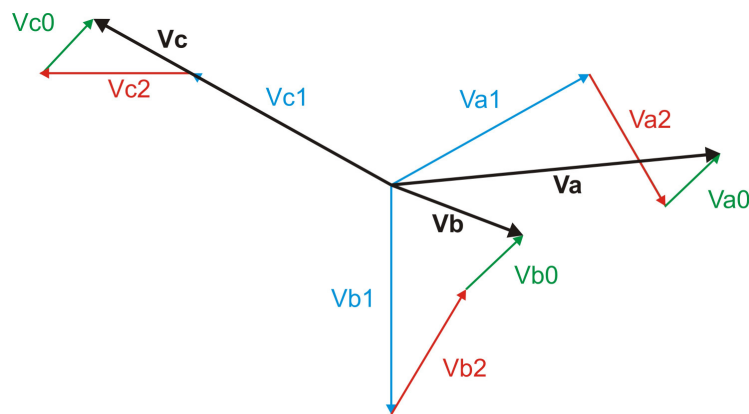


Figura 3.1 – Componentes simétricos

A partir dos fasores não equilibrados, podem-se obter seus componentes simétricos. Como os fasores de uma mesma seqüência somente se diferenciam pela fase, calcula-se somente o fasor de uma fase. Os outros fasores possuem o mesmo módulo e são defasados de $\pm 120^\circ$, dependendo da seqüência de fase.

Calculando-se para V_a , tem-se a equação 3.7.

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \\
 V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Com as equações 3.7 é possível o cálculo dos componentes simétricos de qualquer sistema trifásico equilibrado ou não-equilibrado.

3.1.2 – Topologia

A topologia do gerador de afundamentos momentâneos de tensão proposto é baseada na injeção de tensão de modo a originar o afundamento com as características desejáveis. Para gerar essa tensão, serão utilizados inversores de frequência conectados em série com a tensão original da rede como em (Naetiladdanon, 2005), (Wang, 2005), (Ahn, 2005), (Silva, 2001), (Chung, 2004).

A topologia por fase é mostrada na figura 3.2 e é composta de três inversores de frequência PWM, fonte CC, transformadores e chaves *bypass*. Os inversores de frequência representam cada componente simétrico, enquanto que os transformadores são responsáveis pela injeção das tensões geradas pelos inversores na rede. As chaves *bypass* são tiristores em antiparalelo e têm as finalidades de definir o início e o final do afundamento de tensão e mitigar possíveis quedas de tensão nos transformadores.

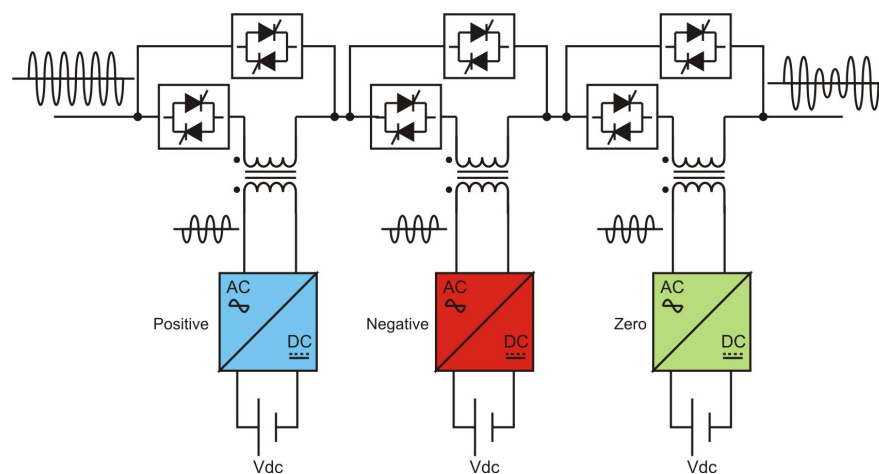


Figura 3.2 – Gerador de afundamento de tensão proposto

Essa topologia possibilita flexibilidade na escolha do tipo de afundamento de tensão e nas características do mesmo. Pode-se modificar tanto o módulo da tensão gerada quanto a sua fase, alterando os parâmetros dos inversores de frequência e como consequência, a tensão a ser injetada em série na rede.

3.2 – EQUACIONAMENTO

Um sistema trifásico equilibrado de determinada concessionária é formado pelos fasores da equação 3.8.

$$\begin{aligned} V_a &= 1\angle 0^\circ = e^{0j} \\ V_b &= 1\angle -120^\circ = e^{-120j} \\ V_c &= 1\angle 120^\circ = e^{120j} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Se em um determinado instante ocorre um afundamento momentâneo de tensão com profundidade ΔV , a tensão remanescente na carga será dada pela equação 3.9.

$$V = 1 - \Delta V, \text{ com } 0,1 \leq \Delta V \leq 0,9. \quad (3.9)$$

Segundo (Boolen, 2000), as tensões na carga terão variação de acordo com o tipo de afundamento. Por isso, convém equacionar quais serão os fasores a serem produzidos pelos inversores de frequência.

3.2.1 – Afundamento Tipo A

Conforme (Boolen, 2000), o afundamento momentâneo de tensão tipo A tem as características da equação 3.10.

$$\begin{aligned} V_a' &= V\angle 0^\circ = Ve^{0j} \\ V_b' &= V\angle -120^\circ = Ve^{-120j} \\ V_c' &= V\angle 120^\circ = Ve^{120j} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Na figura 3.3 são representados os fasores das tensões normal, injetada e com afundamento para um sistema trifásico.

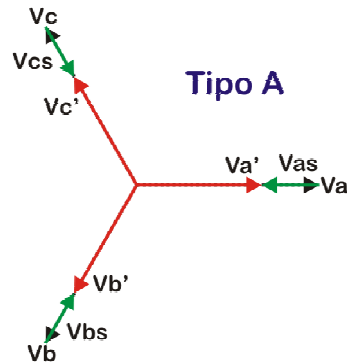


Figura 3.3 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo A

Os fasores V_{as} , V_{bs} e V_{cs} que deverão ser injetados de modo a obter o afundamento de tensão são definidos na equação 3.11.

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_a' - V_a \\ V_{bs} &= V_b' - V_b \\ V_{cs} &= V_c' - V_c \end{aligned} \quad (3.11)$$

Substituindo as equações 3.2 e 3.10 na equação 3.11, tem-se a equação 3.12.

$$\begin{aligned} V_{as} &= Ve^{0j} - e^{0j} = -(1-V)e^{0j} = -\Delta Ve^{0j} = \Delta Ve^{180j} \\ V_{bs} &= Ve^{-120j} - e^{-120j} = -(1-V)e^{-120j} = -\Delta Ve^{-120j} = \Delta Ve^{60j} \\ V_{cs} &= Ve^{120j} - e^{120j} = -(1-V)e^{120j} = -\Delta Ve^{120j} = \Delta Ve^{-60j} \end{aligned} \quad (3.12)$$

A partir da equação 3.12, calculam-se os componentes simétricos de cada fase. Para simplificação, calcular-se-á os componentes simétricos para a fase A, já que os componentes de seqüência negativa e positiva para as outras fases são diferentes apenas em relação ao ângulo de fase. No caso de componente de seqüência zero, calculando-se o fasor para a fase A, obtém-se os fasores das outras fases.

Aplicando a equação 3.12 na equação 3.7, obtém-se a equação 3.13.

$$\begin{aligned}
V_{as1} &= \frac{1}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j} + \Delta V e^{60j} e^{120j} + \Delta V e^{-60j} e^{-120j}) = \\
&= \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j} + \Delta V e^{180j} + \Delta V e^{180j}) = \Delta V e^{180j} \\
V_{as2} &= \frac{1}{3}(V_{as} + a^2V_{bs} + aV_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j} + \Delta V e^{60j} e^{-120j} + \Delta V e^{-60j} e^{120j}) = \\
&= \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j} + \Delta V e^{-60j} + \Delta V e^{60j}) = 0 \\
V_{as0} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j} + \Delta V e^{60j} + \Delta V e^{-60j}) = 0
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Logo, os fasores V_{as} , V_{bs} e V_{cs} possuem somente a seqüência positiva, comprovando o esperado já que os fasores formam um sistema equilibrado. Sendo assim, os inversores de seqüência negativa e zero não entrarão em operação. Na tabela 3.1 é mostrado um resumo das tensões dos nove inversores de freqüência, baseado nas equações 3.13.

Tabela 3.1 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento A

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \Delta V e^{180j}$	$V_{as2} = 0$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = \Delta V e^{60j}$	$V_{bs2} = 0$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = \Delta V e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0$	$V_{cs0} = 0$

3.2.2 – Afundamento Tipo B

O afundamento momentâneo de tensão tipo B é caracterizado pela equação 3.14.

$$\begin{aligned}
V_a' &= V \angle 0^\circ = V e^{0j} \\
V_b' &= V \angle -120^\circ = V e^{-120j} \\
V_c' &= V \angle 120^\circ = V e^{120j}
\end{aligned} \tag{3.141}$$

A partir da equação 3.11, calculam-se quais serão os fasores V_{as} , V_{bs} e V_{cs} que deverão ser injetados de modo a obter o afundamento de tensão, obtendo a equação 3.15.

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= V e^{0j} - e^{0j} = -(1-V)e^{0j} = -\Delta V e^{0j} = \Delta V e^{180j} \\
 V_{bs} &= e^{-120j} - e^{-120j} = 0 \\
 V_{cs} &= e^{120j} - e^{120j} = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

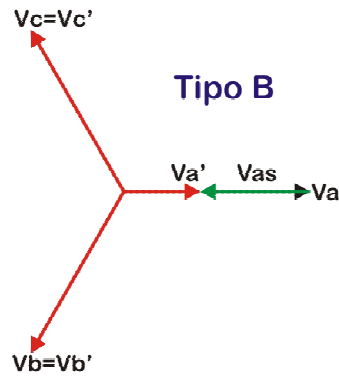


Figura 3.4 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo B

A partir a equação 3.7, calculam-se os componentes simétricos de cada fase, resultando na equação 3.16.

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= \frac{1}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j}) = \frac{\Delta V}{3} e^{180j} \\
 V_{as2} &= \frac{1}{3}(V_{as} + a^2V_{bs} + aV_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j}) = \frac{\Delta V}{3} e^{180j} \\
 V_{as0} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) = \frac{1}{3}(\Delta V e^{180j}) = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

A tabela 3.2 mostra como são os fasores a serem gerados pelos inversores de frequência, conforme as equações 3.16.

Tabela 3.2 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento B

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$	$V_{as0} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$
$V_{bs1} = \frac{\Delta V}{3} e^{60j}$	$V_{bs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{-60j}$	$V_{bs0} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$
$V_{cs1} = \frac{\Delta V}{3} e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{60j}$	$V_{cs0} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$

3.2.3 – Afundamento Tipo C

No afundamento de tensão tipo C, além de diminuição da magnitude, o ângulo em duas fases altera-se, conforme pode ser visto na equação 3.17.

$$\begin{aligned}
 V_a' &= e^{0j} \\
 V_b' &= -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_j = \left(\sqrt{\frac{1+3V^2}{4}} \right) e^{\text{arctg}(\sqrt{3}V)j} \\
 V_c' &= -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} V_j = \left(\sqrt{\frac{1+3V^2}{4}} \right) e^{\text{arctg}(-\sqrt{3}V)j}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Os fasores a serem injetados serão de acordo com a equação 3.18. Observa-se pela equação 3.17 que o fasor da fase A permanece inalterado. Logo, pela equação 3.18, o fasor da tensão injetada deve ser nulo.

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= 0 \\
 V_{bs} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{90j} \\
 V_{cs} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{-90j}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Na figura 3.5 são representados os fasores das tensões normal, injetada e com afundamento para o afundamento tipo C.

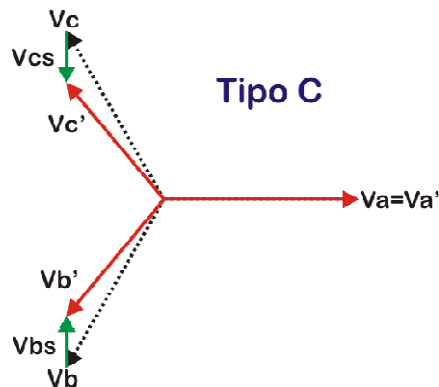


Figura 3.5 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo C

Em componentes simétricos, obtém-se a equação 3.19.

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= \frac{1}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) = \frac{1}{3} \left[0 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{90j} e^{120j} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{-90j} e^{-120j} \right] = \frac{\Delta V}{2} e^{180j} \\
 V_{as2} &= \frac{1}{3}(V_{as} + a^2V_{bs} + aV_{cs}) = \frac{1}{3} \left[0 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{90j} e^{-120j} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{-90j} e^{120j} \right] = \frac{\Delta V}{2} e^{0j} \quad (3.19) \\
 V_{as0} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) = \frac{1}{3} \left[0 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{90j} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \Delta V \right) e^{-90j} \right] = 0
 \end{aligned}$$

A partir das equações 3.19, calculam-se os fasores para as fases B e C. Os dados são apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento C

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{\Delta V}{2} e^{180j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{2} e^{0j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = \frac{\Delta V}{2} e^{60j}$	$V_{bs2} = \frac{\Delta V}{2} e^{120j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = \frac{\Delta V}{2} e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{\Delta V}{2} e^{-120j}$	$V_{cs0} = 0$

3.2.4 – Afundamento Tipo D

Assim como o afundamento tipo C, o tipo D também se caracteriza por mudança de ângulo em duas fases, como se vê na equação 3.20.

$$\begin{aligned}
 V_a' &= V = V e^{0j} \\
 V_b' &= -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}j = \left(\sqrt{\frac{V^2 + 3}{4}} \right) e^{\arctg\left(\frac{\sqrt{3}}{V}\right)j} \\
 V_c' &= -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}j = \left(\sqrt{\frac{V^2 + 3}{4}} \right) e^{\arctg\left(-\frac{\sqrt{3}}{V}\right)j}
 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Os fasores a serem injetados serão conforme a equação 3.21.

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= \Delta V e^{180j} \\
 V_{bs} &= \frac{\Delta V}{2} e^{0j} \\
 V_{cs} &= \frac{\Delta V}{2} e^{0j}
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

A figura 3.6 ilustra os fasores das tensões normal, injetada e com afundamento de tensão para o caso de afundamento tipo D.

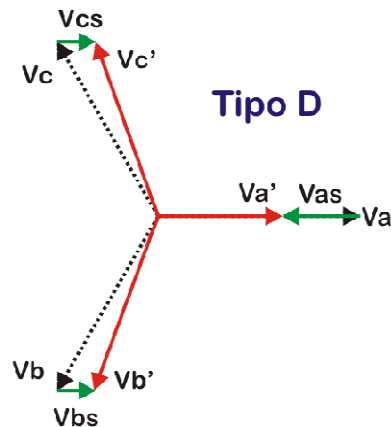


Figura 3.6 – Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo D

Em componentes simétricos, tem-se a equação 3.22.

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= \frac{1}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) = \frac{1}{3} \left[\Delta V e^{180j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} e^{120j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} e^{-120j} \right] = \frac{\Delta V}{2} e^{180j} \\
 V_{as2} &= \frac{1}{3}(V_{as} + a^2V_{bs} + aV_{cs}) = \frac{1}{3} \left[\Delta V e^{180j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} e^{-120j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} e^{120j} \right] = \frac{\Delta V}{2} e^{180j} \\
 V_{as0} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) = \frac{1}{3} \left[\Delta V e^{180j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} + \frac{\Delta V}{2} e^{0j} \right] = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

A tabela 3.4 apresenta os fasores a serem gerados para compor as tensões a serem injetadas para o afundamento tipo D, baseado nas equações 3.22.

Tabela 3.4 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento D

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{\Delta V}{2} e^{180j}$ $V_{bs1} = \frac{\Delta V}{2} e^{60j}$ $V_{cs1} = \frac{\Delta V}{2} e^{-60j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{2} e^{180j}$ $V_{bs2} = \frac{\Delta V}{2} e^{-60j}$ $V_{cs2} = \frac{\Delta V}{2} e^{60j}$	$V_{as0} = 0$ $V_{bs0} = 0$ $V_{cs0} = 0$

3.2.5 – Afundamento Tipo E

O afundamento tipo E, causado por falta bifásica a terra, apresenta duas fases com magnitudes menores e mesmos ângulos e uma fase em que a magnitude não se altera. Isso pode ser evidenciado na equação 3.23.

$$\begin{aligned}
 V_a' &= 1 \angle 0^\circ = e^{0j} \\
 V_b' &= V \angle -120^\circ = V e^{-120j} \\
 V_c' &= V \angle 120^\circ = V e^{120j}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Os fasores injetados serão de acordo com a equação 3.24.

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= 0 \\
 V_{bs} &= \Delta V e^{60j} \\
 V_{cs} &= \Delta V e^{-60j}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Na figura 3.7 são apresentados os fasores das tensões normal, injetada e com afundamento de tensão para o caso E.

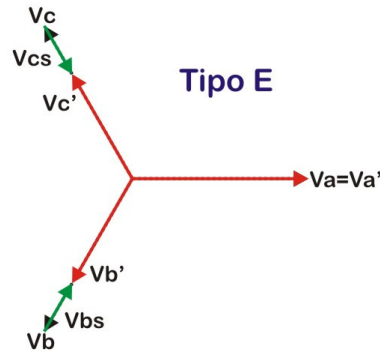


Figura 3.7 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo E

Em componentes simétricos, tem-se a equação 3.25.

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= \frac{1}{3}(V_{as} + aV_{bs} + a^2V_{cs}) = \frac{1}{3}[0 + \Delta V e^{60j} e^{120j} + \Delta V e^{-60j} e^{-120j}] = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j} \\
 V_{as2} &= \frac{1}{3}(V_{as} + a^2V_{bs} + aV_{cs}) = \frac{1}{3}[0 + \Delta V e^{60j} e^{-120j} + \Delta V e^{-60j} e^{120j}] = \frac{\Delta V}{3} e^{0j} \\
 V_{as0} &= \frac{1}{3}(V_{as} + V_{bs} + V_{cs}) = \frac{1}{3}[0 + \Delta V e^{60j} + \Delta V e^{-60j}] = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Pela tabela 3.5, vê-se como devem ser configurados os nove inversores de frequência de modo a formar a tensão a ser injetada em série na rede. Os fasores das fases B e C foram calculados a partir das equações 3.25, em que são mostrados os fasores das tensões de seqüências para a fase A.

Tabela 3.5 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento E

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}$	$V_{as0} = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}$
$V_{bs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{60j}$	$V_{bs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{120j}$	$V_{bs0} = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}$
$V_{cs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{-120j}$	$V_{cs0} = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}$

3.2.6 – Afundamento Tipo F

No afundamento tipo F, além da magnitude das três fases diminuir, em duas fases ocorre salto de ângulo, conforme se vê na equação 3.26.

$$\begin{aligned}
 V_a' &= V \\
 V_b' &= -\frac{1}{2}V - \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{6}V \right)j \\
 V_c' &= -\frac{1}{2}V + \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{\sqrt{3}}{6}V \right)j
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Os fasores V_{as} , V_{bs} e V_{cs} serão como na equação 3.27.

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= \Delta V e^{180j} \\
 V_{bs} &= 0,5774 \Delta V e^{30j} \\
 V_{cs} &= 0,5774 \Delta V e^{-30j}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

A figura 3.8 ilustra como são formados os fasores das tensões com afundamentos.

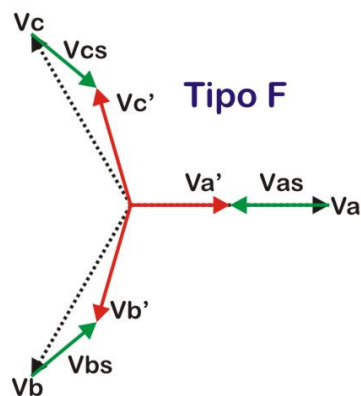


Figura 3.8 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo F

Em componentes simétricos, tem-se a equação 3.28.

$$\begin{aligned}
V_{as1} &= \frac{1}{3} [\Delta V e^{180j} + 0,5774 \Delta V e^{30j} e^{120j} + 0,5774 \Delta V e^{-30j} e^{-120j}] = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j} \\
V_{as2} &= \frac{1}{3} [\Delta V e^{180j} + 0,5774 \Delta V e^{30j} e^{-120j} + 0,5774 \Delta V e^{-30j} e^{120j}] = \frac{\Delta V}{3} e^{180j} \\
V_{as0} &= \frac{1}{3} [\Delta V e^{180j} + 0,5774 \Delta V e^{30j} + 0,5774 \Delta V e^{-30j}] = 0
\end{aligned} \tag{3.28}$$

A tabela 3.6 mostra como deverão ser as tensões a serem geradas pelos inversores de frequência, baseado nas equações 3.28.

Tabela 3.6 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento F

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j}$ $V_{bs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{60j}$ $V_{cs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{-60j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{3} e^{180j}$ $V_{bs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{-60j}$ $V_{cs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{60j}$	$V_{as0} = 0$ $V_{bs0} = 0$ $V_{cs0} = 0$

3.2.7 – Afundamento Tipo G

Esse tipo de afundamento de tensão caracteriza-se por alterar as magnitudes de todas as fases e salto de ângulo em duas fases, conforme é visto na equação 3.29.

$$\begin{aligned}
V_a' &= \frac{2}{3} + \frac{V}{3} \\
V_b' &= -\left(\frac{1}{3} + \frac{V}{6}\right) - \frac{\sqrt{3}}{2} Vj \\
V_c' &= -\left(\frac{1}{3} + \frac{V}{6}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} Vj
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Os fasores que serão injetados são como na equação 3.30.

$$\begin{aligned}
V_{as} &= \frac{\Delta V}{3} e^{180j} \\
V_{bs} &= 0,8819 \Delta V e^{79,1j} \\
V_{cs} &= 0,8819 \Delta V e^{-79,1j}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

A figura 3.9 representa os fasores das tensões normal, injetada e com afundamento no caso do afundamento tipo G.

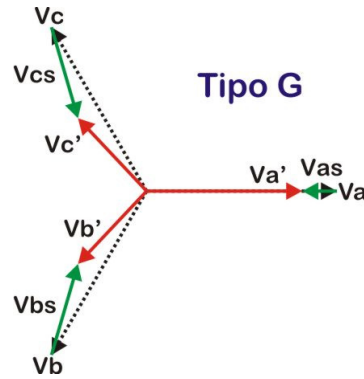


Figura 3.9 - Fasores das tensões normal (preto), injetada (verde) e com afundamento (vermelho) para tipo G

Em componentes simétricos, obtêm-se os fasores da equação 3.31.

$$\begin{aligned}
 V_{as1} &= \frac{1}{3} \left[\frac{\Delta V}{3} e^{180j} + 0,8819 \Delta V e^{79,1j} e^{120j} + 0,8819 \Delta V e^{-79,1j} e^{-120j} \right] = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j} \\
 V_{as2} &= \frac{1}{3} \left[\frac{\Delta V}{3} e^{180j} + 0,8819 \Delta V e^{79,1j} e^{-120j} + 0,8819 \Delta V e^{-79,1j} e^{120j} \right] = \frac{\Delta V}{3} e^{0j} \\
 V_{as0} &= \frac{1}{3} \left[\frac{\Delta V}{3} e^{180j} + 0,8819 \Delta V e^{79,1j} + 0,8819 \Delta V e^{-79,1j} \right] = 0
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Finalmente, a tabela 3.7 mostra como deverão ser configurados os inversores de frequência de modo a formar as tensões injetadas da equação 3.30.

Tabela 3.7 - Fasores dos componentes simétricos das tensões injetadas para afundamento G

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{180j}$	$V_{as2} = \frac{\Delta V}{3} e^{0j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{60j}$	$V_{bs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{120j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = \frac{2\Delta V}{3} e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{\Delta V}{3} e^{-120j}$	$V_{cs0} = 0$

Capítulo 4

PROJETO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA

4.1 – PROJETO DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

4.1.1 – Inversor de Frequência Tipo Ponte H

4.1.1.1 – Topologia

A topologia escolhida para os inversores monofásicos do gerador de afundamentos de tensão é a topologia em ponte H. Nesse arranjo são utilizadas duas pernas com duas chaves semicondutoras, conforme esquema da figura 4.1 (Mohan, 1995) e (Aphiratsakun).

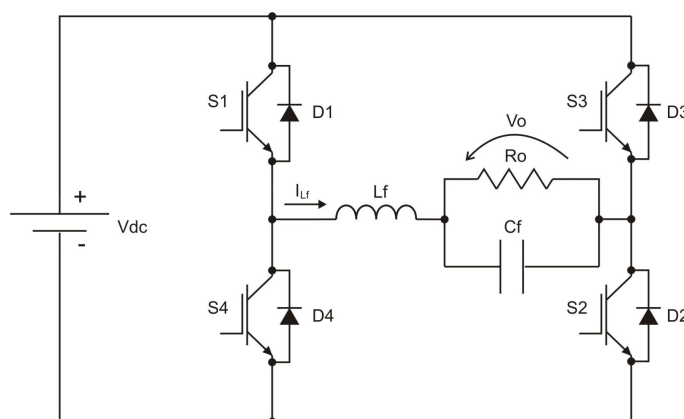


Figura 4.1 – Inversor em Ponte H

Essa topologia, juntamente com o filtro LC ilustrado na figura 4.1, permite o desenvolvimento de tensão senoidal sobre a carga R_o e com baixos níveis harmônicos. Cada chave semicondutora possui um diodo em antiparalelo, que são denominados *free-wheeling* e são responsáveis por permitir a passagem da corrente quando as chaves não estiverem conduzindo.

4.1.1.2 – Técnicas de Modulação PWM

A forma de onda da tensão de saída do inversor é formada por uma seqüência de pulsos com valor da tensão da fonte CC. Com a finalidade de reduzir o custo e volume dos componentes do filtro LC, utiliza-se técnicas de chaveamento com freqüências elevadas conhecidas como modulação PWM (*Pulse Width Modulation*).

A modulação PWM consiste na geração de um trem de pulsos de largura variável através da comparação de dois sinais: uma referência senoidal com freqüência da tensão de saída desejada e uma portadora triangular com freqüência de operação do inversor.

Há dois tipos de modulação PWM: modulação a dois níveis ou bipolar e modulação a três níveis ou unipolar. A modulação bipolar, ilustrada na figura 4.2(a), consiste na comparação simples da portadora triangular com a referência senoidal, gerando os sinais para as quatro chaves. Mais complexa, a modulação unipolar, ilustrada na figura 4.2(b), consiste da comparação da portadora triangular com dois sinais de referência senoidal, um defasado 180° em relação ao outro. Nas figuras 4.2(a) e 4.2(b) são esquematizados como são formados os pulsos das chaves e também como fica a forma de onda da saída do inversor (Pinheiro, 2005) e (Aphiratsakun).

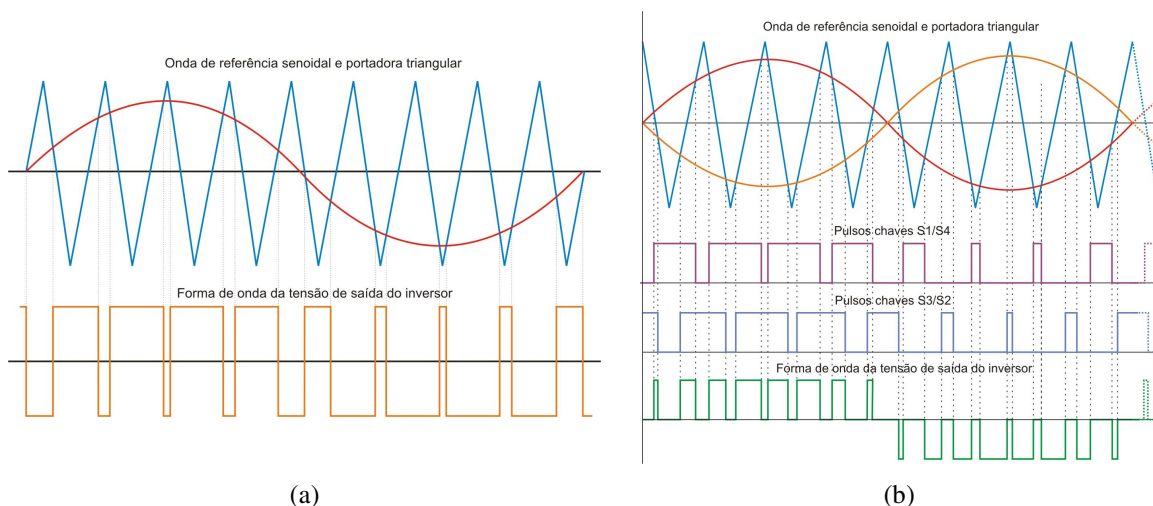


Figura 4.2 – Modulação PWM (a) bipolar (b) unipolar (Pinheiro, 2005)

O índice de modulação da frequência m_f é definido pela relação entre a frequência da portadora triangular (f_{tri}) e a frequência da referência senoidal (f_{sen}), conforme equação 4.1.

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{sen}} \quad (4.1)$$

O índice de modulação da amplitude m_a é definido pela relação entre o valor de pico da tensão de referência (V_{sen}) e o valor da tensão da portadora (V_{tri}).

$$m_a = \frac{V_{sen}}{V_{tri}} \quad (4.2)$$

A tensão de saída do inversor V_o em ponte H é definida pela equação 4.3.

$$V_o = m \cdot V_{DC} \quad (4.3)$$

4.1.2 – Modos de Operação

A modulação escolhida para o projeto foi a técnica de modulação unipolar. Com essa técnica, o inversor apresenta oito etapas de comutação, sendo quatro durante o ciclo positivo e quatro durante o ciclo negativo da onda senoidal de saída (Pinheiro, 2005).

As análises seguintes são feitas considerando que todos os elementos ativos e passivos são ideais e que o inversor já esteja em regime permanente.

4.1.2.1 – Semiciclo Positivo

a) Etapa 1 - chaves S1 e S2 conduzindo

Na primeira etapa de comutação, ilustrada na figura 4.3 as chaves S1 e S2 estão conduzindo e a tensão na carga é igual à tensão da fonte CC, ou seja, a tensão é positiva e a corrente circula do inversor para a carga. Como a tensão aplicada no indutor do filtro é positiva, a corrente cresce linearmente. A etapa 1 termina quando a chave S2 é bloqueada.

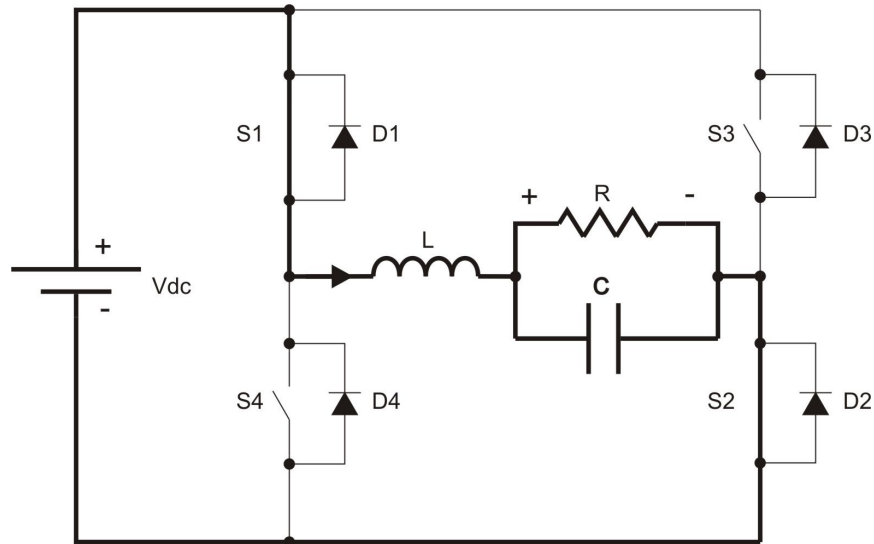


Figura 4.3 – Etapa 1 do semiciclo positivo

b) Etapa 2 – chave S1 e diodo D3 conduzindo

Após a chave S2 ser bloqueada, como mostrado na figura 4.4, o diodo D3 entra em condução, anulando a tensão de saída e realizando uma comutação não-dissipativa. Quando a chave S3 é ligada, ela não entra em condução devido ao sentido da corrente. Nessa etapa a tensão no indutor é negativa, fazendo com que a corrente decresça linearmente.

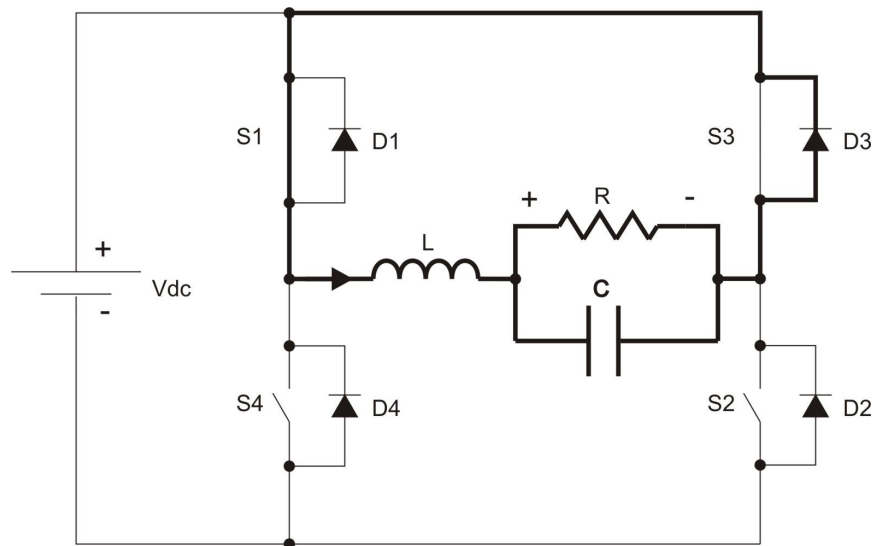


Figura 4.4 – Etapa 2 do semiciclo positivo

c) Etapa 3 – chaves S1 e S2 conduzindo

Quando S2 é ligada, ilustrado na figura 4.5, ocorre uma comutação dissipativa que impõe uma tensão reversa no valor da tensão da fonte CC sobre o diodo D3, que será bloqueado fazendo com que a tensão da carga seja positiva no valor da tensão da fonte CC.

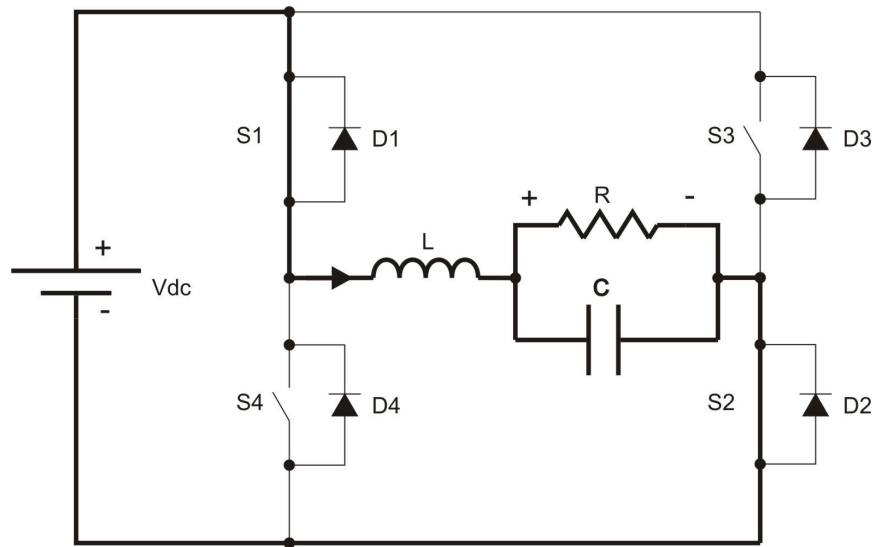


Figura 4.5 – Etapa 3 do semiciclo positivo

d) Etapa 4 – diodo D4 e chave S2 conduzindo

Na etapa da figura 4.6 a chave S1 é bloqueada e nesse momento, o diodo D4 entra em condução, anulando a tensão na carga e fazendo a corrente no indutor decrescer. A chave S4 é comandada para conduzir, porém não chega a entrar em condução pelo sentido da corrente imposto pelo indutor. Essa situação permanece até que S1 entre em condução, retornando à situação exposta na Etapa 1.

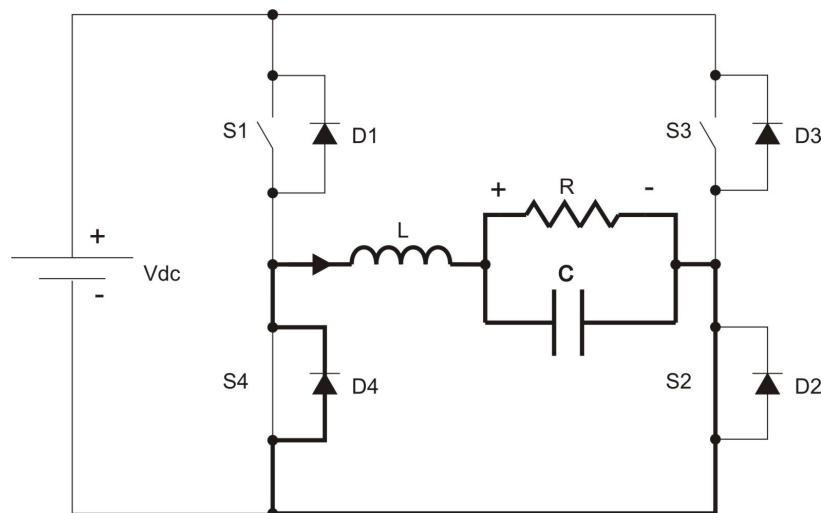


Figura 4.6 – Etapa 4 do semiciclo positivo

4.1.2.2 – Semiciclo Negativo

a) Etapa 1 – chaves S3 e S4 conduzindo

Na etapa da figura 4.7, as chaves S3 e S4 estão ligadas e a tensão de saída é negativa e de valor da tensão da fonte CC. A corrente no indutor cresce linearmente, em sentido oposto ao observado na etapa 1 do semi-ciclo positivo.

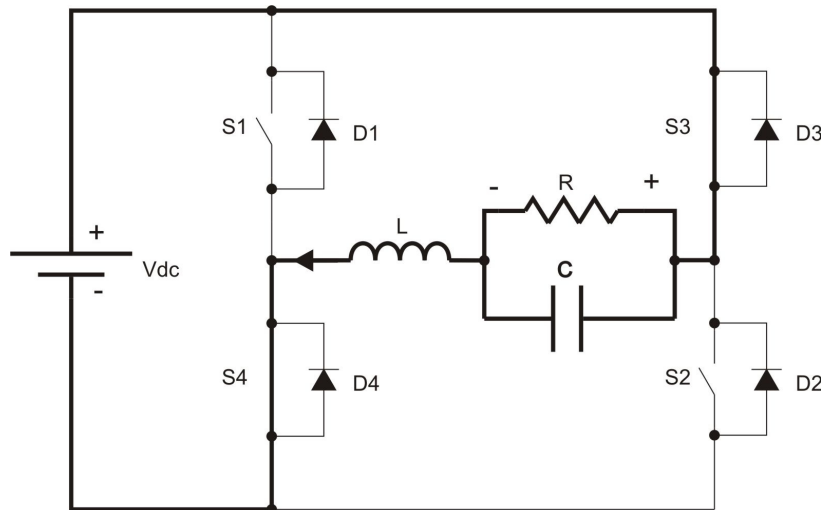


Figura 4.7 – Etapa 1 do semiciclo negativo

b) Etapa 2 – chave S4 e diodo S2 conduzindo

De forma análoga ao semi-ciclo positivo, quando a chave S3 é bloqueada, entra em condução o diodo D2, anulando a tensão de saída do inversor e fazendo decrescer a corrente no indutor, conforme esquema da figura 4.8. A chave S4 é ligada, mas não entra em condução devido ao sentido da corrente.

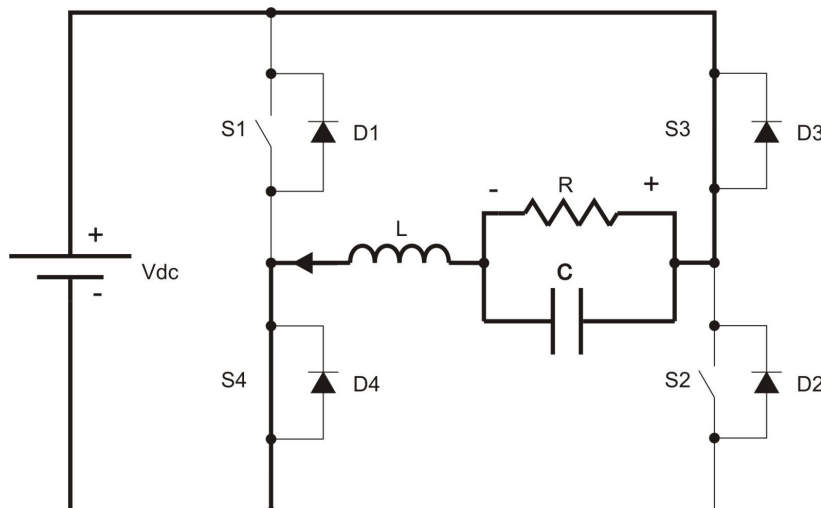


Figura 4.8 – Etapa 2 do semiciclo negativo

c) Etapa 3 – chaves S3 e S4 conduzindo

A chave S3 volta a ser ligada, fazendo com que o diodo D2 bloqueie, a tensão de saída seja negativa e de valor da fonte CC e a corrente no indutor cresça, conforme esquema da figura 4.9.

