



Universidade Federal de Pernambuco

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS- CTG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

**ESTUDO DE QUALIDADE DA ENERGIA
DIMENSIONAMENTO DE UM RESTAURADOR DINÂMICO
DE TENSÃO**

POR

LUIZ CARLOS DE ALCÂNTARA FONSECA

RECIFE-PE

2003

LUIZ CARLOS DE ALCÂNTARA FONSECA

**ESTUDO DE QUALIDADE DA ENERGIA
DIMENSIONAMENTO DE UM RESTAURADOR
DINÂMICO DE TENSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, em cumprimento às exigências para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Prof. Francisco de Assis dos Santos Neves, D.Sc., UFMG

Orientador

RECIFE-PE

2003



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

LUIZ CARLOS DE ALCÂNTARA FONSECA

TÍTULO

**“ESTUDO DE QUALIDADE DA ENERGIA –
DIMENSIONAMENTO DE UM RESTAURADOR DINÂMICO
DE TENSÃO”**

A comissão examinadora composta pelos professores:
FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEESP/UFPE,
MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEESP/UFPE,
MARCELO CABRAL CAVALCANTI, DEE/UFPB sob a presidência
do primeiro, consideram o candidato **LUIZ CARLOS DE
ALCÂNTARA FONSECA APROVADO.**

Recife, 18 de junho de 2003.


FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES


MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR


MARCELO CABRAL CAVALCANTI

**ESTUDO DE QUALIDADE DA ENERGIA
DIMENSIONAMENTO DE UM RESTAURADOR
DINÂMICO DE TENSÃO**

Dedico este trabalho aos meus pais, Nildo Fonseca de Souza (in memoriam) e Irma de Alcântara Fonseca, minha esposa Tereza Helena de Lima Fonseca, aos meus filhos Tiago, Humberto e Caio, e ao meu neto Humberto Lima de Alcântara Fonseca Filho.

AGRADECIMENTOS

A ti Jeová Deus, porque em ti vivemos, e nos movemos, e existimos, e ao nosso Senhor Jesus Cristo. (Atos 17:28)

Agradeço à Eletrobrás, que viu uma luz depois de um apagão.

Agradeço à CHESF, chama que não se apaga.

Agradeço à UFPE.

Agradeço à STIUEP, Sindicato dos Urbanitários, por sua luta constante por treinamento e aperfeiçoamento dos seus associados.

Agradeço a Leonardo Lins, Murilo Pinto, Oswaldo Régis, Marcelo Maia e Fernando Rodrigues Alves, diretor e chefes de departamento e divisão que me indicaram, incentivaram e favoreceram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Francisco de Assis dos Santos Neves, pela seu empenho e dedicação.

Agradeço aos representantes da Eletrobrás, João Rosas e Itamar Moreira, para quem digo que “cabrito que é bom não berra”... nem sempre.

Agradeço à DADO, especialmente Maria José porque nunca me deixou em paz.

Agradeço a Eduardo Fontana e Manoel Afonso de Carvalho Júnior que coordenaram este mestrado, e a Valdete de Oliveira Carvalho, pequena no tamanho, mas grande na simpatia.

Agradeço a todos os professores deste mestrado, em especial do meu professor e colega de turma de graduação de 1977, Antônio Belfort, que nos fez, realmente, visualizar o campo eletro-magnético .

Agradeço aos meus colegas do mestrado, pela minha parte que ficou com eles e pela parte deles que levei comigo.

Agradeço, finalmente, a todos os meus amigos do DES da CHESF, que sempre dividiram pacientemente suas experiências e conhecimentos, e não só isto, mas seu exemplo de amor e dedicação ao serviço público universal e de qualidade.

Luiz Carlos de Alcântara Fonseca

RESUMO

Com o desenvolvimento da microeletrônica e da eletrônica de potência, as cargas dos sistemas de potência estão se tornando cada vez mais sensíveis a variações momentâneas de tensão. Essas variações, mesmo que momentâneas, podem provocar paradas ou mau funcionamento em processos industriais, causando prejuízos consideráveis. Desta forma, é natural o crescente interesse em estudar alternativas para melhorar a qualidade da energia elétrica ofertada, com a redução dos afundamentos momentâneos de tensão, seja através da adição de reforços nas redes de transmissão e distribuição, seja pela introdução de equipamentos próximos à carga desenvolvidos especificamente para mitigar afundamentos de tensão.

Esta dissertação apresenta um estudo das alternativas para a mitigação de afundamentos momentâneos de tensão, descrevendo detalhadamente o Restaurador Dinâmico de Tensão e apresentando um programa computacional para seu dimensionamento. Realiza-se também um estudo de caso para avaliar a viabilidade econômica da aplicação de um restaurador dinâmico de tensão junto a um consumidor específico.

ABSTRACT

The recent dependence of loads and system equipment on electronic controllers and energy processing technologies has created an environment in which industrial systems are becoming, more and more sensitive to voltage distortions and deviations such as voltages sags. These voltages sags, although, momentary, can cause disruption, malfunction and ultimately outages. Therefore, there is an increasing interest by the power utilities and end-users to study and develop mitigation technologies and techniques to improve the overall power quality and security of power systems. The solution may rely, on the reinforcement of the transmission and distribution grid, or the introduction of equipment specifically developed to mitigate sags, near the sensitive loads.

This work presents studies of alternatives for mitigation of voltages sags, describing, in detail, the Dynamic Voltage Restorer (DVR), and showing a computational program that performs the calculation of its ratings, for economic comparison.

This work presents also the results of a case study to evaluate the most cost-effective alternative between solutions in the transmission and distribution systems level, and a local solution using DVR.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. QUALIDADE DA ENERGIA.....	3
2.1. INTRODUÇÃO À QUALIDADE DA ENERGIA.....	3
2.2. QUANTO À CONTINUIDADE, REGIME PERMANENTE	7
2.3. QUANTO À CONFORMIDADE – FORMA DE ONDA DA TENSÃO	9
2.4. RESUMO.....	15
3. AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO	17
3.1. DEFINIÇÕES	17
3.1.1. <i>Caracterização do Afundamento Momentâneo de Tensão para um Sistema Trifásico</i> 19	
3.1.2. <i>Métodos para Contabilização dos Afundamentos Momentâneos de Tensão</i> 28	
3.2. CAUSAS DO AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO.	32
3.3. EFEITOS DO AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO.....	34
3.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA DE UM SISTEMA	37
3.5. FORMAS DE ATENUAÇÃO	42
3.5.1. <i>Soluções em nível de Transmissão e Distribuição</i>	44
3.5.2. <i>Soluções em nível de consumidor</i>	45
4. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO	48
4.1. INTRODUÇÃO	48
4.2. FILOSOFIAS DE PROJETO	52
4.3. O RDT.....	54
4.3.1. <i>O transformador elevador série</i>	56
4.3.2. <i>Conversores</i>	57
4.3.2.1. O Inversor	57
4.3.2.2. O Circuito Retificador.....	73
4.3.3. <i>O Controle / PLL</i>	74
4.3.4. <i>O filtro</i>	82
4.3.5. <i>Dimensionamento do RDT</i>	84
4.3.5.1. <i>Filosofia de Projeto do restaurador dinâmico de tensão</i>	85
5. ESTUDO DE CASO	91
5.1. DIRETRIZES E CRITÉRIOS	92