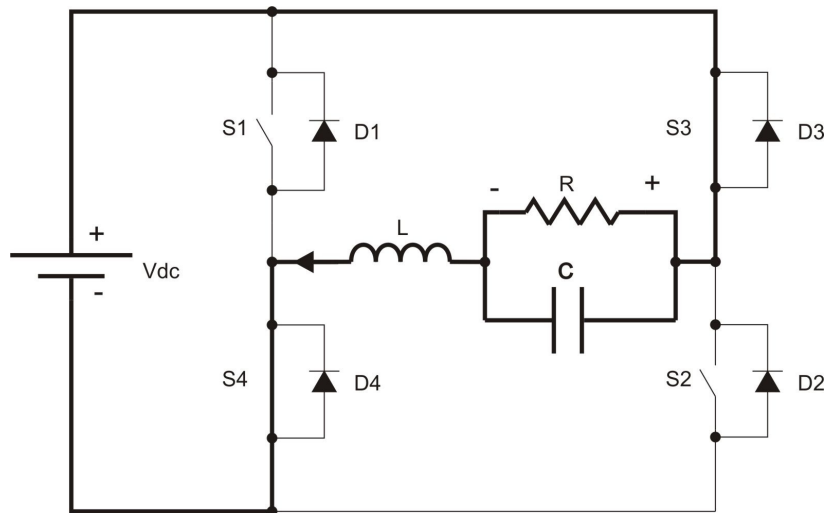


Figura 4.9 – Etapa 3 do semiciclo negativo

d) Etapa 4 – diodo D1 e chave S3 conduzindo

Com S4 bloqueado, o diodo D1 entra em condução, anulando a tensão de saída. Se S1 for ligada, não entrará em condução devido ao sentido da corrente. A situação da figura 4.10 permanece até S4 voltar a conduzir, retornando à etapa 1 do semiciclo negativo.

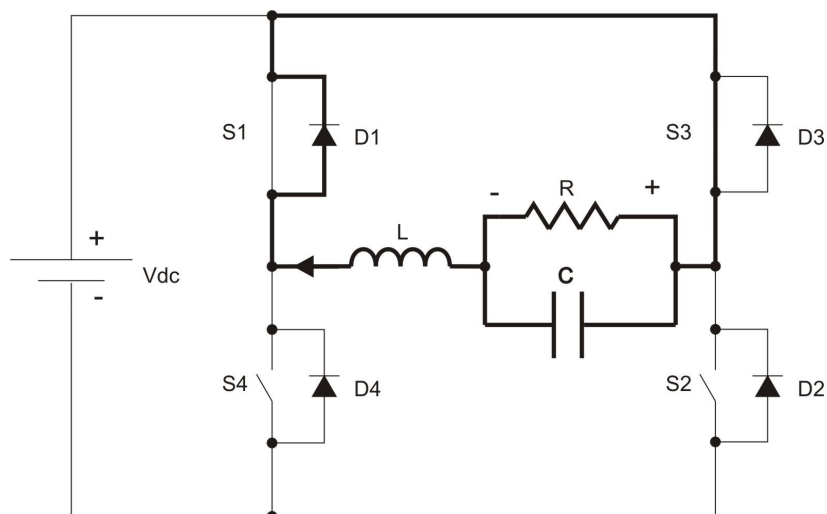


Figura 4.10 – Etapa 4 do semiciclo negativo

A partir das oito etapas de operações, obtêm-se as formas de ondas da tensão de saída, da corrente no indutor e da tensão no capacitor, representadas na figura 4.11.

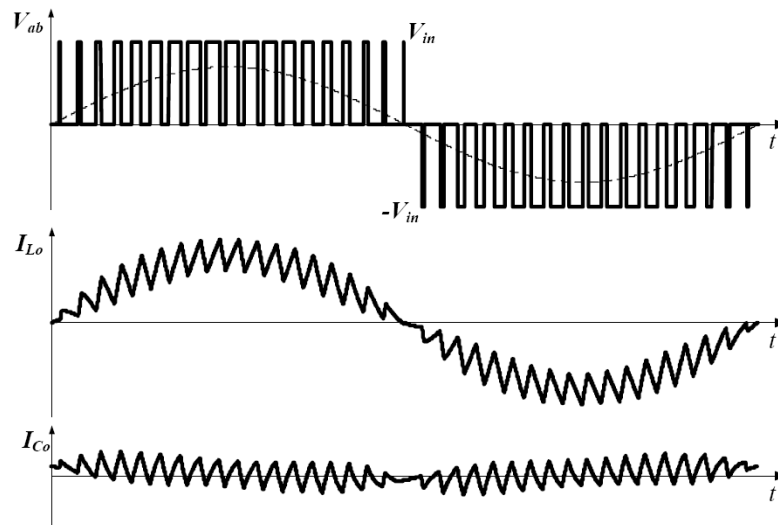


Figura 4.11 – Principais formas de onda (Pinheiro, 2005)

4.1.3 – Dimensionamento dos Componentes

4.1.3.1 – Chaves Semicondutoras

A tensão máxima direta nas chaves semicondutoras $V_{Sw_{max}}$ depende da tensão do barramento CC V_{DC} e também de possíveis *spikes* de tensão, que serão considerados em 30% da magnitude da tensão referente, como na equação 4.4.

$$V_{Sw_{max}} > V_{DC} + spikes \rightarrow V_{Sw_{max}} > 1,3V_{DC} \quad (4.4)$$

A máxima corrente na carga $I_{0_{max}}$ será como na equação 4.5.

$$I_{0_{max}} = \frac{P_o}{V_o} \quad (4.5)$$

Onde P_0 é a potência e V_0 é a tensão de saída do inversor.

A máxima ondulação de corrente no indutor é dada pela equação 4.6.

$$\Delta I_{L_{\max}} = 0.5\sqrt{2}I_o \quad (4.6)$$

Sendo assim, a corrente de pico no indutor será como na equação 4.7.

$$I_{L_{\text{pico}}} = I_{o_{\text{pico}}} + \frac{\Delta I_{L_{\max}}}{2} \quad (4.7)$$

A partir dessas correntes, as correntes máxima e eficaz nas chaves semicondutoras serão como nas equações 4.8 e 4.9, respectivamente.

$$I_{S_{W_{\max}}} = I_{L_{\text{pico}}} \quad (4.8)$$

$$I_{S_{W_{\text{rms}}}} = I_{L_{\text{pico}}} \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{1}{3\pi}m} \quad (4.9)$$

4.1.3.2 – Diodos

A tensão máxima nos diodos de roda livre $V_{D_{\max}}$ deve ser a mesma da tensão máxima nas chaves é dada pela equação 4.10.

$$V_{D_{\max}} > V_{DC} + \text{spikes} \rightarrow V_{D_{\max}} > 1,3V_{DC} \quad (4.10)$$

A corrente média nos diodos é calculada de acordo com a equação 4.11.

$$I_{D_{\text{média}}} = I_{L_{\text{pico}}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} + \frac{1}{8}m} \quad (4.11)$$

4.1.3.3 – Snubber

O circuito *snubber* desempenha o papel de proteção contra sobre-tensões nos terminais das chaves semicondutoras, reduzindo também os picos de tensão (dv/dt). O *snubber* utilizado é de configuração simples e conhecido como *snubber* passivo, já que é formado por um capacitor e um resistor, conforme figura 4.12.

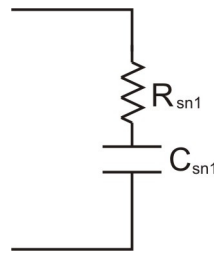


Figura 4.12 – Snubber

O capacitor do *snubber* é escolhido de acordo com a corrente na carga, a tensão nos terminais e o tempo de desligamento da chave semicondutora t_f , como na equação 4.12.

$$C_{sn} = \frac{I_o \cdot t_f}{V_{Sw_{max}}} \quad (4.12)$$

O resistor do *snubber* é calculado de acordo com a escolha do capacitor e a largura de pulso mínima $T_{on_{min}}$, conforme equação 4.13.

$$R_{sn} = \frac{T_{on_{min}}}{3C_s} \quad (4.13)$$

A potência do resistor é escolhida pela equação 4.14.

$$P_{R_{sn}} = \frac{1}{2} C_{sn} V_{Sw_{max}}^2 f_c \quad (4.14)$$

4.1.3.4 – Filtro LC

O filtro LC utilizado permite produzir uma tensão senoidal com baixa distorção harmônica. O cálculo do indutor é dependente da tensão do barramento DC, da frequência de comutação e da ondulação máxima de corrente no indutor (Pinheiro, 2005). A equação para o cálculo do indutor do filtro L_f é dada pela equação 4.15.

$$L_f = \frac{V_{DC}}{8f_c \Delta I_{L_{max}}} \quad (4.15)$$

O capacitor do filtro C_f depende do valor da indutância do filtro e da frequência mais alta a ser eliminada, que nesse caso será de 20% da frequência de comutação, como nas equações 4.16 e 4.17.

$$f_x = \frac{f_c}{5} \quad (4.16)$$

$$C_f = \frac{1}{(2\pi f_x)^2 L_f} \quad (4.17)$$

4.2 – ESPECIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR SÉRIE

Sabe-se que para garantir que a tensão seja injetada com a máxima confiabilidade e eficácia, a seleção do transformador série é de fundamental importância. A escolha dos parâmetros do transformador, tais como potência, tensão e corrente no primário e relação de transformação, deve ser feita observando detalhes da topologia do gerador mostrada na figura 4.13 e do afundamento de tensão (Li, 2000).

Os parâmetros do transformador série são dependentes das seguintes características do sistema:

- máxima profundidade do afundamento de tensão
- salto de ângulo do afundamento de tensão
- presença de harmônicos

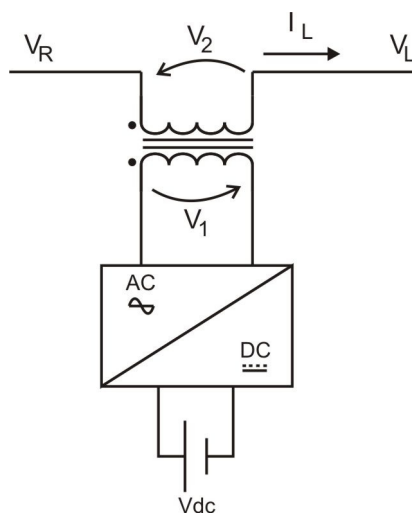


Figura 4.13 – Transformador série

4.2.1 – Tensão do Primário do Transformador Série V_1

O dimensionamento da tensão V_1 depende do afundamento de tensão e das características harmônicas da tensão a ser injetada.

4.2.1.1 – Especificação de Acordo com a Magnitude do Afundamento de Tensão

A tensão injetada varia de acordo com o tipo e a magnitude do afundamento de tensão. Por isso, para especificar a tensão do primário, deve-se conhecer quais os limites máximo e mínimo da tensão injetada. Se a tensão remanescente de um afundamento de tensão é V , então o valor da profundidade do afundamento será $\Delta V = 1 - V$. O máximo valor de ΔV define qual a máxima tensão (V_1) para o primário do transformador série, como na equação 4.18.

$$V_1 = \Delta V \cdot V_s \quad (4.18)$$

Onde V_s é a tensão da rede.

4.2.1.2 – Especificação de Acordo com o Salto de Ângulo do Afundamento

Caso o afundamento de tensão seja do tipo C, D, F ou G em que ocorrem saltos de ângulos, a tensão a ser injetada não é simplesmente a tensão V_1 . Para especificar a tensão do primário do transformador nesses casos, deve-se levar em conta o máximo salto de ângulo dentre os tipos de afundamentos, conforme o diagrama de fasores da figura 4.14.

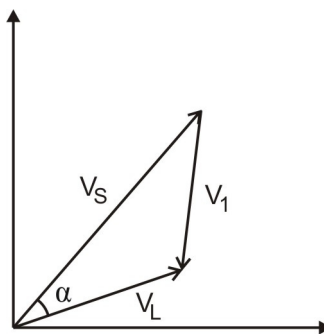


Figura 4.14 – Diagrama de fasores

Logo, a tensão do primário deverá ser especificada pela equação 4.19.

$$V_1 = \sqrt{V_s^2 + (\Delta V \cdot V_s)^2 - 2 \cdot V_s^2 \cdot \Delta V \cdot \cos \alpha} \quad (4.19)$$

4.2.1.3 – Especificação de Acordo com o Tipo do Filtro

Na topologia de geradores de afundamentos de tensão e DVR, existem duas topologias para a filtragem da tensão gerada pelo inversor. O filtro *inverter-side* mostrado na figura 4.15(a) é posicionado logo após a saída do inversor e no primário do transformador, enquanto que o filtro *line-side*, ilustrado na figura 4.15(b), é projetado para filtrar os harmônicos após o transformador (Li, 2000), (Choi, 2000), (Choi, 2001) e (Choi, 2002).

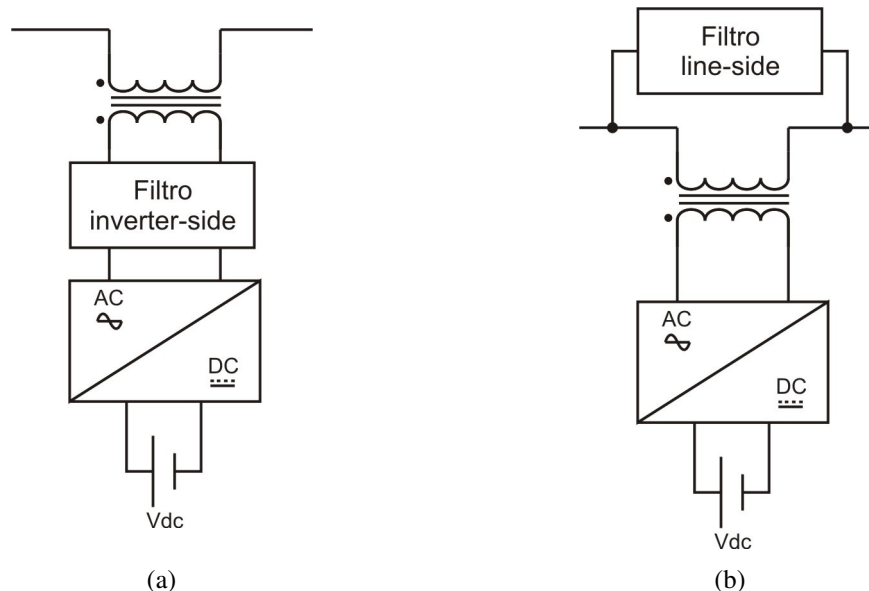


Figura 4.15 – Tipos de filtros

A escolha do filtro influencia na especificação da tensão do primário do transformador série. Caso seja escolhido o filtro *inverter-side*, não há necessidade de recalculer a tensão do primário e pode-se utilizar a equação 4.19 para a especificação de V_1 , pois os harmônicos são atenuados pelo próprio filtro e não influenciam no transformador. Todavia, se a escolha for pelo filtro *line-side*, todos os harmônicos presentes na tensão de saída do inversor de frequência influenciarão no transformador e por isso, devem-se considerar os harmônicos na especificação da tensão do primário de acordo com a equação 4.20.

$$V_1^h = \sqrt{V_1^2 + \sum V_h^2} \quad (4.20)$$

Onde V_1^h é a tensão do primário devido aos harmônicos e $\sum V_h^2$ corresponde a soma das componentes harmônicas de maiores amplitudes.

4.2.2 – Corrente do Primário do Transformador Série

A corrente do primário deve ser especificada de acordo com a corrente da carga. Entretanto, caso se utilize o filtro line-side, devem-se considerar os harmônicos presentes na corrente, conforme a equação 4.21.

$$I_1^h = \sqrt{I_L^2 + \sum I_h^2} \quad (4.21)$$

Onde I_1^h é a corrente do primário devido aos harmônicos e $\sum I_h^2$ corresponde a soma das componentes harmônicas de maiores amplitudes.

4.2.3 – Potência do Transformador Série

Com a especificação da corrente e tensão do primário, calcula-se a potência do transformador série de acordo com a equação 4.22.

$$S = k.V_1.I_1 \quad (4.22)$$

Onde S é a potência do transformador, V_1 e I_1 a corrente e tensão do primário (sem considerar os harmônicos) e k é uma constante de segurança.

4.2.4 – Relação de Transformação

A relação de transformação depende da necessidade de se elevar a tensão a ser injetada e também da disponibilidade comercial.

4.3 – PROJETO DAS CHAVES *BYPASS*

As chaves *bypass* são formadas por dois tiristores em antiparalelo. Nesse caso, os tiristores devem ser dimensionados de modo a suportarem a tensão da carga, quando não conduzem, e a corrente da carga quando em condução.

Logo, a tensão máxima nos tiristores $V_{BP_{max}}$ será como na equação 4.23.

$$V_{BP_{max}} \geq V_{L_{max}} \quad (4.23)$$

A corrente $I_{BP_{max}}$ nas chaves será dada pela equação 4.24.

$$I_{BP_{max}} \geq I_{L_{max}} \quad (4.24)$$

4.4 – VALORES ADOTADOS PARA O PROJETO

As simulações desse capítulo foram realizadas de acordo com algumas especificações do projeto de desenvolvimento do protótipo. As especificações do sistema na simulação e no protótipo foram de acordo com as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Especificações do afundamento de tensão

Tipos	A a G
Magnitude V	0,1 a 0,9 pu
Máximo salto de ângulo	50°

Tabela 4.2 – Especificações da carga

Potência P_L	100mW
Tensão nominal V_L	11,2V _{rms}

Tabela 4.3 – Especificações dos inversores

Potência P_o	100mW
Tensão de entrada nominal V_{DC}	15,7V
Tensão máxima de saída $V_{o_{max}}$	$\Delta V_{max} \cdot V_o = 0,9 \cdot 15,7 = 14,13V_{rms}$
Frequência de saída f_o	60Hz
Frequência de comutação f_c	3kHz
Distorção harmônica máxima THD	5%
Ondulação máxima de corrente no indutor $\Delta I_{L_{max}}$	$0,5 \cdot I_{o_{pico}}$
Estimativa de rendimento η	85%

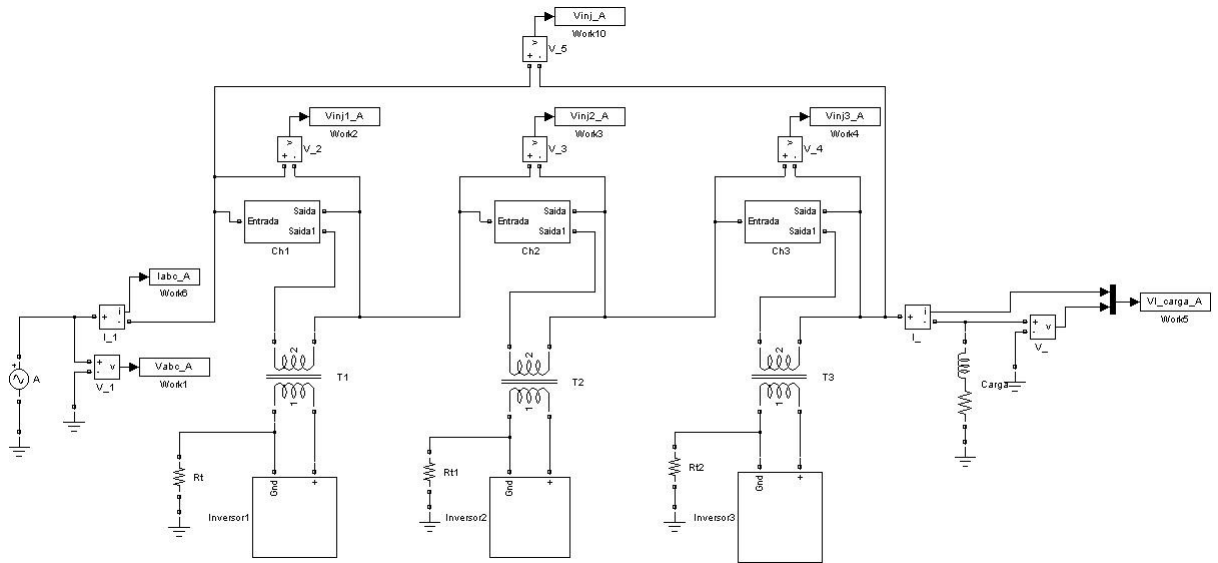
Os valores adotados nas simulações e no desenvolvimento do protótipo foram de acordo com a tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores adotados em simulações e protótipo

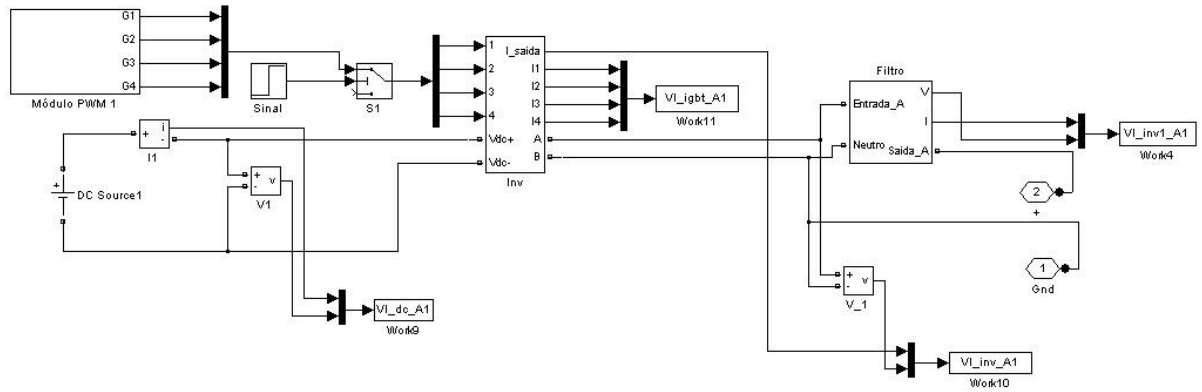
Resistência <i>snubber</i> R_{sn}	150 Ω
Capacitor do <i>snubber</i> C_{sn}	470 nF
Indutor do filtro L_f	1500 μ H
Capacitor do filtro C_f	60 μ F

4.5 – CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO

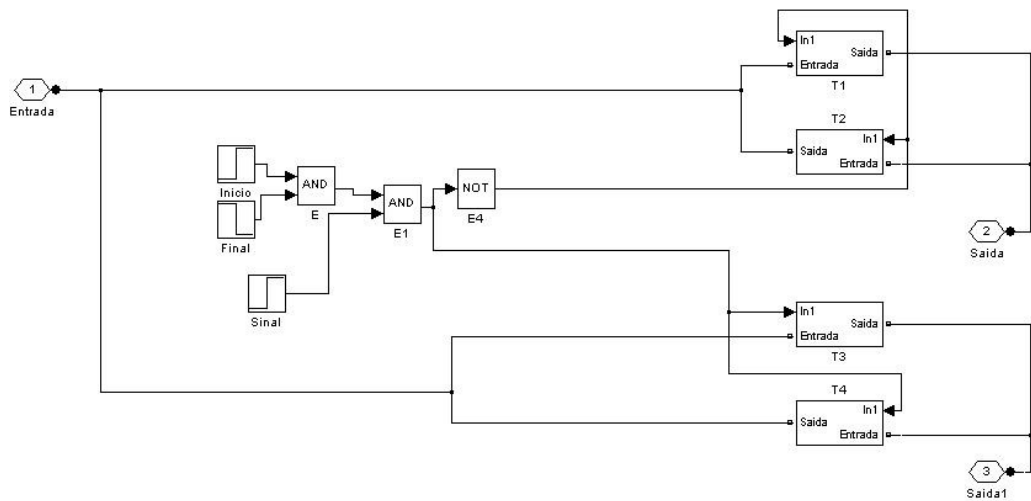
As simulações do gerador de afundamentos de tensão foram realizadas no Matlab/Simulink[®], com auxílio da biblioteca *Simpower Systems*. A topologia do gerador da figura 4.16(a) foi implementada utilizando três inversores monofásicos por fase, conforme figura 4.16 (b), três transformadores e as respectivas chaves *bypass*, conforme figura 4.16(c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16 – Diagramas no Simulink
 (a) Topologia do gerador – 1 fase
 (b) Topologia dos inversores de frequência
 (c) Topologia das chaves *bypass*

A topologia dos inversores de frequência é em Ponte H, com modulação PWM unipolar gerada através da comparação de um sinal de referência senoidal 60Hz e uma onda triangular de 3kHz. No bloco de modulação unipolar, a onda triangular é formada a partir da integração de um trem de pulsos na frequência desejada. Além da comparação para formação dos pulsos PWM, é possível configurar o tempo morto entre cada trem de pulsos PWM. No caso, o tempo morto foi estabelecido em 1 μ s. O “Módulo PWM 1” da figura 4.16(b) é responsável por essas funções.

As chaves *bypass* têm a função de determinar o início e o final do afundamento de tensão. O módulo de controle das chaves *bypass* nada mais é que a liberação de pulsos para cada tiristor dependendo da polaridade da tensão de entrada. Nesse módulo, cada tiristor conduz 180°, ou seja, os tiristores em antiparalelo formam as chaves *bypass* que apenas conduzem a tensão de entrada para a saída. O início e final da liberação dos pulsos são definidos pela duração e tipo do afundamento de tensão, já que o acionamento das chaves *bypass* depende da operação do respectivo inversor de frequência em paralelo, como se pode ver na lógica implementada na figura 4.16 (c). Quando não há operação do inversor, as chaves 2, 4 e 6, analisando a figura 4.16(a), devem entrar em condução, enquanto que as chaves 1, 3 e 5 permanecem abertas.

A carga utilizada nas simulações foi uma carga resistiva $R_L=1000\Omega$ e a tensão da rede foi configurada para um valor de pico de 15,7V.

4.5 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com a definição dos parâmetros de simulação e o desenvolvimento de um software no Matlab[®] para cálculo das magnitudes e ângulos das tensões dos inversores de acordo com o capítulo 3, simularam-se algumas situações de afundamentos de tensão para comprovar a idéia do gerador de afundamentos de tensão por componentes simétricos. Todas as simulações foram realizadas para uma magnitude de afundamento de 50% e duração de 50 ms. Embora as análises dos afundamentos de tensão, em sua maioria, sejam feitas pelos valores eficazes das tensões, nas análises desse capítulo as tensões serão analisadas pela sua forma de onda, de modo a observar o comportamento dos inversores e também os saltos de ângulo quando houver.

4.5.1 – Afundamento de Tensão Tipo A

No afundamento tipo A, as tensões nas três fases sofrem atenuações iguais na magnitude e, por isso, as tensões a serem injetadas compõem um sistema equilibrado. Por isso, as tensões injetadas não possuem componente de seqüência negativa e zero. Somente o inversor de seqüência positiva entra em operação para formar a tensão a ser injetada. A tabela 4.5 apresenta os valores das tensões a serem geradas pelos nove inversores.

Tabela 4.5 – Tensões nos inversores afundamento tipo A 50%

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,5e^{180j}$	$V_{as2} = 0$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = 0,5e^{60j}$	$V_{bs2} = 0$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = 0,5e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0$	$V_{cs0} = 0$

Como resultado, as tensões na carga durante o afundamento foram os seguintes fasores:

$$\text{Fase A} - 0,5e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,5e^{-120j}$$

$$\text{Fase C} - 0,5e^{120j}$$

Os gráficos de simulação da figura 4.17 mostram tanto as tensões de saída dos inversores formando a tensão a ser injetada, quanto o afundamento de tensão sofrido na carga. Observa-se que as tensões tanto em 4.17(b), 4.17(d) e 4.17(f) diminuíram nas mesmas proporções e as tensões injetadas em 4.17(a), 4.17(c) e 4.17(e) são as próprias tensões de seqüência positiva em cada fase, que estão 180° defasadas em relação à respectiva tensão de rede.

A duração do afundamento, conforme esperado, é de 50 ms, ou seja, 3 ciclos de 60Hz, com início ao final do primeiro ciclo de simulação. Observa-se um pequeno nível de tensão na tensão injetada antes e após a injeção de tensão. Essa tensão é resultante das quedas de tensão nas chaves *bypass*. Nessa simulação, essa tensão torna-se significativa porque os níveis de tensão utilizados são baixos. Contudo, em uma simulação com valores comerciais (220V_{rms}, 440V_{rms}, etc), essa queda de tensão passa a ser desprezível.

Analisando a forma de onda da tensão de saída de cada inversor, vê-se que a mesma é praticamente senoidal, com baixa distorção harmônica e algum nível de ruído na freqüência da modulação unipolar.

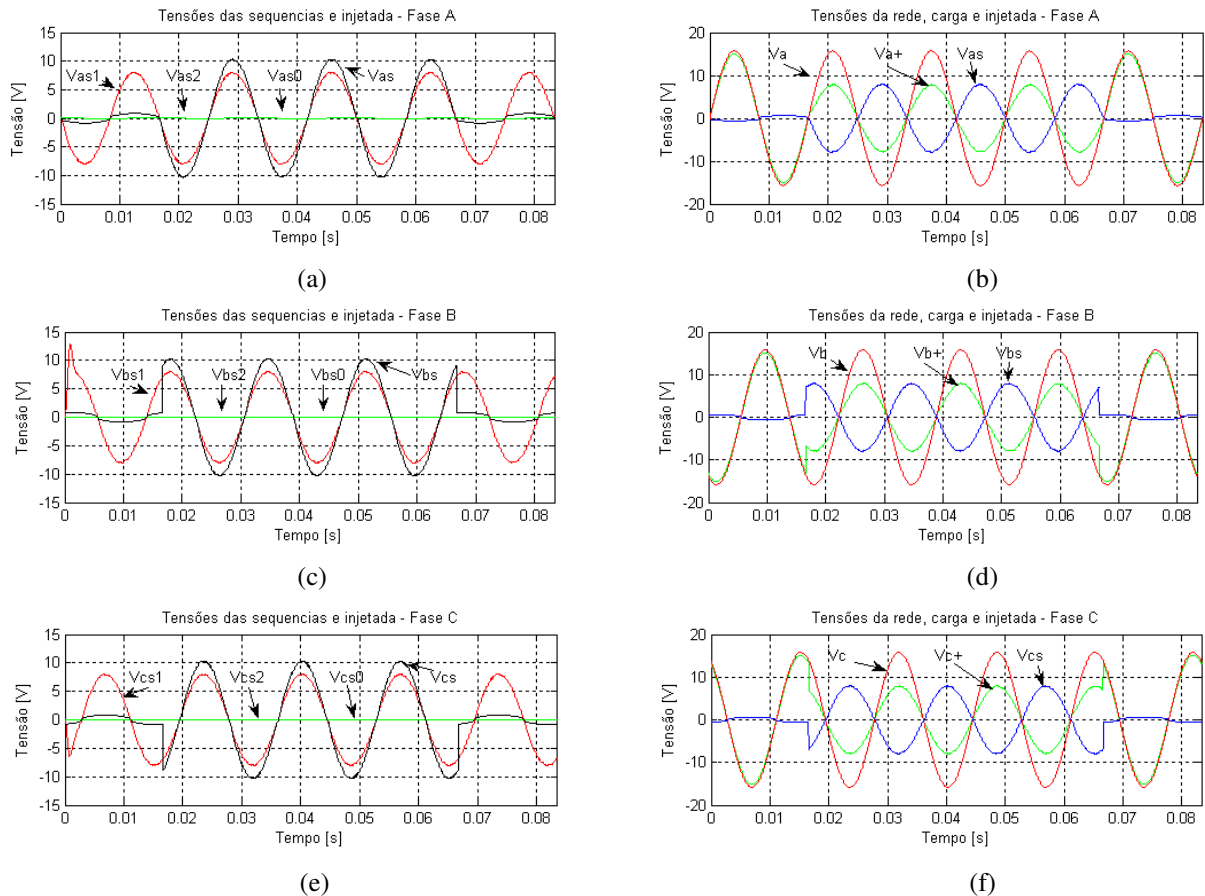


Figura 4.17 – Simulação do afundamento A

(a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada (x1,3)

(b) Fase A – Tensões da rede, carga e injetada

(c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada (x1,3)

(d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada

(e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada (x1,3)

(f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

4.5.2 – Afundamento de Tensão Tipo B

O afundamento de tensão tipo B é um importante teste na validação do gerador, pois nessa configuração todos os inversores operam, possibilitando analisar a dinâmica de todo o sistema.

Nesse tipo de afundamento de tensão, duas fases permanecem inalteradas, enquanto que a outra sofre um afundamento de profundidade ΔV . A tabela 4.6 mostra como ficam as tensões a serem geradas por cada inversor.

Tabela 4.6 – Tensões nos inversores afundamento tipo B 50%

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,167e^{180j}$	$V_{as2} = 0,167e^{180j}$	$V_{as0} = 0,167e^{180j}$
$V_{bs1} = 0,167e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,167e^{-60j}$	$V_{bs0} = 0,167e^{180j}$
$V_{cs1} = 0,167e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,167e^{60j}$	$V_{cs0} = 0,167e^{180j}$

As tensões na carga durante o afundamento possuem o comportamento da figura 4.18 e os seguintes fasores:

Fase A – $0,49e^{0j}$

Fase B – $0,98e^{-120j}$

Fase C – $0,98e^{120j}$

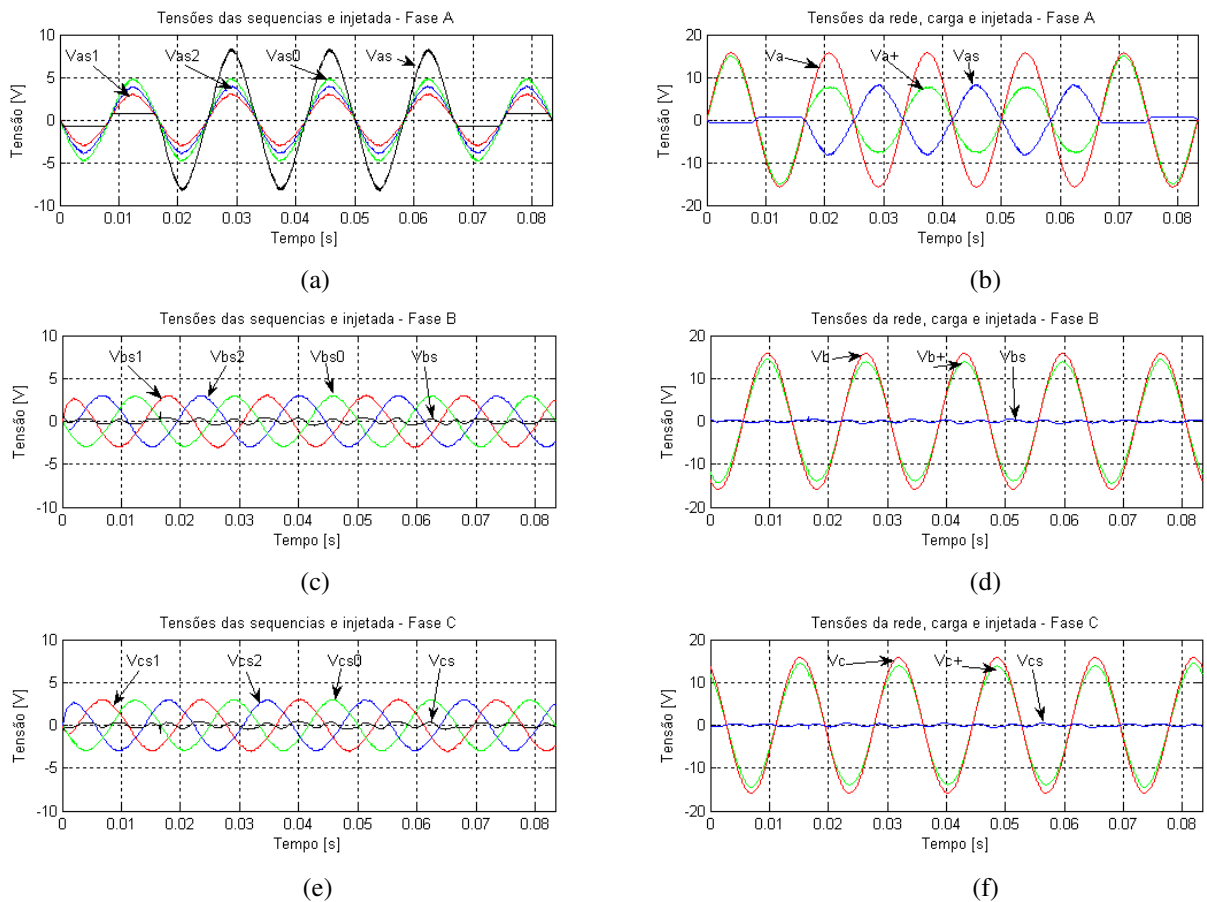


Figura 4.18 – Simulação do afundamento B

(a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa (x1,3), zero (x1,6) e injetada

(b) Fase A – Tensões da rede, carga e injetada

(c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(d) Fase B – Tensões da rede, carga (x0,9) e injetada

(e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(f) Fase C – Tensões da rede, carga (x0,9) e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

As figuras 4.18(a), 4.18(c) e 4.18(e) mostram como são as formas de onda das tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada. Observa-se que na fase A, as tensões possuem a mesma amplitude e ângulo e, por isso, a soma resultante forma uma tensão injetada com metade da tensão nominal, ocasionando afundamento de tensão de 50%, como se pode ver na figura 4.18(b). Nas figuras 4.18(d) e 4.18(f) são mostradas as tensões de rede, injetada e carga nas fases B e C. Vê-se que não há afundamento de tensão, já que as tensões das seqüências compõem um sistema equilibrado e em todo sistema equilibrado a soma resultante é nula.

4.5.3 – Afundamento de Tensão Tipo C

No afundamento de tensão tipo C, além de diminuição da magnitude, ocorre salto de ângulo em duas fases. A outra permanece inalterada. A tabela 4.7 mostra como ficam as tensões a serem injetadas.

Tabela 4.7 – Tensões nos inversores afundamento tipo C 50%

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,25e^{180j}$	$V_{as2} = 0,25e^{0j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = 0,25e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,25e^{120j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = 0,25e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,25e^{-120j}$	$V_{cs0} = 0$

Os fasores resultantes na carga foram:

$$\text{Fase A} - 0,98e^{0j} \quad \text{Fase B} - 0,67e^{-138,4j} \quad \text{Fase C} - 0,66e^{138,1j}$$

Nas figuras 4.19(d) e 4.19(f), é possível observar os saltos de ângulo que aconteceram nas fases B e C. O salto de ângulo na fase B é de $-18,4^\circ$, enquanto que na fase C é de aproximadamente $18,1^\circ$. Além disso, na figura 4.19(b), observa-se que a fase A não sofreu alteração de magnitude.

Na figura 4.19(a), as tensões das seqüências positiva e negativa possuem mesma amplitude e ângulos 180° defasados e por isso, a soma resultante é um fasor de magnitude nula. Nas figuras 4.19(c) e 4.19(e), as tensões estão 60° defasadas uma da outra, resultando em uma tensão com ângulo entre os ângulos das tensões (-90° na fase B e 90° na fase C). A profundidade e salto de ângulo no afundamento são relacionadas com a amplitude do afundamento desejado. Quanto maior a profundidade desejada, maiores serão o salto de ângulo e a profundidade nas fases B e C.

Observa-se nesse afundamento de tensão que embora a profundidade desejada seja de 50%, em nenhuma das fases a profundidade chega a esse nível, devido ao salto de ângulo nas duas fases e ao fato da outra fase não sofrer alteração.

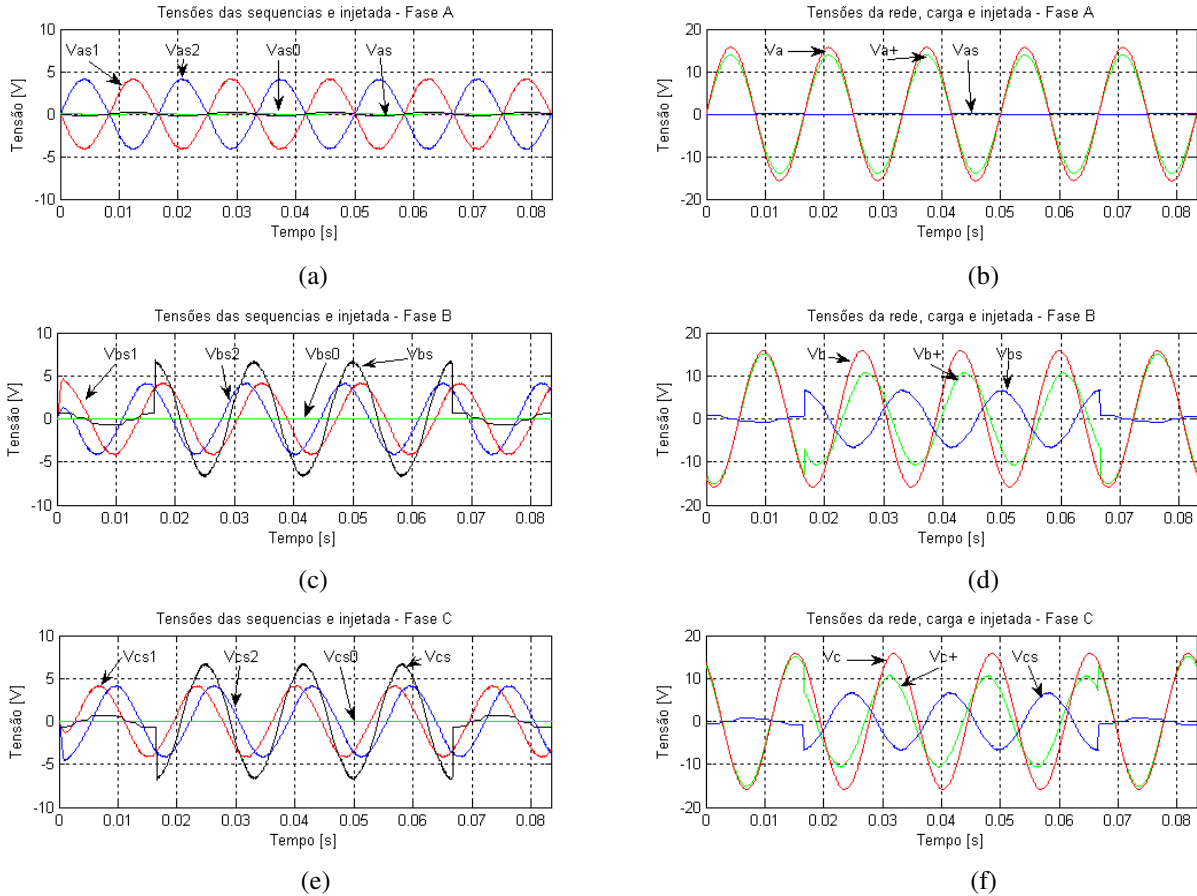


Figura 4.19 – Simulação do afundamento C

- (a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (b) Fase A – Tensões da rede, carga (x0,9) e injetada
- (c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada
- (e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

4.5.4 – Afundamento de Tensão Tipo D

O afundamento tipo D é semelhante ao tipo C, pois em ambos os tipos ocorrem saltos de ângulos. A diferença é que, nesse caso, a fase que permanecera inalterada no tipo C sofre afundamento de magnitude da profundidade desejada. As diferenças nas tensões dos inversores nos dois tipos referem-se aos ângulos das tensões da seqüência negativa. A tabela

4.8 mostra esses valores e comparando-se com a tabela 4.7, vê-se que as tensões de seqüência negativa do tipo D são defasadas 180° em relação às tensões de seqüência negativa do tipo C.