5.2.	ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO	95
5.3.	ANÁLISE TÉCNICA DAS ALTERNATIVAS.....	96
5.3.1.	<i>Análise Técnica das Alternativas Mitigadoras</i>	97
5.3.2.	<i>Perspectivas de soluções em nível de Consumidor</i>	99
5.4.	ANÁLISE ECONÔMICA DAS ALTERNATIVAS	102
5.4.1.	<i>Solução em nível de Transmissão e Distribuição</i>	102
5.4.2.	<i>Solução em nível de Consumidor</i>	107
6.	CONCLUSÕES	110
6.1.	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	111
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
8.	ANEXO 1	119
9.	ANEXO 2	125

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Resumo dos Fenômenos Associados à Qualidade da Energia.....	15
Tabela 3.1 Modelo para Tabulação dos Índices de ocorrência de Afundamento de Tensão (UNIPEDE).....	28
Tabela 3.2 Limites Definidos pela norma da África do Sul (NSR 048).....	30
Tabela 3.3 Resumo do Fenômeno Afundamento Momentâneo de Tensão	47
Tabela 4.1 Tensões na Saída de um Inversor Trifásico	65
Tabela 4.2 Projeto do RDT (DVR) Para a Indústria em Análise.....	89
Tabela 5.1 Taxa de Falhas Por 100 Km Por Ano do Sistema de Transmissão.....	93
Tabela 5.2 Taxa de Falhas Por 100 Km Por Ano do Sistema de Sub-Transmissão e Distribuição.....	94
Tabela 5.3 Distribuição Percentual do Tipo de Falta e Taxa de Falha por Nível de Tensão	94
Tabela 5.4 Alternativas de Mitigação	95
Tabela 5.5 Benefícios da utilização do RDT	101
Tabela 5.6 Comparação das soluções em nível de Transmissão / Distribuição	102
Tabela 5.7 Comparação dos Benefícios das Alternativas.....	103
Tabela 5.8 Contabilização dos Benefícios	104
Tabela 5.9 Custo das Alternativas	105
Tabela 5.10 Relação Custo/Benefício.....	106
Tabela 5.11 Escolha das Alternativas Mais Atrativas	107

Tabela 5.12 Valoração dos benefícios de equipamentos condicionadores na indústria em análise.	108
Tabela 5.13 Relação Custo/Benefício.....	108
Tabela 5.14 Relação Custo/Benefício Social por Grau de Atratividade Decrescente	109

Índice de Figuras

Figura 2.1 Classificação dos Fenômenos de Qualidade da Energia	5
Figura 2.2 Perfil de Tensão medido durante 24 horas. Ilustra as variações de tensão de longa duração.....	10
Figura 2.3 Tensão Limite de Regime Permanente (ANSI, 1995).....	11
Figura 2.4 Forma de onda senoidal típica.....	12
Figura 2.5 Formas de Onda com Conteúdo Harmônico	12
Figura 2.6 Gráfico do Valor Eficaz da Tensão em Relação ao Tempo	13
Figura 2.7 Exemplo de surto de tensão	14
Figura 3.1 Registro de Ocorrência de um afundamento momentâneo de tensão.....	18
Figura 3.2 Caracterização de um afundamento monofásico	19
Figura 3.3 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão segundo a UNIPEDE.	20
Figura 3.4 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão Segundo a Norma da África do Sul	21
Figura 3.5 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão segundo a ELETROTEK	22
Figura 3.6 Tipos de Afundamentos Desequilibrados de Tensão	24
Figura 3.7 Representação Gráfica do método de análise de afundamentos da UNIPEDE	29
Figura 3.8 Caracterização dos Afundamentos segundo norma NSR 084 (África do Sul)	30

Figura 3.9 Curva ITIC Information Technology Industry Council	31
Figura 3.10 Afundamento Causado por Árvore.....	33
Figura 3.11 Curva de Suportabilidade dos Computadores	35
Figura 3.12 Curva do controlador de velocidade ajustável (ASD) mais sensível que a curva CBEMA	36
Figura 3.13 Percentual Acumulado dos Afundamentos por Ano, por Percentual do Afundamento.....	37
Figura 3.14 Interrupções de Tensão e Afundamentos Momentâneos de Tensão por Ano, em Porcento da Tensão Nominal	38
Figura 3.15 Fluxograma de Análise de Desempenho	40
Figura 3.16 Sentido dos Custos das Soluções.....	43
Figura 4.1 Recentes Aplicações da Eletrônica de Potência	49
Figura 4.2 Funcionamento Esquemático de um RDT.....	50
Figura 4.3 Diagrama Trifilar de um RDT (DVR) com o Barramento CC Alimentado por Diodos.....	51
Figura 4.4 RDT (DVR) Com Armazenamento de Energia Através de SMES	52
Figura 4.5 RDT (DVR) sem Fonte Externa, com Armazenamento em Campo Magnético Supercondutor	53
Figura 4.6 Diagrama Esquemático de um RDT.....	55
Figura 4.7 RDT (DVR) em (a) Modo de Espera, e (b) Funcionamento	57
Figura 4.8 Circuito Inversor.....	58
Figura 4.9 Modulação de uma Onda Senoidal.....	60