Tabela 4.8 – Tensões nos inversores afundamento tipo D 50%

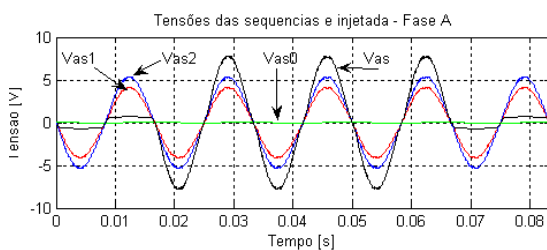
Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,25e^{180j}$	$V_{as2} = 0,25e^{180j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = 0,25e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,25e^{-60j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = 0,25e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,25e^{60j}$	$V_{cs0} = 0$

Os fasores resultantes desse tipo de afundamento foram:

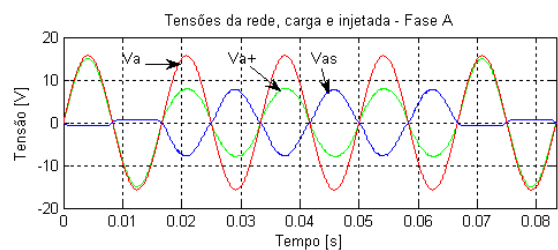
$$\text{Fase A} - 0,49e^{0j} \quad \text{Fase B} - 0,87e^{-106,6j} \quad \text{Fase C} - 0,90e^{107,1j}$$

Na figura 4.20(b), observa-se que a tensão na carga sofreu o afundamento com a profundidade desejada. Ainda podem-se analisar nas figuras 4.20(d) e 4.20(f), os saltos de ângulos que ocorreram nas fases B (salto de 13,4°) e C (salto de -12,9°).

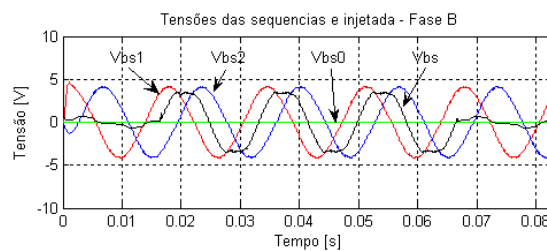
Nas figuras 4.20(a), 4.20(c) e 4.20(e), observam-se os comportamentos dos inversores de frequência e como as tensões de seqüência positiva e negativa formam as tensões injetadas. Na figura 4.20(a), vê-se que as tensões de seqüências positiva e negativa possuem mesma amplitude e ângulo. Nas figuras 4.20(c) e 4.20(e), observam-se que as tensões são defasadas 120° e com isso suas somas resultam em tensões de ângulo 0°. Por isso, embora a profundidade seja de 50%, nessas duas fases a profundidade não é tão acentuada quanto na fase A. No caso da simulação, o afundamento de tensão nas fases B e C têm magnitude de aproximadamente 90%.



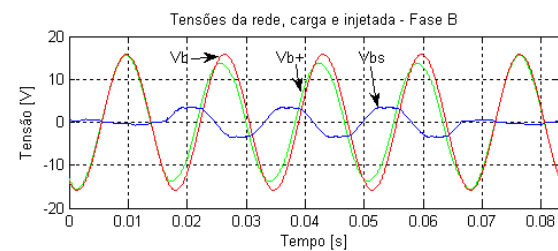
(a)



(b)



(c)



(d)

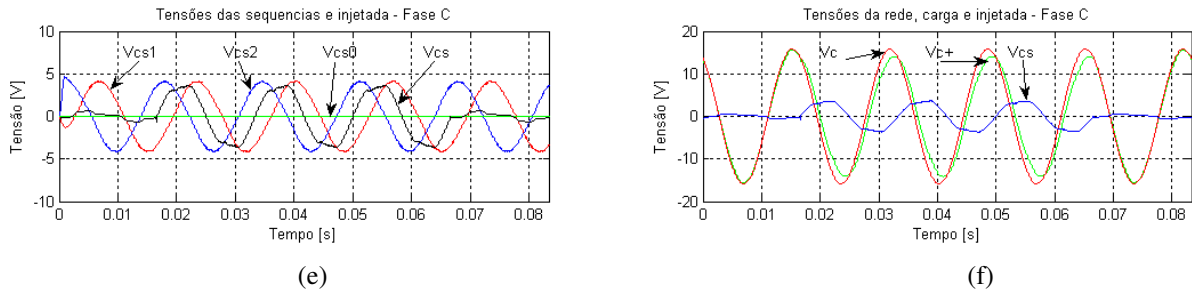


Figura 4.20 – Simulação do afundamento D

(a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa (x1,3), zero e injetada

(b) Fase A – Tensões da rede, carga e injetada

(c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada

(e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

4.5.5 – Afundamento de Tensão Tipo E

Como no afundamento de tensão tipo B, todos os inversores de frequência no tipo E operam de modo a formar a tensão a ser injetada. A tabela 4.9 mostra como ficam os vetores a serem produzidos pelos nove inversores de frequência.

Tabela 4.9 – Tensões nos inversores afundamento tipo E 50%

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,333e^{180j}$	$V_{as2} = 0,167e^{0j}$	$V_{as0} = 0,167e^{0j}$
$V_{bs1} = 0,333e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,167e^{120j}$	$V_{bs0} = 0,167e^{0j}$
$V_{cs1} = 0,333e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,167e^{-120j}$	$V_{cs0} = 0,167e^{0j}$

Somando as tensões positiva, negativa e zero em cada fase, observa-se que a fase A não sofrerá alteração, enquanto que as demais sofrerão afundamento de tensão de acordo com a profundidade desejada.

Os fasores seguintes são resultados da simulação para esse caso:

$$\text{Fase A} - 1,02e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,52e^{-120j}$$

$$\text{Fase C} - 0,52e^{120j}$$

A partir da análise das figuras 4.21(b), 4.21(d) e 4.21(f), observa-se que realmente não houve alteração nos ângulos das tensões da carga. Pela figura 4.21(b), vê-se que na fase A,

não houve alteração, enquanto nas outras duas, figuras 4.21(d) e 4.21(f), ocorreram afundamentos próximos da profundidade desejada.

As figuras 4.21(a), 4.21(c) e 4.21(e) ilustram a dinâmica dos nove inversores de frequência. Em 4.21(a), observa-se que as tensões de seqüência negativa e zero são iguais em amplitude e ângulo e possuem metade da amplitude e são defasadas 180° em relação à tensão de seqüência positiva. Isso resulta em uma tensão injetada de magnitude nula. Nas figuras 4.21(c) e 4.21(e), a soma das tensões de seqüência negativa e zero resultam em uma tensão semelhante à tensão de seqüência positiva. Por isso, a soma resulta em uma tensão injetada de magnitude da profundidade do afundamento de tensão desejado, sem saltos de ângulos.

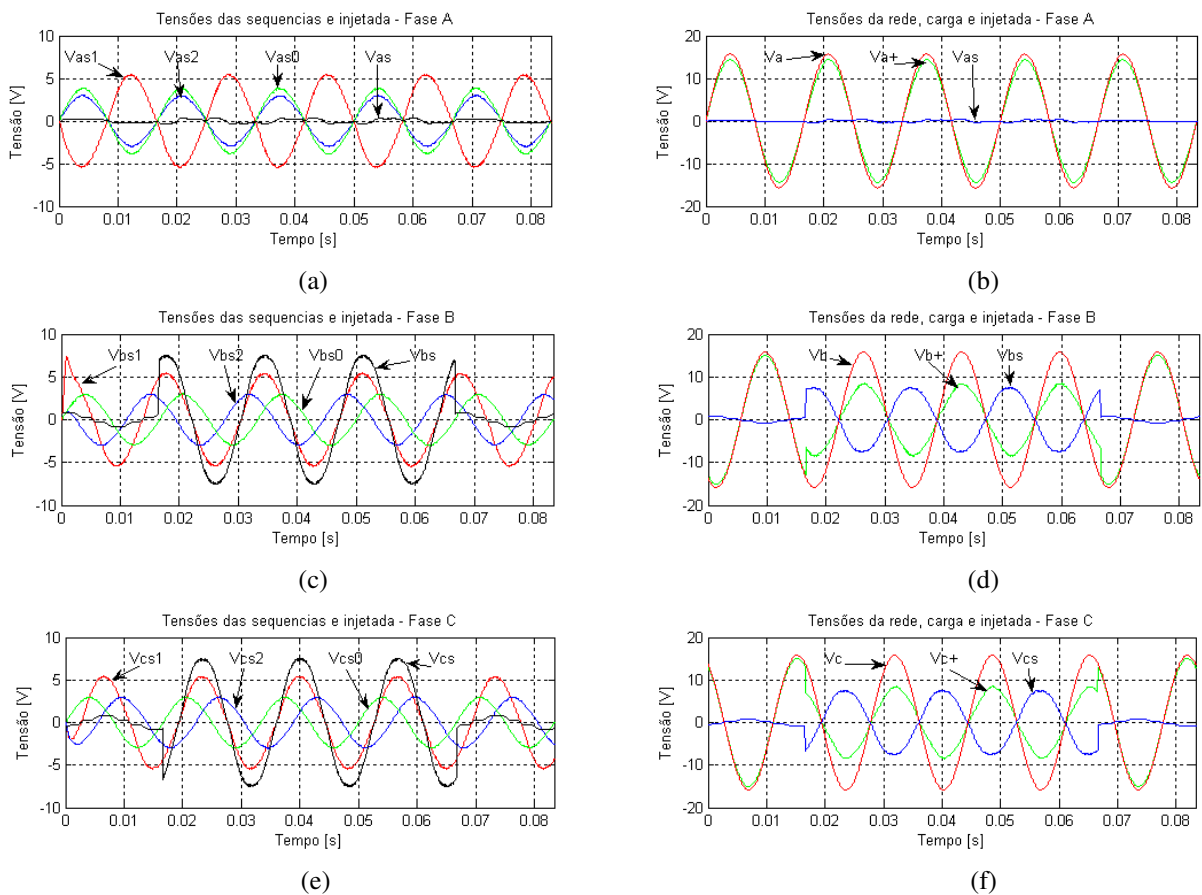


Figura 4.21 – Simulação do afundamento E

(a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero (x1,3) e injetada

(b) Fase A – Tensões da rede, carga (x0,9) e injetada

(c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada

(e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

4.5.6 – Afundamento de Tensão Tipo F

No afundamento de tensão tipo F, uma fase sofre afundamento na profundidade desejada, enquanto as outras duas sofrem afundamento de menor amplitude, com salto de ângulo. A tabela 4.10 mostra como devem ser configurados os inversores de frequência para o afundamento de 50%.

Tabela 4.10 – Tensões nos inversores afundamento tipo F 50%

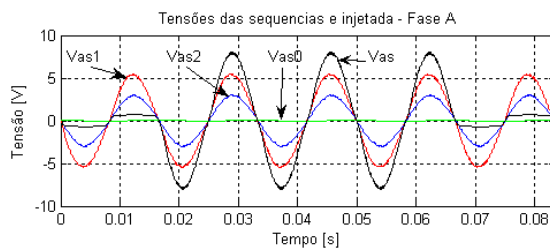
Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,333e^{180j}$	$V_{as2} = 0,167e^{180j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = 0,333e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,167e^{-60j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = 0,333e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,167e^{60j}$	$V_{cs0} = 0$

Analisando a figura 4.22, obtêm-se os fasores resultantes da tensão na carga.

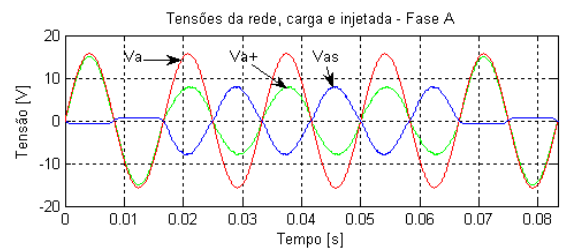
$$\text{Fase A} - 0,49e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,74e^{-110,8j}$$

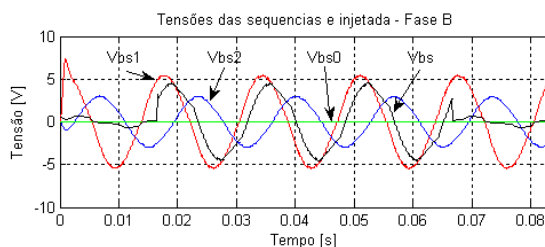
$$\text{Fase C} - 0,76e^{109j}$$



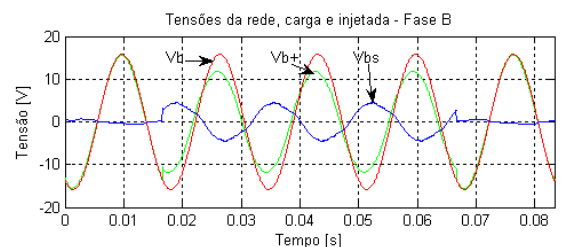
(a)



(b)



(c)



(d)

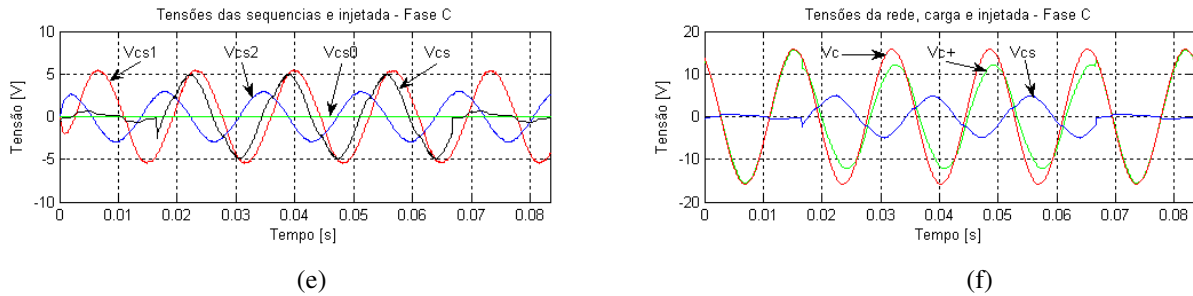


Figura 4.22 – Simulação do afundamento F

- (a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (b) Fase A – Tensões da rede, carga e injetada
- (c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada
- (e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada
- (f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

Observa-se em 4.22(d) e 4.22(f) que a tensão remanescente é maior que a desejada, pois ocorrem saltos de ângulo. No caso, o salto é de $9,2^\circ$ para a fase B e -11° na fase C.

Na figura 4.22(a), as tensões de seqüência positiva e negativa possuem mesmo ângulo e amplitude de modo a formar a tensão de amplitude com a profundidade estabelecida. Em 4.22(c) e 4.22(e), a amplitude das tensões varia de acordo com a magnitude do afundamento e o ângulo das tensões a serem injetadas é sempre o mesmo (30° para fase B e -30° para fase C), já que a tensão da seqüência negativa tem sempre metade da amplitude da tensão de seqüência positiva e a defasagem entre elas é sempre 120° .

4.5.7 – Afundamento de Tensão Tipo G

O último tipo de afundamento de tensão caracteriza-se por saltos de ângulos em duas fases e amplitude sempre maior que 0,66 pu na outra fase. Para que a tensão injetada forme um afundamento de tensão tipo G com magnitude de 50%, os inversores de frequência devem ser configurados de acordo com tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Tensões nos inversores afundamento tipo G 50%

Seqüência positiva	Seqüência negativa	Seqüência zero
$V_{as1} = 0,333e^{180j}$	$V_{as2} = 0,167e^{0j}$	$V_{as0} = 0$
$V_{bs1} = 0,333e^{60j}$	$V_{bs2} = 0,167e^{120j}$	$V_{bs0} = 0$
$V_{cs1} = 0,333e^{-60j}$	$V_{cs2} = 0,167e^{-120j}$	$V_{cs0} = 0$

Pela figura 4.23, obtiveram-se os fasores resultantes durante o afundamento de tensão.

Fase A – $0,83e^{0j}$

Fase B – $0,61e^{-134,8j}$

Fase C – $0,59e^{131,5j}$

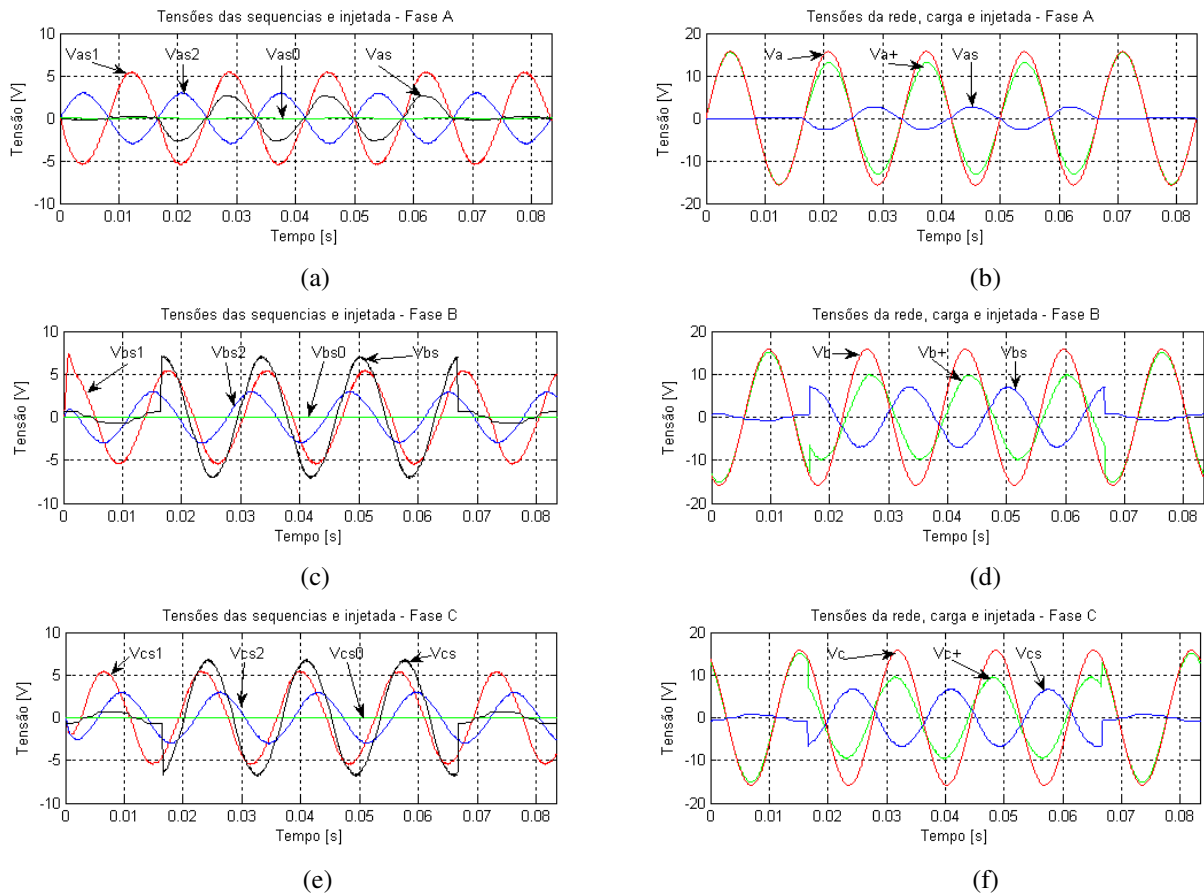


Figura 4.23 – Simulação do afundamento G

(a) Fase A – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(b) Fase A – Tensões da rede, carga e injetada

(c) Fase B – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(d) Fase B – Tensões da rede, carga e injetada

(e) Fase C – Tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada

(f) Fase C – Tensões da rede, carga e injetada

Va+ substitui Va' na representação da tensão na carga

Observa-se que na figura 4.23(b) a tensão é maior que 0,66pu e nas demais a tensão é maior que a profundidade desejada, pois há saltos de ângulo. Na simulação da figura 4.23(d), o salto é de $-14,8^\circ$, enquanto que em 4.23(f) o salto é de $11,5^\circ$.

Na figura 4.23(a) vê-se que a tensão de seqüência positiva possui o dobro da magnitude e 180° de defasagem em relação à tensão de seqüência negativa, conforme a tabela 26. A tensão resultante dessa soma é uma tensão com a mesma amplitude da tensão de seqüência negativa, em fase com a seqüência positiva. Nas fases B e C, figuras 4.23(c) e 4.23(e), a tensão injetada possui sempre o mesmo ângulo ($79,1^\circ$ na fase B e $-79,1^\circ$ na fase C) e a amplitude depende da profundidade desejada. O ângulo das tensões injetadas é o mesmo porque a amplitude da tensão de seqüência positiva é sempre duas vezes a amplitude da tensão de seqüência negativa e a defasagem entre elas é sempre 60° .

Capítulo 5

PROTÓTIPO PARA OPERAÇÃO EM BAIXA POTÊNCIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 – INVERSORES DE FREQUÊNCIA

5.1.1 – Circuito de Potência

Os inversores do protótipo são de configuração em ponte H, como ilustrado na figura 5.1. As chaves são protegidas por circuitos *snubber* e um filtro LC é colocado na saída do inversor.

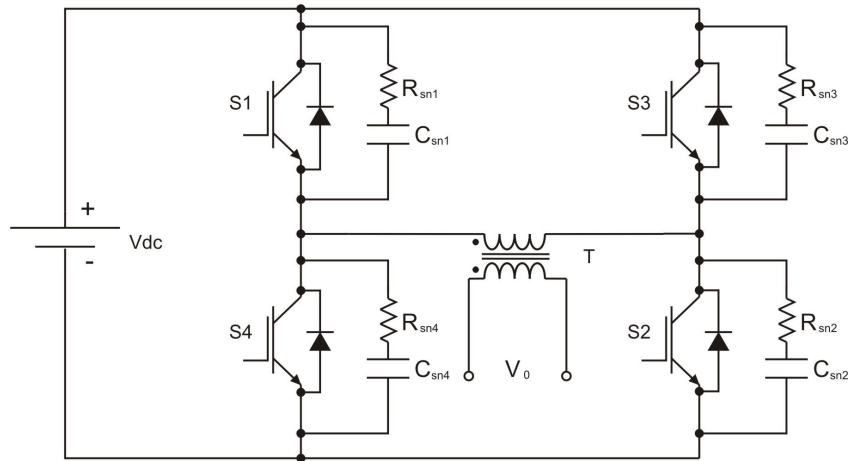


Figura 5.1 – Circuito eletrônico da ponte H utilizada

5.1.2 – Circuito de Controle

O circuito de controle dos inversores, ilustrado na figura 5.2, foi implementado utilizando os *drivers* IR2110 da *International Rectifier*. Uma barreira óptica foi colocada entre o gerador dos sinais PWM e esse *driver* de potência de modo a proteger o sistema de controle de eventuais sobre-tensões no circuito de potência.

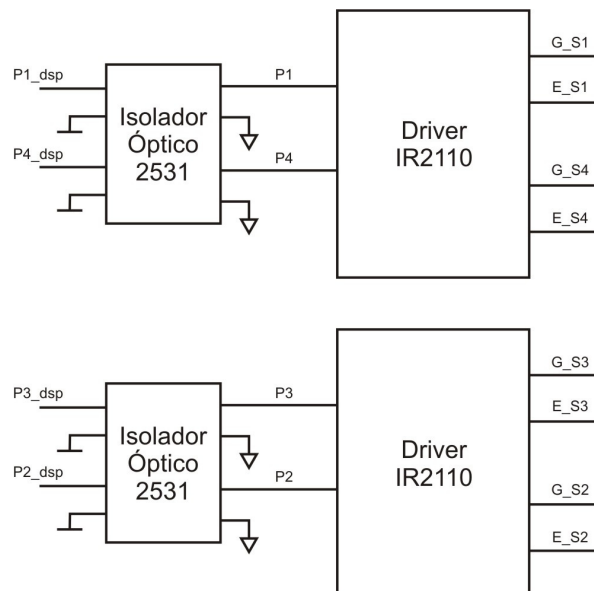


Figura 5.2 – Circuito de comando dos inversores

5.2 – CHAVES *BYPASS*

5.2.1 – Circuito de Potência

O circuito de potência das chaves *bypass* é composto por tiristores em antiparalelo, como ilustrado na figura 53, de modo que se tenha a condução de toda a tensão da rede, independente do semi-ciclo de operação desta.

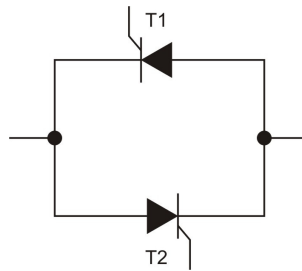


Figura 5.3 – Tiristores em antiparalelo

5.2.2 – Circuito de Controle

O circuito de controle do estado de operação dos tiristores possui algumas particularidades:

- a) O ângulo de disparo dos tiristores será sempre nulo, já que se deseja tensão total na carga;
- b) Cada tiristor deverá conduzir por meio ciclo, já que a cada 180°, a tensão na carga alterna de polaridade;
- c) As chaves *bypass* deverão ser acionadas remotamente.

Para que cada tiristor do conjunto em antiparalelo conduza por 180°, projetou-se um circuito de sincronismo a partir da tensão da rede. Esse circuito é um comparador simples com amplificador operacional cuja saída é uma onda quadrada na frequência da tensão da rede. Como o ângulo de disparo é sempre zero, o circuito de comando não possui nenhum tipo de controle de disparo. Independentes do ângulo em que a tensão estiver, as chaves irão conduzir pelo tempo de duração do pulso que definirá a duração do afundamento de tensão. O *driver* de comando dos tiristores da figura 5.4 utiliza-se de transformadores de pulso como meio de isolamento entre o *driver* e o sistema de potência.

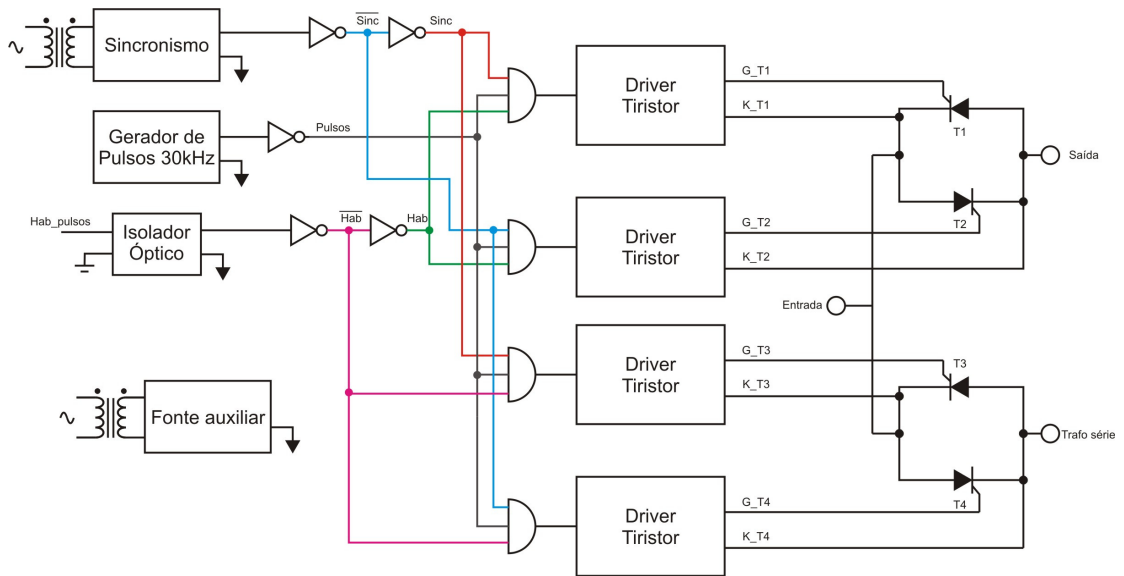


Figura 5.4 – Driver de potência para tiristores em antiparalelo

5.3 – INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Como existe a possibilidade de alterar o tipo, a magnitude e a duração do afundamento de tensão, uma interface homem-máquina (IHM) foi projetada e desenvolvida. Utilizando-se o microcontrolador MC68HC908JL3, desenvolveu-se um sistema para o usuário escolher os parâmetros do afundamento de tensão. A figura 5.5 mostra um diagrama de blocos abordando os principais componentes e sistemas utilizados na IHM.

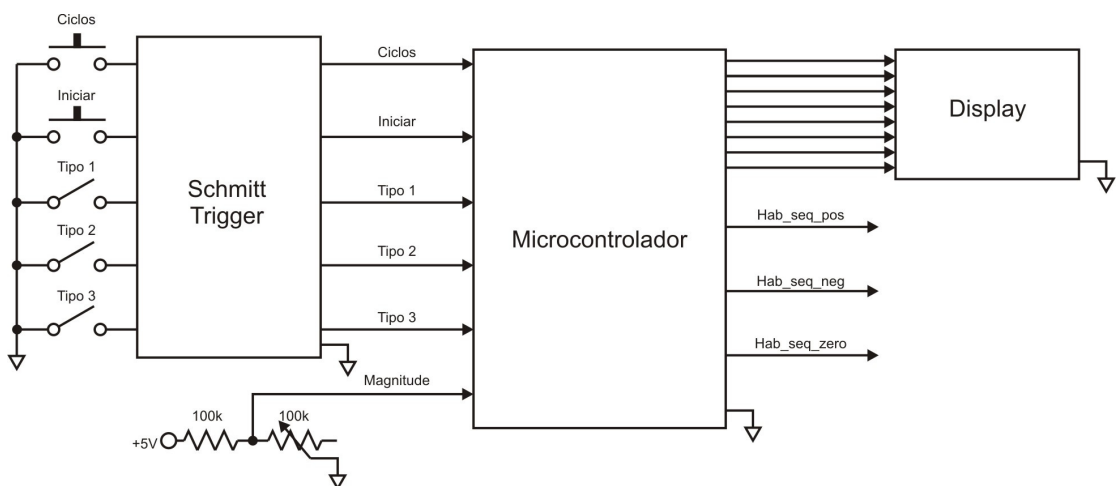


Figura 5.5 – Diagrama de blocos da IHM

O painel de comando da IHM, ilustrado na figura 5.6, dispõe de botoeiras, chaves, potenciômetro e um display.



Figura 5.6 – Painel de comando da IHM

O tipo do afundamento de tensão é escolhido por meio de três chaves: Tipo1, Tipo2 e Tipo3 na figura 5.5. O funcionamento é de uma contagem digital. Quando todas as chaves estão desligadas (estado “000”), não há afundamento de tensão. Quando o estado das chaves é “001”, o afundamento tipo A é escolhido. Quando o estado é “010”, escolhe-se o afundamento B e assim por diante até que no estado “111” é escolhido o afundamento tipo G.

A magnitude do afundamento de tensão é definida por um potenciômetro de 100 k Ω e pode variar de 0.1 a 0.9 pu, lembrando que a magnitude em questão é referente à tensão remanescente.

A duração é parametrizada em números de ciclos da rede, ou seja, 16.66 ms. Assim sendo, a cada toque da botoeira “Duração”, soma-se um ciclo na duração do afundamento. A faixa de variação é de 1 a 9 ciclos, ou 16.66 a 150 ms.

Foi adicionada uma botoeira para definir o início do afundamento de tensão. Ao pressioná-la, o afundamento de tensão ocorrerá em aproximadamente 10 segundos, contagem que será mostrada no display da IHM. O display da IHM mostra os parâmetros citados à medida que são alterados.

5.4 – IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DOS INVERSORES NO DSP

5.4.1 – DSP e Placa de Desenvolvimento

A estratégia PWM de controle foi desenvolvida no DSP TMS320F2812, cujo diagrama de blocos pode ser vista na figura 5.7, da família de ponto-fixado da Texas Instruments. Detalhes das características do DSP podem ser encontrados em seu manual de dados ou no site do fabricante.

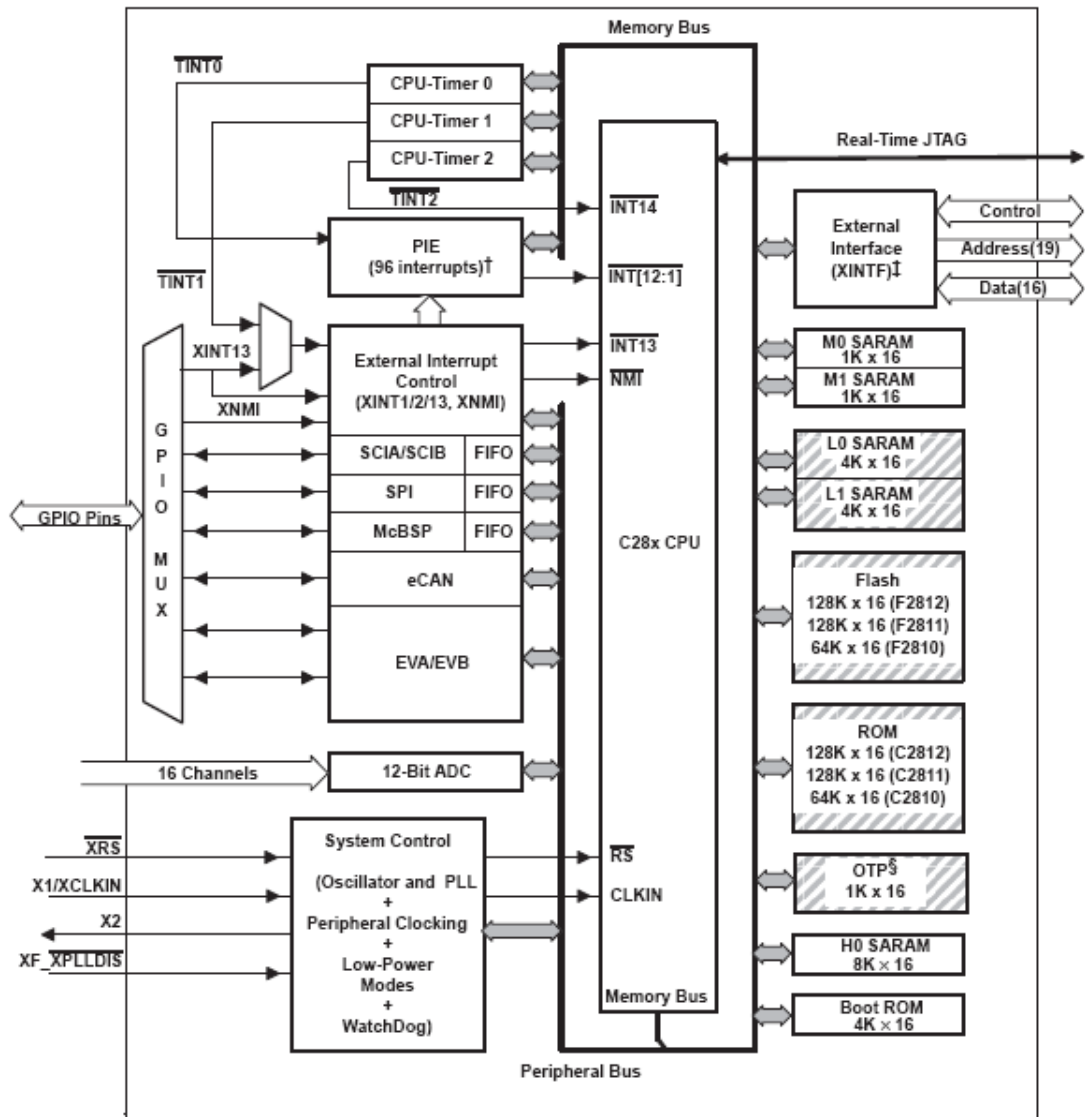
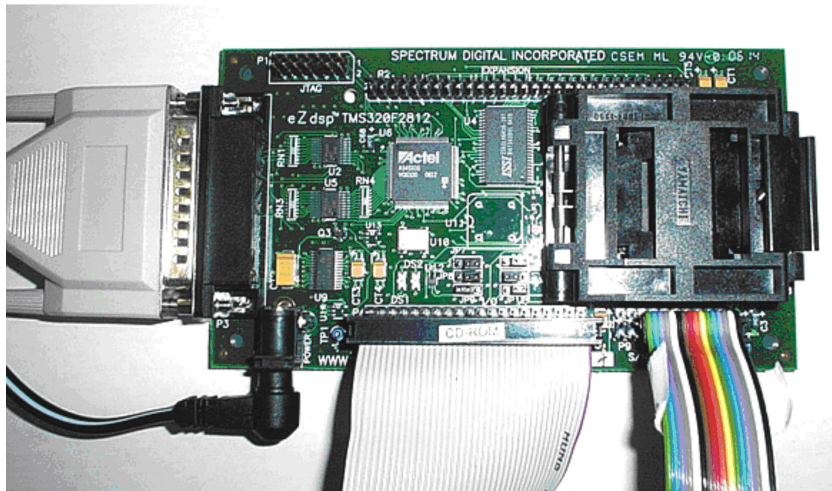
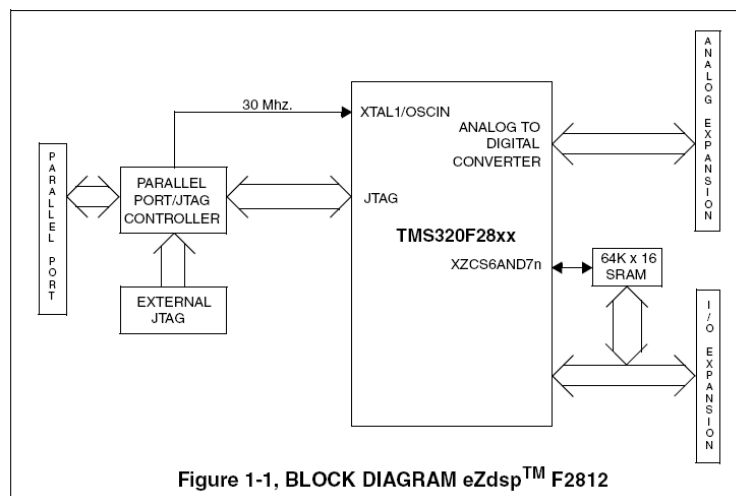


Figura 5.7 – Diagrama blocos do DSP



(a)



(b)

Figura 5.8 – Kit de desenvolvimento do DSP

(a) Foto da placa de circuito impresso do kit de desenvolvimento

(b) Diagrama em blocos do kit de desenvolvimento

A configuração dos periféricos do DSP depende de cada aplicação. No item A3.7 do apêndice 3 podem ser vistos como são configurados o conversor analógico-digital, os pinos de entrada/saída do DSP, os parâmetros do sistema como velocidade de processamento, contadores e outros, bem como o módulo PWM responsável pela liberação dos pulsos aos inversores.

5.4.2 – Técnica Unipolar

A estratégia PWM unipolar caracteriza-se pela comparação de duas ondas senoidais de referência, defasadas entre si de 180 graus (complementar), com uma onda portadora

triangular, conforme exposto em 4.1.1.2. A programação dessa estratégia de controle foi desenvolvida no DSP.

Armazenaram-se valores da portadora triangular e valores correspondentes à meio-ciclo da onda de referência senoidal. O motivo de alocação de meio-ciclo da onda senoidal é que os valores da onda senoidal complementar podem ser calculados e os tempos de transição para as chaves 1 e 4 na primeira metade (T1) da onda são os mesmos para as chaves 2 e 3 na segunda metade. Analogamente, os tempos de transição das chaves 2 e 3 na primeira metade (T2) são os mesmos para as chaves 1 e 4 na outra parte da onda senoidal. A figura 5.9 ilustra essa particularidade da técnica unipolar. A frequência do sinal triangular é menor que a utilizada experimentalmente para ficarem mais claras as comparações dos tempos de transição.

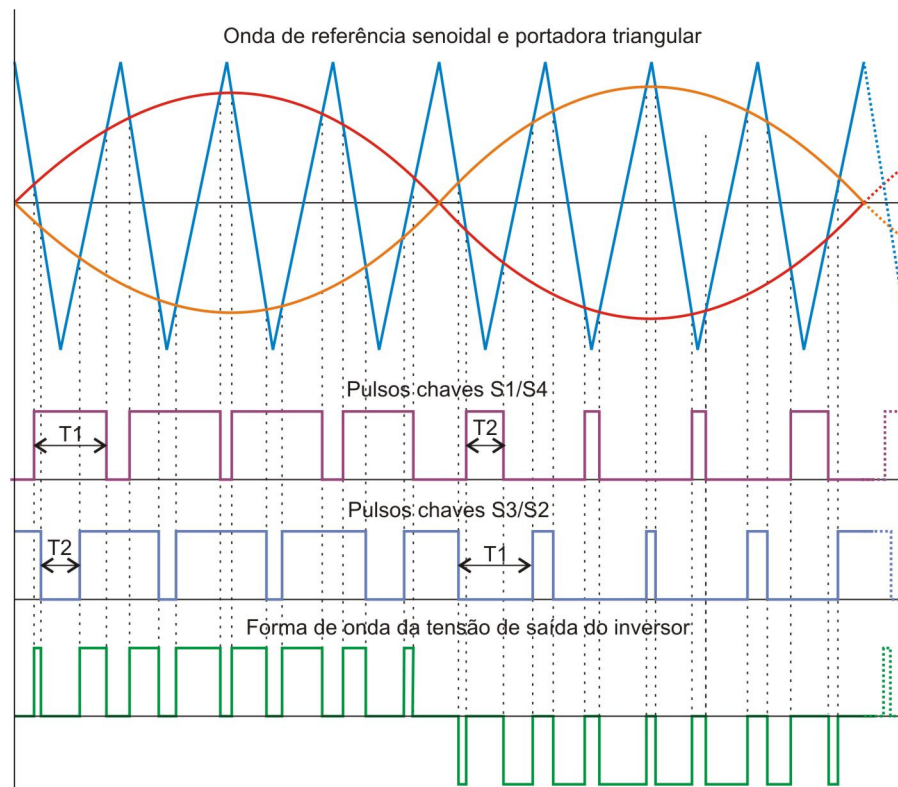


Figura 5.9 – Tempos de transição

Armazenar apenas metade da onda senoidal aumenta a precisão do sistema de comparação já que para um mesmo espaço físico na memória pode-se armazenar o dobro de valores da referência senoidal.

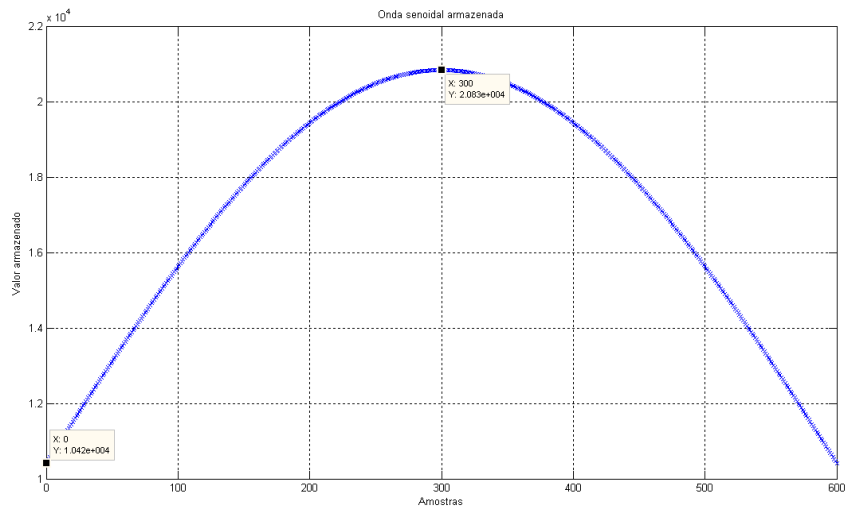
A onda de referência senoidal armazenada é dada pela equação 5.1 e é representada na figura 5.10(a). A onda da portadora triangular é formada por dois segmentos de retas,

conforme as equações (5.2) e a figura 5.10(b). Os valores alocados podem ser vistos em A3.1, no apêndice 3.

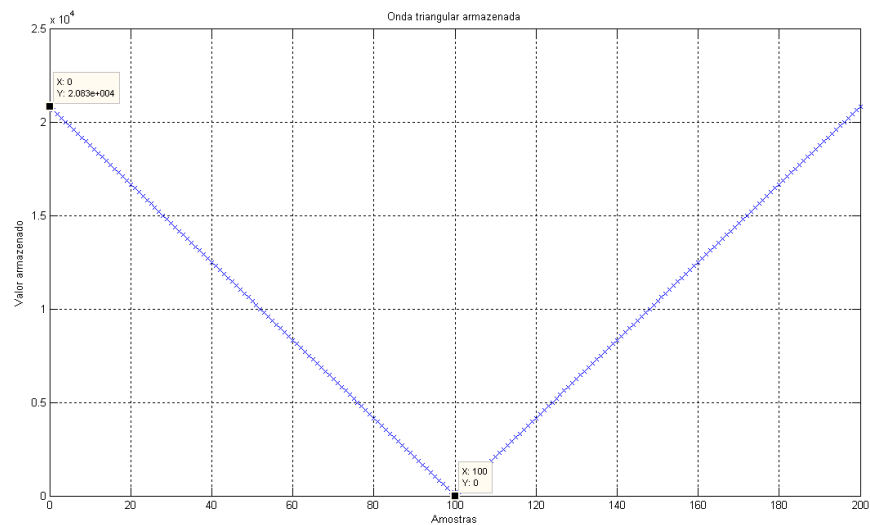
$$\textit{seno}(i) = \frac{T}{2}(1 + \sin(i)), \text{ com } 0 \leq i \leq \pi \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \textit{triangular}(j) &= T(1 - 0.01j), \text{ para } 0 \leq j < 100 \\ \textit{triangular}(j) &= T(0.01j - 1), \text{ para } 100 \leq j < 200 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Onde $T=20832$.



(a)



(b)

Figura 5.10 – Ondas armazenadas (a) meio-seno (b) triangular

Além disso, com o intuito de melhorar a tensão de saída, utilizou-se outra ferramenta: a interpolação da onda senoidal. Isso é possível armazenando-se mais valores da onda triangular. Para cada dois valores da onda senoidal, armazenaram-se cinco vezes mais valores da onda triangular. Assim sendo, a cada varredura de comparação, faz-se a interpolação dos dois valores de onda senoidal e comparam-se esses valores interpolados com os armazenados da onda triangular. A figura 5.11 mostra como ocorre a interpolação. Nesse caso, o tempo de transição ficou entre dois valores da tensão senoidal. Caso não se utilizasse da interpolação, a transição dar-se-ia após o próximo valor da senoidal, alterando consideravelmente o tempo real da transição, fato que diminui a qualidade da tensão de saída do inversor.

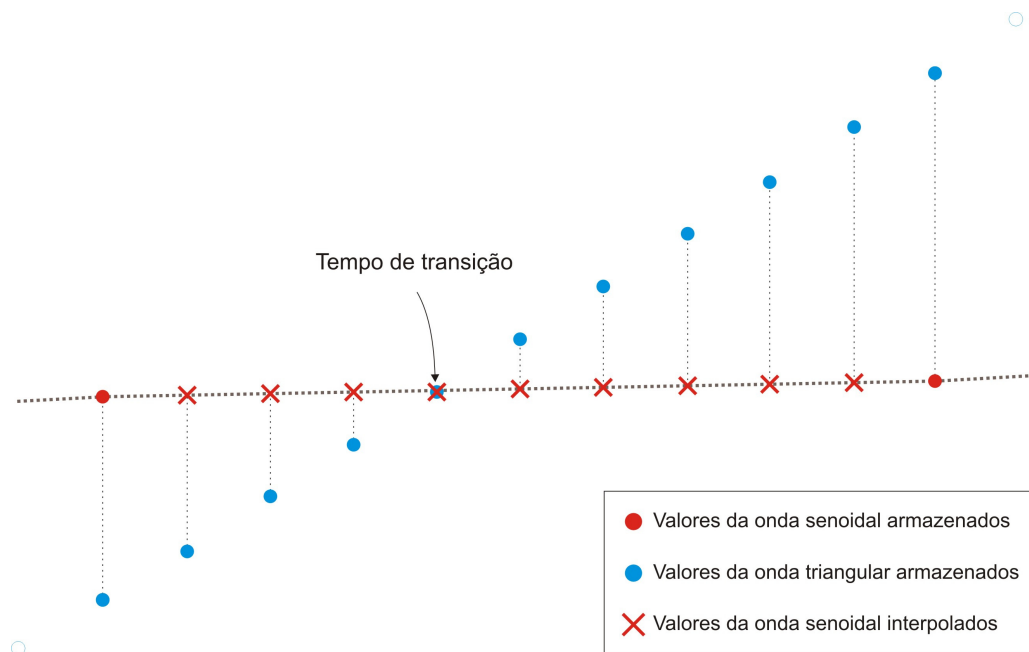


Figura 5.11 – Interpolação da meia-onda senoidal

O DSP utilizado possui em seus periféricos 16 canais PWM e por isso, utilizou-se um mesmo processador para controlar os três inversores de frequência utilizados em cada fase do gerador de fundamentos de tensão. Os inversores de frequência foram comutados na frequência de 3600 Hz. O tempo morto utilizado na comutação das chaves foi de 2 μ s. Na Figura 5.12 estão representadas as estruturas do DSP que foram utilizadas e como elas se interligam com a rotina de cálculo dos vetores de transição e as entradas do sistema de modo a definir os sinais PWM de saída.

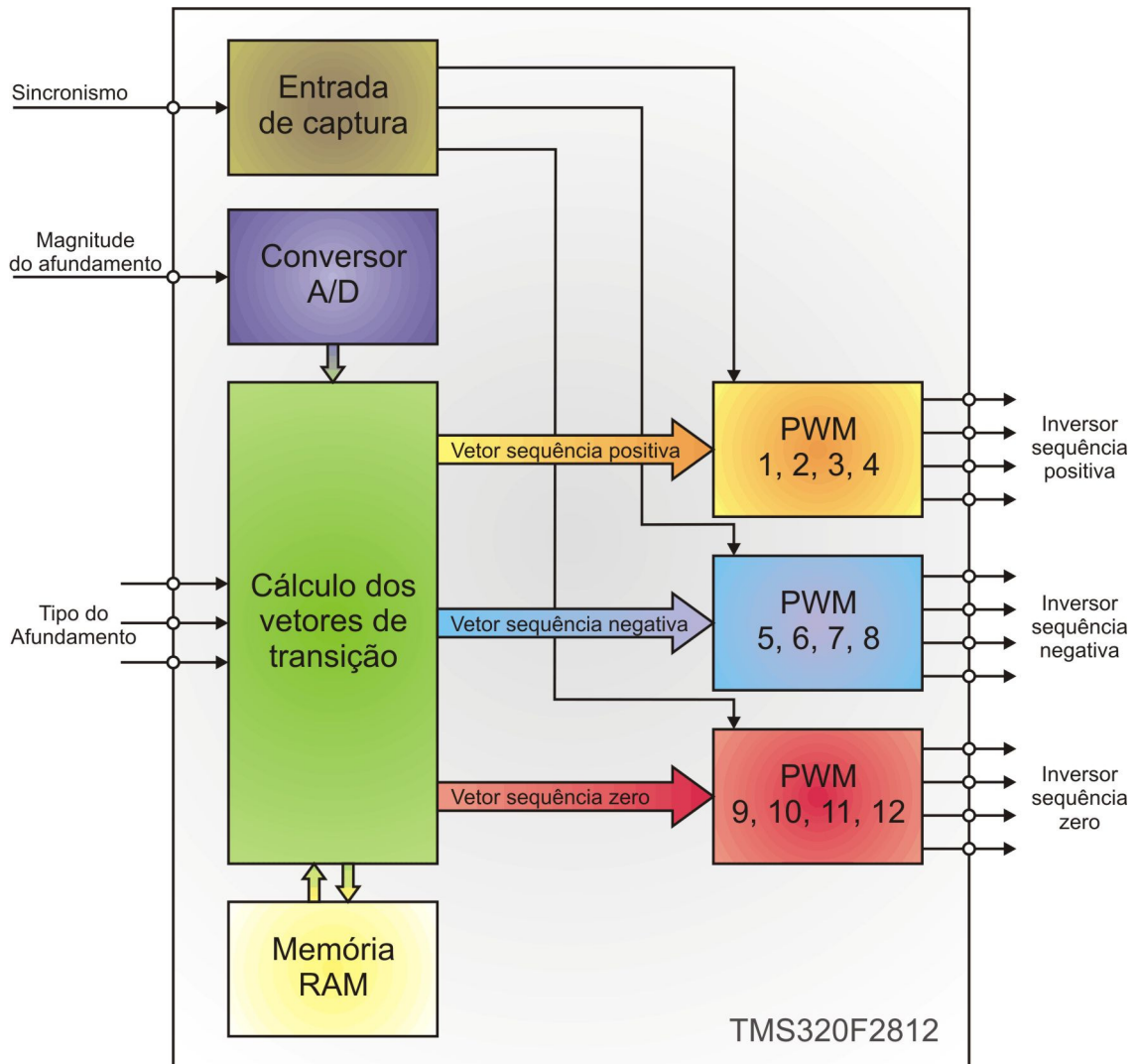


Figura 5.12 – Esquema de estruturas do DSP

O sincronismo das tensões de saída com a tensão da rede foi realizado com um circuito eletrônico comparador simples, formado por amplificadores operacionais, e a entrada de captura do DSP detectando a passagem por zero e ajustando as tensões de saída de acordo com o tipo de afundamento escolhido. A rotina de interrupção da entrada de captura utilizada está em A3.8.

No software de controle, foram criados vetores para armazenar os tempos de transição de cada chave para cada inversor da seqüência positiva, negativa e zero, como se vê no item A3.2. Esses vetores são lidos a cada interrupção de período ou underflow do timer do DSP, que está configurado para a frequência de comutação do inversor, ou seja, a frequência da onda triangular. Assim sendo, o valor configurado para o período do timer foi utilizado para definir a onda senoidal e triangular. O código de interrupção de período ou underflow do timer do DSP pode ser visto no item A3.10. Também foram criados vetores que definirão a

magnitude e ângulo da tensão de saída de acordo com o tipo de afundamento, como mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Fasores trifásicos dos componentes simétricos das tensões a serem injetadas

Fase A	Fase B	Fase C
Afundamento A		
$V_{as1} = (1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = (1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = (1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = 0$	$V_{bs2} = 0$	$V_{cs2} = 0$
$V_{as0} = 0$	$V_{bs0} = 0$	$V_{cs0} = 0$
Afundamento B		
$V_{as1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60j}$
$V_{as0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{cs0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-180j}$
Afundamento C		
$V_{as1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{0j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{120j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-120j}$
$V_{as0} = 0$	$V_{bs0} = 0$	$V_{cs0} = 0$
Afundamento D		
$V_{as1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60j}$
$V_{as0} = 0$	$V_{bs0} = 0$	$V_{cs0} = 0$
Afundamento E		
$V_{as1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{0j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-120j}$
$V_{as0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{0j}$	$V_{bs0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{0j}$	$V_{cs0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{0j}$
Afundamento F		
$V_{as1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60j}$
$V_{as0} = 0$	$V_{bs0} = 0$	$V_{cs0} = 0$
Afundamento G		
$V_{as1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{180j}$	$V_{bs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{60j}$	$V_{cs1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-60j}$
$V_{as2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{0j}$	$V_{bs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120j}$	$V_{cs2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-120j}$
$V_{as0} = 0$	$V_{bs0} = 0$	$V_{cs0} = 0$

A tabela 5.1 permite configurar o tipo do afundamento, já que a partir desses fasores, criaram-se dois vetores: um vetor de magnitudes e outro de ângulos. O vetor de magnitudes, representado na tabela 5.2, foi definido a partir dos escalares que multiplicam a magnitude da tensão injetada (1-V). Esse vetor possui 21 elementos, referentes às três seqüências de cada afundamento de tensão. Não há necessidade de se carregar os valores para cada fase, já que as magnitudes são as mesmas em todas as fases. O vetor foi com carregado com o dobro do denominador do escalar, já que no programa o vetor será multiplicado por dois. Isto se deve ao fato de se ter a fração $2/3$ entre os escalares e facilitar os cálculos.

Como o mesmo protótipo foi utilizado nas três fases, o vetor de ângulos da tabela 5.3 foi baseado no ângulo de referência de cada fase. Por exemplo, considerando que o gerador está instalado na fase defasada -120° da referência (fase B), para o afundamento de tensão tipo A, o ângulo deve ser 60° , a partir do fasor de referência (fase A). Porém, como o sincronismo é feito com base na fase B, o ângulo que deverá ser carregado no vetor é 180° , já que 60° está 180° defasado de -120° . Esse vetor possui 63 elementos, já que se têm três seqüências para cada sete tipos de afundamentos de tensão, contando as três fases do sistema. Os vetores de magnitude e ângulos podem ser vistos no item A3.2 do apêndice 3. A magnitude é lida a partir do conversor A/D e o código da interrupção do conversor A/D é visto no item A3.9.

Tabela 5.2 – Vetor de magnitudes

A			B			C			D			E			F			G		
2	0	0	6	6	6	4	4	0	4	4	0	3	6	6	3	6	0	3	6	0

Tabela 5.3 – Vetor de ângulos (em graus)

Fase A																				
A			B			C			D			E			F			G		
180	0	0	180	180	180	180	0	0	180	180	0	180	0	0	180	180	0	180	0	0
Fase B																				
A			B			C			D			E			F			G		
180	0	0	180	60	300	180	240	0	180	60	0	180	240	120	180	60	0	180	120	0
Fase C																				
A			B			C			D			E			F			G		
180	0	0	180	300	60	180	120	0	180	300	0	180	120	240	180	300	0	180	120	0

5.4.3 – Fluxogramas do Programa

O desenvolvimento do programa principal no DSP foi baseado no fluxograma da figura 5.13 e o código do programa está no item A3.3 do apêndice 3.

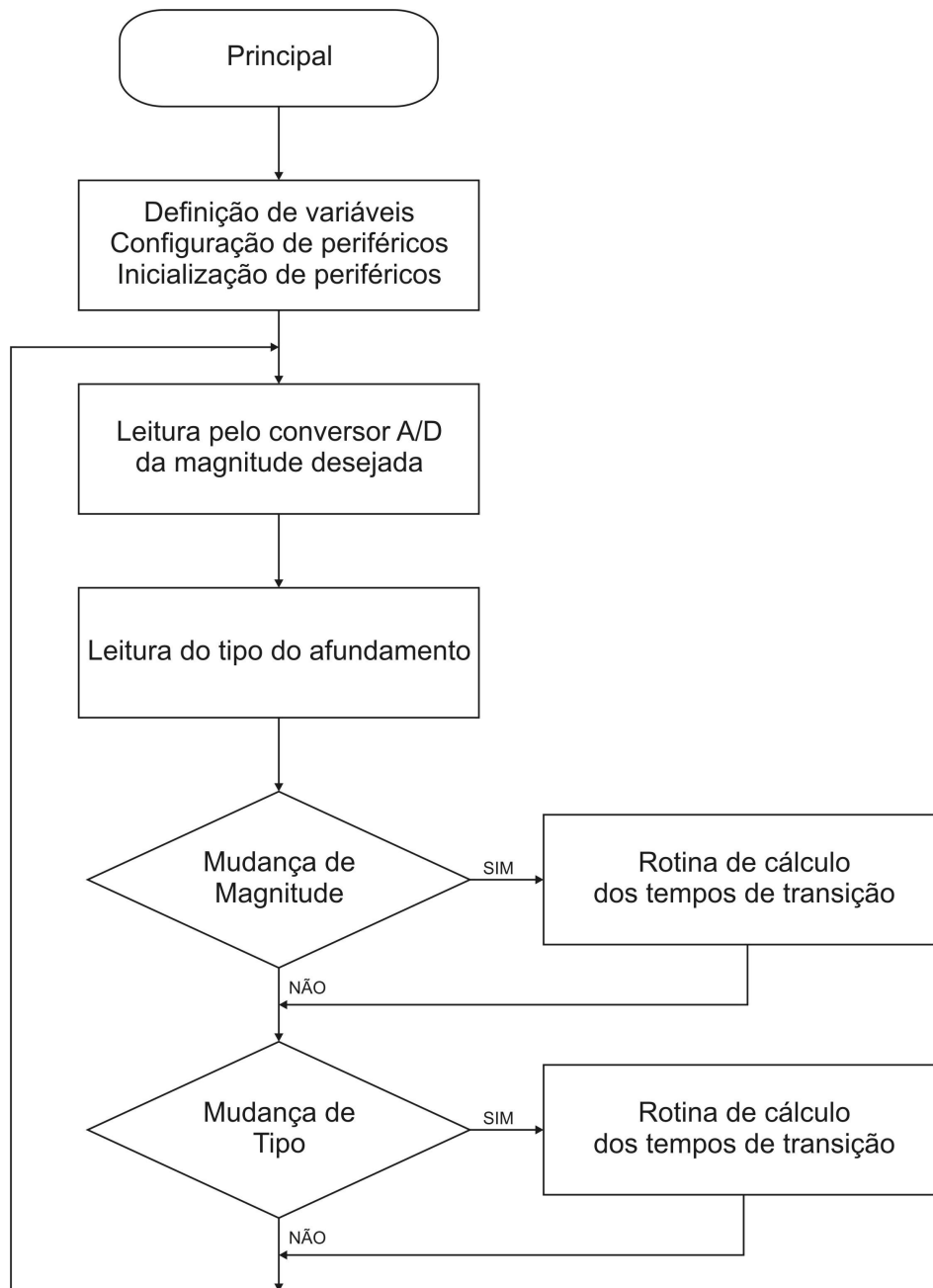


Figura 5.13 – Fluxograma do programa principal desenvolvido no DSP

A rotina de cálculo dos tempos de transição atualiza os vetores de tempos de transição por seqüência, magnitude e tipo do afundamento de modo a garantir a mudança de parâmetro

da tensão de saída nas interrupções seguintes. Os passos da rotina são representados nos fluxogramas da figura 5.13.

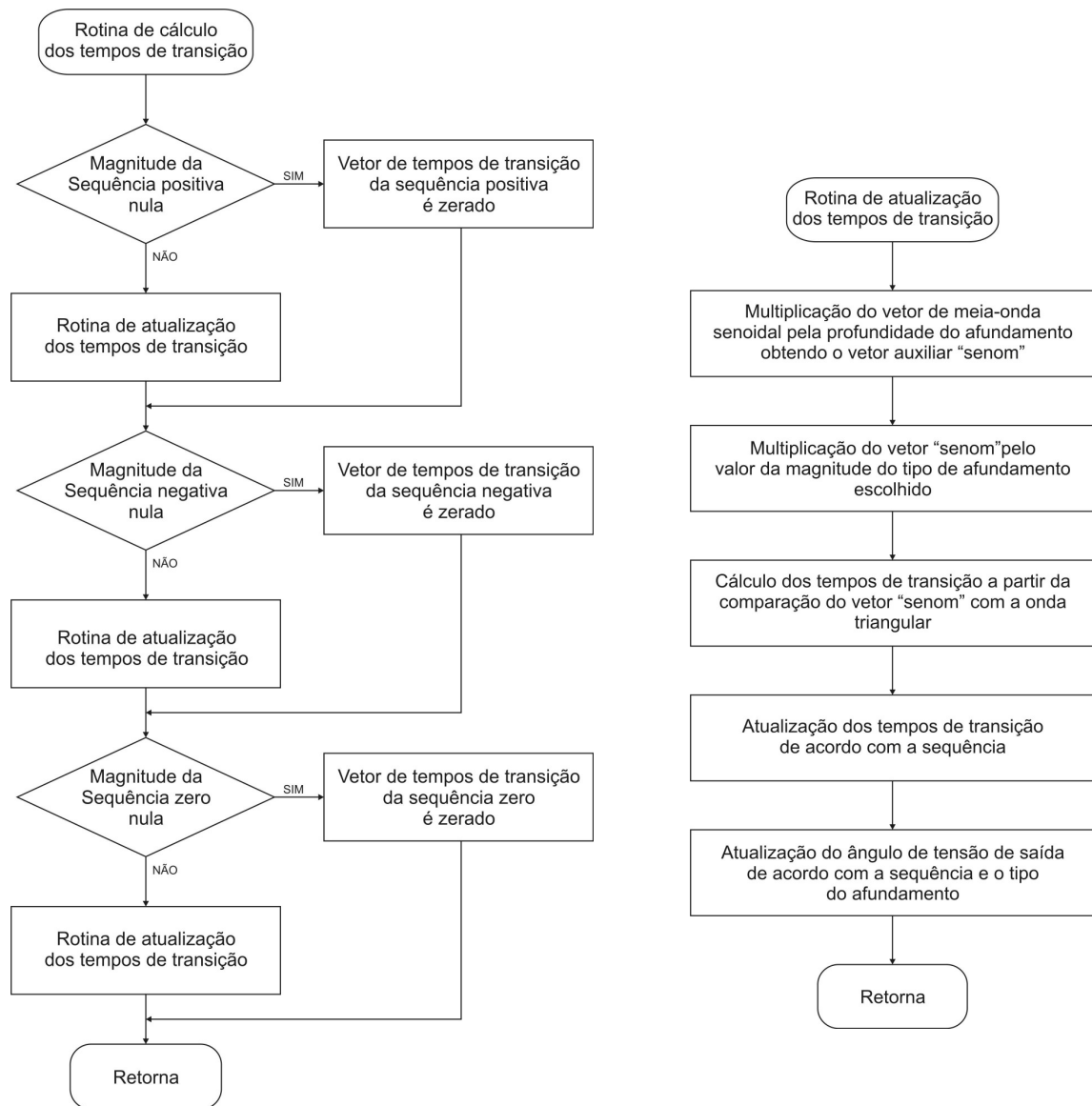


Figura 5.14 – Rotina de cálculo dos tempos de transição

O código da rotina de cálculo dos tempos de transição pode ser visualizada no item A3.4. O código que altera a referência senoidal de acordo com o tipo e magnitude do afundamento está presente no item A3.5. No item A3.6 do apêndice 3 é apresentada a função de atualização dos tempos de transição, ou seja, a função que realiza a comparação entre a referência senoidal e a portadora triangular.

A mudança de ângulo da tensão de saída depende da mudança do tipo de afundamento de tensão. Quando ocorre, na primeira interrupção após a atualização do ângulo de tensão de saída, o programa busca o valor do tempo de transição correspondente ao ângulo em questão.

Nesse projeto em questão foram armazenados 120 valores de tempos de transição. Logo, se o ângulo for de 180° , o programa irá iniciar a comparação na interrupção a partir da metade do valor do vetor de tempos de transição. Os ângulos da tensão de saída variam de acordo com cada tipo de afundamento de tensão e com cada fase em que está instalado o gerador, de acordo com a tabela 5.3.

5.5 – ESTRUTURA FÍSICA DO PROTÓTIPO

Todos os circuitos projetados e desenvolvidos foram alocados em uma estrutura física de três andares, em que cada andar é referente a uma componente da seqüência. A figura 5.15 mostra como ficaram dispostas as placas de circuito impresso dos circuitos, bem como os transformadores série, as chaves *bypass* e demais componentes do gerador de afundamentos de tensão.



Figura 5.15 – Foto da estrutura do gerador

A Figura 5.16 mostra a disposição do inversor, do transformador série e das chaves bypass para a seqüência negativa.

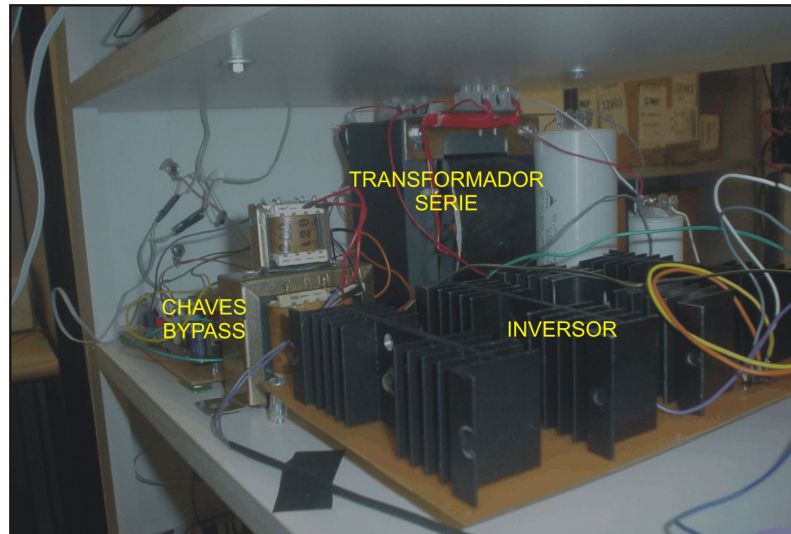


Figura 5.16 – Estrutura do gerador para uma seqüência

5.6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais são importantes para analisar e validar o comportamento e topologia do protótipo desenvolvido. Os parâmetros que foram utilizados nos ensaios constam na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros experimentais

Tensão nominal da carga	$V=11,2V_{rms}$
Tensão do barramento CC	$V=15,7V$
Potência da carga	100mW
Índice de modulação dos inversores	0,5
Duração do afundamento de tensão	100ms

A ferramenta de aquisição de dados utilizada foi um módulo de coleta de dados da *National Instruments*, com oito entradas analógicas de 24kHz cada.

O software utilizado para a coleta foi o LabVIEW. Além de um desenvolvimento do software de aquisição, foi criado um software de análise dos resultados a partir dos dados

armazenados. A figura 5.17 mostra uma das telas do software, em que se poder ver todos os sinais coletados.

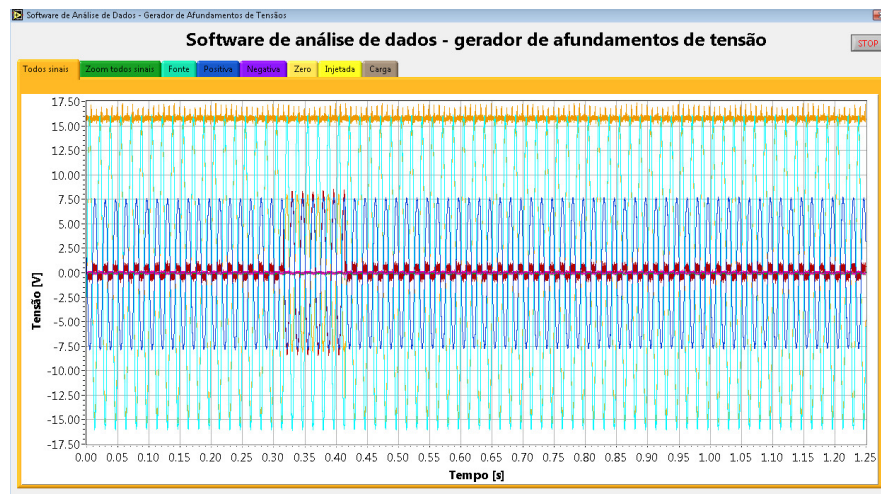


Figura 5.17 – Tela do software de análise dos dados coletados

Com o auxílio desse software, é possível analisar não só o afundamento de tensão, mas também as características das formas de onda, principalmente a resposta em frequências, conforme ilustrado na figura 5.18. A partir dessa análise, é possível avaliar o comportamento da tensão da rede e o nível de harmônicos injetados no sistema de energia. Na análise do afundamento, além da magnitude e duração, pode-se observar qual o salto de ângulo ocorrido durante o afundamento de tensão, como se pode ver na figura 5.19(a). Além disso, o software permite a análise das tensões geradas pelos inversores e como essas tensões de seqüência formam a tensão injetada, conforme apresentado na figura 5.19(b).

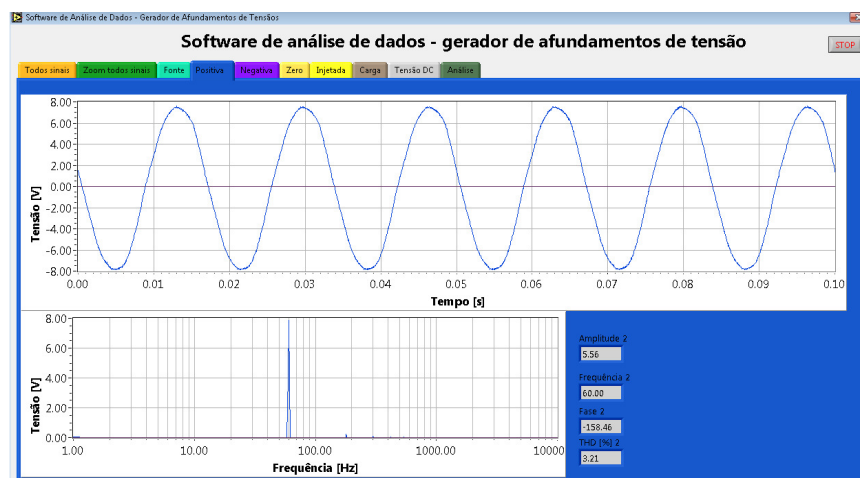
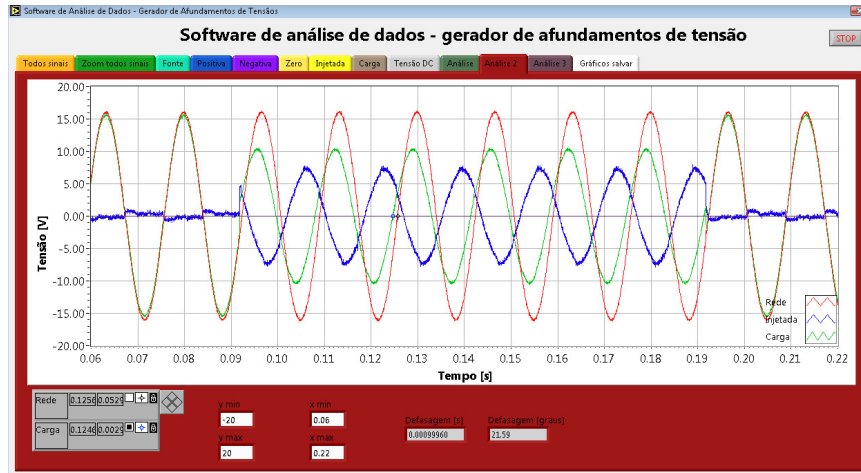
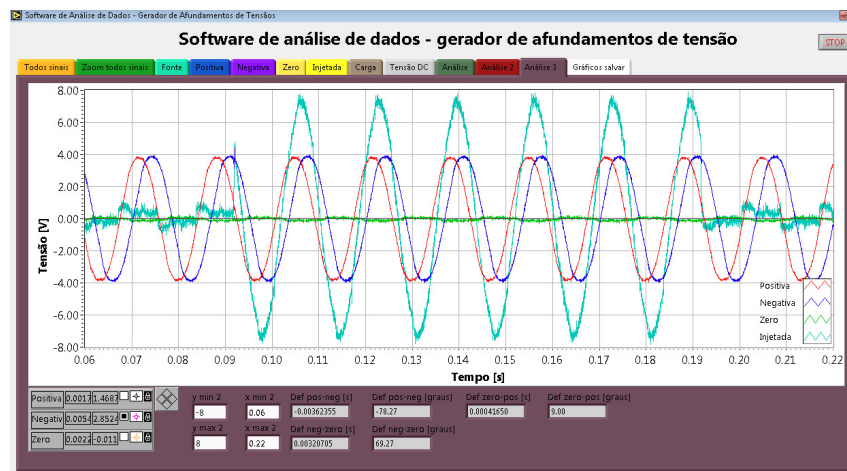


Figura 5.18 – Tela do software de análise dos dados coletados – análise de frequência



(a)



(b)

Figura 5.19 – Tela do software de análise dos dados coletados

(a) Análise do afundamento de tensão

(b) Análise das tensões de seqüência e injetada

5.7 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM FONTE DE TENSÃO IDEAL

As análises dessa seção apresentam como são formadas as tensões injetadas, a partir das seqüências positiva, negativa e zero. Além disso, mostram como ficam as tensões desenvolvidas na carga durante um afundamento de tensão. Cada fase foi ensaiada em tempos distintos, uma vez que somente um protótipo foi implementado. Para representar o comportamento do protótipo em cada fase, alterou-se no software desenvolvido o valor da fase em que o protótipo está instalado, já que em cada tipo de afundamento, o ângulo das

tensões de saída altera de acordo com a fase em que o gerador está instalado. Embora os afundamentos de tensão sejam analisados, na maioria dos casos, pelos seus valores eficazes, nas análises desse capítulo os afundamentos serão analisados pela forma de onda, já que além da análise da magnitude, devem-se analisar também o salto de ângulo e a forma de onda das tensões, principalmente as tensões geradas pelos inversores de frequência de cada seqüência.

Na tensão de rede utilizou-se uma fonte de tensão da Pacific Power Source, modelo 345-AMX, que possibilitou uma tensão de rede sem distorção harmônica. Isso é imprescindível para que os resultados sejam os mais reais possíveis, já que todos os tipos de afundamentos de tensão foram calculados para uma tensão de rede ideal (60 Hz).

A fonte de tensão trifásica 345-AMX possibilita a variação da frequência e da amplitude da tensão de saída, bem como a criação de tensões com distorções harmônicas. O modelo utilizado tem potência máxima até 4500 VA, com tensão até 270 V_{rms} e corrente máxima de 20A.

5.7.1 – Análise do Conteúdo Harmônico das Formas de Ondas Geradas

A análise do conteúdo harmônico presente nas tensões geradas pelos inversores é importante para que se possa injetar uma tensão com baixa distorção de forma de onda. As análises seguintes são feitas a partir do espectro de frequências da tensão gerada por um inversor em duas amplitudes distintas.

A primeira análise é para uma tensão de aproximadamente 8V de pico, correspondente a aproximadamente metade da tensão do barramento DC. Na figura 5.20(a) é mostrada a forma de onda, enquanto que na figura 5.20(b) pode ser visto seu espectro harmônico.

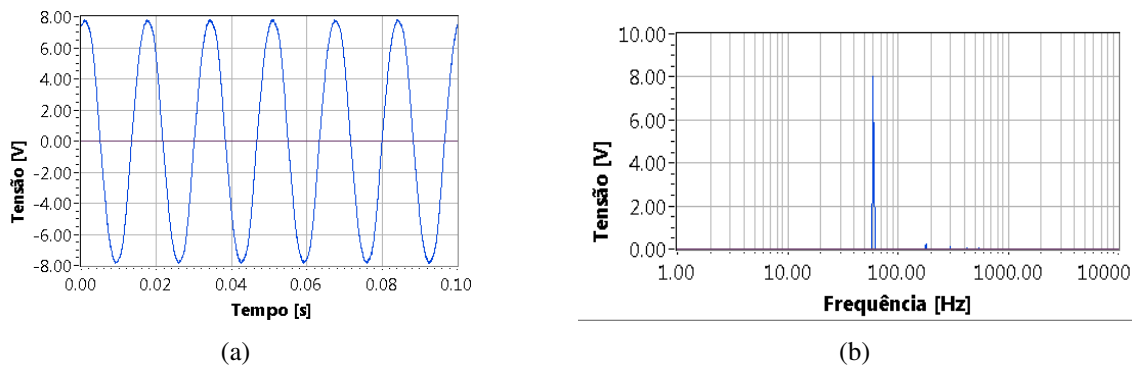


Figura 5.20 – Análise da tensão gerada pelos inversores (8V)

(a) Forma de onda

(b) Espectro de frequências

Na figura 5.20(b) observa-se que a tensão gerada pelo inversor possui algum conteúdo harmônico, sobretudo 3º, 5º, 7º e 9º harmônico. A distorção harmônica total dessa tensão é aproximadamente 3,20%.

A segunda análise é baseada em uma tensão de menor amplitude, aproximadamente 2,7V de pico. Na figura 5.21(a) pode ser visto a forma de onda dessa tensão, enquanto que em 5.21(b) é apresentado seu espectro de frequências.

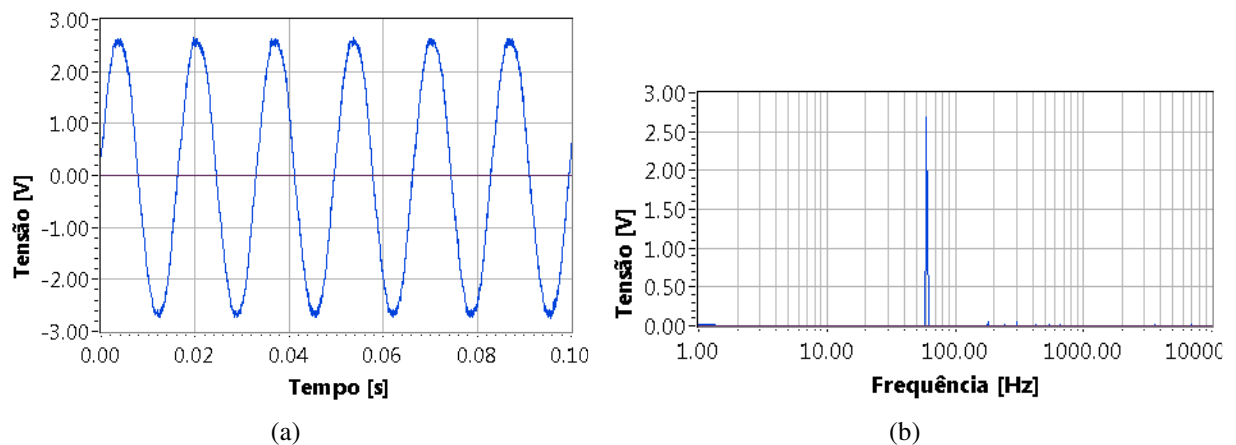


Figura 5.21 – Análise da tensão gerada pelos inversores (2,7V)

(c) Forma de onda

(d) Espectro de frequências

Observa-se da figura 5.21(b) que, embora a amplitude da tensão seja baixa, o conteúdo harmônico é semelhante ao apresentado para uma tensão de 8V de pico. Vê-se que o conteúdo harmônico é composto principalmente dos harmônicos de ordem 3, 5, 7 e 9. Nesse caso, a distorção harmônica total é por volta de 2,64%.