Figura 4.10 Inversores Trifásico em Ponte e Semi-Ponte.....	60
Figura 4.11 Tensões Típicas de Saída do Inversor (a) Tensão de Fase, (b) Tensão de Linha (entre fases).....	61
Figura 4.12 Espectro Típico das Tensões de Fase e de Linha de um Inversor MLP (2 e 3 níveis).....	61
Figura 4.13 Espectro de sinal MLP (referência cc) com portadora de frequência variável	62
Figura 4.14 Transformador Elevador Filtro e Conversor do RDT	63
Figura 4.15 Forma de Onda Sintetizada de Tensão	64
Figura 4.16 Vetores espaciais produzidos em inversores trifásicos	66
Figura 4.17 Vetores que compõem o vetor tensão de referência V_r	67
Figura 4.18 Modelagem no SIMULINK para o Cálculo dos Ciclos de Trabalho de uma Onda Senoidal.....	69
Figura 4.19 Amostragem da Onda de Referência Senoidal.....	70
Figura 4.20 Detecção do Valor da Amostra e Alocação no Setor (Sextante).....	70
Figura 4.21 Através do Programa Combinação Linear Cálculo das Razões Cíclicas .	71
Figura 4.22 Saída do Cálculo do Sextante.....	72
Figura 4.23 Saída dos Valores das razões Cíclicas δ' e δ''	72
Figura 4.24 Esquema de oscilador bloqueado em fase	76
Figura 4.25 Detecção da Frequência da Rede pelo Oscilador Bloqueado em Fase em Radianos por Segundos (ω (rad/s) x tempo).....	77
Figura 4.26 Detecção do Cruzamento com o Zero pelo Oscilador Bloqueado em Fase	77

Figura 4.27 Tensão de Teste, V_a , e a Tensão de Teste Reproduzida, V_{aPLL} com Sinal Gerado pelo Oscilador Bloqueado em Fase.....	78
Figura 4.28 Oscilador Bloqueado em Fase - Parte 1	80
Figura 4.29 Saída V_d do Oscilador Bloqueado em Fase	81
Figura 4.30 Saída V_q do Oscilador Bloqueado em Fase	81
Figura 4.31 Controle de Tensão de Saída do filtro de um Inversor Trifásico	83
Figura 4.32 Sistema de Alimentação com um RDT	85
Figura 4.33 Diagrama Fasorial do Sistema da Figura 4.32.....	86
Figura 4.34 Diagrama Vetorial onde é Minimizada a Potência Ativa Injetada pelo RDT	87
Figura 4.35 Diagrama Vetorial onde é Minimizada a Potência Reativa Injetada pelo RDT	88
Figura 5.1 Número de Afundamentos Iguais ou Maiores que 20% (0,8 pu remanescente). Comparação dos Casos Bases do Primeiro e Segundo Anos de Estudo.....	96
Figura 5.2 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Fim do Primeiro Ano(n° médio esperado)......	97
Figura 5.3 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o fim do segundo ano. ...	98
Figura 5.4 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Primeiro Ano	98
Figura 5.5 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Segundo Ano.	99
Figura 5.6 Afundamentos por Intensidade para o Primeiro Ano.....	100
Figura 5.7 Afundamentos por Intensidade para o Segundo Ano.....	101

Abreviações

Termo	Descrição
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão (SAG)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica (Agente regulador do Brasil)
ANSI	American National Standards Institute
ASD	Adjustable Speed Drivers
CBEMA	Computer Business Equipment Manufacturers Association
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardisation
CVT	Transformadores ferroressonantes de tensão constante (Constant Voltage Transformer)
DVR	Dynamic Voltage Restorer (Restaurador Dinâmico de Tensão)
DVReg	DVReg - Dynamic Voltage Regulator
ELECTROTEK	Electrotek Concepts, Inc Consultora referência internacional em qualidade de energia
EMC	Electromagnetic Compatibility – Compatibilidade Eletromagnética
EMTDC	Programa de Transitórios Eletromagnéticos da Manitoba HVDC Research Centre Inc
EPRI	Electric Power Research Institute
GTO	Gate Turn-Off Thyristors
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers

IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
ITIC	Information Tecnology Industry Council
MLP	Modulação por Largura de Pulso (PWM)
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NSR	National Electricity Regulator (Agente regulador da África do Sul)
PLL	Phase Locked Loop (Oscilador Bloqueado em Fase)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso - MLP)
RTD	Restaurador Dinâmico de Tensão
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International Group
SMES	Super Conducting Magnetic Energy Storage (Reatores supercondutores armazenadores de energia)
SVM	Space Vector Modulation (Modulação por Vetor Espacial)
UNIPEDE	Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique
UPS	Uninterruptible Power Supply (Sistema de Energia Ininterrupta)

1. Introdução

Apesar de atualmente não existirem penalidades para as concessionárias pela ocorrência de afundamento momentâneo de tensão, ou mesmo interrupção momentânea de tensão, é muito provável, e já se está estudando a introdução destas penalizações.

É possível que também sejam definidas áreas de fornecimento de energia de alta qualidade, e, em consequência, com limitado número de afundamentos momentâneos ou interrupções momentâneas de tensão. Estas áreas, devido às suas características especiais, forneceriam energia, ou melhor, o serviço de energia, por um preço maior. Esta maior tarifa estaria associada à remuneração de equipamentos que garantissem esta melhor qualidade de energia, e mais especificamente, a uma quantidade de afundamentos momentâneos de energia menor do que o comumente fornecido.

Visando fornecer energia a este tipo de mercado diferenciado, ou mesmo, se precaver quanto a futuras penalizações por causa do número acima de um determinado limite de afundamentos momentâneos de tensão, é preciso, em alguns casos, definir esquemas para assegurar esta melhor qualidade de energia.

Nos próximos capítulos serão vistas as definições de fenômenos relacionados com a qualidade da energia, seus valores limites, suas consequências nas cargas e no sistema elétrico. Será apresentado um estudo específico de afundamento momentâneo de tensão considerando um consumidor em 13,8KV, bem como os métodos e equipamentos para redução destes afundamentos, particularmente um restaurador dinâmico de tensão (RDT - DVR).

A partir dos valores dos afundamentos e das características da carga desta indústria, será proposto o dimensionamento do RDT (DVR). De posse deste dimensionamento, pode-se comparar com outras alternativas a viabilidade econômica da aplicação desta solução.

As principais contribuições desta dissertação são:

- Revisão bibliográfica sobre afundamentos momentâneos de tensão e sobre os principais métodos de mitigação;
- Verificação da viabilidade econômica do uso de um RDT (DVR) para mitigar afundamentos de tensão em um consumidor específico, em comparação com outras alternativas de solução em nível de sistema;
- Desenvolvimento de ferramenta para o dimensionamento de um RDT (DVR).

O capítulo 2 apresenta uma explicação resumida do que é qualidade da energia, e qualidade da tensão. Neste capítulo é vista a diferenciação entre continuidade de fornecimento e conformidade da forma de onda da tensão. São apresentados os índices de continuidade regulamentados, e os fenômenos que interferem numa forma de onda perfeitamente senoidal, tal como harmônicos e cintilação (flicker), e quanto a sua regularidade, como o afundamento momentâneo de tensão.