5.7.2 – Afundamento Tipo A

No afundamento tipo A, o inversor da seqüência positiva é o único que opera e, portanto, a tensão a ser injetada possui a mesma magnitude e ângulo. A figura 5.22 mostra os resultados referentes às três fases. Em 5.22(a), 5.22(c) e 5.22(e) são mostradas as tensões de seqüência positiva, negativa, zero e como elas formam a tensão a ser injetada. Em 5.22(b), 5.22(d) e 5.22(f), mostram-se as tensões da rede, injetada e carga.

Nesse caso, os fasores das tensões na carga foram:

$$\text{Fase A} - 0,47e^{0j} \qquad \text{Fase B} - 0,47e^{-120j} \qquad \text{Fase C} - 0,47e^{120j}$$

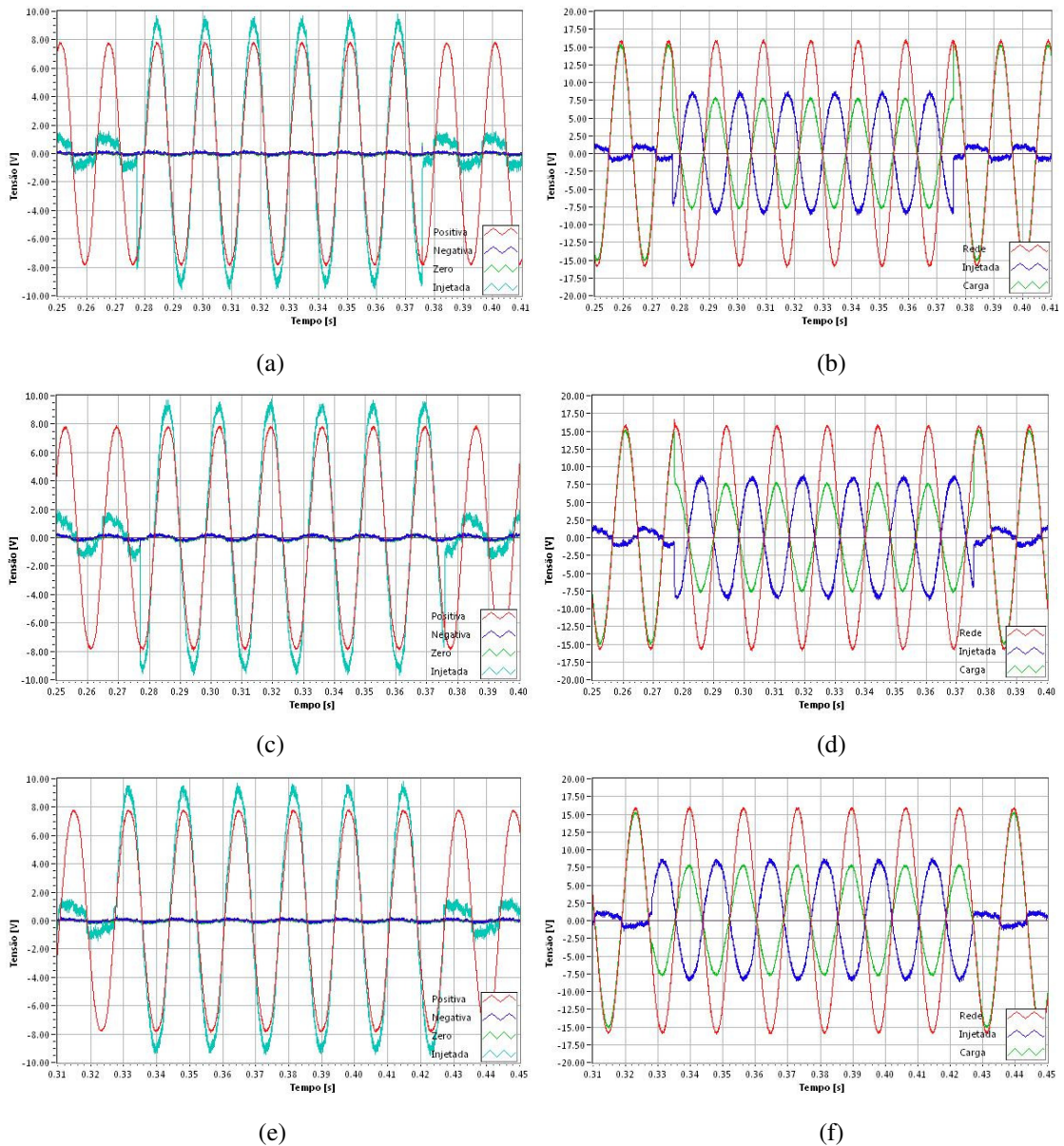


Figura 5.22 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo A

- (a) Fase A: positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro (x1.1)
- (b) Fase A: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (c) Fase B: positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro (x1.1)
- (d) Fase B: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) Fase C: positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro (x1.1)
- (f) Fase C: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

A tabela 5.5 mostra numericamente como ficaram os fasores das tensões positiva, negativa, zero e injetada.

Tabela 5.5 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento A)

Afundamento A					
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	8,02	0,00	0,00	8,63
	Ângulo [graus]	180,0	-	-	180,0
Fase B	Amplitude [V]	8,03	0,00	0,00	8,67
	Ângulo [graus]	180,0	-	-	180,0
Fase C	Amplitude [V]	8,00	0,00	0,00	8,63
	Ângulo [graus]	180,0	-	-	180,0

Como esperado, nas figuras 5.22(b), 5.22(d) e 5.22(f) as três fases apresentam o mesmo comportamento, ou seja, afundam na profundidade desejada.

5.7.3 – Afundamento Tipo B

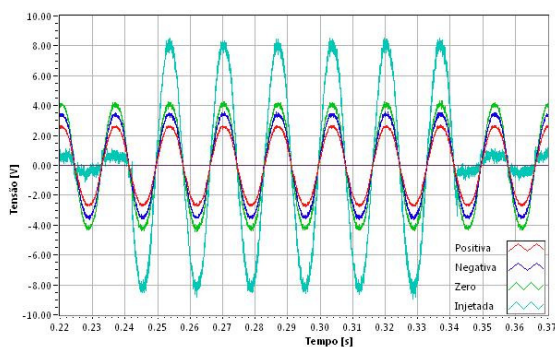
Nas análises que seguem, todos os inversores estão em operação para formar a tensão a ser injetada para compor o afundamento tipo B. Nas figuras 5.23(a), 5.23(c) e 5.23(e) são apresentadas as tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada, enquanto que em 5.23(b), 5.23(d) e 5.23(f) são mostradas as formas de onda das tensões da rede, injetada e na carga.

As tensões nos terminais da carga foram:

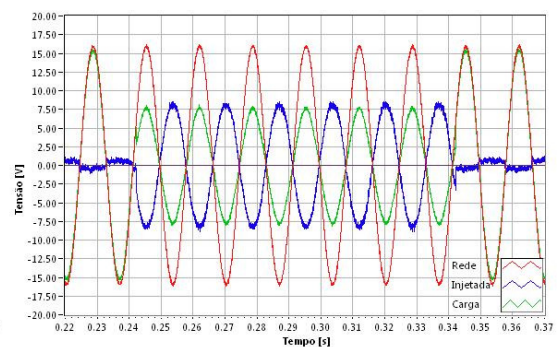
$$\text{Fase A} - 0,47e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,97e^{-120j}$$

$$\text{Fase C} - 0,97e^{120j}$$



(a)



(b)

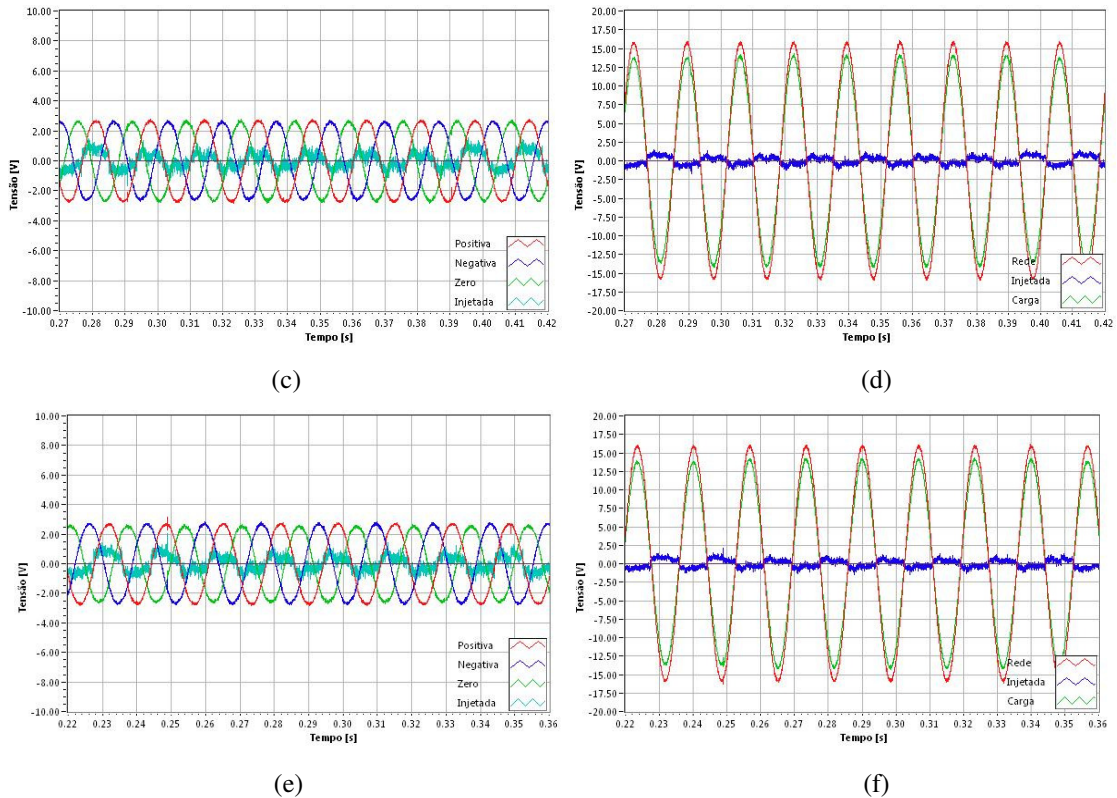


Figura 5.23 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo B

- (a) Fase A: positiva – vermelho, negativa – azul (x1.3), zero – verde (x1.6), injetada – azul claro
 (b) Fase A: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
 (c) Fase B: positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (d) Fase B: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde (x0.9)
 (e) Fase C: positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (f) Fase C: rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde (x0.9)

A tabela 5.6 mostra os resultados numéricos das tensões geradas pelos inversores.

Tabela 5.6 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento B)

		Afundamento B			
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	2,69	2,71	2,66	8,34
	Ângulo [graus]	180,0	180,0	180,0	180,0
Fase B	Amplitude [V]	2,77	2,69	2,72	0,00
	Ângulo [graus]	60,0	-60,0	180,0	-
Fase C	Amplitude [V]	2,77	2,74	2,64	0,00
	Ângulo [graus]	-60,0	60,0	180,0	-

Observa-se em 5.23(a) e na tabela 5.6 que as tensões dos três inversores na fase A possuem a mesma magnitude e ângulo, formando uma tensão injetada com metade da tensão nominal da rede. Por isso, em 5.23(b), o afundamento na fase A é de aproximadamente 50%.

Em 5.23(c), observa-se que as tensões formam um sistema equilibrado, com ligeira variação de magnitude. Isso resulta em uma tensão injetada de magnitude praticamente nula, conforme mostrado em 5.23(d).

Na fase C, figura 5.23(e), as tensões também compõem um sistema equilibrado, com menor variação que na fase B. Como resultado, a tensão injetada é mais próxima de zero e a tensão da carga sofre menor atenuação, como mostram as formas de onda em 5.23(f).

5.7.4 – Afundamento Tipo C

Nesse tipo de afundamento, os inversores de seqüência positiva e negativa operam formando a tensão injetada, como mostrado nas figuras 5.24(a), 5.24(c) e 5.24(e). Em 5.24(b), observa-se que a tensão na carga permanece inalterada, já que a soma das tensões de seqüência positiva e negativa resultam em tensão nula. Em 5.24(d) e 5.24(f), as tensões na carga sofrem saltos de ângulos de $-18,9^\circ$ e $19,6^\circ$, respectivamente, já que os fasores das tensões na carga foram:

$$\text{Fase A} - 0,97e^{0j} \qquad \text{Fase B} - 0,61e^{-138,9j} \qquad \text{Fase C} - 0,64e^{139,6j}$$

Da tabela 5.7, observa-se que houve pouca variação na magnitude das tensões dos inversores e nas fases B e C, os ângulos das tensões injetadas são 90° e -90° , como esperado.

Tabela 5.7 – Tensões das seqüências e injetada

Afundamento C					
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	3,99	4,17	0,00	0,00
	Ângulo [graus]	180,0	0,0	-	-
Fase B	Amplitude [V]	4,03	4,09	0,00	7,42
	Ângulo [graus]	60,0	120,0	-	90,0
Fase C	Amplitude [V]	4,00	4,04	0,00	7,24
	Ângulo [graus]	-60,0	-120,0	-	-90,0

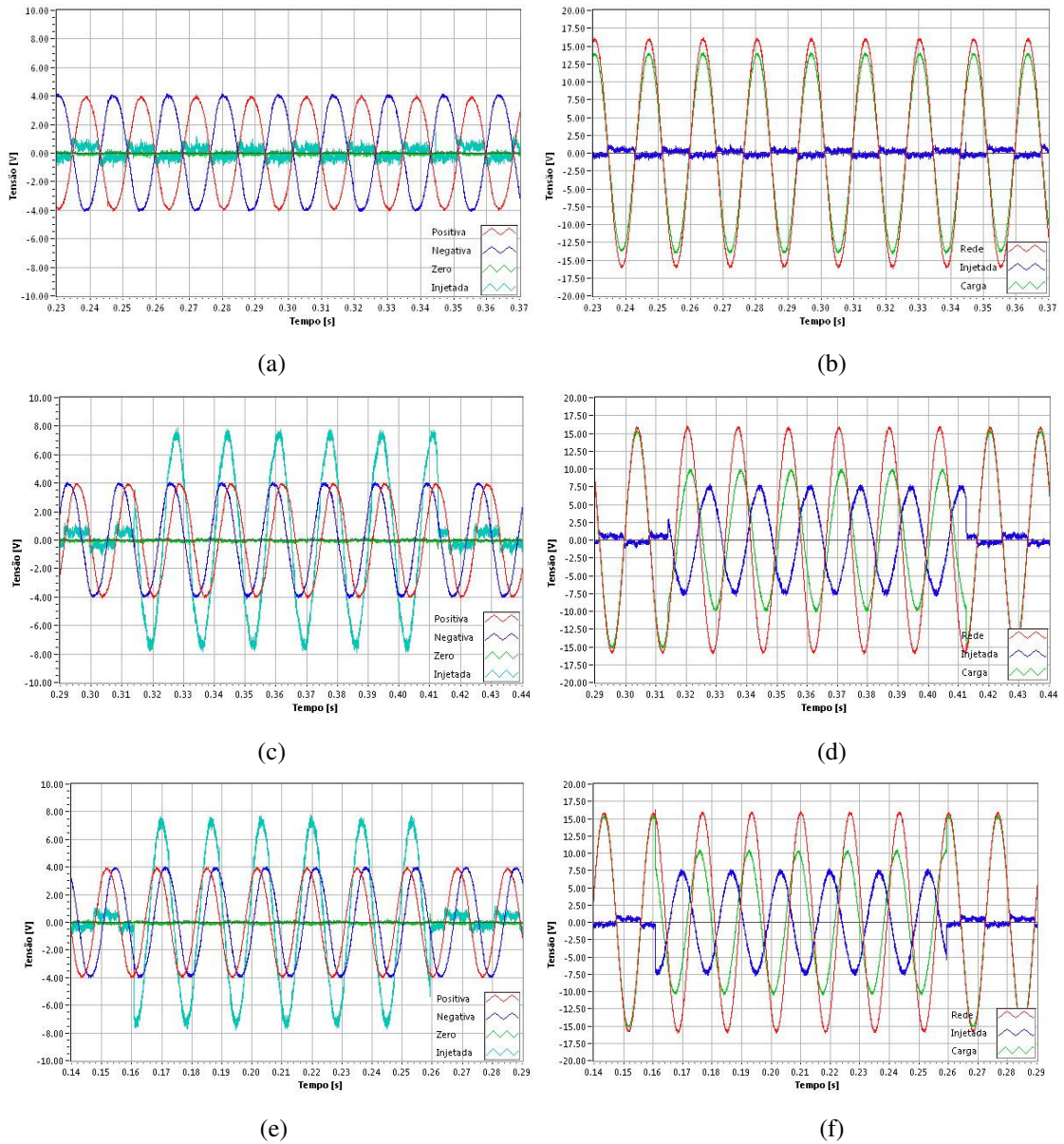


Figura 5.24 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo C

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde (x0.9)
- (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

5.7.5 – Afundamento Tipo D

Como no caso do afundamento anterior, o inversor de seqüência negativa não opera e por isso a tensão injetada é formada pela soma das tensões de seqüência positiva e negativa. A

tabela 5.8 mostra em valores numéricos as magnitudes e ângulos de cada tensão de seqüência e injetada

Tabela 5.8 – Tensões das seqüências e injetadas (Afundamento D)

		Afundamento D			
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	4,11	4,14	0,00	8,85
	Ângulo [graus]	180,0	180,0	-	180,0
Fase B	Amplitude [V]	4,13	4,03	0,00	4,34
	Ângulo [graus]	60,0	-60,0	-	0,0
Fase C	Amplitude [V]	3,99	4,13	0,00	4,33
	Ângulo [graus]	-60,0	60,0	-	0,0

Os fasores na carga ficaram:

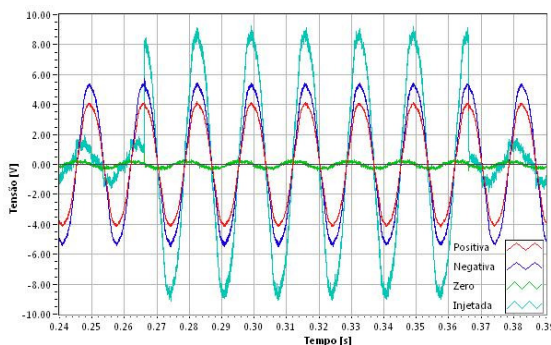
$$\text{Fase A} - 0,45e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,87e^{-102,6j}$$

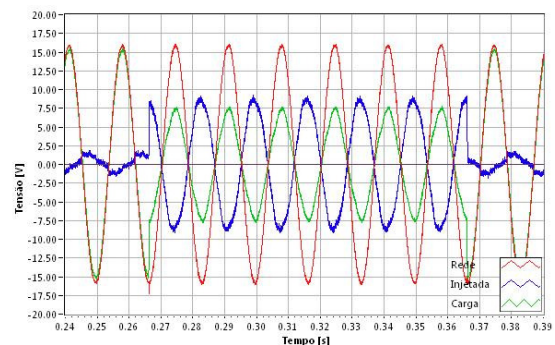
$$\text{Fase C} - 0,86e^{105,6j}$$

As figuras 5.25(b), 5.25(d) e 5.25(f) ilustram o comportamento da tensão na carga para o afundamento tipo D. Observa-se em 5.25(b) que a tensão na carga afunda de acordo com a profundidade desejada, sem salto de ângulo. Em 5.25(d) e 5.25(f), vê-se que as tensões na carga não sofrem afundamentos tão severos, já que a tensão injetada é de pequena amplitude e ângulo distante do ângulo da tensão da rede. Tanto na fase B quanto na fase C, o ângulo da tensão injetada é 0° .

Em 5.25(d), o salto de ângulo do afundamento de tensão é de $17,1^\circ$, enquanto que em 5.25(f), o salto de ângulo é $-14,4^\circ$.



(a)



(b)

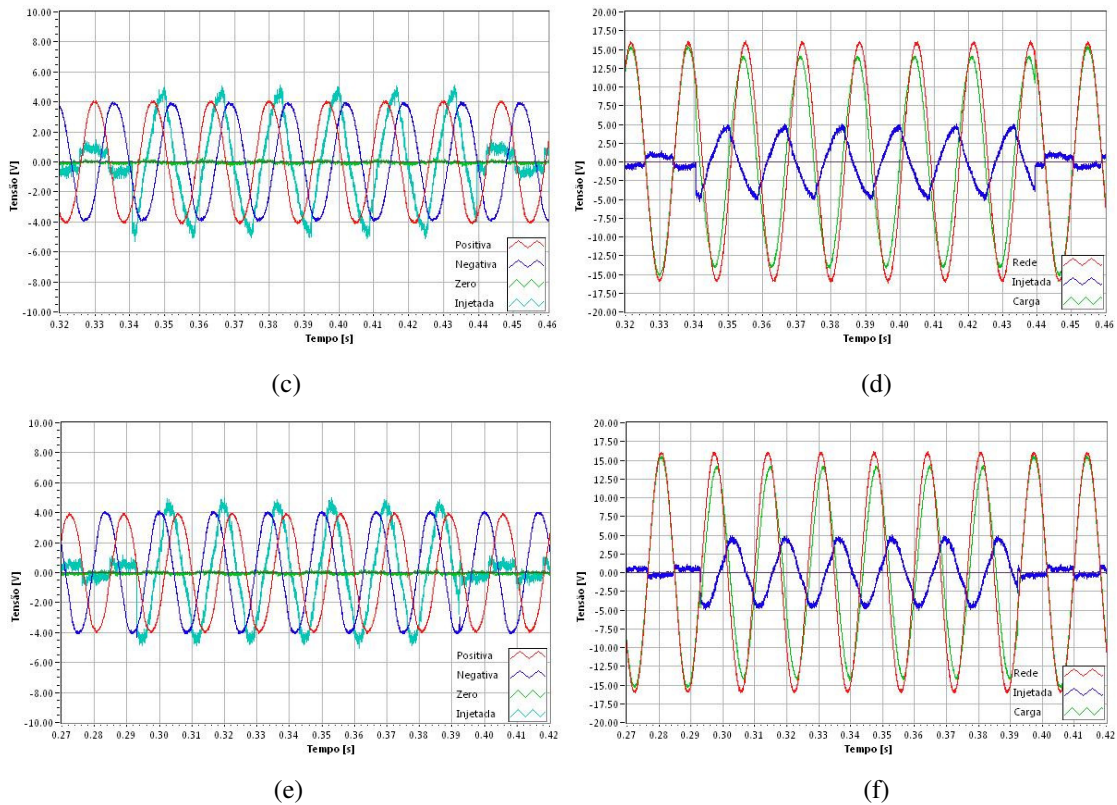


Figura 5.25 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo D

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul (x1.3), zero – verde, injetada – azul claro
 (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
 (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
 (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

5.7.6 – Afundamento Tipo E

Os resultados desse tipo de afundamento de tensão são interessantes, pois a dinâmica dos inversores é intensa, como se vê nas figuras 5.26(a), 5.26(c) e 5.26(e). Nas figuras 5.26(b), 5.26(d) e 5.26(f) são mostradas as tensões da rede, injetada e na carga.

Os fasores da carga no ensaio do afundamento tipo E foram:

$$\text{Fase A} - 0,98e^{0j}$$

$$\text{Fase B} - 0,49e^{-120j}$$

$$\text{Fase C} - 0,49e^{120j}$$

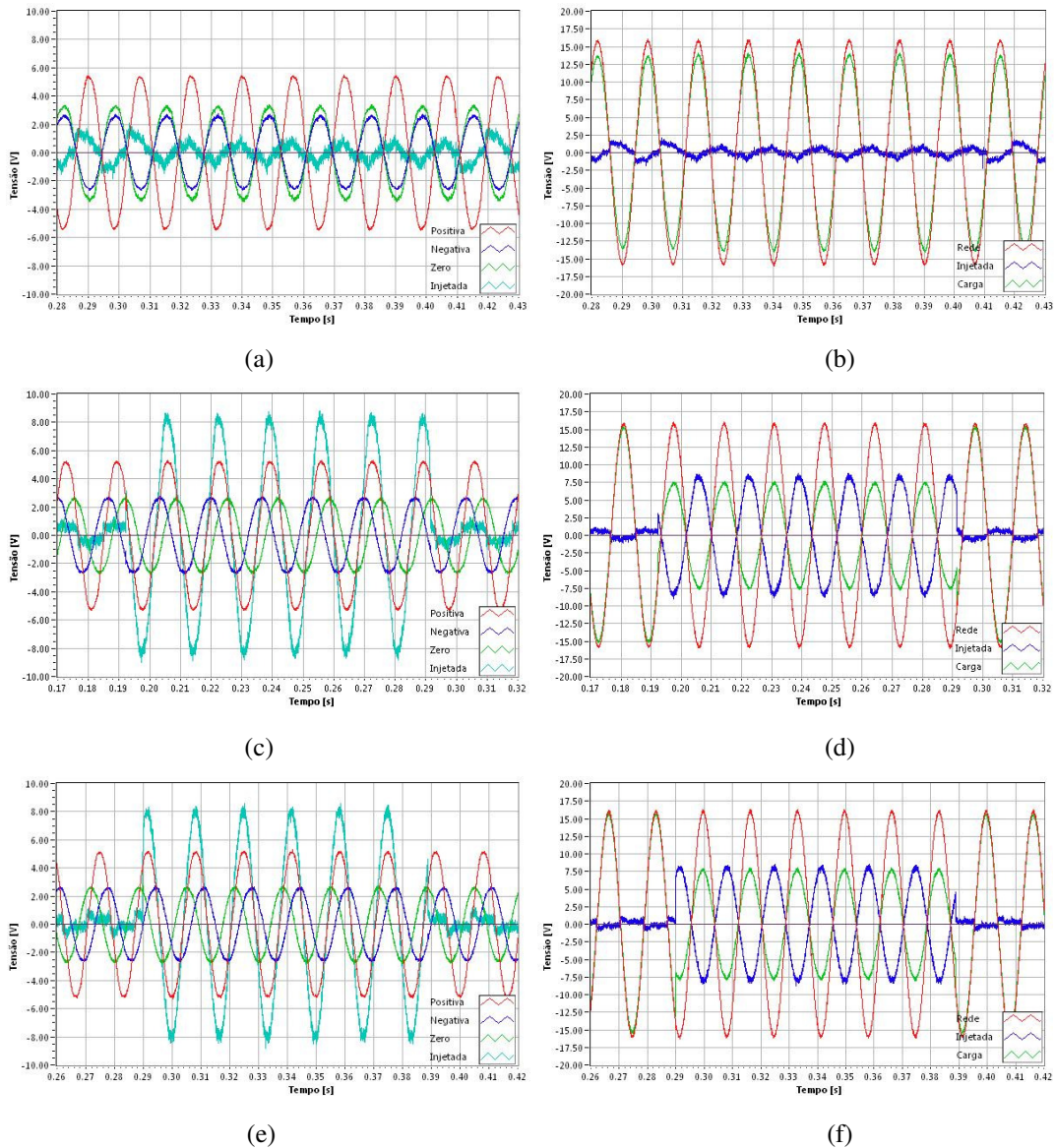


Figura 5.26 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo E

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde (x1.3), injetada – azul claro
- (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde (x0.9)
- (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

Observa-se na figura 5.26(a) que as tensões negativa e zero somam-se de modo a anular a tensão de seqüência positiva. Em 5.26(b), o resultado é que a tensão na carga permanece inalterada. Em 5.26(c) e 5.26(e), as tensões de seqüência negativa e zero somam-se de modo a formar uma tensão de mesma magnitude e ângulo da tensão de seqüência positiva. Os resultados em 5.26(d) e 5.26(f) são tensões na carga com afundamentos na proporção desejada.

A tabela 5.9 mostra numericamente os valores das magnitudes e ângulos das tensões injetadas e de seqüências positiva, negativa e zero.

Tabela 5.9 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento E)

Afundamento E					
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	5,42	2,67	2,63	0,00
	Ângulo [graus]	180,0	0,0	0,0	-
Fase B	Amplitude [V]	5,31	2,74	2,69	8,20
	Ângulo [graus]	60,0	120,0	0,0	60,0
Fase C	Amplitude [V]	5,22	2,64	2,67	8,02
	Ângulo [graus]	-60,0	-120,0	0,0	-60,0

5.7.7 – Afundamento Tipo F

As figuras 5.27(a), 5.27(c) e 5.27(e) mostram a dinâmica para um afundamento de tensão do tipo F. Nesse tipo de afundamento, a tensão de uma das fases afunda sem mudança de ângulo e com a magnitude do afundamento desejado, enquanto que nas outras fases ocorre salto de ângulo e a magnitude não é drasticamente afundada, como visto em 5.27(b), 5.27(d) e 5.27(f).

Nesse caso, as tensões na carga foram:

$$\text{Fase A} - 0,45e^{0j} \quad \text{Fase B} - 0,73e^{-107,4j} \quad \text{Fase C} - 0,74e^{108,3j}$$

A tabela 5.10 mostra numericamente os fasores das tensões de seqüência positiva, negativa, zero e injetada.

Tabela 5.10 – Tensões das seqüências e injetadas (Afundamento F)

Afundamento F					
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	5,30	2,74	0,00	8,48
	Ângulo [graus]	180,0	180,0	-	180,0
Fase B	Amplitude [V]	5,37	2,69	0,00	5,32
	Ângulo [graus]	60,0	-60,0	-	30,0
Fase C	Amplitude [V]	5,44	2,79	0,00	5,31
	Ângulo [graus]	-60,0	60,0	-	-30,0

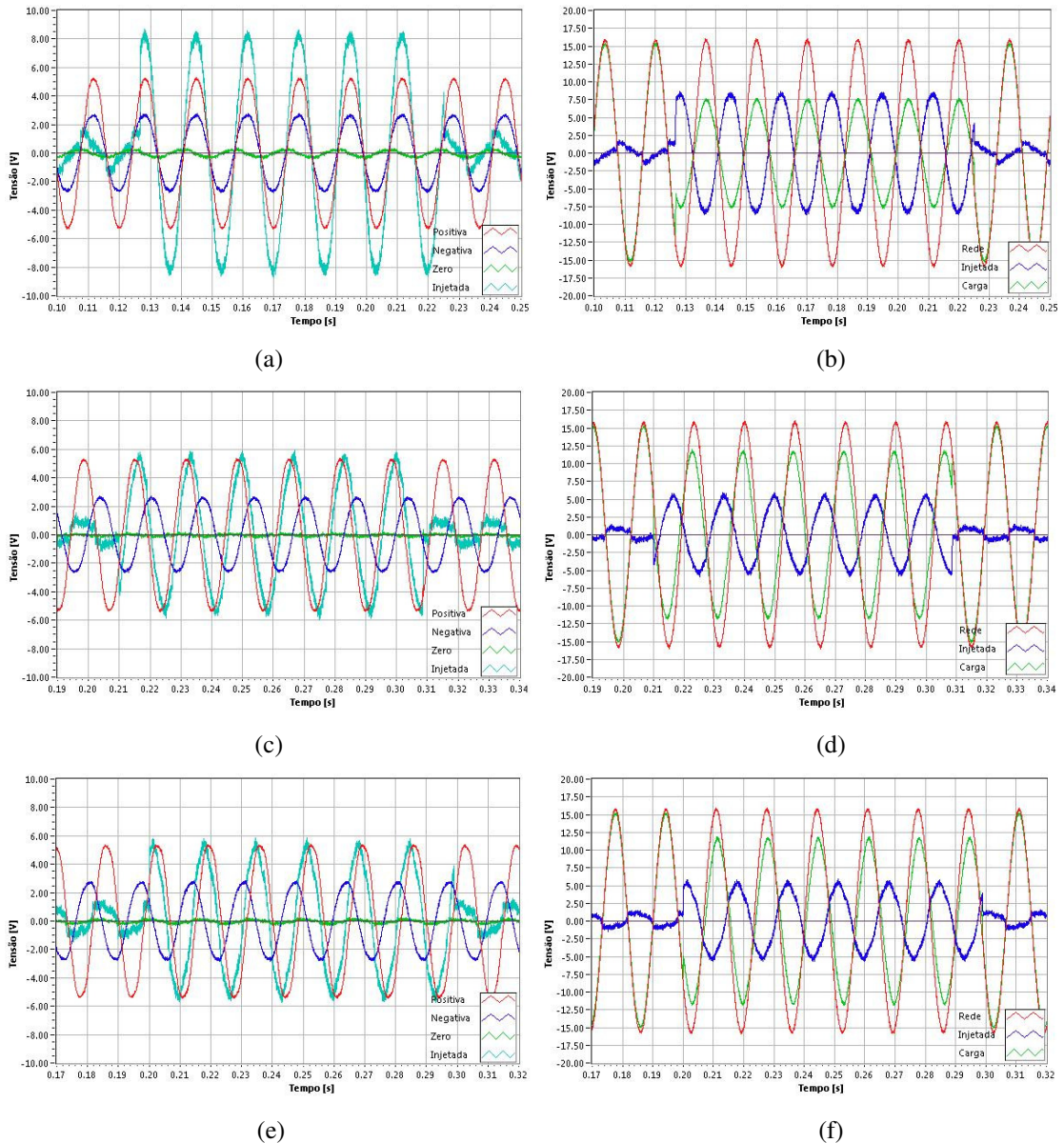


Figura 5.27 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo F

(a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
 (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
 (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
 (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

Observa-se em 5.27(a) e pela tabela 5.10 que as tensões positiva e negativa somam-se de modo a formar um tensão injetada na profundidade do afundamento desejado. Nas fases B e C, figuras 5.27(c) e 5.27(e), as tensões injetadas possuem ângulos de 30° e -30° , respectivamente. Na figura 5.27(c), isso resulta da soma de uma tensão de ângulo 60° com

uma tensão de metade de magnitude e ângulo -60° . Em 5.27(e), a resultante é formada pela soma da tensão de ângulo -60° com uma tensão de metade da amplitude e ângulo de 60° .

Vê-se em 5.27(b) que não há salto de ângulo. Em 5.27(d), a tensão na carga durante o afundamento está adiantada $12,6^\circ$ em relação à tensão de rede. Na figura 5.27(f), a tensão na carga é atrasada de $11,7^\circ$ em relação à tensão de rede.

5.7.8 – Afundamento Tipo G

Na figura 5.28 são representados os resultados experimentais para o ensaio do afundamento tipo G. Em 5.28(a), a tensão de seqüência negativa possui metade da magnitude da tensão de seqüência positiva e está defasada 180° . Isso resulta em uma tensão com a magnitude da tensão negativa e ângulo da tensão de seqüência positiva. Em 5.28(c) e 5.28(e) vê-se que as tensões de seqüência positiva e negativa somam-se para formar uma tensão injetada de ângulo $\pm 79,1^\circ$, dependendo da fase.

Os fasores que representam as tensões na carga são:

$$\text{Fase A} - 0,81e^{0j} \qquad \text{Fase B} - 0,57e^{-133,5j} \qquad \text{Fase C} - 0,56e^{135,3j}$$

A tabela 5.11 apresenta os resultados das tensões geradas pelos inversores de frequência na ocorrência de um afundamento tipo G.

Tabela 5.11 – Tensões das seqüências e injetada (Afundamento G)

Afundamento G					
		Positiva	Negativa	Zero	Injetada
Fase A	Amplitude [V]	5,18	2,87	0,00	2,74
	Ângulo [graus]	180,0	0,0	-	180,0
Fase B	Amplitude [V]	5,32	2,74	0,00	7,40
	Ângulo [graus]	60,0	120,0	-	79,1
Fase C	Amplitude [V]	5,23	2,67	0,00	7,37
	Ângulo [graus]	-60,0	-120,0	-	-79,1

Na fase A, a tensão na carga afunda para 0.81 pu, mas não há salto de ângulo. Nas fases B e C, ocorrem saltos de ângulos de $-13,5^\circ$ e $15,3^\circ$, respectivamente.

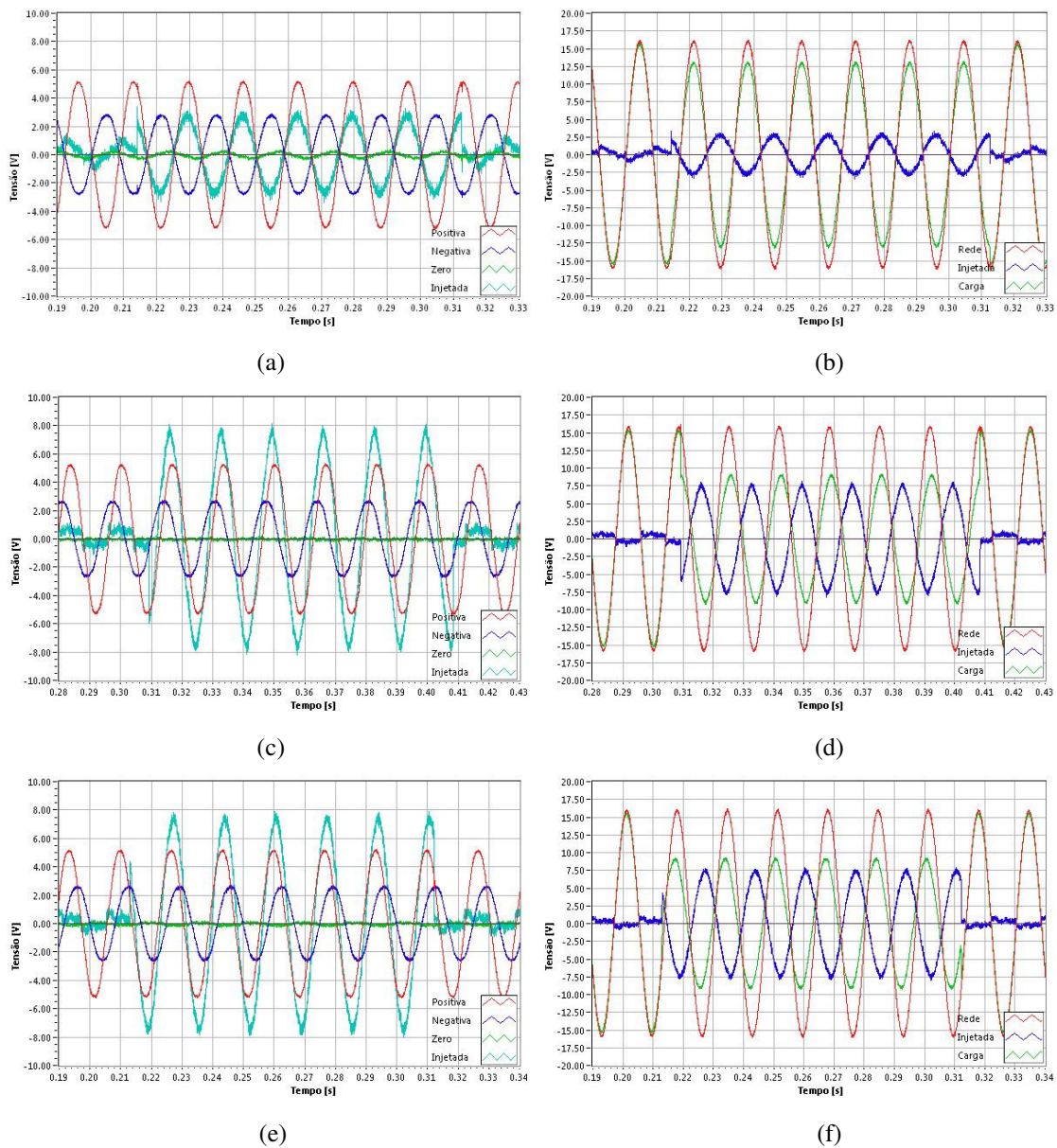


Figura 5.28 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo G

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

5.8 – RESULTADOS COM DISTORÇÃO HARMÔNICA NA TENSÃO DA REDE

Como forma de se analisar a influência da distorção harmônica nos afundamentos de tensão, ensaiou-se dois tipos de afundamentos (C e D) na presença de harmônicos na tensão da rede, conforme ilustração da figura 5.29. A forma de onda da tensão da figura 5.29(a) corresponde à forma de onda da tensão da CEMIG, que alimenta o laboratório onde os ensaios foram realizados. Esses resultados são importantes para observar que na presença de harmônicos, os saltos de ângulos sofrem variação diferente da teoria dessa dissertação. Isso se deve ao fato da injeção de tensão distorcer ainda mais a tensão na carga, que, portanto, terá uma forma de onda diferente da tensão de rede e conseqüentemente, a passagem por zero de cada uma variar-se-á de diferentes modos. A escolha dos tipos C e D devem-se ao fato dos dois afundamentos possuírem saltos de ângulos, além de fase inalterada (tipo C) e fase com afundamento desejado (tipo D).

A tensão da figura 5.29(a) apresenta níveis elevados de 3°, 7° e, sobretudo, 5° harmônico, como se pode ver em 5.29(b).

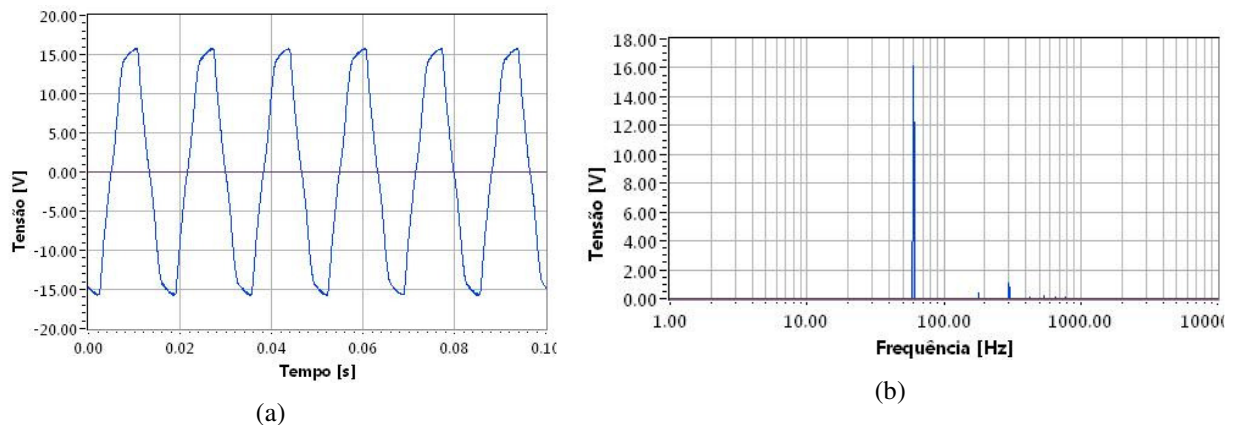


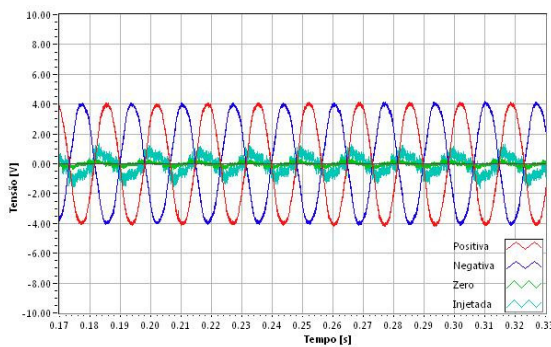
Figura 5.29 – Tensão da rede distorcida

- (a) Forma de onda
- (b) Espectro de frequências

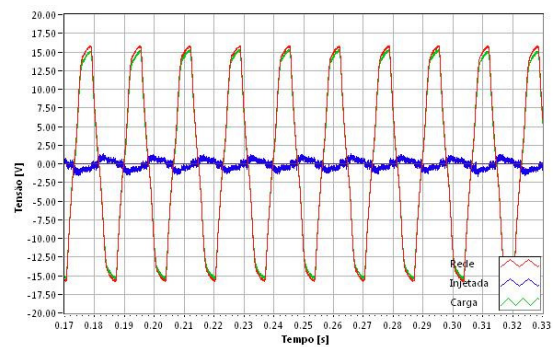
5.8.1 – Afundamento Tipo C

Na figura 5.30 são ilustradas as tensões da rede, injetada e da carga para cada fase, bem como a dinâmica dos inversores de frequência de modo a formar a tensão injetada para o afundamento tipo C com tensão da rede com a forma de onda da figura 29(a).

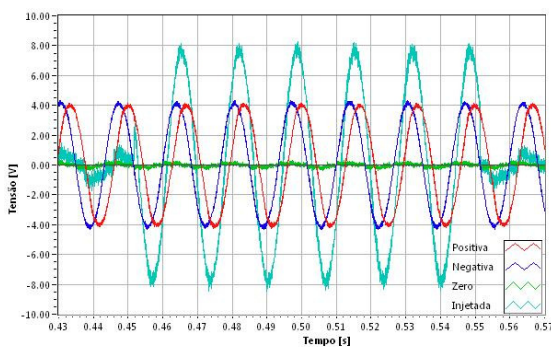
Observa-se em 5.30(b), 5.30(d) e 5.30(f) que o comportamento do afundamento de tensão é o mesmo do resultado ensaiado em 5.7.3. O que altera é a forma de onda da tensão da carga, que fica mais distorcida. Com essa distorção, o salto de ângulo altera-se. Na fase B, o salto altera para $-24,3^\circ$, enquanto na fase C o salto muda para $24,3^\circ$. A diferença dos saltos de ângulo, com e sem distorção harmônica, é de $5,4^\circ$ na fase B e $4,7^\circ$ na fase C.



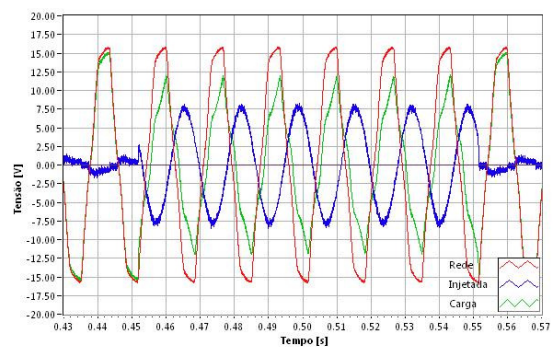
(a)



(b)



(c)



(d)

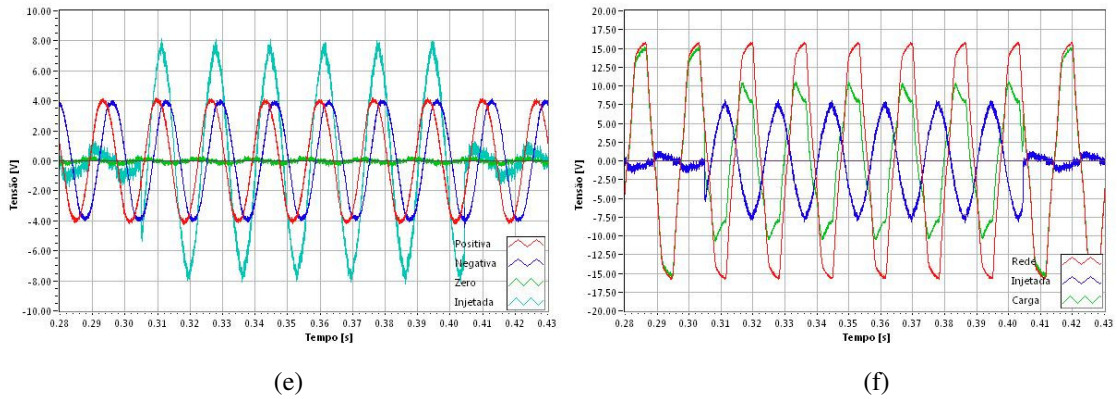
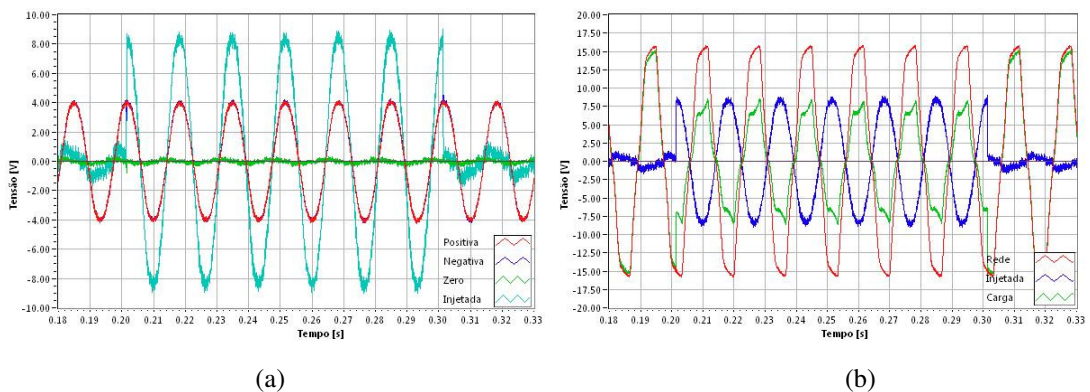


Figura 5.30 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo C com distorção harmônica

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

5.8.2 – Afundamento Tipo D

Na figura 5.31 são apresentados os resultados para o afundamento tipo D com a tensão da rede distorcida. Como no caso do item 5.8.1, nesse afundamento as tensões na carga são distorcidas, provocando alteração nos saltos de ângulos das fases B e C. Nesse caso, o salto é de $18,9^\circ$ na fase B e de $-18,9^\circ$ na fase C. Com relação aos ensaios sem distorção harmônica na rede, a diferença dos saltos de ângulos é de $1,8^\circ$ na fase B e $4,5^\circ$ na fase C.



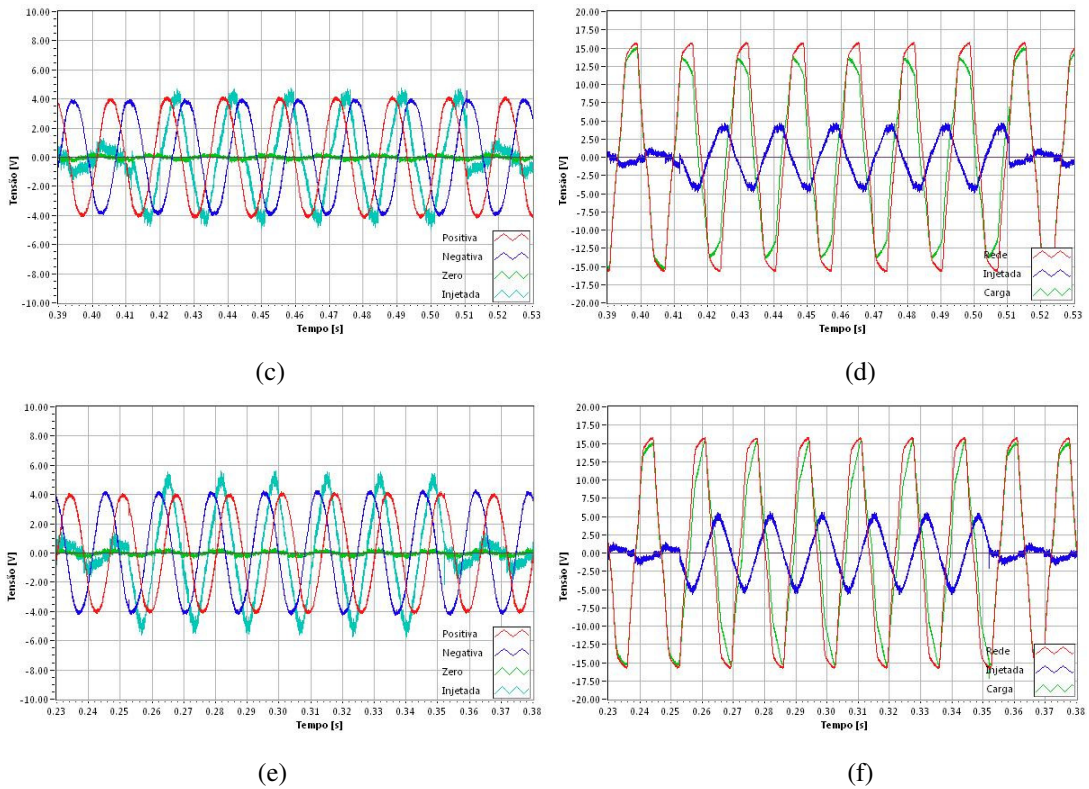


Figura 5.31 – Resultado experimental para afundamento de tensão tipo D com distorção harmônica

- (a) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (b) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (c) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (d) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde
- (e) positiva – vermelho, negativa – azul, zero – verde, injetada – azul claro
- (f) rede – vermelho, injetada – azul, carga – verde

5.9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

A tabela 5.12 compara os dados teóricos, de simulação e do protótipo, ensaiados com fonte de tensão ideal, para os tipos de afundamentos de tensão, que foram simulados e ensaiados na mesma profundidade (0,5 pu). Os dados em pu do protótipo e das simulações foram calculados para tensão de base como sendo a tensão nominal da rede ($11,2 V_{rms}$).

Tabela 5.12 – Comparação dos dados (amplitude em pu)

Afundamento A						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	0,50	0,0°	0,50	-120,0°	0,50	120,0°
Simulação	0,50	0,0°	0,50	-120,0°	0,50	120,0°
Protótipo	0,47	0,0°	0,47	-120,0°	0,47	120,0°
Afundamento B						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	0,50	0,0°	1,00	-120,0°	1,00	120,0°
Simulação	0,49	0,0°	0,98	-120,0°	0,98	120,0°
Protótipo	0,47	0,0°	0,97	-120,0°	0,97	120,0°
Afundamento C						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	1,00	0,0°	0,66	-139,1°	0,66	139,1°
Simulação	0,98	0,0°	0,67	-138,4°	0,66	138,1°
Protótipo	0,97	0,0°	0,61	-138,9°	0,64	139,6°
Afundamento D						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	0,50	0,0°	0,90	-106,1°	0,90	106,1°
Simulação	0,49	0,0°	0,87	-106,6°	0,90	107,1°
Protótipo	0,45	0,0°	0,87	-102,6°	0,86	105,6°
Afundamento E						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	1,00	0,0°	0,50	-120,0°	0,50	120,0°
Simulação	1,02	0,0°	0,52	-120,0°	0,52	120,0°
Protótipo	0,98	0,0°	0,49	-120,0°	0,49	120,0°
Afundamento F						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	0,50	0,0°	0,76	-109,1°	0,76	109,1°
Simulação	0,49	0,0°	0,74	-110,8°	0,76	109,0°
Protótipo	0,45	0,0°	0,73	-107,4°	0,74	108,3°
Afundamento G						
	A		B		C	
	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo	amplitude	ângulo
Teoria	0,83	0,0°	0,60	-133,9°	0,60	133,9°
Simulação	0,83	0,0°	0,61	-134,8°	0,59	131,5°
Protótipo	0,81	0,0°	0,57	-133,5°	0,56	135,3°

Pela análise dos dados da tabela 5.12, observa-se que os resultados de simulação e os experimentais ficaram próximos aos valores teóricos. As principais diferenças estão nos saltos de ângulos. A explicação para isso é a influência de harmônicos das tensões das seqüências na injeção de tensão em série com a rede. Dependendo do nível de harmônicos da tensão, o salto de ângulo pode variar tanto positiva quanto negativamente. Além disso, sistemas em baixa tensão estão mais susceptíveis a ruídos e quedas de tensão em componentes.

Capítulo 6

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONCLUSÃO

Estudar afundamentos de tensão, sobretudo relativo á sua geração, exige que se padronizem quais tipos de afundamentos serão propostos para serem gerados. Isso deve ser feito, pois existe uma diversidade de tipos de afundamentos de tensão. Nessa dissertação, escolheram-se os sete tipos definidos por Bollen (2000). Além disso, padronizou-se o formato do afundamento, como sendo retangular. Em relação à duração, todas as durações forma definidas em termos de ciclos de rede de 60Hz. Em relação à amplitude, escolheu-se a definição do IEEE, que julga afundamentos de tensão variando entre 0,1 a 0,9 pu. Escolher esses parâmetros é importante para as análises posteriores e para a definição da topologia e princípio de operação do gerador de afundamentos.

O funcionamento do gerador de afundamentos de tensão baseado na injeção de tensão em série na rede demonstrou-se satisfatório, possibilitando, além de injeção de tensão, isolamento entre a rede e os inversores por meio de um transformador. A topologia do gerador, definida a partir dos componentes simétricos, é o grande diferencial dessa dissertação. Nessa topologia, são geradas as tensões de seqüência positiva, negativa e zero da tensão a ser injetada. Isso possibilita flexibilidade na definição do afundamento de tensão, além de melhorar a parametrização dos inversores, sobretudo nos casos de afundamentos tipo F e G, em que as magnitudes das tensões injetadas são fracionárias e o ângulo no caso do tipo G é de

79,1°, o que pode dificultar a definição de parâmetros da tensão a ser injetada. Uma desvantagem dessa topologia é seu custo elevado, ocasionado pelo uso de três sistemas de geração de tensão (inversor, transformador, chaves *bypass*) por fase.

Os resultados de simulação mostraram-se satisfatórios, na medida em que se pode comprovar o funcionamento do gerador. Além da análise do afundamento de tensão, analisaram-se também como as tensões injetadas são formadas a partir da soma das tensões geradas pelos inversores. Essa dinâmica varia de acordo com o tipo do afundamento de tensão, já que se pode ter a operação de um, dois ou três inversores de frequência. Os afundamentos de tensão simulados forma validados teoricamente, principalmente os saltos de ângulos nos tipos de afundamentos em que se têm essas particularidades. Uma observação importante é definida quando não ocorre afundamento de tensão em uma das fases, em que é observado que a soma das tensões dos inversores anulam-se de modo a formar a tensão injetada.

A partir da validação das simulações, iniciou-se a construção do protótipo do gerador. Esse protótipo é formado pelos três inversores, sendo um de cada seqüência. A injeção de tensão é realizada por transformadores isoladores e o início e a duração do afundamento são definidos pelas chaves *bypass*. Os inversores são controlados por um único DSP, responsável pela alteração dos pulsos PWM e sincronismo dos três inversores dependendo do tipo e magnitude do afundamento de tensão escolhido. Além disso, o gerador possui um painel de interface para definir os parâmetros do afundamento de tensão, como duração, magnitude e tipo. Somente um protótipo foi construído devido ao seu elevado custo de implementação. Para se ensaiar todos os tipos de afundamentos, variou-se no software do DSP a fase em que o gerador está instalado.

Os resultados experimentais conseguidos a partir do protótipo desenvolvido foram satisfatórios, mostrando que a topologia e funcionamento do gerador são interessantes e produzem bons resultados. A partir de um software desenvolvido em LabVIEW[®], pôde-se analisar tanto as características dos afundamentos quanto as características das formas de onda geradas pelos inversores, sobretudo pela análise em frequência do sinal. Os resultados obtidos para a forma de onda da tensão de saída dos inversores foram satisfatórios, na medida em que houve baixa distorção harmônica e magnitudes de acordo com as especificações. Além de cálculos das características do afundamento, pôde-se analisar a dinâmica dos inversores para produzir a tensão a ser injetada. Dentre os resultados experimentais obtidos, destacam-se os afundamentos em que houve saltos de ângulo e outros em que as tensões em

uma ou mais fases não são afetadas pelo distúrbio. Os resultados experimentais conseguidos foram bem próximos aos valores teóricos e dos resultados de simulação.

Outra observação é em relação à influência da distorção harmônica da rede nas características dos afundamentos de tensão. Nesses casos, além de distorção harmônica na tensão nos terminais da carga, os saltos de ângulos podem variar dependendo da quantidade de harmônicos presentes na tensão da rede. Nos dois casos analisados, os saltos de ângulos aumentaram e as formas de onda da tensão na carga ficaram mais distorcidas.

Em suma, os trabalhos de simulação e de desenvolvimento do protótipo foram importantes para a validação do gerador de afundamento de tensão proposto.

6.2 – TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalho, seria interessante a construção de um protótipo de maior potência, para ser aplicado em testes de inversores de frequência comerciais e em sistemas UPS. Esse protótipo deve ser trifásico, para que se possam gerar afundamentos de tensão trifásicos cujas tensões de fase sejam afetadas simultaneamente.

A implementação de um sistema de controle dos inversores em malha fechada seria outra proposta de trabalho futura. Realimentando a tensão e corrente de saída do inversor, poder-se-ia melhor controlar a amplitude dessa tensão, fixando-a em um determinado nível e imunizando-a de eventuais erros e variações de parâmetros do sistema.

A topologia em componentes simétricos mostrou-se satisfatória. Portanto, seria interessante analisá-la em um DVR. Nesse caso, a partir da detecção do afundamento e da análise em componentes simétricos da tensão afundada, o sistema deveria injetar as tensões de seqüência positiva, negativa e zero de modo a compensar o afundamento de tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

BOLLEN, M. H. J.; *Understanding Power Quality Problems-Voltage Sags and Interruptions*; IEEE Press, 2000.

SOUZA, W. C.; *Uma contribuição ao estudo da qualidade de energia elétrica no suprimento de sistemas de telecomunicações*; Dissertação de mestrado, Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 2002.

CARVALHO, P. L.; *Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão*; Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 1997.

LEBORGNE, R. C.; *Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão*; Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

SEYMOR, J., HORSLEY, T.; *The seven types of power problems*; White paper #18, American Power Conversion, 2005.

BRITO, C. M. C., LEÃO, R. P. S.; *Caracterização de afundamentos de tensão em transformadores trifásicos*; CEFET-PI e Universidade Federal do Ceará.

LEÃO, R. P. S.; SCHMIDLIN JR., C. R., FERREIRA, G. S., SILVEIRA, L. C. J., MARQUES, R. M. B., MOREIRA, A. B.; *Laboratório virtual para estudo de fundamentos de tensão*; VI SBQEE, Belém-PA, 2005.

CARVALHO FILHO, J. M.; *Notas de aula da disciplina de pós-graduação ECM-124*; Notas de aula, Grupo de Qualidade da Energia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

GERADORES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

CHUNG, Y.H., KWON, G.H., PARK, T.B., KIM H.J., JEON, Y.S., *Voltage Sag and Swell Generator with Series Injected Inverter for the KCPP*; 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 21-24 November 2004.

CHUNG, Y.H., KWON, G.H., PARK, T.B., KIM H.J.; *Voltage Sag and Swell Generator with Thyristor Controlled Reactor*; IEEE 2002.

DOKIC, S. Z., MILANOVIC, J. V., CHARALAMBOUS, K. A.; *Computer simulation of voltage sag generator*; IEE transactions, 2002.

ELETRICIDADE E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

MOHAN, N., UNDERLAND, T. M., ROBBINS, W. P.; *Power Electronics: converters, applications, and design*; John Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, USA, 1995.

PINHEIRO FILHO, R. F.; *Estudo e implementação de uma fonte de tensão alternada de 220V/1kW alimentada por fontes CC de 24V*; Dissertação de mestrado, INEP, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

APHIRATSAKUN, N., BHAGANAGARAPU, S. R., TECHAKITTIROJ, K.; *Implementation of a single-phase unipolar inverter*; Faculty Engineering, Assumption University, Bangkok, Thailand.

KERCHNER, R.M., CORCORAN, G.F.; *Circuitos de Corrente Alternada*; Tradução de Reynaldo Resende e Ruy P.S. Sieczkowski, Editora Globo, 1a edição, 1968.

RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

LI, B. H., CHOI, S. S., VILATHGAMUWA, D. M.; *On the injection transformer used in the dynamic voltage restorer*; IEEE transactions, 2000.

CHOI, S. S., LI, H. H., VILATHGAMUWA, D. M.; *A comparative study of inverter- and line-side filtering schemes in the dynamic voltage restorer*; IEE transactions, 2000.

CHOI, S. S., VILATHGAMUWA, D. M.; *Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer*; IEEE transactions, 2001.

CHOI, S. S., VILATHGAMUWA, D. M.; *Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer*; IEEE transactions, 2002.

SILVA, S. M., CARDOSO FILHO, B. J., SILVA, S. R., RIBEIRO, T. N; *Análise e implementação de um restaurador dinâmico de tensão*; IV SBQEE, Porto Alegre-RS, 2001.

AHN, S. U., JARDINI, J. A., MATAKAS JR, L., KOMATSU, W., MASUDA, M., SILVA, F. A. T., GALASSI, M.; *Implementação e testes alfa da geração de referência e controle em um protótipo de restaurador dinâmico de tensão*; VI SBQEE, Belé-PA, 2005.

WANG, B., VENKATARAMANAN, G.; *Operation and controlo f a dynamic voltage restorer realized using cascaded H-bridge converters*; IEEE transactions, 2005.

NAETILADDANON, S., ISE, T., FUJITA, H.; *Series voltage sag compensation using series type SMES with open-circuit protection*; IEEE transactions, 2005.

DSP TMS320F2812

TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 Digital Signal Processors Data Manual, Texas Instruments, Revisão de 2004.

TMS320x281x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide, Texas Instruments, Revisão de 2004.

TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide, Texas Instruments, 2004.

TMS321x281x DSP System Control and Interrupts Reference Guide, Texas Instruments, Revisão de 2004.

Digital signal controller TMS320F2812, Texas Instruments Incorporated, European Customer Training Center, University of Applied Sciences Zwickau.

eZdsp™ F2812 Technical reference, Digital Spectrum Incorporated, 2003.

Microcontrolador MC68HC908JL3

MC68HC08JK1, MC68HRC08JK1, MC68HC08JK3, MC68HRC08JK3, MC68HC08JL3, MC68HRC08JL3, HCMOS Microcontroller Unit TECHNICAL DATA, Freescale, revisão 4.

Apêndice 1

ARTIGOS APRESENTADOS

**A1.1 – COBEP 2007 – 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (BLUMENAU, SC)**

SYMMETRICAL COMPONENTS BASED VOLTAGE SAG GENERATOR – CONCEPT AND SIMULATIONS

Renato Takahashi¹, José Antônio Cortez², Valberto Ferreira da Silva³

1, 2, 3 Federal University of Itajubá – Power Electronics and Applications Research Group (GPEPA)

renato_taka@yahoo.com.br cortez@unifei.edu.br valberto@unifei.edu.br

Abstract – This paper proposes a new voltage sag generator for testing electric sensitive electronic equipment. This generator works with frequency inverters and its control is based on voltages symmetrical components that will be injected in series with original utility voltages and will create the voltage sag. The paper discusses about the concept, calculations and simulations involved in this kind of voltage sag generator.

Keywords – Voltage sag generator, symmetrical component.

I. INTRODUCTION

The utility concern about power quality began in the 80's. Before that, main discussions were about power generation and transmission.

One of the main reasons for this scenario is the development of electronic equipment. Besides a piece of these equipment pollutes energy buses with harmonics and other electric faults, others are too sensitive to voltage variations. So, many electronic equipment can suffer damage from voltage sags and, in other cases, they can be turned off by some protection device. These inconveniences mean loss of productivity to industries and consequently, loss of money.

Another reason that increased studies on power quality was the need to make a standard of supplied energy parameters, like voltage, harmonic distortion, etc. As a result, consumers were now seen as clients and not only a load in a power system. Energy became a product with some characteristics that need to be measured, guaranteed and improved.

This standardization only happened due to the development of electric measurement equipment, that were able to measure other parameters besides voltage and current, like harmonic distortion and voltage sags.

Power quality is a theme that discusses many other issues, such as the presence and measurement of harmonic distortion and measurement of the supplied voltage. This paper will focus on study and generation of voltage sags. The generator will work with frequency inverters with control based on symmetrical components (positive, negative and zero sequence). This new technique will make possible the generation of any type of voltage sag.

This voltage sag generator will be useful to test and validate VSI inverters and UPS systems. Nowadays, it's very important to know how these equipment works when a voltage sag occur. Many industries have frequency inverters and, sometimes, these inverters stop due to

voltage sags. Consequently, the process where these inverters are involved stops too.

The paper focus on the concept and simulation of the symmetrical component voltage sag generator. In future studies, it's intended to implement this voltage sag generator in order to test some inverters and UPS systems.

On item II-A, the paper shows the types of voltage sags and how they vary their phase and magnitude depending on the sag percent deep. Item II-B explains the concept and calculations of the proposed voltage sag generator. Finally, item II-C exposes some simulations of the proposed voltage sag.

II. CONTENTS

A Voltage Sag

Among different definitions about voltage sag, the paper defines voltage sags as voltage reductions (from 10 to 90% of nominal magnitude) in a short time interval (from half-cycle to few minutes) [1]. Voltage sags occur due to several reasons, like short-circuits, overflow, animal contact with transmissions lines and large motors starts.

Three-Phase voltage sag can be classified in seven types as shown at figure 1. Table I presents the relation involving voltage phase and magnitude and the remained voltage "V" due to sag in pu [1].

TABLE I
Phase and magnitude of each voltage sag type

Sag Type A $V_x = V$ $V_y = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag Type B $V_x = V$ $V_y = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
Sag Type C $V_x = 1$ $V_y = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag Type D $V_x = V$ $V_y = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
Sag Type E $V_x = 1$ $V_y = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag Type F $V_x = V$ $V_y = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$ $V_z = +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V + \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$
Sag Type G $V_x = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}j$ $V_y = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}j - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_z = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}j + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	

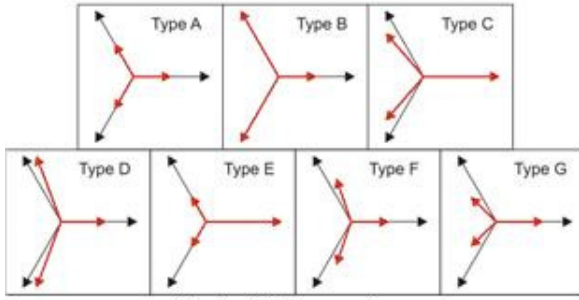


Fig. 1 – Voltage sag types

With the voltage sag type on figure 1 and its relation exposed on table I, it's possible to calculate which vectors will compose the voltage sag.

A. Symmetrical component based voltage sag generator

There are three usual types of voltage sag generators: variable transformers, load commutation (like reactors, motors, etc) and power amplifiers. The first one combines different transformers that will generate voltage sag or nominal voltage. Electronic switches modify which voltage will be on the load. The second one uses variable loads to cause voltage sag that can practically happen in an industry [7]. The last one generates waveforms that will be injected on an electric bus to compose voltage sag. This type makes possible modify any parameter of voltage sag [5,6]. Therefore, the proposed voltage sag generator is based on the last type of sag generators.

The generator control technique is based on symmetrical components. An algorithm was developed to make calculations easier and help simulations projects. Type of voltage sag and its magnitude are algorithm inputs, while symmetrical components voltages are outputs. The steps of the algorithm are:

1) Voltage sag type: among the 7 types, generated voltage sag type is chosen in this step.

2) Voltage sag magnitude: as defined before, the magnitude of the voltage sag is chosen. This value can be 10% to 90% of the nominal value (according to IEEE).

3) Voltage sag vectors: in this step, voltage sag vectors are calculated according to table I.

4) Injected voltage vectors: the injected voltage vectors V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} are defined as (1).

$$\begin{aligned} V_{sa} &= V_a - V'_a \\ V_{sb} &= V_b - V'_b \\ V_{sc} &= V_c - V'_c \end{aligned} \quad (1)$$

Where V_a , V_b e V_c are remained voltage sag vectors and V'_a , V'_b e V'_c are nominal voltage vectors.

5) Symmetrical component calculation of injected voltage vectors: the last step of the algorithm is the calculation of symmetrical components of each voltage vector that will be injected.

Table II shows voltage vectors that will be injected for any magnitude "V" of each voltage sag type. Table III shows symmetrical components voltages V_{sa1} , V_{sa2} , V_{sa0} (positive, negative and zero sequence, respectively) for any magnitude "V" for each voltage sag type. These calculations were made for phase A of each symmetrical

component sequence, because the other vectors (B and C) are phased 120° from A, depending on each sequence.

TABLE II
Injected voltage vectors

Sag Type A $V_{sa} = (1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sb} = (1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = (1-V)e^{i\omega t}$	Sag Type B $V_{sa} = (1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sb} = 0$ $V_{sc} = 0$
Sag Type C $V_{sa} = 0$ $V_{sb} = \frac{\sqrt{3}}{2}(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = \frac{\sqrt{3}}{2}(1-V)e^{-i\omega t}$	Sag Type D $V_{sa} = (1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sb} = \frac{1}{2}(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = \frac{1}{2}(1-V)e^{i\omega t}$
Sag Type E $V_{sa} = 0$ $V_{sb} = (1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = (1-V)e^{-i\omega t}$	Sag Type F $V_{sa} = (1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sb} = 0,5774(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = 0,5774(1-V)e^{-i\omega t}$
Sag Type G $V_{sa} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sb} = 0,8819(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sc} = 0,8819(1-V)e^{-i\omega t}$	

TABLE III
Symmetrical components voltage vectors

Sag Type A $V_{sa1} = (1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = 0$ $V_{sa0} = 0$	Sag Type B $V_{sa1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$
Sag Type C $V_{sa1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sa0} = 0$	Sag Type D $V_{sa1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa0} = 0$
Sag Type E $V_{sa1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sa0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{i\omega t}$	Sag Type F $V_{sa1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa0} = 0$
Sag Type G $V_{sa1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-i\omega t}$ $V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{i\omega t}$ $V_{sa0} = 0$	

A software was developed with this algorithm on Matlab[®]. In this software, the user chooses which type of voltage sag and how deep is it. From this, the software calculates all vectors above and outputs voltage vectors that will be injected in symmetrical components form.

Voltage sag generator topology is shown at figure 2 and it has basically PWM frequency inverters, chopper dc supplies and transformers. PWM Inverters represent each symmetrical component sequence (positive, negative and zero), while transformers are responsible by adding voltages that will be generated by inverters. Three-phase

phase inverter will generate negative and zero sequence, respectively.

Symmetrical components topology brings flexibility in characterization of voltage sag. It's possible to modify magnitude and phase of voltage sag modifying vectors that will be added on each sequence.

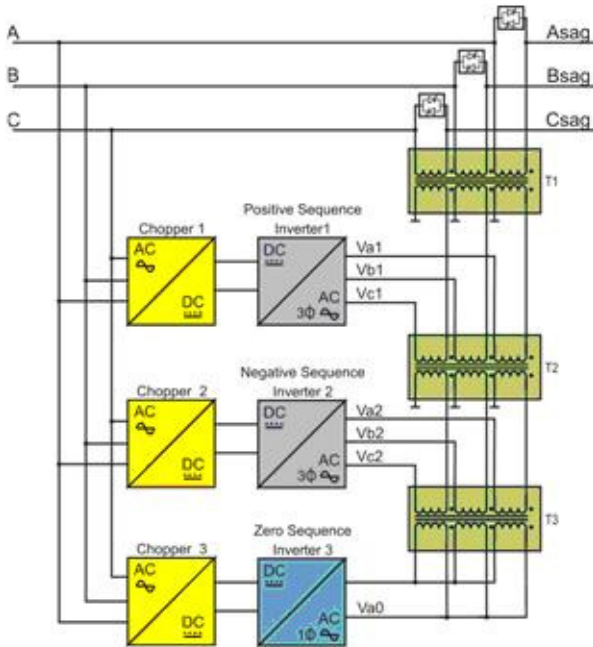


Fig. 2 – Proposed voltage sag generator

The 1-phase inverter on figure 3 is a full-bridge inverter or H-bridge inverter with PWM modulation and a LC filter in its output [3,4]. This inverter has four interrupters and is responsible to generate zero sequence vectors.

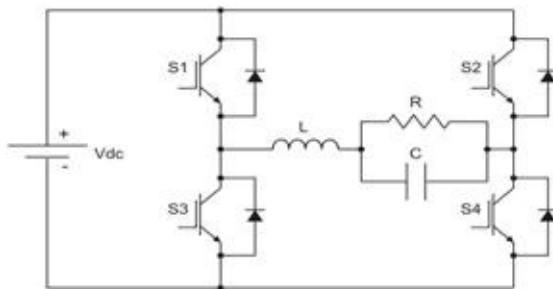


Fig. 3 – 1-phase inverter topology

Three-phase inverters on figure 4 have six interrupters and are controlled with PWM technique [3]. Also, as in the 1-phase inverter, these inverters have LC filter in their outputs to turn output voltage most sinusoidal as possible.

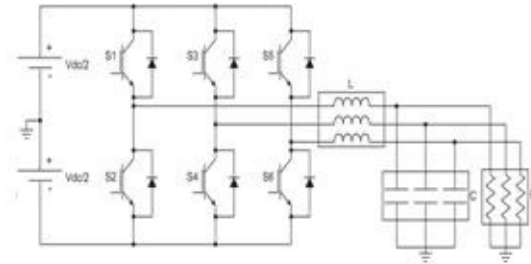


Fig. 4 – 3-phase inverter topology

Varying correctly the duty cycle of PWM gates and projecting adequately LC filters parameters [4], a sinusoidal voltage with magnitude and phase specified with low harmonic distortion can be generated.

The voltage sag control will be an open loop control that needs to compensate magnitude and phase variations due to filters and transformers. Magnitude attenuations can be corrected by multiplying the desirable voltage output by a constant gain and phase variations can be corrected by adding or subtracting a constant phase angle.

A Voltage sag generator simulation

As a way to validate the theory of the proposed voltage sag generator, some simulations results are presented. These simulations were done in Simulink and SimPower Systems of Matlab® and followed the parameters on table IV.

TABLE IV
Simulation parameters

Voltage sag type	A
Magnitude V	0,5 ou 50%
Initial time of voltage sag	4 periods of signal (66,66ms)
End time of voltage sag	After 10 periods of signal (166,66ms)
Vdc	622Vdc
Inverter frequency	4kHz
Output Power Pout	50kVA
Vout (RMS)	440V
THD	Less than 5%
Inductance L of filters	1000uH
Capacitance C of filters	200uF

The voltage sag simulated was type A because this is one of the most dangerous voltage sag that trips VSI inverters. According to the software developed and some parameters on Table IV, symmetrical components voltages vectors will be as shown in (2).

$$\begin{aligned} V_{sa} &= 0,5e^{-j20^\circ} \\ V_{sb} &= 0 \\ V_{sc} &= 0 \end{aligned}$$

As it can be seen, these vectors are an equilibrated vector system. Therefore, only positive sequence is available. Then, inverters 2 and 3 will not operate and the injected vector will be added just by inverter 1. These vectors will have exactly 0.5 of nominal magnitude. Figure 5(a) shows simulation injected voltages waveforms and figure 5(b) shows these voltages in RMS values.

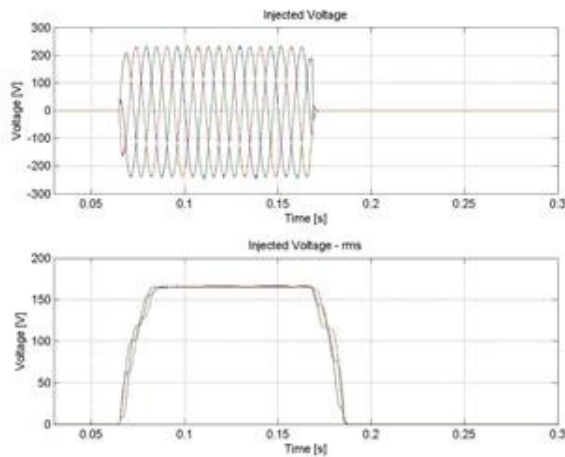


Fig. 5 – Injected voltages sag A 50%

On figure 6(a), output voltage waveforms are illustrated. It can be seen that there is a voltage sag between 66,66 [ms] and 166,66 [ms], exactly the specified voltage sag duration time – 100 [ms]. Also it can be seen that the voltage output is 50% smaller than nominal voltage. Figure 6(b) shows output RMS voltages, where can be seen that the voltage sag has a rectangular shape.

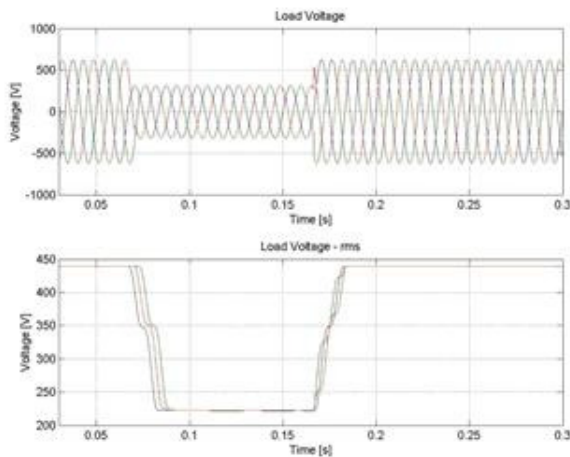


Fig. 6 – Output voltages with sag A 50%

Besides these simulations, it is interesting vary voltage sag deep. So, new parameters simulations were established according to Table V.

TABLE V
Simulation parameters

Voltage sag type	A
Magnitude V	0,65 ou 65%
Initial time of voltage sag	4 periods of signal (66,66ms)
End time of voltage sag	After 10 periods of signal (166,66ms)

In this case, the injected voltages will be according to (3).

$$\begin{aligned} V_{a1} &= 0,35e^{-120a} \\ V_{a2} &= 0 \\ V_{a3} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Figures 7(a) and 7(b) show injected voltages waveforms and RMS values.

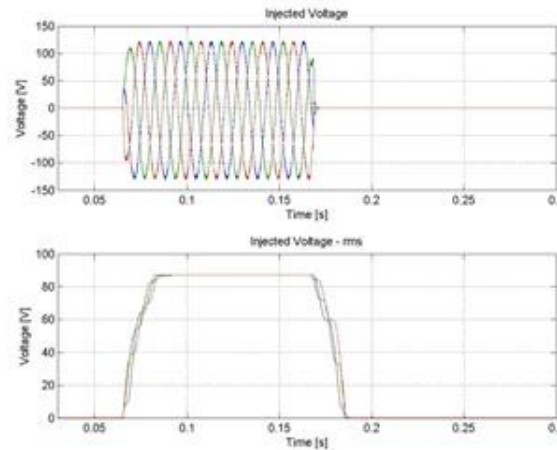


Fig. 7 – Injected voltages sag A 65%

Figure 8(a) and 8(b) show output voltage waveforms and RMS values. The voltage sag duration time is the same as the other simulations – 100 [ms].

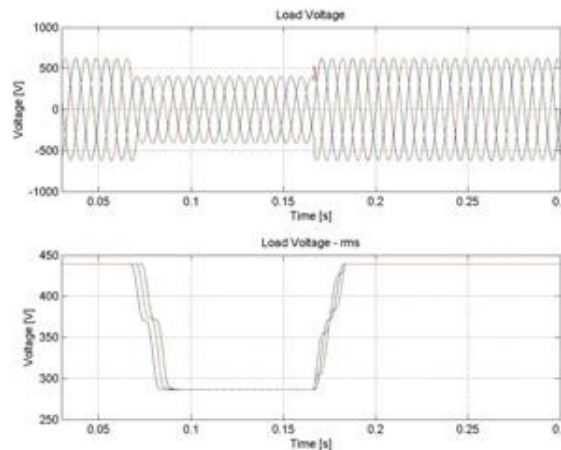


Fig. 8 – Output voltages with sag A 65%

In all these simulations, voltage sag has a rectangular shape and how it's a type A sag, voltage output phase didn't vary with voltage sag deep.

I. CONCLUSION

The concept of voltage sag generator based on symmetrical component is efficient and applicable to any voltage sag type and magnitude. Based on the developed

Choosing right topologies and filters, it's possible to generate sinusoidal voltages with low harmonic distortion and magnitudes that can vary according to voltage sag magnitude.

Simulations results presented in this paper showed voltage sags due to three-phase fault (type A sag), one of the most dangerous voltage sag that trip VSI inverters.