O capítulo 3 apresenta um aprofundamento da análise do afundamento momentâneo de tensão, relativo à sua caracterização, causas, efeitos, avaliação da qualidade da energia sobre o ponto de vista do afundamento, e formas de atenuação.

O capítulo 4 apresenta detalhes esquemáticos de um RDT, onde é dividido o equipamento nas suas partes constituintes, e onde é apresentado o modo de seu dimensionamento. Com a ferramenta de dimensionamento é feito o cálculo que será usado nas comparações do próximo capítulo.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso, onde foram apresentados os resultados de um estudo de qualidade de energia sobre o ponto de vista do afundamento momentâneo de tensão, e onde é feita uma análise comparativa entre várias soluções em nível de sistema e aplicando um RDT (DVR) dimensionado conforme descrito no capítulo 4.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões, e as sugestões de continuidade.

2. Qualidade da Energia

2.1. Introdução à Qualidade da Energia

Enquanto anteriormente ao surgimento em grande escala dos controles eletrônicos nas indústrias e da eletrônica de potência o problema da qualidade da energia estava vinculado à continuidade do suprimento, atualmente estas cargas são extremamente sensíveis aos transitórios e as variações momentâneas na tensão de suprimento o que levou à mudança dos conceitos em relação à qualidade da energia conforme (IEEE, 1992), (Ramos et al., 1997) e (Bonatto et al., 2002).

De acordo com o Business Week (4/8/91) os problemas de qualidade de energia têm uma estimativa de custo, nos EEUU, da ordem de 26 bilhões de dólares por ano, e um simples desligamento pode custar 500000 dólares por minuto.

Os controladores microprocessados e os equipamentos de eletrônica de potência são sensíveis aos pequenos distúrbios e podem ser afetados pelas variações momentâneas de tensão, por mais rápidas que sejam, resultando em paradas ou mau funcionamento de todo um processo.

Um outro grande problema dos sistemas atuais, é que um só equipamento sensível de um processo pode causar a parada de todo o processo, ou seja, todo o sistema é tão sensível quanto o seu mais sensível equipamento.

Estas mudanças nas características da carga criou um mercado de equipamentos de compensação e proteção para enfrentar a grande quantidade de distúrbios na qualidade da energia, entre eles o restaurador dinâmico de tensão (RDT), cuja principal utilidade é compensar o afundamento momentâneo de tensão, deixando as tensões a níveis tais que não causem prejuízos às cargas (Hongfa et al., 2000)

Grande parte dos distúrbios vem do sistema de suprimento, enquanto outra parte tem origem dentro dos próprios consumidores. Muitos dos transitórios de chaveamento vêm das manobras dos equipamentos dentro da própria indústria. Problemas de

cabeamento e de aterramento aumentam a susceptibilidade das instalações. Equipamentos eletrônicos, tais como controladores de velocidade, causam transientes contínuos tanto quanto distorções harmônicas que podem provocar aquecimento em outras cargas da indústria bem como a possibilidade de ressonâncias e torques pulsantes nas máquinas.

Pode-se caracterizar a qualidade da energia através dos seguintes conceitos conforme (Gueiros et al., 1999):

- 1) Qualidade intrínseca do produto energia elétrica, ou conformidade, caracterizada em um sistema elétrico trifásico, pela manutenção das tensões em qualquer ponto do sistema, durante todo o tempo, perfeitamente senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes.
- 2) Disponibilidade da energia, caracterizada pela continuidade da alimentação de energia, na quantidade desejada, durante todo o tempo.
- 3) Segurança da alimentação de energia.
- 4) Qualidade do serviço, caracterizado pelo atendimento ou superação às expectativas do cliente, e de forma mais abrangente, das partes envolvidas.

Em relação à conformidade e à continuidade pode-se visualizar na Figura 2.1 os seguintes aspectos característicos dos seus efeitos:

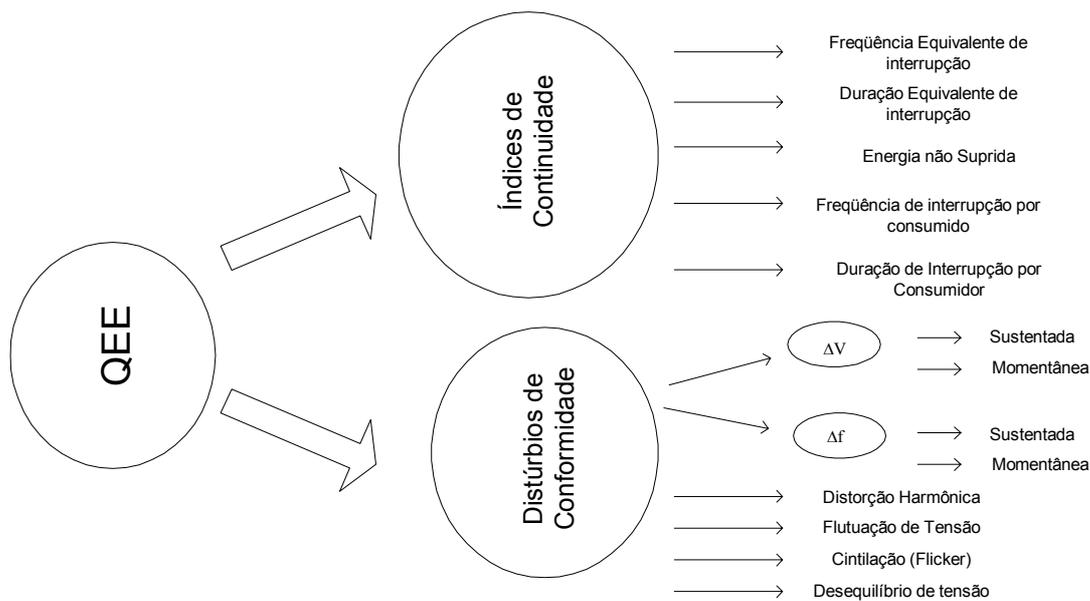


Figura 2.1 Classificação dos Fenômenos de Qualidade da Energia

Há um grande interesse em todos os países na elaboração de normas e critérios para a qualidade da energia. A IEC definiu uma categoria de normas chamada Electromagnetic Compatibility (EMC) Standards que lida com assuntos relativos à qualidade da energia. Estes assuntos dividem-se em seis categorias:

- Geral –Relativos às definições e terminologia
- Ambiente - Características do ambiente onde o equipamento será aplicado.
- Limites – Limites de emissão que definem os níveis permissíveis dos distúrbios que podem ser causados por equipamentos ligados ao sistema de potência.
- Técnicas de Testes e Ensaio – Lida com guias detalhados para equipamentos de medição e procedimentos de ensaios para assegurar coerência com outras partes das normas.
- Guia para instalação e medições - Normas relativas para aplicação de equipamentos tais como filtros compensadores, supressores de surto etc. para resolver problemas de qualidade da energia.