Next studies will be related to practical applicability and implementation of the proposed voltage sag generator on testing electronic equipment, such as VSI frequency inverters and UPS systems.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank to Federal University of Itajubá and CAPES for supporting this study.

REFERENCES

- [1] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems-Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, 2000.
- [2] R.M. Kerchner, G.F. Corcoran, *Circuitos de Corrente Alternada*, Tradução de Reynaldo Resende e Ruy P.S. Siczkowski, Editora Globo, 1^a edição, 1968.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, USA, 1995.
- [4] R.P. Pinheiro Filho, *Estudo e Implementação de um fonte de tensão alternada de 220V/1kW alimentada por fontes CC de 24V*, Dissertação de mestrado, Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [5] S.Z. Dokic, J.V. Milanovic, K.A. Charalambous, *Computer Simulation of Voltage Sag Generator*, IEEE 2002.
- [6] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T.B. Park, H.J. Kim, Y.S. Jeon, *Voltage Sag and Swell Generator with Series Injected Inverter for the KCPP*, 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 21-24 November 2004.
- [7] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T.B. Park, H.J. Kim, *Voltage Sag and Swell Generator with Thyristor Controlled Reactor*, IEEE 2002.

**A1.2 – INDUSCON 2008 – VIII CONFERÊNCIA
INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS
(POÇOS DE CALDAS, MG)**

A PROTOTYPE IMPLEMENTATION OF A VOLTAGE SAG GENERATOR

Renato Takahashi¹, José Antônio Cortez², Valberto Ferreira da Silva³, Angelo J. J. Rezek⁴
 1, 2, 3, 4 Federal University of Itajubá – Power Electronics and Applications Research Group (GPEPA)
renato_taka@yahoo.com.br cortez@unifei.edu.br valberto@unifei.edu.br rezek@unifei.edu.br

Abstract – This paper proposes a new voltage sag generator for testing electric sensitive electronic equipment. This generator works with frequency inverters and its topology and control is based on voltages symmetrical components that will be injected in series with original utility voltages and will create the voltage sag. The paper discusses about the concept, series injected IGBT inverter and DSP control implementation and some experimental results of this voltage sag generator. A low power prototype was developed to test and validate the proposed voltage sag generator.

Keywords - Voltage sag generator, symmetrical component, DSP Implementation.

I. INTRODUCTION

Nowadays, power quality is a theme that discusses a lot of issues such as measurement of harmonic distortion, voltage sags and swells, flicker, noise and others. Most voltage sag papers are related to voltage sag mitigation using DVR. There are few papers worried about sag or swell generation. Therefore, this paper plays an important role focusing on study and generation of voltage sags.

The proposed generator works with series injected frequency inverters with control based on injected voltages symmetrical components (positive, negative and zero sequence). This new technique makes possible the generation of any kind of voltage sag. The voltage sag generator can be useful to test and validate VSI inverters and UPS systems. It's very important to know how these equipment works when a voltage sag occur. Many industries have frequency inverters and, sometimes, these inverters stop due to voltage sags and consequently, the process where these inverters are involved stops too.

The paper focuses on the concept and experimental results of the symmetrical component based voltage sag generator prototype, controlled by Digital Signal Processor (DSP). This prototype was projected in low power and voltage and it was useful to verify the proposed voltage sag generator.

On item II-A, the paper shows kinds of voltage sags and how they vary their angle and magnitude depending on the sag percent deep. Item II-B explains the concept of the proposed voltage sag generator. Item II-C exposes the some features of

the sag generator prototype. On item III, the paper explains how the chosen PWM technique was implemented in a DSP. Finally, item IV-A shows some system specifications and items IV-B, IV-C and IV-D exposes some experimental results of voltage sags B, A and F.

II. OPERATION OF THE PROPOSED SAG GENERATOR

A. Voltage Sag Calculations

Among different definitions about voltage sag, the paper defines voltage sags as voltage reductions (from 10 to 90% of nominal magnitude) in a short time interval (from half-cycle to few minutes) [1]. Voltage sags occur due to several reasons, like short-circuits, overflow, animal contact with transmissions lines and large motors starts.

3-Phase voltage sag can be classified in seven kinds as shown at figure 1. Table I presents how load voltages V_u , V_v and V_c are affected and the relation involving voltage angle and magnitude and the remained voltage "V" due to sag in pu [1].

TABLE I
Angle and magnitude of each voltage sag kind

Sag A $V_c = V$ $V_u = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag B $V_c = V$ $V_u = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$
Sag C $V_c = 1$ $V_u = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag D $V_c = V$ $V_u = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$
Sag E $V_c = 1$ $V_u = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	Sag F $V_c = V$ $V_u = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$ $V_v = +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V + \frac{1}{6}jV\sqrt{3}$
Sag G $V_c = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$ $V_u = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_v = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	

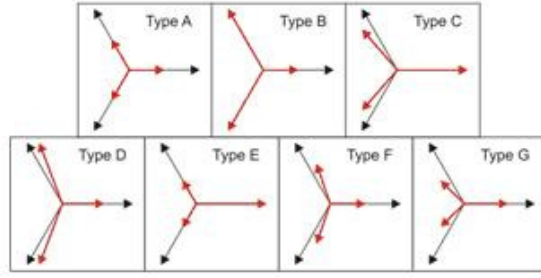


Fig. 1 – Voltage sag kinds (black: supply voltages, red: load voltages)

With the voltage sag on figure 1 and its relation exposed on table I, it's possible to calculate which vectors will compose the voltage sag.

A Symmetrical component based voltage sag generator

There are three usual kinds of voltage sag generators: variable transformers, load commutation (like reactors, motors, etc) and power amplifiers. The first one combines different transformers that will generate voltage sag or nominal voltage. Electronic switches modify which voltage will be on the load. The second one uses variable loads to cause voltage sag that can practically happen in an industry [7]. The last one generates waveforms that will be injected on an electric bus to compose voltage sag. This kind makes possible modify any parameter of voltage sag [5,6]. Therefore, the proposed voltage sag generator is based on the last kind of sag generators.

The generator control technique is based on symmetrical components [8]. An algorithm was developed to make calculations easier and help the prototype project. Kind of voltage sag and its magnitude are algorithm inputs, while symmetrical components voltages are outputs. The steps of the algorithm are:

1) Voltage sag kind: among 7 kinds, generated voltage sag kind is chosen.

2) Voltage sag magnitude: as defined before, the magnitude of the voltage sag is chosen. This value can be 10% to 90% of the nominal value (according to IEEE).

3) Voltage sag vectors: in this step, voltage sag vectors are calculated according to table I.

4) Injected voltage vectors: the injected voltage vectors V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} are defined as (1).

$$\begin{aligned} V_{sa} &= V_a - V_a' \\ V_{sb} &= V_b - V_b' \\ V_{sc} &= V_c - V_c' \end{aligned} \quad (1)$$

Where V_a , V_b e V_c are remained voltage sag (load voltage) vectors and V_a' , V_b' e V_c' are nominal voltage vectors.

5) Symmetrical component calculation of injected voltage vectors: the last step of the algorithm is the calculation of symmetrical components of each voltage vector that will be injected.

Table II shows voltage vectors that will be injected for any magnitude "V" of each voltage sag. Table III shows symmetrical components voltages V_{sa1} , V_{sa2} , V_{sa0} (positive, negative and zero sequence, respectively) for any magnitude "V" for each voltage sag. Note that zero sequence voltages

are present when the sum of all injected voltages on table II is different from zero (sags B and E).

TABLE II
Injected voltage vectors

Sag A $V_{sa} = (1-V)e^{120^\circ}$ $V_{sb} = (1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = (1-V)e^{-60^\circ}$	Sag B $V_{sa} = (1-V)e^{120^\circ}$ $V_{sb} = 0$ $V_{sc} = 0$
Sag C $V_{sa} = 0$ $V_{sb} = \frac{\sqrt{3}}{2}(1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = \frac{\sqrt{3}}{2}(1-V)e^{-60^\circ}$	Sag D $V_{sa} = (1-V)e^{120^\circ}$ $V_{sb} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$
Sag E $V_{sa} = 0$ $V_{sb} = (1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = (1-V)e^{-60^\circ}$	Sag F $V_{sa} = (1-V)e^{120^\circ}$ $V_{sb} = 0.5774(1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = 0.5774(1-V)e^{-60^\circ}$
Sag G $V_{sa} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$ $V_{sb} = 0.8819(1-V)e^{60^\circ}$ $V_{sc} = 0.8819(1-V)e^{-60^\circ}$	

TABLE III
Symmetrical components injected voltage vectors for 3-phase system

Phase A	Phase B	Phase C
Sag A		
$V_{sa1} = (1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = (1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = (1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = 0$	$V_{sb2} = 0$	$V_{sc2} = 0$
$V_{sa0} = 0$	$V_{sb0} = 0$	$V_{sc0} = 0$
Sag B		
$V_{sa1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60^\circ}$	$V_{sc2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$
$V_{sa0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sc0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-120^\circ}$
Sag C		
$V_{sa1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sb2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sc2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-120^\circ}$
$V_{sa0} = 0$	$V_{sb0} = 0$	$V_{sc0} = 0$
Sag D		
$V_{sa1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{-60^\circ}$	$V_{sc2} = \frac{1}{2}(1-V)e^{60^\circ}$
$V_{sa0} = 0$	$V_{sb0} = 0$	$V_{sc0} = 0$
Sag E		
$V_{sa1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sb2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sc2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-120^\circ}$
$V_{sa0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sb0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc0} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$
Sag F		
$V_{sa1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{60^\circ}$	$V_{sc1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{-60^\circ}$
$V_{sa2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{120^\circ}$	$V_{sb2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{-60^\circ}$	$V_{sc2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{60^\circ}$
$V_{sa0} = 0$	$V_{sb0} = 0$	$V_{sc0} = 0$

Sag G		
$V_{a1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{j\omega t}$	$V_{a1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{j\omega t}$	$V_{a1} = \frac{2}{3}(1-V)e^{j\omega t}$
$V_{a2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{j\omega t}$	$V_{a2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{j\omega t}$	$V_{a2} = \frac{1}{3}(1-V)e^{j\omega t}$
$V_{a0} = 0$	$V_{a0} = 0$	$V_{a0} = 0$

A Voltage Sag Generator Prototype

Voltage sag generator 1-phase topology is shown at figure 2 and it has basically PWM frequency inverters, dc supplies, bypass switches and transformers. PWM inverters represent each symmetrical component sequence voltage (positive, negative and zero) of the injected voltage, while transformers are responsible by adding these voltages. Bypass switches defines initial time and duration of the required voltage sag.

Symmetrical components topology brings flexibility in characterization of voltage sags. It's possible to modify magnitude and angle of the voltage sag modifying vectors that will be added on each sequence.

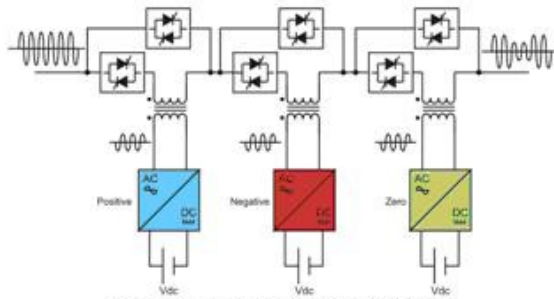


Fig. 2 - Proposed voltage sag generator

The 1-phase inverter on figure 3 is a full-bridge inverter with PWM modulation and a LC filter in its output [3,4]. This inverter has four interrupters and is responsible to generate symmetrical components sequence vectors.

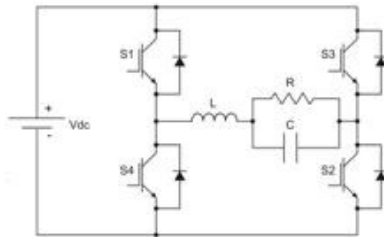


Fig. 3 - 1-phase inverter topology

Varying correctly the duty cycle of PWM gates and projecting adequately LC filter parameters [4], a sinusoidal voltage with magnitude and angle specified and low harmonic distortion rate can be generated.

All three inverters were controlled open-looped by one DSP with the three-level PWM technique. According to the kind and magnitude of the required sag the algorithm developed calculates magnitude and angle of each sequence voltage following vectors on table III.

Figure 4 and 5 shows a photo of the developed prototype and the TMS320F2812 DSP development kit, respectively.



Fig. 4 - Photo of the developed prototype



Fig. 5 - Photo of the DSP board development kit

II. DSP IMPLEMENTATION

The TMS320F2812 [9] is a Texas Instruments fixed-point DSP with 150MHz speed processor. This DSP was chosen due to its peripherals, specially its 16 PWM channels and 16 A/D channels. The sag generator DSP software was developed with the eZdsp development kit (Figure 5) and Code Composer Studio software [10].

As three-level PWM technique was chosen, the sag generator DSP software calculates all PWM transition times comparing look-up tables of a half sine wave and a triangular wave with the period of the commutation frequency (Figure 6(a)). The reason of using a half sine wave is due to the three-level PWM technique [8]. In this PWM technique, switches 1 and 4 (Figure 3) transition times are taken with a complementary sine wave of switches 3 and 2. This feature increases precision because with a same memory size, it's possible to allocate more values of a sine wave. In addition, the software uses less processor cycles to calculate all transitions, once when the software calculates transition times for switches 1 and 4 in the first half cycle, it just copy

these transition times to switches 3 and 2 that will be used in the second half sine wave cycle (Figure 6(b) and 6(c)). Figure 6 shows the situation above where it can be seen that the synchronism of the triangular wave is done by the peak of the sine wave. Figure 6(d) shows the output inverter voltage using a three-level PWM technique.

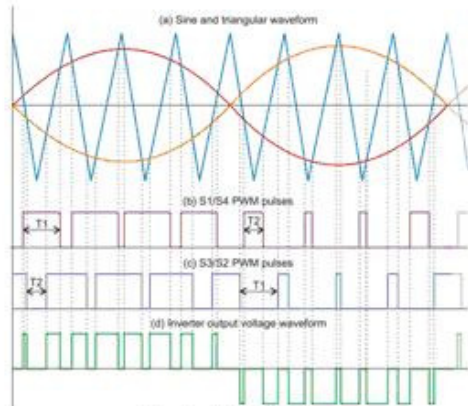


Fig. 6 – PWM strategy

(a) Sine and triangular waveform (b) S1/S4 PWM pulses

(c) S3/S2 PWM Pulses (d) Inverter output voltage waveform

Another feature to make the output voltage better is the allocation of more values of the triangular wave in the same time period of the half sine wave [8]. Between two values of the sine wave, it was allocated 10 values of the triangular wave. Therefore, the comparison is done by taking an interpolation of 10 points for each two values of the sine wave (Figure 7).

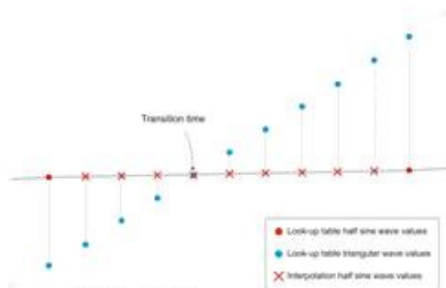


Fig. 7 – Half sine wave interpolation

The control strategy compares each interpolated half sine wave value with the respective triangular wave value. However, each wave has its own index to run all memory positions because just one period of the triangular wave was allocated in the DSP memory. So, when the last triangular position memory is read, the index is cleared to initiate another triangular period with the respective half sine wave index.

A human interface was designed to change voltage sag characteristics as deep, duration and kind [8]. The kind of the voltage sag is changed using 3 switches that define a binary state to the DSP. If all switches are off, the state is

“000” and there is no sag. If the state is “001”, sag A is chosen. Sequentially, the following states will define the other voltage sags. A potentiometer was implemented to change the sag deep, in a range of 0.1 to 0.9 pu. All these parameters and the sag duration (in cycles of 60Hz and range of 1 to 9) can be visualized at a display.

If the deep or kind of the required sag is changed, the DSP software recalculates all transition times.

The synchronism of inverter output voltages is done by an electronic comparator circuit, which transforms the supply sinusoidal voltage to a 60Hz square voltage synchronized with the supply voltage, and a DSP software routine that outputs inverter voltage angles according to table III. Figure 8 shows some DSP peripherals and how they were used to control sequence voltages magnitude and angle.

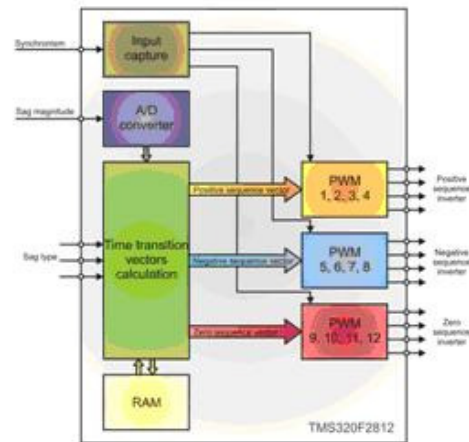


Fig. 8 – Sequence voltages control and DSP peripherals

I. EXPERIMENTAL RESULTS

A. System specification

All seven kinds of sags were generated, but this paper will emphasize three cases: sags A, B and F. The reason for this emphasis is that in sag A (Figure 9(a)) just positive sequence inverter runs, while the others are bypassed. In sag B (Figure 9(b)), all three inverters run and moreover, two injected voltages (phase B and C) are zero magnitude voltages. In sag F (Figure 9(c)), two inverters run to result in load voltages with angle jumps.

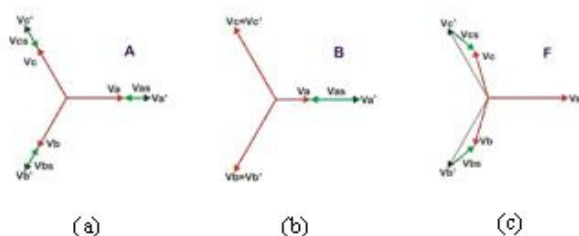


Fig. 9 – Vector diagram of sags

(a) A (b) B (c) F

Some parameters of experimental results are:

$$V_{sp}=12V_{ms} \quad V_{dc}=15V$$

$$m=0.7 \quad f_c=3600Hz$$

Where V_{sp} is the supply nominal voltage, V_{dc} is the DC supply voltage, m is the modulation index and f_c is the commutation frequency of all PWM inverters.

An important observation is that these experimental results were done with the same 1-phase prototype. The DSP software synchronizes output voltages according to the phase where the prototype is installed. Each experimental result was done by changing the DSP software, because each sequence voltage has different angle according to the phase where the prototype is installed. In near future, it's intended to develop another two prototypes, making possible an experiment with 3-phase voltage sags simultaneously.

All experimental results were collected with a data acquisition system with a 30kHz sampling rate per channel.

A. Sag B

On figure 10, sag B sequence and injected voltages when installed in phase A are illustrated. All three inverters are running and all output voltages have the same magnitude and angle (180 degrees phased from the reference supply voltage) and their sum compound the injected voltage.

Data plotted on figure 11 was acquired in another experiment after changing the reference phase to B in the software. As expected, sequence voltages are an equilibrated 3-phase system, in which all magnitudes are equal and are 120 degrees phased each other. Therefore, when these voltages are added, they originate a zero magnitude injected voltage. Finally, sag B phase C was experimented changing phase to C and the result can be seen on figure 12. This result is the same case of phase B. Note that these plots are not synchronized as an equilibrated 3-phase system, as exposed on item IV -A.

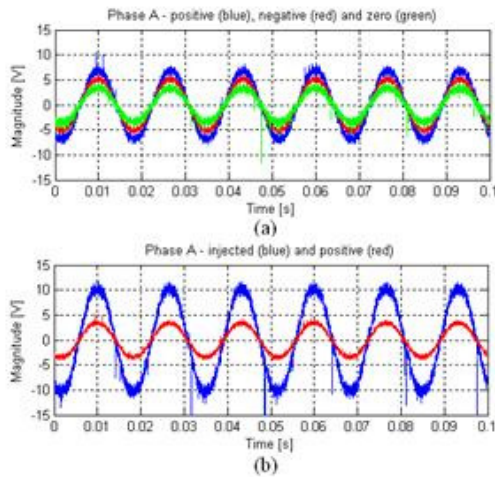


Fig. 10 –Sag B phase A experimental results

- (a) Sequence voltage: blue – positive sequence*2.0, red – negative sequence*1.5, green – zero sequence
 (b) Injected voltage: blue – injected voltage, red – positive sequence

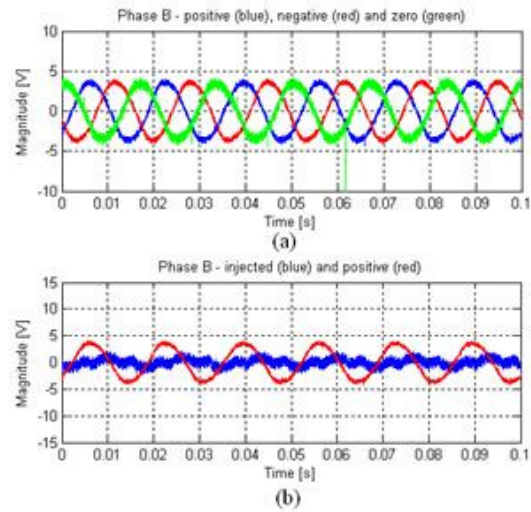


Fig. 11 –Sag B phase B experimental results

- (a) Sequence voltage: blue – positive sequence, red – negative sequence, green – zero sequence
 (b) Injected voltage: blue – injected voltage, red – positive sequence

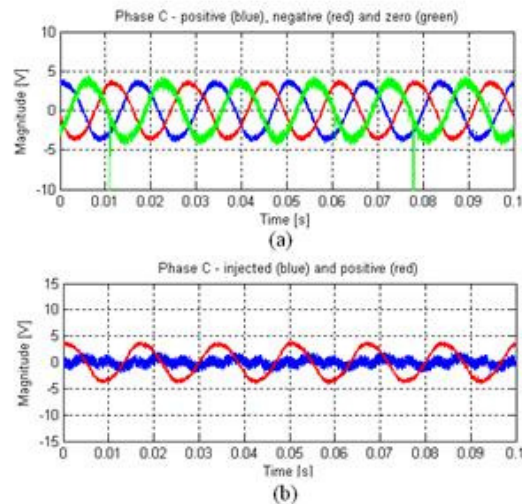


Fig. 12 –Sag B phase C experimental results

- (a) Sequence voltage: blue – positive sequence, red – negative sequence, green – zero sequence
 (b) Injected voltage: blue – injected voltage, red – positive sequence

B. Sag A

Figure 13 shows data of sag A, in all phases. It's clear that just one inverter is running while the others are stopped and bypassed. Consequently, the injected voltage has the same magnitude of the positive sequence inverter voltage. In all phases, injected voltages are 180 degrees phased from supply voltages.

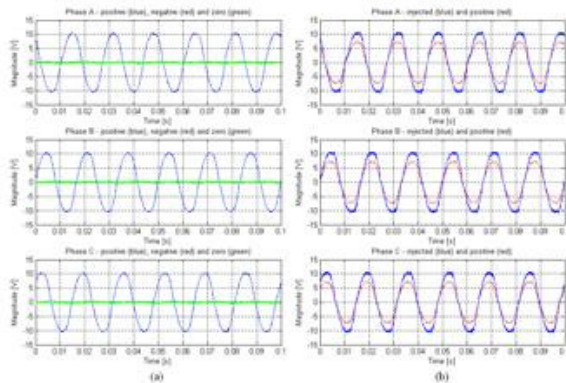


Fig. 13 – Sag A all experimental results

(a) Sequence voltage: blue – positive sequence, red – negative sequence, green – zero sequence

(b) Injected voltage: blue – injected voltage, red – positive sequence*0.7

A Sag F

The last case presented is interesting because it exposes one of the most important features of this kind of voltage sag generator: angle jump. It can be seen from figure 14 that the injected voltage in phases B and C are phased from their positive sequence voltages.

Positive sequence voltages are 180 degrees phased from supply voltages in all phases. In phase A, negative sequence voltage has the same angle of positive one, but in phases B and C they are phased ± 120 degrees according to each phase. The phase A injected voltage has no angle jump and its magnitude has the magnitude of the sum of positive and negative sequence voltages. The injected voltage on phase B is phased -34.8 degrees from positive sequence voltage. On phase C, this angle is $+34.8$ degrees. These angle differences cause angle jumps in load voltages when these voltages are series injected with supply voltages.

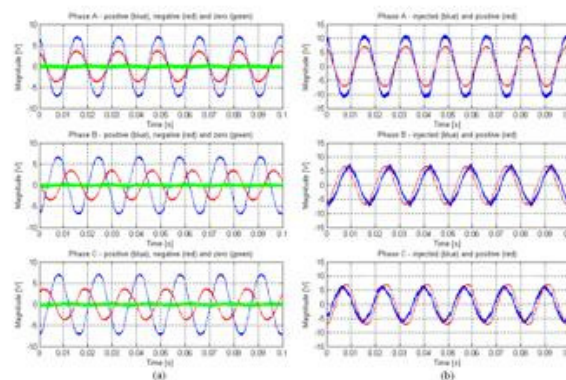


Fig. 14 – Sag F all experimental results

(a) Sequence voltage: blue – positive sequence, red – negative sequence, green – zero sequence

(b) Injected voltage: blue – injected voltage, red – positive sequence

II. CONCLUSIONS

The topology of the proposed voltage sag generator is interesting and leads to great experimental results. Therefore, the developed prototype validates the concept of the symmetrical components based voltage sag generator, although it was developed in low power and voltages.

Experimental results presented showed important features of the sag generator such as: three options of inverters arrangement (one, two or three inverters), injection of zero magnitude voltage originated by adding of non-zero voltages and angle jumps. All experimental results were next to results presented in theory (table II and III).

The developed PWM control technique has the advantage of being a precise comparison technique due to two main features: half sine wave allocating and interpolation. Combined to a LC filter, output inverter voltages have sinusoidal shape with low harmonic distortion, although some commutation noise is presented, mainly in lower voltages.

Next studies will be related to the project and design of a high power 3-phase voltage sag generator prototype to be used in voltage sag tests with commercial VSI inverters and UPS systems.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank to Federal University of Itajubá and CAPES for supporting this study.

REFERENCES

- [1] M.H.J. Bollen; Understanding Power Quality Problems- Voltage Sags and Interruptions; IEEE Press, 2000.
- [2] R.M. Kerchner, G.F. Corcoran; Circuitos de Corrente Alternada, Tradução de Reynaldo Resende e Ruy P.S. Siczkowski, Editora Globo, 1ª edição, 1968.
- [3] N. Mohan, T. M Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: converters, applications, and design, John Wiley & Sons, 2nd Edition, New York, USA, 1995.
- [4] R.P. Pinheiro Filho; Estudo e Implementação de um fonte de tensão alternada de 220V/1kW alimentada por fontes CC de 24W; Dissertação de mestrado, Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [5] S.Z. Dokic, J.V. Milanovic, K.A. Charalambous; Computer Simulation of Voltage Sag Generator; International Conference on Harmonics and Quality of Power, Volume 2, Pages 649-654, 2002.
- [6] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T.B. Park, H.J. Kim, Y.S. Jeon, Voltage Sag and Swell Generator with Series Injected Inverter for the KCPP; 2004 International Conference on Power System Technology, Volume 2, Pages 1589-1594, Singapore, 2004.
- [7] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T.B. Park, H.J. Kim; Voltage Sag and Swell Generator with Thyristor Controlled Reactor; International Conference on Power System Technology, Volume 3, Pages 1933-1937, 2002.
- [8] R. Takahashi; Projeto e implementação de um gerador de afundamentos momentâneos de tensão; Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação da Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [9] TMS 320F2812 Digital Signal Processors Data Manual.
- [10] eZdsp F2812 Technical Reference.

BIOGRAPHIES

Renato Takahashi is Automation and Control Engineer graduated in 2005 at Federal University of Itajubá-MG (UNIFED), Brazil. In 2008, he intends to get his Master in Science graduation at UNIFEI. His interested areas are: power electronics, power quality and microprocessor devices.

Jose Antonio Cortez is associated professor at Federal University of Itajubá-MG (UNIFED), Brazil. He graduated in Electric Engineering at INATEL in 1980, received his Electric Engineering Master in Science graduation in 1987 at USP-São Carlos and his Electric Engineering Doctor in Science graduation in 1997 at USP. His interested areas are: power electronics and electric machines devices.

Valberto Ferreira da Silva is titular professor at Federal University of Itajubá-MG (UNIFED), Brazil. He graduated in Electric Engineering at UNIFEI in 1976, received his Electric Engineering Master in Science graduation in 1981 at UNIFEI and his Electric Engineering Doctor in Science graduation in 2001 at USP. His interested areas are: power electronics, power quality and electric machines devices.

Angelo J. J. Resak is titular professor at Federal University of Itajubá-MG (UNIFED), Brazil. He graduated in Electric Engineering at UNIFEI in 1981, received his Electric Engineering Master in Science graduation in 1986 at UNIFEI and his Electric Engineering Doctor in Science graduation in 1991 at UNICAMP. His interested areas are: power electronics and electric machines devices.

Apêndice 2

PROPAGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

A2.1 – MUDANÇA DO TIPO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE ACORDO COM CONEXÃO DE TRANSFORMADORES

O tipo de conexão do transformador influencia substancialmente no tipo de afundamento de tensão, como se pode ver nas análises em 2.2.9 e 2.2.10. Como exemplo, considere a malha da figura A2.1.

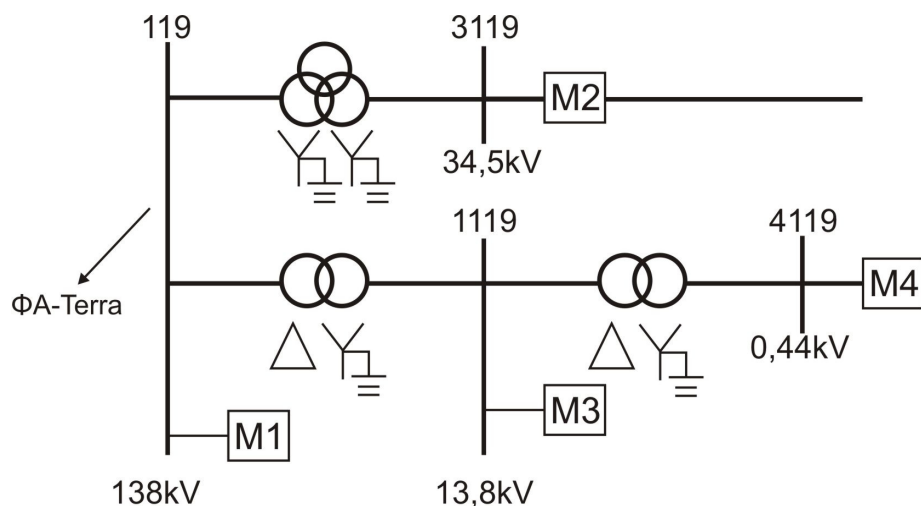


Figura A2.1 – Malha para análise de propagação de afundamentos

Essa malha é formada por quatro barras: M1-138kV, M2-34,5 kV, M3-13,8kV e M4-0,44kV. A interligação da barra M1 com a barra M2 é feita utilizando um transformador do tipo 1, com conexão $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$. A interligação entre M1 e M3 é realizada com um transformador tipo 3, com conexão $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$, mesma conexão do transformador entre M3 e M4. A falta elétrica ocorre na barra M1 e é de natureza monofásica (fase A – terra).

A análise da propagação do afundamento de tensão pela malha da figura A2.1 pode ser feita observando as tensões fase-neutro ou as tensões fase-fase.

A2.1.1 – Análise Tensões Fase-neutro

Pelas análises de tensão fase-neutro, o afundamento de tensão monofásico comporta-se como um afundamento do tipo B. Caso a profundidade do afundamento de tensão seja nula, os fasores das tensões ficarão de acordo com a figura A2.2.

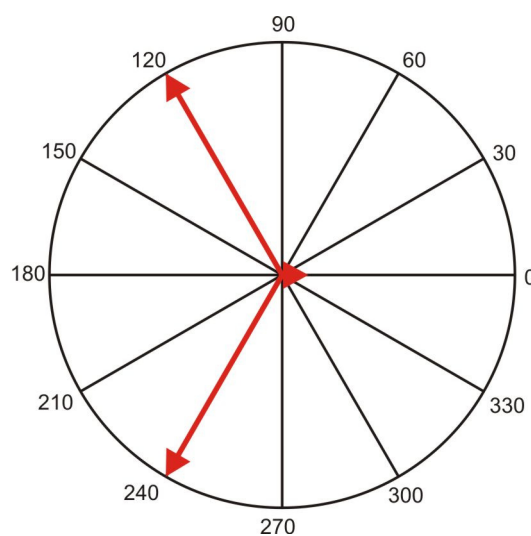


Figura A2.2 – Fasores fase-neutro em M1 e M2

Em M2, o afundamento de tensão será do mesmo tipo de M1 já que o transformador do tipo 1 não altera as tensões entre primário e secundário. Porém, em M3, ter-se-á outro tipo de afundamento de tensão, pois a propagação é feita através de um transformador do tipo 3. Então, nesse caso o afundamento de tensão será do tipo C, em que uma fase permanece inalterada e as outras sofrem, além de afundamento, saltos de ângulos. A figura A2.3 ilustra o tipo de afundamento em M3.

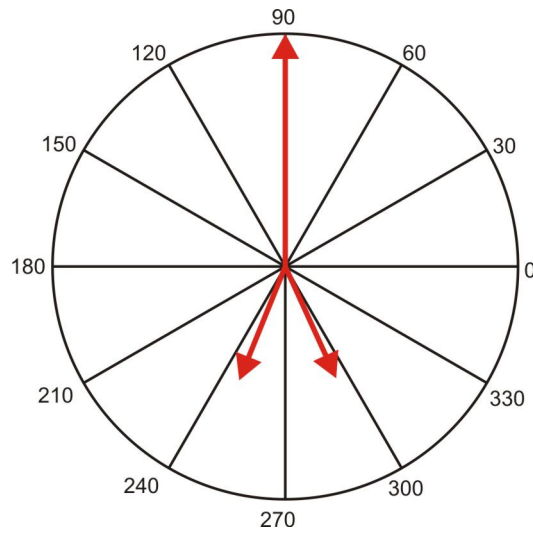


Figura A2.3 – Fasores fase-neutro em M3

Em M4, a propagação é por dois transformadores tipo 3. Isso equivale a propagação em um transformador tipo 2. Logo, o afundamento de tensão será do tipo D, conforme figura A2.4.

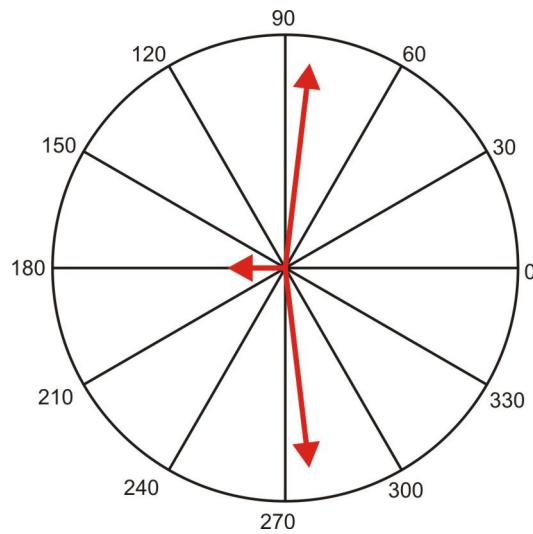


Figura A2.4 – Fasores fase-neutro em M4

Na figura A2.5 é possível observar como o afundamento de tensão monofásico propaga-se pela malha, alternando-se entre os tipos de afundamentos de tensão propostos por Bollen (2000).

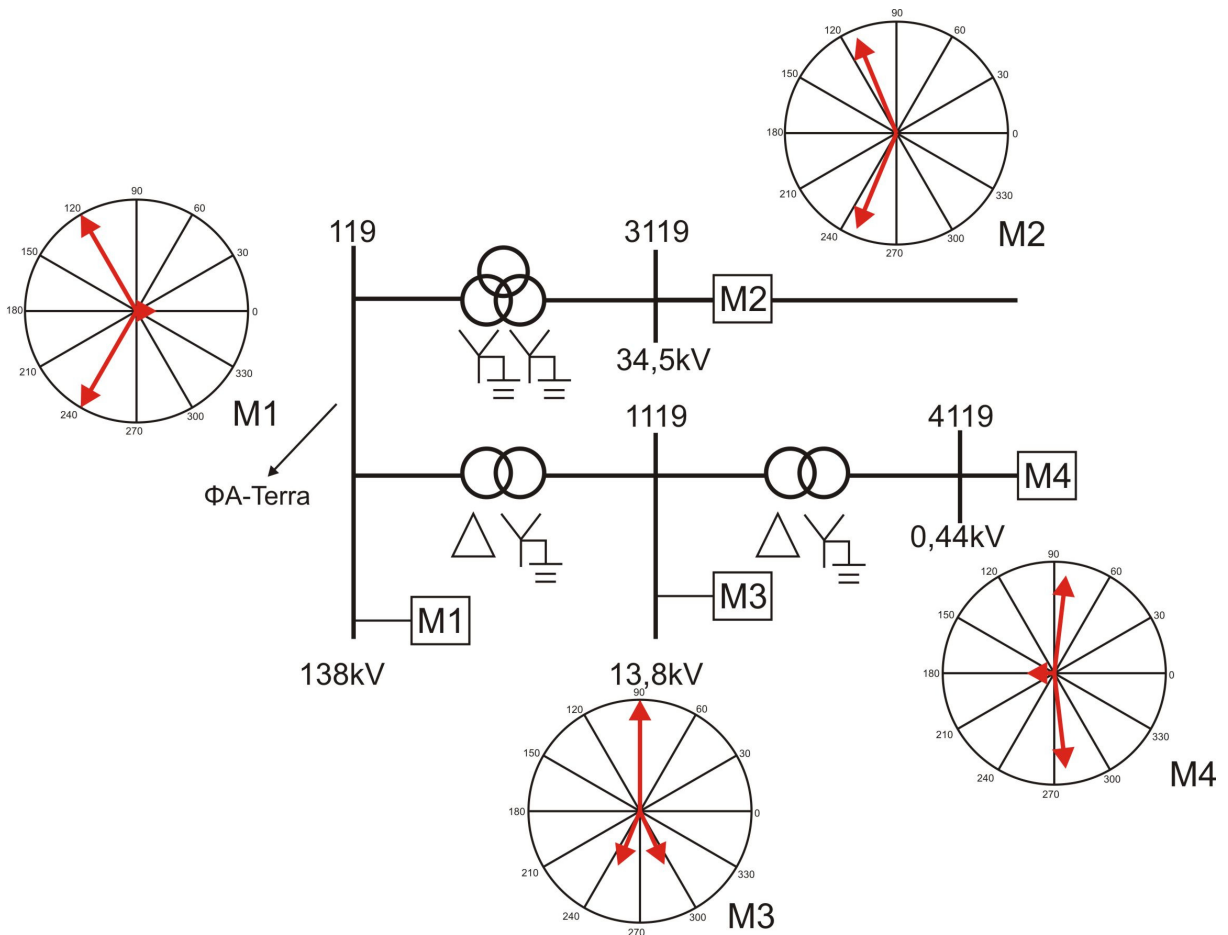


Figura A2.5 – Propagação de afundamento monofásico – análise de tensões fase-neutro

A2.1.2 – Análise Tensões Fase-fase

Na análise da malha da figura A2.1 pelas tensões fase-fase, observa-se também que o afundamento de tensão modifica-se ao se propagar pelas barras. Em M1, o afundamento de tensão será do tipo C, conforme a figura A2.6. Em M2, não há alteração do tipo do afundamento de tensão, como no caso anterior. Portanto, em M2, o afundamento possui as mesmas características do afundamento em M1.

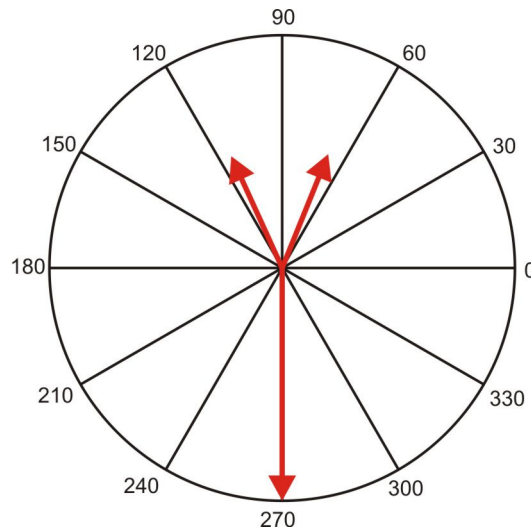


Figura A2.6 – Fasores fase-fase em M1 e M2

Em M3, o tipo do afundamento altera-se, pois a propagação é realizada pelo transformador tipo 3. O tipo do afundamento em M3 é do tipo D, conforme a figura A2.7.

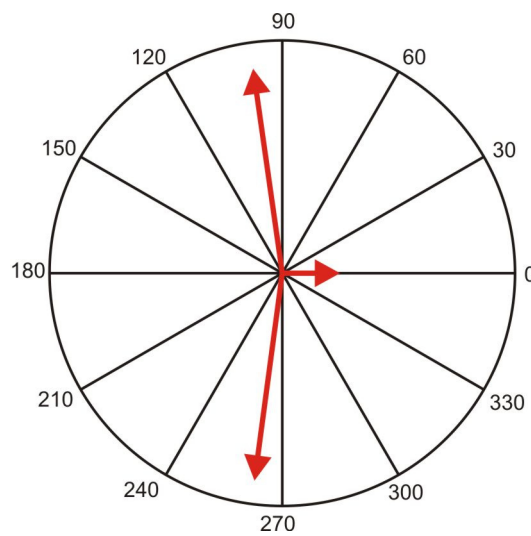


Figura A2.7 – Fasores fase-fase em M3

Em M4, o afundamento de tensão é o mesmo que em M1 e M2, pois o afundamento propaga-se por dois transformadores tipo 3 (equivalente a um transformador tipo 2) e como as tensões fase-fase não possuem seqüência zero, não há influência do tipo de conexão do transformador nas características do afundamento de tensão. Portanto, o afundamento de tensão será do tipo C conforme a figura A2.8.