- Normas dos Produtos – Estas normas definem os níveis de imunidade requeridos para equipamentos de forma geral e para equipamentos particulares

As normas adotados pela comunidade europeia (CENELEC) são requisitos para equipamentos vendidos na Europa.

Nos EEUU as normas são desenvolvidas pela IEEE, ANSI, e organizações dos fabricantes de equipamentos tais como a NEMA. Têm-se também normas relativas à segurança tais como o National Electric Code. Os EEUU têm poucas normas que definam requisitos para equipamentos específicos. As normas tendem a ser mais orientativas tais como a que determinam os níveis limites de distorção harmônica na rede elétrica.

Existe um certo receio das concessionárias americanas, por exemplo, que se crie normas de qualidade que definam o nível de qualidade requerida ao sistema de suprimento. Este receio está sendo vagarosamente quebrado quando as concessionárias compreendem a necessidade de definir um nível básico de qualidade de suprimento de forma a ser possível oferecer um tipo de serviço diferenciado a alguns consumidores que requeiram um nível de desempenho maior.

É interessante neste ponto se tentar definir o que se entende, depois desta visão ampla, por qualidade de energia (QE) e qualidade da tensão (QT):

- QE é o atributo do sistema elétrico que habilita os consumidores elétricos a operar equipamentos elétricos e eletrônicos como intencionado;
- QT é a característica de uma tensão com forma de onda senoidal de magnitude e frequência adequada, livre de harmônicos ou distúrbios transitórios que possam afetar o uso de equipamentos.

Os problemas de QE estão distribuídos num largo espectro, e as classificações apresentadas a seguir, servem como base para introdução do problema que se deseja abordar neste texto.

2.2. *Quanto à Continuidade, Regime Permanente*

Esta área está relacionada à frequência e duração das interrupções permanentes de suprimento. Estas interrupções requerem algum tipo de manobra manual ou reparo para se retornar à condição normal de operação. Estas interrupções dão origem a registros de interrupções permanentes de suprimento.

Relativamente à continuidade do suprimento da energia elétrica, existem normas e penalizações, que estão associadas à seguinte nomenclatura adotada pela ANEEL (ANEEL, 2000), (Rei et al., 2001).

1. Ponto de Controle

É a instalação ou conjunto de instalações da Rede Básica que fazem fronteira com os ativos de conexão dos Agentes de Geração, de Distribuição, Consumidores Livres e demais instalações de transmissão.

2. Interrupção do Ponto de Controle

Ausência de tensão no ponto de controle por um período igual ou superior a 1 (um) minuto. Na apuração deverão ser consideradas todas as interrupções, a exceção de interrupções voluntárias ou não de um agente, desde que apenas o mesmo seja afetado.

3. DIPC - Duração da Interrupção do Ponto de Controle

O indicador DIPC é definido como o somatório das durações das interrupções do ponto de controle com duração maior ou igual a 1 (um) minuto, e será dado em minutos por período de apuração

4. FIPC - Frequência da Interrupção do Ponto de Controle

O indicador FIPC é definido como o número total de interrupções do ponto de controle com duração igual ou superior a 1 (um) minuto.

5. DMIPC - Duração Máxima da Interrupção do Ponto de Controle

O indicador DMIPC é definido como a maior duração de interrupção do Ponto de controle dentre aquelas utilizadas no cálculo do indicador DIPC e será dado em minutos por período de apuração.

6. Valores de referência (Padrões Provisórios)

Média aritmética dos valores individuais de cada ponto de controle apurados no período o Primeiro Ano-1999. Para pontos de controle com valores médios nulos foram adotados os mesmos padrões de pontos de controle com características similares.

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos, denominados de DEC e FEC.

O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica o número de horas em média que um determinado consumidor, de um conjunto considerado, fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. Já o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica quantas vezes, em média, houve interrupção numa determinada unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i).t(i)}{C} \quad \text{Eq. 2.1}$$

sendo:

DEC - duração (em horas) equivalente de interrupção por consumidor do conjunto considerado;

i - número de interrupções variando de 1 a n;

Ca (i) - número de consumidores, do conjunto considerado, atingidos nas interrupções (i);

t(i) - tempo de duração das interrupções (i), em horas;

C - número total de consumidores do conjunto considerado.

As metas de DEC e FEC a serem observadas pelas concessionárias estão definidas em Resolução específica da ANEEL, que podem ser encontradas na própria home-page. Essas metas também estão sendo publicadas mensalmente na conta de energia elétrica do consumidor.

A ANEEL implantou no ano 2000 mais três indicadores destinados a aferir a qualidade prestada diretamente ao consumidor, quais sejam: DIC, FIC e DMIC.

Os indicadores DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) indicam por quanto tempo e o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. Observar que é um valor para um consumidor individual e não uma média.

O DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo. Esse indicador passa a ser controlado a partir de 2003.

As metas para os indicadores DIC, FIC e DMIC estão publicadas na Resolução ANEEL no 024, de 27 de janeiro de 2000 e já estão sendo informadas na conta de energia elétrica do consumidor as metas do DIC e FIC.

2.3. *Quanto à conformidade – Forma de Onda da Tensão*

Em um sistema de potência as cargas estão continuamente mudando e este sistema está continuamente se ajustando a estas mudanças, ver Figura 2.2. Todas estas mudanças e ajustes resultam na variação da tensão e são referidas como variações de tensão de longo prazo. Estas podem ser subtensões ou sobretensões, dependendo das condições específicas dos circuitos. As características de regime permanente são melhor expressas através de estatísticas e perfis de tensão de longa duração. Características importantes incluem nível de tensão e desequilíbrio. Variações de longa duração são consideradas presentes quando os limites são excedidos num tempo maior que 1 minuto. Distorções harmônicas são também uma característica de tensões

de regime permanente, mas esta característica é tratada separadamente pois ela não envolve variações na componente de frequência fundamental.

A tensão do sistema de suprimento deve ficar na faixa de mais ou menos 5% em torno da tensão nominal de operação da rede. Como as cargas estão se ligando e se desligando, as tensões da rede podem sofrer variações ao longo do dia.

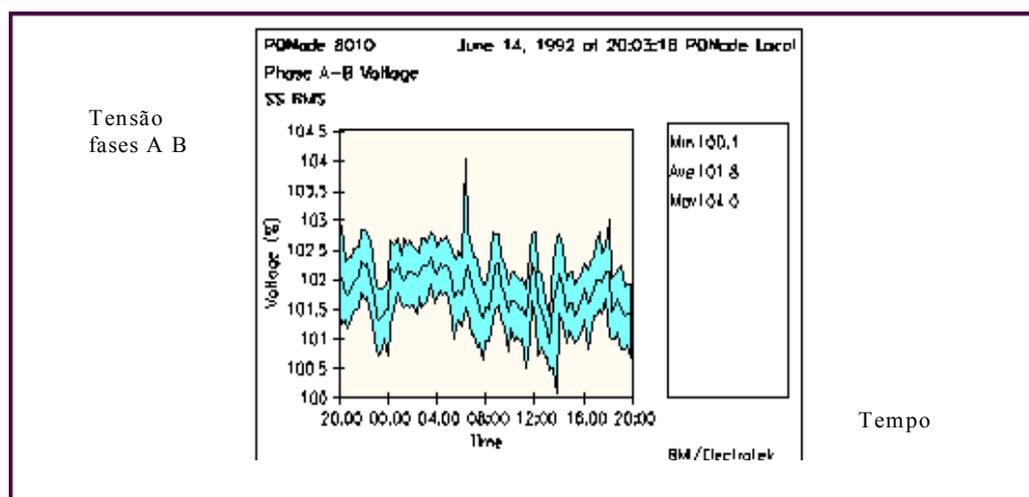


Figura 2.2 Perfil de Tensão medido durante 24 horas. Ilustra as variações de tensão de longa duração.

A maioria dos equipamentos em uso não são sensíveis a estas variações por serem entre limites estreitos. As normas de operação especificam os limites toleráveis de tensão de regime permanente, e as normas de fabricação dos equipamentos especificam que eles sejam projetados para operar com desempenho aceitável sob limites extremos de +6% a -13% em torno da tensão nominal. Dispositivos de proteção podem operar para retirar o equipamento de operação para situações fora destes limites. A Figura 2.3 ilustra os requisitos da norma americana da referência (ANSI, 1995).

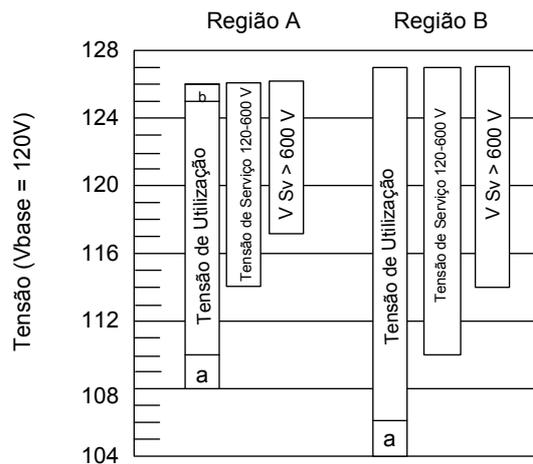


Figura 2.3 Tensão Limite de Regime Permanente (ANSI, 1995)

Duas gamas de tensão permissíveis são determinadas. Região A para condições normais de operação. Região B para condições de curta duração ou condições não usuais do sistema de suprimento. A tensão de serviço é a tensão no ponto de conexão entre a concessionária e o consumidor. A tensão de utilização é a tensão real do equipamento em uso, a que leva em conta uma queda de tensão ao longo do cabeamento da indústria. Esta norma espera que, na região A, o equipamento possa operar a uma tensão de serviço entre 95% e 105%, e, na região B, com uma tensão de utilização entre 87% e 106% para tensões nominais entre 120V e 600V, ou seja os equipamentos devem ser projetados para operar com desempenho aceitável entre +6% e -13% da tensão nominal. Para tensões acima de 600V os limites são mais reduzidos. Deve ser observado que a parte (a) não se aplica a cargas de iluminação, enquanto a parte (b) não se aplica a tensões entre 120V e 600V. A tensão de utilização se aplica a todos os níveis de tensão, ao menos da ressalva relativa à parte (a).

Também em conformidade se enquadram os problemas relativos à característica senoidal da forma de onda, ou seja, problemas relacionados com a forma senoidal da onda, ou a não similaridade em todas as fases, ver Figura 2.4. Nestes fenômenos se enquadram a surtos e impulsos, flutuação de tensão (flicker - cintilação), a distorção harmônica, o desequilíbrio, a variação de tensão de curta duração (afundamentos e elevações) além da já vista variação de tensão e frequência em regime permanente. Um detalhamento destes fenômenos será visto a seguir:

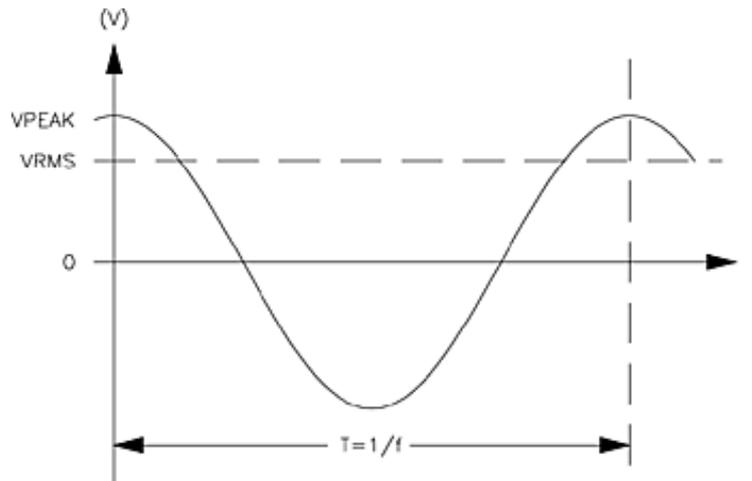


Figura 2.4 Forma de onda senoidal típica

- Harmônicos são distorções da forma de onda suprida pela concessionária e são causadas geralmente por cargas não lineares, ou seja, distorcidas que incluem retificadores, computadores, lâmpadas fluorescentes compactas, e outros equipamentos eletrônicos. Altos níveis de harmônicos elevam as perdas nas linhas de transmissão e diminuem a vida útil dos equipamentos (Martins, 2001). A Figura 2.5 mostra formas de ondas com conteúdo harmônico.