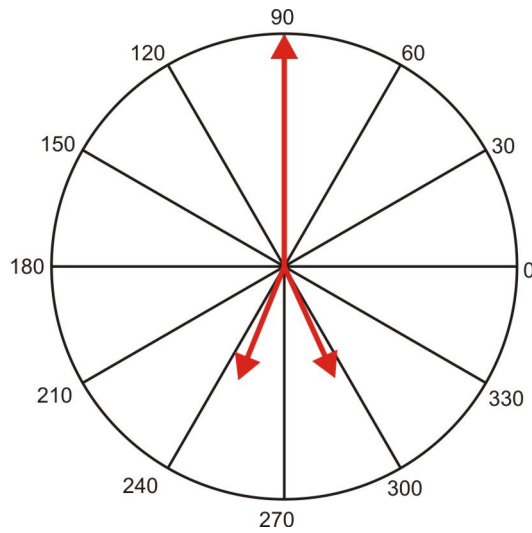


Figura A2.8 – Fasores fase-fase em M4

Na figura A2.9 são ilustrados como ficam os fasores nas barras da malha analisando as tensões fase-fase para um afundamento monofásico na barra M1.

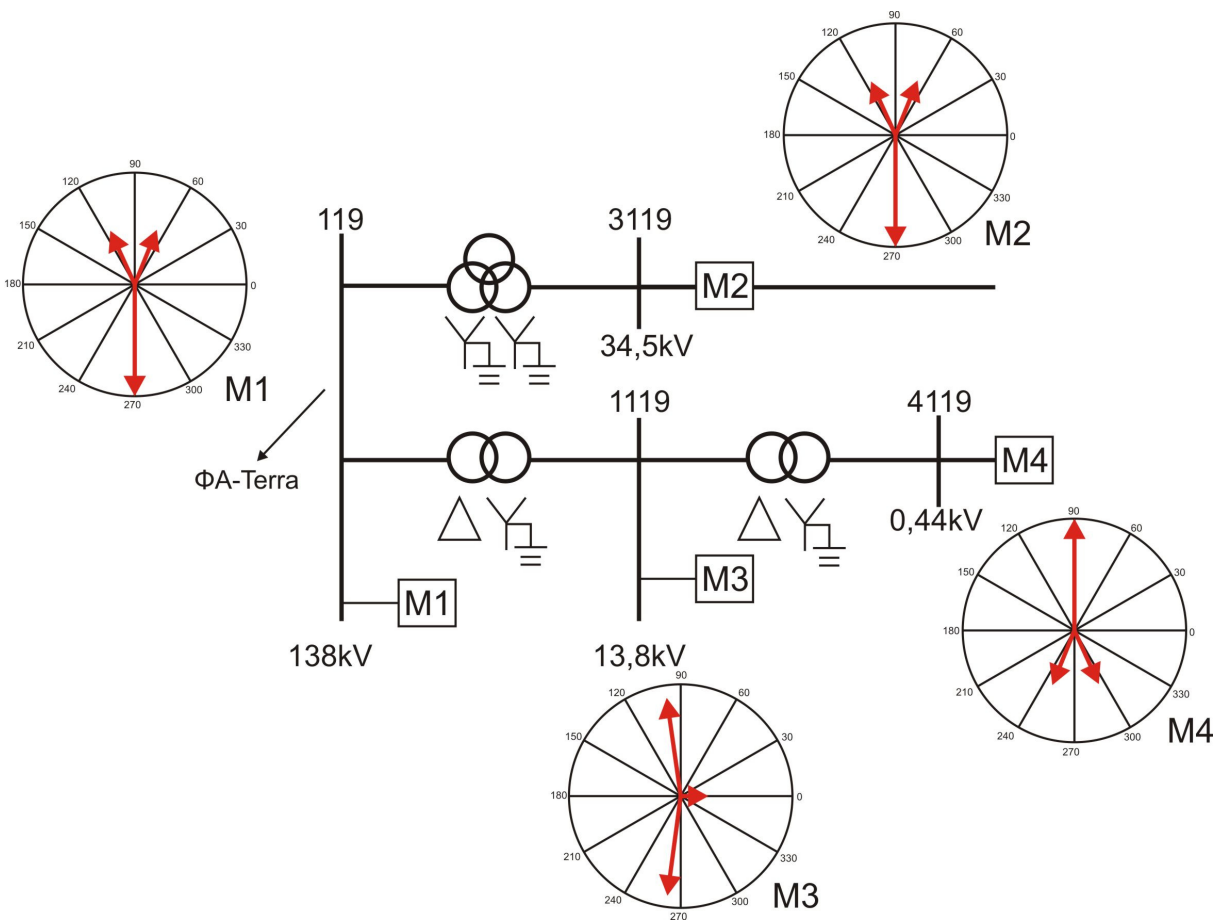


Figura A2.9 – Propagação de afundamento monofásico – análise de tensões fase-fase

Apêndice 3

PROGRAMA DESENVOLVIDO NO DSP

A3.1 – ALOCAÇÃO DE VALORES DA REFERÊNCIA SENOIDAL E DA PORTADORA TRIANGULAR

```
// Vetor com 600 valores de uma senóide
unsigned int seno[600]={
    10416, 10471, 10526, 10580, 10635, 10689, 10744, 10798, 10853, 10907, 10962, 11016, 11071, 11125, 11179, 11234, 11288,
    11342, 11397, 11451, 11505, 11560, 11614, 11668, 11722, 11776, 11830, 11884, 11938, 11992, 12046, 12100, 12154, 12207, 12261,
    12315, 12368, 12422, 12475, 12529, 12582, 12636, 12689, 12742, 12795, 12848, 12901, 12954, 13007, 13060, 13112, 13165, 13218,
    13270, 13323, 13375, 13427, 13479, 13531, 13583, 13635, 13687, 13739, 13791, 13842, 13894, 13945, 13996, 14047, 14098, 14149,
    14200, 14251, 14302, 14352, 14403, 14453, 14503, 14553, 14603, 14653, 14703, 14753, 14802, 14852, 14901, 14950, 14999, 15048,
    15097, 15145, 15194, 15242, 15291, 15339, 15387, 15435, 15482, 15530, 15577, 15625, 15672, 15719, 15766, 15813, 15859, 15906,
    15952, 15998, 16044, 16090, 16135, 16181, 16226, 16271, 16316, 16361, 16406, 16451, 16495, 16539, 16583, 16627, 16671, 16714,
    16758, 16801, 16844, 16887, 16929, 16972, 17014, 17056, 17098, 17140, 17181, 17223, 17264, 17305, 17346, 17386, 17427, 17467,
    17507, 17547, 17587, 17626, 17665, 17705, 17743, 17782, 17821, 17859, 17897, 17935, 17972, 18010, 18047, 18084, 18121, 18157,
    18194, 18230, 18266, 18302, 18337, 18373, 18408, 18443, 18477, 18512, 18546, 18580, 18614, 18647, 18680, 18714, 18746, 18779,
    18811, 18844, 18876, 18907, 18939, 18970, 19001, 19032, 19062, 19093, 19123, 19153, 19182, 19211, 19241, 19269, 19298, 19326,
    19355, 19382, 19410, 19437, 19465, 19491, 19518, 19545, 19571, 19597, 19622, 19648, 19673, 19698, 19722, 19747, 19771, 19795,
    19818, 19842, 19865, 19888, 19910, 19932, 19954, 19976, 19998, 20019, 20040, 20061, 20081, 20102, 20121, 20141, 20161, 20180,
    20199, 20217, 20236, 20254, 20271, 20289, 20306, 20323, 20340, 20356, 20373, 20388, 20404, 20419, 20434, 20449, 20464, 20478,
    20492, 20506, 20519, 20532, 20545, 20558, 20570, 20582, 20594, 20605, 20617, 20627, 20638, 20648, 20659, 20668, 20678, 20687,
    20696, 20705, 20713, 20721, 20729, 20737, 20744, 20751, 20758, 20764, 20770, 20776, 20781, 20787, 20792, 20796, 20801, 20805,
    20809, 20812, 20816, 20819, 20821, 20824, 20826, 20828, 20829, 20831, 20832, 20832, 20833, 20833, 20833, 20833, 20832, 20832, 20831,
    20829, 20828, 20826, 20824, 20821, 20819, 20816, 20812, 20809, 20805, 20801, 20796, 20792, 20787, 20781, 20776, 20770, 20764,
    20758, 20751, 20744, 20737, 20729, 20721, 20713, 20705, 20696, 20687, 20678, 20668, 20659, 20648, 20638, 20627, 20617, 20605,
    20594, 20582, 20570, 20558, 20545, 20532, 20519, 20506, 20492, 20478, 20464, 20449, 20434, 20419, 20404, 20388, 20373, 20356,
```

```

20340, 20323, 20306, 20289, 20271, 20254, 20236, 20217, 20199, 20180, 20161, 20141, 20121, 20102, 20081, 20061, 20040, 20019,
19998, 19976, 19954, 19932, 19910, 19888, 19865, 19842, 19818, 19795, 19771, 19747, 19722, 19698, 19673, 19648, 19622, 19597,
19571, 19545, 19518, 19491, 19465, 19437, 19410, 19382, 19355, 19326, 19298, 19269, 19241, 19211, 19182, 19153, 19123, 19093,
19062, 19032, 19001, 18970, 18939, 18907, 18876, 18844, 18811, 18779, 18746, 18714, 18680, 18647, 18614, 18580, 18546, 18512,
18477, 18443, 18408, 18373, 18337, 18302, 18266, 18230, 18194, 18157, 18121, 18084, 18047, 18010, 17972, 17935, 17897, 17859,
17821, 17782, 17743, 17705, 17665, 17626, 17587, 17547, 17507, 17467, 17427, 17386, 17346, 17305, 17264, 17223, 17181, 17140,
17098, 17056, 17014, 16972, 16929, 16887, 16844, 16801, 16758, 16714, 16671, 16627, 16583, 16539, 16495, 16451, 16406, 16361,
16316, 16271, 16226, 16181, 16135, 16090, 16044, 15998, 15952, 15906, 15859, 15813, 15766, 15719, 15672, 15625, 15577, 15530,
15482, 15435, 15387, 15339, 15291, 15242, 15194, 15145, 15097, 15048, 14999, 14950, 14901, 14852, 14802, 14753, 14703, 14653,
14603, 14553, 14503, 14453, 14403, 14352, 14302, 14251, 14200, 14149, 14098, 14047, 13996, 13945, 13894, 13842, 13791, 13739,
13687, 13635, 13583, 13531, 13479, 13427, 13375, 13323, 13270, 13218, 13165, 13112, 13060, 13007, 12954, 12901, 12848, 12795,
12742, 12689, 12636, 12582, 12529, 12475, 12422, 12368, 12315, 12261, 12207, 12154, 12100, 12046, 11992, 11938, 11884, 11830,
11776, 11722, 11668, 11614, 11560, 11505, 11451, 11397, 11342, 11288, 11234, 11179, 11125, 11071, 11016, 10962, 10907, 10853,
10798, 10744, 10689, 10635, 10580, 10526, 10471

```

```
};
```

```
// Vetor para cálculo de nova senóide
```

```
unsigned int senom[600];
```

```
// Vetor com valores da referência triangular
```

```
unsigned int triangular[200]={
```

```

20833, 20625, 20416, 20208, 20000, 19791, 19583, 19375, 19166, 18958, 18750, 18541, 18333, 18125, 17916, 17708, 17500,
17291, 17083, 16875, 16666, 16458, 16250, 16041, 15833, 15625, 15416, 15208, 15000, 14791, 14583, 14375, 14166, 13958, 13750,
13541, 13333, 13125, 12916, 12708, 12500, 12291, 12083, 11875, 11666, 11458, 11250, 11041, 10833, 10625, 10416, 10208, 10000, 9792,
9583, 9375, 9167, 8958, 8750, 8542, 8333, 8125, 7917, 7708, 7500, 7292, 7083, 6875, 6667, 6458, 6250, 6042, 5833, 5625, 5417, 5208,
5000, 4792, 4583, 4375, 4167, 3958, 3750, 3542, 3333, 3125, 2917, 2708, 2500, 2292, 2083, 1875, 1667, 1458, 1250, 1042, 833, 625, 417,
208, 0, 208, 417, 625, 833, 1042, 1250, 1458, 1667, 1875, 2083, 2292, 2500, 2708, 2917, 3125, 3333, 3542, 3750, 3958, 4167, 4375, 4583,
4792, 5000, 5208, 5417, 5625, 5833, 6042, 6250, 6458, 6667, 6875, 7083, 7292, 7500, 7708, 7917, 8125, 8333, 8542, 8750, 8958, 9167,
9375, 9583, 9792, 10000, 10208, 10416, 10625, 10833, 11041, 11250, 11458, 11666, 11875, 12083, 12291, 12500, 12708, 12916, 13125,
13333, 13541, 13750, 13958, 14166, 14375, 14583, 14791, 15000, 15208, 15416, 15625, 15833, 16041, 16250, 16458, 16666, 16875,
17083, 17291, 17500, 17708, 17916, 18125, 18333, 18541, 18750, 18958, 19166, 19375, 19583, 19791, 20000, 20208, 20416, 20625

```

```
};
```

A3.2 – ALOCAÇÃO DOS VETORES DE COMPARAÇÃO E VETORES DE MAGNITUDE E ÂNGULOS

```
// Vetor com comparacoes para componente positiva 1, negativa 2 e zero 0, para PWM a 3 niveis ou unipolar
```

```
// a --> referência da senóide positiva
```

```
// b --> referência da senóide negativa
```

```

unsigned int indicesa[120], indicesb[120], indices1a[120], indices2a[120], indices0a[120], indices1b[120], indices2b[120],
indices0b[120];

```

```
// Vetor com angulos Ang_Vas1, Ang_Vas2, Ang_Vas0 para cada afundamento
```

```
unsigned int tab_ang[63]={
```

```
180,0,0, 180,180,180, 180,0,0, 180,180,0, 180,0,0, 180,180,0, 180,0,0,
```

```
180,0,0, 180,60,300, 180,240,0, 180,60,0, 180,240,120, 180,60,0, 180,240,0,
```

```

180,0,0, 180,300,60, 180,120,0, 180,300,0, 180,120,240, 180,300,0, 180,120,0
};

// Vetor com divisores para dar as magnitudes Mag_Vas1, Mag_Vas2, Mag_Vas0 para cada afundamento
// obs: valores divididos por 2, já que pra frente a magnitude será multiplicada por 2. Facilita em
// afundamentos E, F, G
unsigned int tab_mag[21]={2,0,0, 6,6,6, 4,4,0, 4,4,0, 3,6,6, 3,6,0, 3,6,0};

```

A3.3 – PROGRAMA PRINCIPAL

```

// Função principal
void main(void)
{
    // Inicializar o DSP
    InitSystem();

    // Configuração de portas de I/O
    Gpio_select();

    // Configuração das interrupções
    InitPieCtrl();

    // Configuração da tabela de vetores de interrupção
    InitPieVectTable();

    // Inicializa o ADC
    InitAdc();

    InitCpuTimers();

    // Habilita interrupções que serão utilizadas
    PieCtrlRegs.PIEIER2.bit.INTx1=1; //Habilita interrupção por comparação CMP1
    PieCtrlRegs.PIEIER2.bit.INTx2=1; //Habilita interrupção por comparação CMP2
    PieCtrlRegs.PIEIER2.bit.INTx3=1; //Habilita interrupção por comparação CMP3
    PieCtrlRegs.PIEIER2.bit.INTx6=1; //Habilita interrupção por comparação T1 Underflow
    PieCtrlRegs.PIEIER2.bit.INTx4=1; //Habilita interrupção por comparação T1 Period Match
    PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx5=1; //Habilita interrupção por captura
    PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx1=1; //Habilita interrupção por comparação CMP4
    PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx2=1; //Habilita interrupção por comparação CMP5
    PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx3=1; //Habilita interrupção por comparação CMP6
    PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx6=1; //Habilita interrupção por comparação T3 Underflow
    PieCtrlRegs.PIEIER4.bit.INTx4=1; //Habilita interrupção por comparação T3 Period Match
    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6=1; //Habilita interrupção por ADC

    // Habilita grupos 1, 2, 3 e 4.
    IER = 15;
}

```

```

// Habilita Interrupção global e eventos tempo real de alta prioridade
EINT; // Habilita interrupção global INIM
ERTM; // Habilita interrupção tempo-real gloal DBGm

// Configuração dos timers e PWM
Configura_PWM();

// Configuração do ADC
Configura_ADC();

CpuTimer0Regs.TCR.bit.TSS = 0;

Calcula_sequencias();

EvaRegs.T1CON.bit.TENABLE = 1; // Habilita Timer 1
EvbRegs.T3CON.bit.TENABLE = 1; // Habilita Timer 3

// Rotina de varredura
while(1)
{
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDKEY = 0xAA; // Watchdog #2
    EDIS;
    cont_AD++;
    if(cont_AD==100)
    {
        AdcRegs.ADCCTRL2.bit.SOC_SEQ1 = 1; //Habilita conversão A/D
        cont_AD=0;
    }

    if((GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF4==0)&&(GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF0==0)&&(GpioDataRegs.GPEDAT.bit.GPIO
E0==0))
    {
        desab_pulsos=1;
        Zera_pos();
        Zera_neg();
        Zera_zero();
    }
    else
    {
        desab_pulsos=0;
    }

    tipo=(GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF4)+(GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF0<<1)+(GpioDataRegs.GPEDAT.bit.GPIOE0<<
2);

    if((mag_V!=mag_V_ant)&&(desab_pulsos==0))
    {
        Calcula_sequencias();
        mag_V_ant=mag_V;
    }
}

```

```

    }

    if((tipo!=tipo_ant)&&(desab_pulsos==0))
    {
        Calcula_sequencias();
        tipo_ant=tipo;
    }

    atraso=9;
}
}

```

A3.4 – FUNÇÃO PARA CÁLCULOS DOS TEMPOS DE TRANSIÇÃO EM CADA SEQÜÊNCIA

```

void Calcula_sequencias(void)
{
    // Calcula deltaV
    deltaV = (_IQ(1) - mag_V);

    Ref_x_DeltaV();

    // Calculo para Vas1
    if(tab_mag[3*(tipo-1)]!=0)
    {
        ang=tab_ang[((fase-1)*21)+(3*(tipo-1))];           // Pega no vetor o valor do angulo

        // Multiplica cada elemento da tabela de senom com (2/tab_mag)
        inc=0;
        Calcula_senom();

        // Inicia variáveis
        Inicia_var();

        Calcula_indices();

        // Calcula a largura do pulso para indices pares e impares. Subtrai de 10416
        for(i=0;i<120;i++)
        {
            indices1a[i]=temp_max - indicesa[i];
            indices1b[i]=temp_max - indicesb[i];
        }
    }
    else
    {

```

```

        // Se a magnitude for zero, carrega os vetores com zeros
        Zera_pos();
    }

    Ref_x_DeltaV();

    Angulo();
    ref_atraso1=ref_atraso;

    // Calculo para Vas2
    if(tab_mag[(3*(tipo-1))+1]!=0)
    {
        ang=tab_ang[((fase-1)*21)+(3*(tipo-1))+1];        // Pega na tabela o valor do angulo

        // Multiplica cada elemento da tabela de senom com (2/tab_mag)
        inc=1;
        Calcula_senom();

        // Inicia variáveis
        Inicia_var();

        Calcula_indices();

        // Calcula a largura do pulso para indices pares e impares. Subtrai de 10416
        for(i=0;i<120;i++)
        {
            indices2a[i]=temp_max-indicesa[i];
            indices2b[i]=temp_max-indicesb[i];
        }
    }
    else
    {
        // Se a magnitude for zero, carrega os vetores com zeros
        Zera_neg();
    }

    Ref_x_DeltaV();

    Angulo();
    ref_atraso2=ref_atraso;

    // Calculo para Vas0
    if(tab_mag[(3*(tipo-1))+2]!=0)
    {
        ang=tab_ang[((fase-1)*21)+(3*(tipo-1))+2];        // Pega na tabela o valor do angulo

        // Multiplica cada elemento da tabela de senom com (2/tab_mag)
        inc=2;
        Calcula_senom();

        // Inicia variáveis

```

```

        Inicia_var();

        Calcula_indices();

        // Calcula a largura do pulso para indices pares e impares. Subtrai de 10416
        for(i=0;i<120;i++)
        {
            indices0a[i]=temp_max-indicesa[i];
            indices0b[i]=temp_max-indicesb[i];
        }
    }
    else
    {
        // Se a magnitude for zero, carrega os vetores com zeros
        Zera_zero();
    }

    Angulo();
    ref_atraso0=ref_atraso;
}

```

A3.5 – FUNÇÕES PARA AJUSTE DA REFERÊNCIA SENOIDAL DE ACORDO COM O TIPO E MAGNITUDE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

```

// Multiplicação da referência senoidal pelo valor na tabela de magnitudes
//correspondente ao tipo do afundamento de tensão
void Calcula_senom(void)
{
    for(i=0;i<600;i++)
    {
        senom[i]=(2*senom[i])/tab_mag[3*(tipo-1)+inc];
        if(i==0)
            div = seno[0] - senom[0];
        senoatual = senom[i]+div;
        senom[i] = senoatual;
    }
}

// Multiplicação da referência senoidal por DeltaV
void Ref_x_DeltaV(void)
{
    // Multiplica a referência senoidal por deltaV
    for(i=0;i<600;i++)
    {

```

```

senoV1 = _IQ(seno[i]);
senoV = _IQmpy(senoV1,deltaV);
senom[i] = senoV>>10;
if(i==0)
    div = seno[0] - senom[0];
senom[i] = senom[i]+div;
senoatual = senom[i];
    }
}

```

A3.6 – FUNÇÃO PARA ATUALIZAÇÃO DOS TEMPOS DE TRANSIÇÃO PELA COMPARAÇÃO DA REFERÊNCIA SENOIDAL E DA PORTADORA TRIANGULAR

```

void Calcula_indices(void)
{
    sai1=0;
    sai2=0;

    // Compara a senoide com a triangular para pegar os indices onde ocorre mudança
    for(j=0;j<30;j++)
    {
        for(i=0;i<20;i++)
        {
            for(cont=0;cont<10;cont++)
            {
                if(senom[i+(20*j)]>senom[i+1+(20*j)])
                {
                    aux1=senom[i+(20*j)]-senom[i+1+(20*j)];
                    seno_interpol[cont]=senom[i+(20*j)]-(aux1/10)*cont;
                }
                else
                {
                    aux1=senom[i+1+(20*j)]-senom[i+(20*j)];
                    seno_interpol[cont]=senom[i+(20*j)]+(aux1/10)*cont;
                }
            }
            op1=i*10;
            for(cont=0;cont<10;cont++)
            {
                op=op1+cont;
                if((seno_interpol[cont]>=triangular[op])&&(aa==1))
                {
                    aa=0;
                    bb=1;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        indicesa[k]=triangular[op];
        indicesb[k+60]=triangular[op];
        k++;
        sai1=1;
    }
}
if(sai1==0)
{
    for(cont=0;cont<resolucao;cont++)
    {
        op=op1+cont;
        if((seno_interpol[cont]<=triangular[op])&&(bb==1))
        {
            aa=1;
            bb=0;
            indicesa[k]=triangular[op];
            indicesb[k+60]=triangular[op];
            k++;
        }
    }
}
sai1=0;
for(cont=0;cont<10;cont++)
{
    op=op1+cont;
    if(((temp_max-seno_interpol[cont])>=triangular[op])&&(a==1))
    {
        a=0;
        b=1;
        indicesb[l]=triangular[op];
        indicesa[l+60]=triangular[op];
        l++;
        sai2=1;
    }
}
if(sai2==0)
{
    for(cont=0;cont<10;cont++)
    {
        op=op1+cont;
        if((temp_max-(seno_interpol[cont])<=triangular[op])
        &&(b==1))
        {
            a=1;
            b=0;
            indicesb[l]=triangular[op];
            indicesa[l+60]=triangular[op];
            l++;
        }
    }
}
}

```

```

        sai2=0;
    }
}
}

```

A3.7 – FUNÇÕES PARA CONFIGURAÇÕES DOS PERIFÉRICOS DO DSP

// Configuração do conversor A/D

void Configura_ADC(void)

```

{
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 8;
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 0;           // Modo sequencial
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0;         // Sem contínuo
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0;              // prescaler = 1
    AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0002;         // 3 conversões
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x7;    // ADCINA7 como CONV00
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x6;    // ADCINA6 como CONV01
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x5;    // ADCINA5 como CONV02
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x4;    // ADCINA4 como CONV03
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1;     // Habilita Interrupção SEQ1
    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 4;        // Divide HSPCLK by 8
}

```

// Configuração dos pinos de entrada/saída

void Gpio_select(void)

```

{
    EALLOW;
    GpioMuxRegs.GPAMUX.all = 0x0;             // Todos os pinos da porta A como I/O
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM1_GPIOA0 = 1; // PWM1 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM2_GPIOA1 = 1; // PWM2 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM3_GPIOA2 = 1; // PWM3 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM4_GPIOA3 = 1; // PWM4 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM5_GPIOA4 = 1; // PWM5 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.PWM6_GPIOA5 = 1; // PWM6 ativo
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.CAP1Q1_GPIOA8 = 1; // CAP1 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.all = 0x0;            // Todos os pinos da porta B como I/O
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM7_GPIOB0 = 1; // PWM7 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM8_GPIOB1 = 1; // PWM8 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM9_GPIOB2 = 1; // PWM9 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM10_GPIOB3 = 1; // PWM10 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM11_GPIOB4 = 1; // PWM11 ativo
    GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.PWM12_GPIOB5 = 1; // PWM12 ativo
    GpioMuxRegs.GPDMUX.all = 0x0;            // Todos os pinos da porta D como I/O
    GpioMuxRegs.GPFMUX.all = 0x0;           // Todos os pinos da porta F como I/O
    GpioMuxRegs.GPEMUX.all = 0x0;           // Todos os pinos da porta E como I/O
}

```

```

        GpioMuxRegs.GPGMUX.all = 0x0;           // Todos os pinos da porta G como I/O

        GpioMuxRegs.GPADIR.all = 0x0;         // GPIO A PORT  como entrada
        GpioMuxRegs.GPBDIR.all = 0x0;         // GPIO B PORT  como entrada
        GpioMuxRegs.GPDDIR.all = 0x0;         // GPIO D PORT  como entrada
        GpioMuxRegs.GPEDIR.all = 0x0;         // GPIO E PORT  como entrada
        GpioMuxRegs.GPFDIR.all = 0x0;         // GPIO F PORT  como entrada
        GpioMuxRegs.GPGDIR.all = 0x0;         // GPIO G PORT  como entrada

        GpioMuxRegs.GPAQUAL.all = 0x0;        // Configura GPIO com clock máximo
        GpioMuxRegs.GPBQUAL.all = 0x0;        // Configura GPIO com clock máximo
        GpioMuxRegs.GPDQUAL.all = 0x0;        // Configura GPIO com clock máximo
        GpioMuxRegs.GPEQUAL.all = 0x0;        // Configura GPIO com clock máximo
        EDIS;
    }

// Função de configuração do sistema
void InitSystem(void)
{
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDCR = 0x00AF;                // Configura Watchdog

    SysCtrlRegs.SCSR = 0;                     // Watchdog gera um RESET

    SysCtrlRegs.PLLCR.bit.DIV = 10;           // Configura PLL clock multiplicado por 5

    SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x0; // Configura Highspeed Clock Prescaler dividido por 2
    SysCtrlRegs.LOSPCP.all = 0x2; // Configura Lowspeed CLock Prescaler dividido por 4

    // Habilita os clock de EVA e EVB
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.EVAENCLK=1;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.EVBENCLK=1;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.SCIAENCLK=0;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.SCIBENCLK=0;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.MCBSPENCLK=0;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.SPIENCLK=0;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.ECANENCLK=0;
    SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.ADCENCLK=1;
    EDIS;
}

// Configuração do módulo PWM
void Configura_PWM(void)
{
    // Configura EVA e EVB

    EvaRegs.CAPCONA.bit.CAPRES = 1;

    EvaRegs.T1PR = temp_max;                  // Período do Timer 1

    EvbRegs.T3PR = temp_max;                  // Período do Timer 3
}

```

```

EvaRegs.ACTRA.bit.CMP6ACT = 1; // Ação de pulso em alto na comparação PWM6
EvaRegs.ACTRA.bit.CMP5ACT = 2; // Ação de pulso em alto na comparação PWM5
EvaRegs.ACTRA.bit.CMP4ACT = 1; // Ação de pulso em alto na comparação PWM4
EvaRegs.ACTRA.bit.CMP3ACT = 2; // Ação de pulso em alto na comparação PWM3
EvaRegs.ACTRA.bit.CMP2ACT = 1; // Ação de pulso em alto na comparação PWM2
EvaRegs.ACTRA.bit.CMP1ACT = 2; // Ação de pulso em alto na comparação PWM1

EvbRegs.ACTRB.bit.CMP12ACT = 1; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM12
EvbRegs.ACTRB.bit.CMP11ACT = 2; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM11
EvbRegs.ACTRB.bit.CMP10ACT = 1; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM10
EvbRegs.ACTRB.bit.CMP9ACT = 2; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM9
EvbRegs.ACTRB.bit.CMP8ACT = 1; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM8
EvbRegs.ACTRB.bit.CMP7ACT = 2; // Ação de pulso em baixo na comparação PWM7

EvaRegs.DBTCONA.bit.DBT = 0x5; // Período do tempo morto
EvaRegs.DBTCONA.bit.EDBT3 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 5 e 6
EvaRegs.DBTCONA.bit.EDBT2 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 3 e 4
EvaRegs.DBTCONA.bit.EDBT1 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 1 e 2
EvaRegs.DBTCONA.bit.DBTPS = 0x6; // Prescaler do tempo morto

EvbRegs.DBTCONB.bit.DBT = 0x5; // Período do tempo morto
EvbRegs.DBTCONB.bit.EDBT3 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 11 e 12
EvbRegs.DBTCONB.bit.EDBT2 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 9 e 10
EvbRegs.DBTCONB.bit.EDBT1 = 1; // Habilita tempo morto em PWM 7 e 8
EvbRegs.DBTCONB.bit.DBTPS = 0x6; // Prescaler do tempo morto

EvaRegs.CMPR1 = 0; // Registro de comparação 1
EvaRegs.CMPR2 = 0; // Registro de comparação 2
EvaRegs.CMPR3 = 0; // Registro de comparação 3

EvbRegs.CMPR4 = 0; // Registro de comparação 4
EvbRegs.CMPR5 = 0; // Registro de comparação 5
EvbRegs.CMPR6 = 0; // Registro de comparação 6

EvaRegs.COMCONA.bit.CENABLE = 1; // Habilita Comparação
EvaRegs.COMCONA.bit.CLD = 1; // Configura underflow e período
EvaRegs.COMCONA.bit.ACTRLD = 1; // Carrega em underflow e período
EvaRegs.COMCONA.bit.FCOMPOE = 1; // Habilita comparação em todos canais PWM
EvaRegs.COMCONA.bit.FCMP3OE = 1; // Habilita comparação CMP3
EvaRegs.COMCONA.bit.FCMP2OE = 1; // Habilita comparação CMP2
EvaRegs.COMCONA.bit.FCMP1OE = 1; // Habilita comparação CMP1

EvbRegs.COMCONB.bit.CENABLE = 1; // Habilita Comparação
EvbRegs.COMCONB.bit.CLD = 1; // Configura underflow e período
EvbRegs.COMCONB.bit.ACTRLD = 1; // Carrega em underflow e período
EvbRegs.COMCONB.bit.FCOMPOE = 1; // Habilita comparação em todos canais PWM
EvbRegs.COMCONB.bit.FCMP6OE = 1; // Habilita comparação CMP6
EvbRegs.COMCONB.bit.FCMP5OE = 1; // Habilita comparação CMP5
EvbRegs.COMCONB.bit.FCMP4OE = 1; // Habilita comparação CMP4

```

```

EvaRegs.T1CON.bit.FREE = 0; // Pára quando emulação é suspensa
EvaRegs.T1CON.bit.SOFT = 0; // Pára quando emulação é suspensa
EvaRegs.T1CON.bit.TMODE = 0x1; // Modo de contagem contínuo up/down
EvaRegs.T1CON.bit.TPS = 0; // Prescaler = 1 : 75 MHz
EvaRegs.T1CON.bit.TENABLE = 0; // Desabilita Timer 1
EvaRegs.T1CON.bit.TCLKS10 = 0; // Utiliza clock interno
EvaRegs.T1CON.bit.TCLD10 = 1; // Recarrega registo quando contador é zero ou atinge período

EvaRegs.T1CON.bit.TECMPR = 0; // Habilita operação de comparação

EvbRegs.T3CON.bit.FREE = 0; // Pára quando emulação é suspensa
EvbRegs.T3CON.bit.SOFT = 0; // Pára quando emulação é suspensa
EvbRegs.T3CON.bit.TMODE = 0x1; // Modo de contagem contínuo up/down
EvbRegs.T3CON.bit.TPS = 0; // Prescaler = 1 : 75 MHz
EvbRegs.T3CON.bit.TENABLE = 0; // Desabilita Timer 3
EvbRegs.T3CON.bit.TCLKS10 = 0; // Utiliza clock interno
EvbRegs.T3CON.bit.TCLD10 = 1; // Recarrega registo quando contador é zero ou atinge período

EvbRegs.T3CON.bit.TECMPR = 0; // Habilita operação de comparação

EvaRegs.EVAIMRA.bit.CMP1INT = 1; // Habilita Interrupção CMP1
EvaRegs.EVAIMRA.bit.CMP2INT = 1; // Habilita Interrupção CMP2
EvaRegs.EVAIMRA.bit.CMP3INT = 1; // Habilita Interrupção CMP3
EvaRegs.EVAIMRA.bit.T1UFINT = 1; // Habilita Interrupção T1 Underflow
EvaRegs.EVAIMRA.bit.T1PINT = 1; // Habilita Interrupção T1 Period Match
EvbRegs.EVBIMRA.bit.CMP4INT = 1; // Habilita Interrupção CMP4
EvbRegs.EVBIMRA.bit.CMP5INT = 1; // Habilita Interrupção CMP5
EvbRegs.EVBIMRA.bit.CMP6INT = 1; // Habilita Interrupção CMP6
EvbRegs.EVBIMRA.bit.T3UFINT = 1; // Habilita Interrupção T3 Underflow
EvbRegs.EVBIMRA.bit.T3PINT = 1; // Habilita Interrupção T3 Period Match

EvaRegs.CAPCONA.bit.CAP12TSEL = 1;
EvaRegs.CAPCONA.bit.CAP12EN=1;
EvaRegs.CAPCONA.bit.CAP1EDGE=1;
EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP1INT = 1;
}

```

A3.8 – FUNÇÃO DE INTERRUPTÃO DA ENTRADA DE CAPTURA PARA SINCRONISMO DA TENSÃO DO GERADOR COM A TENSÃO DA REDE

```

interrupt void CAPINT1_ISR(void) // EV-A
{
    sinc=2;
}

```

```

// Reset Compare 3 Interrupt Flag
EvaRegs.EVAIFRC.bit.CAP1INT = 1;

// Permite receber mais interrupções do grupo 3
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

```

A3.9 – FUNÇÃO DE INTERRUPTÃO PARA LEITURA DO CONVERSOR A/D

```

// Interrupção ADC
interrupt void ADCINT_ISR(void)
{
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;           // Watchdog #1
    EDIS;

    Valor1 = AdcRegs.ADCRESULT0>>4;    // Leitura do primeiro valor

    media=media+Valor1/300;
    cont_media++;

    if(cont_media==300)
    {
        aux1=(media*10)/300;
        aux2=_IQ(aux1);
        mag_V= _IQmpy(aux1,_IQ(10));
        mag_V= _IQmpy(mag_V,_IQ(1.024));
        if(mag_V>_IQ(0.9))
            mag_V=_IQ(0.9);
        if(mag_V<_IQ(0.1))
            mag_V=_IQ(0.1);
        media=0;
        cont_media=0;
    }

    mag_V=_IQ(0.5);

    // Zera flags
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1 = 0;    // Desabilita Start of Conversion
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1;    // Reset SEQ1
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;  // Zera INT SEQ1 bit
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Habilita outras interrupções do grupo
}

```

A3.10 – FUNÇÃO DE INTERRUPÇÃO PARA MODIFICAÇÃO DO SINAL PWM DE SAÍDA DE ACORDO COM OS TEMPOS DE TRANSIÇÃO CALCULADOS

```
// Interrupção T1 Underflow
interrupt void T1UFINT_ISR(void)
{
    if(sinc==2)
    {
        cont1=ref_atraso1+atraso;
        cont2=ref_atraso1+atraso;
        cont3=ref_atraso2+atraso;
        cont4=ref_atraso2+atraso;
        cont5=ref_atraso0+atraso;
        cont6=ref_atraso0+atraso;
        sinc=0;
    }
    if(cont1>=90)
        sinal=2;
    else
        sinal=1;
    if((cont1==1000)&&(cont2==1000))
    {
        EvaRegs.CMPR1=0;
        EvaRegs.CMPR2=0;
    }
    else
    {
        EvaRegs.CMPR1 = indices1a[cont1];    // Registro de comparação 1
        cont1++;
        if(cont1==(120))
            cont1=0;
        EvaRegs.CMPR2 = indices1b[cont2];    // Registro de comparação 2
        cont2++;
        if(cont2==(120))
            cont2=0;
    }

    if((cont3==1000)&&(cont4==1000))
    {
        EvaRegs.CMPR3=0;
    }
    else
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+1]!=0)
        {
            EvaRegs.CMPR3 = indices2a[cont3];    // Registro de comparação 3
            cont3++;
        }
    }
}
```

```

        if(cont3==(120))
            cont3=0;
    }
}

EALLOW;
SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;          // Watchdog #1
EDIS;

// Reset T1 Underflow Interrupt Flag
EvaRegs.EVAIFRA.bit.T1UFINT = 1;

// Permite receber mais interrupções do grupo 2
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP2;
}

// Interrupção T1 Overflow
interrupt void T1PINT_ISR(void)
{
    if(sinc==2)
    {
        cont1=ref_atraso1+atraso;
        cont2=ref_atraso1+atraso;
        cont3=ref_atraso2+atraso;
        cont4=ref_atraso2+atraso;
        cont5=ref_atraso0+atraso;
        cont6=ref_atraso0+atraso;
        sinc=0;
    }
    if((cont1!=1000)&&(cont2!=1000))
    {
        EvaRegs.CMPR1 = indices1a[cont1];    // Registro de comparação 1
        cont1++;
        if(cont1==(120))
            cont1=0;
        EvaRegs.CMPR2 = indices1b[cont2];    // Registro de comparação 2
        cont2++;
        if(cont2==(120))
            cont2=0;
    }

    if((cont3!=1000)&&(cont4!=1000))
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+1]!=0)
        {
            EvaRegs.CMPR3 = indices2a[cont3];    // Registro de comparação 3
            cont3++;
            if(cont3==(120))
                cont3=0;
        }
    }
}

```

```

    }

    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;          // Watchdog #1
    EDIS;

    // Reset T1 overflow Interrupt Flag
    EvaRegs.EVAIFRA.bit.T1OFINT = 1;

    // Permite receber mais interrupções do grupo 2
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP2;
}

// Interrupção T3 Underflow
interrupt void T3UFINT_ISR(void)
{
    if((cont3==1000)&&(cont4==1000))
    {
        EvbRegs.CMPR4=0;
    }
    else
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+1]!=0)
        {
            EvbRegs.CMPR4 = indices2b[cont4];    // Registro de comparação 4
            cont4++;
            if(cont4==(120))
                cont4=0;
        }
    }

    if((cont5==1000)&&(cont6==1000))
    {
        EvbRegs.CMPR5=0;
        EvbRegs.CMPR6=0;
    }
    else
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+2]!=0)
        {
            EvbRegs.CMPR5 = indices0a[cont5];    // Registro de comparação 5
            cont5++;
            if(cont5==(120))
                cont5=0;

            EvbRegs.CMPR6 = indices0b[cont6];    // Registro de comparação 6
            cont6++;
            if(cont6==(120))
                cont6=0;
        }
    }
}

```

```

EALLOW;
SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;          // Watchdog #1
EDIS;

// Reset T3 Underflow Interrupt Flag
EvbRegs.EVBIFRA.bit.T3UFINT = 1;

// Permite receber mais interrupções do grupo 4
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP4;
}

// Interrupção T3 Overflow
interrupt void T3PINT_ISR(void)
{
    if((cont3!=1000)&&(cont4!=1000))
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+1]!=0)
        {
            EvbRegs.CMPR4 = indices2b[cont4];    // Registro de comparação
            cont4++;
            if(cont4==(120))
                cont4=0;
        }
    }

    if((cont5!=1000)&&(cont6!=1000))
    {
        if(tab_mag[(3*(tipo-1))+2]!=0)
        {
            EvbRegs.CMPR5 = indices0a[cont5];    // Registro de comparação 5
            cont5++;
            if(cont5==(120))
                cont5=0;
            EvbRegs.CMPR6 = indices0b[cont6];    // Registro de comparação 6
            cont6++;
            if(cont6==(120))
                cont6=0;
        }
    }

EALLOW;
SysCtrlRegs.WDKEY = 0x55;          // Watchdog #1
EDIS;

// Reset T3 Overflow Interrupt Flag
EvbRegs.EVBIFRA.bit.T3OFINT = 1;

// Permite receber mais interrupções do grupo 4
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP4;
}

```