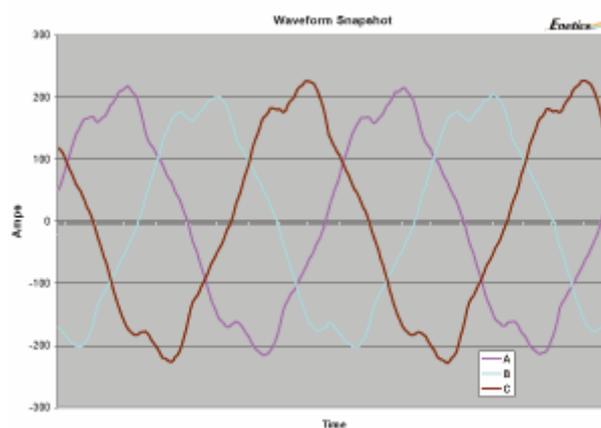


Figura 2.5 Formas de Onda com Conteúdo Harmônico

- Afundamentos e elevações de tensão, surgem durante curtos-circuitos ou partida de grandes cargas na rede. Principalmente o afundamento de tensão é o principal objetivo deste trabalho. A Figura 2.6, a seguir, mostra um gráfico do

valor eficaz da tensão em relação ao tempo, onde pode-se verificar um afundamento momentâneo de tensão.

Equipamentos complexos, com circuitos microprocessados, com funções de controle de processo, proteção e supervisão, incluindo os equipamentos especiais tais como: acionadores de motores de velocidade controlada (ASD – Adjustable Speed Drivers) e ciclo conversores, são bastante sensíveis que sob condições de afundamento de tensão não apresentam operação adequada e segura. Estes equipamentos, em geral, não suportam afundamentos superiores a 20% da tensão nominal de acordo com (Abreu et al., 1997). Este assunto será mais extensivamente analisado no capítulo 3.

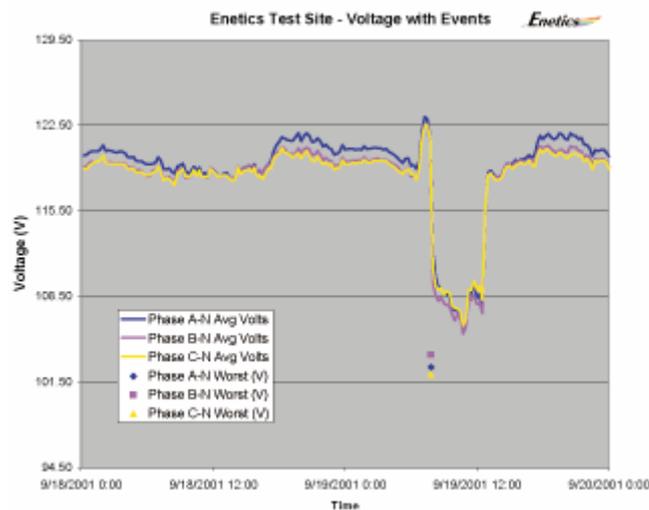


Figura 2.6 Gráfico do Valor Eficaz da Tensão em Relação ao Tempo

- Surtos (transitórios e impulsos) são elevações abruptas de tensão de curta duração (na faixa de milissegundos ou microssegundos) durante os quais a tensão pode subir a valores dezenas de vezes maiores que o normal. Surtos podem ser causados por chaveamentos de bancos de capacitores ou por descargas atmosféricas, e são suprimidos através de pára-raios.

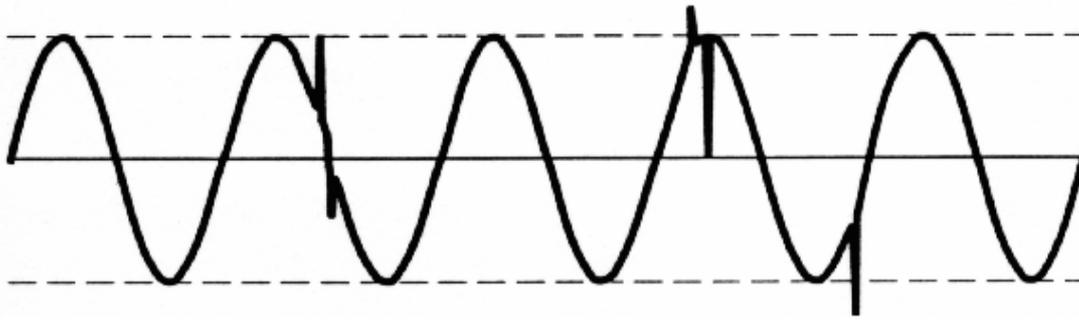


Figura 2.7 Exemplo de surto de tensão

- Cintilação (flicker) é uma sensação visual desagradável causada pelas lâmpadas cuja luminosidade ou a distribuição espectral flutua com o tempo. A principal causa são os fornos elétricos a arco. A variação da luminosidade se dá numa faixa de 10HZ, que está associada com a frequência de ressonância mecânica dos equipamentos dos fornos quando excitados pelos esforços eletromecânicos das grandes correntes que circulam por eles. Também conhecido como Flicker, definição que tanto se aplica ao fenômeno (flutuação de tensão) quanto à consequência (variação do fluxo luminoso).
- Desequilíbrio. Em relação aos desequilíbrios, a versão mais recente da norma americana inclui limites recomendados para desequilíbrio de tensão no sistema de potência. Desequilíbrio é uma quantidade em regime permanente definida como o desvio máximo da média das tensões ou correntes das três fases, dividida pela média das tensões ou correntes das três fases, expressas em por cento. Desequilíbrio também pode ser quantificado usando componentes simétricas. A razão entre a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva é usada para especificar o percentual de desequilíbrio.

A fonte primária de desequilíbrio de tensão menor que 2% são as cargas monofásicas desbalanceadas num circuito trifásico. Desequilíbrio de tensão pode também ser resultado de anomalias em bancos de capacitores, tais como queima de fusível em uma fase de um banco trifásico. Grandes desequilíbrios (maiores que 5%) podem ser resultantes de condições monofásicas.

Dentre as cargas mais sensíveis aos desequilíbrios estão os motores trifásicos. A referência (ANSI 1995) recomenda que o maior desequilíbrio medido para situação sem carga deve ser 3%. Desequilíbrios maiores podem resultar em aquecimento significativo em motores e falha, se não houver proteção de desequilíbrio.

- As perturbações de frequência são variações em torno do valor nominal causadas geralmente por problemas nos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Provocam a atuação de protetores de subfrequência e incorreto funcionamento dos motores.

2.4. *Resumo*

A Tabela 2.1 a seguir apresenta um resumo dos fenômenos associados à qualidade da energia, tanto sob o ponto de vista da continuidade quanto da conformidade da forma de onda da tensão.

Tabela 2.1 Resumo dos Fenômenos Associados à Qualidade da Energia

Categorias de fenômenos de qualidade da energia	Método de Caracterização	Causas Típicas	Exemplo de Equipamentos Mitigadores
Transitórios tipo impulso	Amplitude do pico, tempo de subida, duração	Impulso atmosférico Descarga eletrostática Chaveamentos	Para-ráios Filtros Transformadores de Isolamento
Transitórios oscilatórios	Formas de onda, amplitude do pico, componentes de frequência	Chaveamento de linhas, Chaveamento de bancos de capacitores, chaveamento de cargas	Para-ráios, filtros, transformadores de isolamento
Afundamentos e elevações	Valor eficaz x tempo, amplitude, duração	Curtos-circuitos remotos	Transformadores ferroressonantes, tecnologias de armazenamento de energia, UPS e restauradores dinâmicos de tensão

Interrupções	Duração	Abertura de linhas, manutenção	tecnologias de armazenamento de energia, UPS, geradores de reserva
Distorção harmônica	Espectro harmônico, distorção harmônica total, análises estatísticas	Cargas não lineares	Filtros, aumento do número de pulsos
Cintilação (Flicker)	Variação da amplitude da tensão, frequência do distúrbio, modulação em frequência.	Cargas intermitentes, partida de motores, fornos elétricos a arco	Compensadores estáticos, reatores saturados

Dentro deste conjunto de problemas de QE , o objetivo principal desta dissertação é investigar os problemas de QE das cargas sensíveis, relativos a interrupções momentâneas e afundamento momentâneo de tensão e os principais meios para mitigá-los.

3. Afundamento Momentâneo de Tensão

Neste capítulo serão aprofundadas as definições, causas, efeitos e possíveis medidas de mitigação dos afundamentos momentâneos de tensão.

3.1. Definições

Segundo a norma IEEE Standard 1159 (Brooks et al., 1999), os afundamentos (sags) e elevações (swells) de tensão são variações no valor rms da tensão de uma ou mais fases para 0,1 a 0,9 pu (afundamento) e 1,1 a 1,8 pu (elevação). Dependendo da duração, essas variações podem ser consideradas instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 segundos) ou temporárias (3 segundos a 1 minuto). Se a tensão cair abaixo de 0,1 pu, considera-se a ocorrência de interrupção de tensão. Na verdade, a duração do afundamento momentâneo de tensão depende geralmente das práticas da proteção dos sistemas de transmissão e distribuição, desde que os esquemas de coordenação dos relés determinam os tempos de eliminação da falta, uma vez que um curto-circuito é uma das mais prováveis causas do afundamento momentâneo de tensão. Neste texto, foi empregado o termo afundamento momentâneo de tensão para ocorrências classificadas em qualquer um dos três casos acima citados.

Partidas de grandes motores de indução, bem como outros tipos de entradas rápidas de carga, também são eventos que podem causar afundamentos. Já as fases sãs de um sistema trifásico, durante um curto monofásico, podem ficar submetidas a elevações momentâneas de tensão com durações semelhantes de 0,5 ciclo a 1 minuto.

Tipicamente, o menor tempo requerido pelos equipamentos do sistema de proteção da distribuição para detectar a corrente de falta, mandar os sinais de disparo para o disjuntor e este equipamento abrir seus contatos com a extinção do arco é da ordem de 6 a 8 ciclos (100 a 133 ms). Entretanto, durante este pequeno intervalo de tempo, a

vizinhança do sistema elétrico de potência em falta, fica submetida a um afundamento momentâneo de tensão.

O afundamento momentâneo de tensão cai na categoria de variação de tensão de curta duração, de acordo com (IEEE, 2000). Estas incluem variações na tensão de frequência fundamental que duram menos de 1 minuto. Estas variações são melhor caracterizadas pelo gráfico da tensão rms x tempo, mas é freqüentemente suficiente descrevê-las por uma amplitude de tensão e uma duração em que esta tensão está fora de limites especificados. Usualmente não é necessário ter formas de ondas detalhadas desde que a amplitude da tensão rms é o mais importante, ver Figura 3.1. Muito embora para efeito de correção destes distúrbios, é necessário ter as formas de onda nas três fases visando a compensação tanto em módulo como em fase.

Afundamentos momentâneos de tensão, como foi visto, são tipicamente causados por faltas em algum lugar do sistema. O afundamento ocorre sobre uma área significativa enquanto a falta estiver mantida na rede. Tão logo a falta seja removida pelo sistema de proteção, a tensão retorna ao normal na maior parte do sistema, exceto na linha específica ou seção da rede que estiver com defeito. A duração típica para uma falta no sistema de transmissão é de cerca de seis ciclos. Em sistemas de distribuição a falta pode ter durações mais longas, dependendo da filosofia de proteção. A amplitude da tensão durante a falta vai depender da distância da falta, do tipo da falta e das características do sistema.

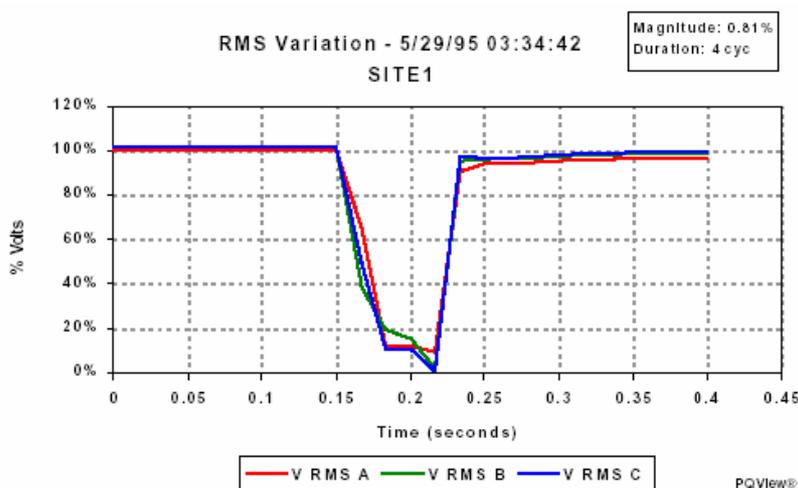


Figura 3.1 Registro de Ocorrência de um afundamento momentâneo de tensão

A caracterização do afundamento para um sistema monofásico pode ser simples de realizar. A referência (IEEE, 2000) define como o menor valor da tensão quando da ocorrência do afundamento, considerando-se como duração todo o período do afundamento, como pode ser visto na Figura 3.2. A duração do evento é o tempo durante o qual a magnitude da tensão permanece abaixo de 90% do valor eficaz da tensão de referência.

Uma vez definidos os parâmetros intensidade e duração, pode-se estabelecer uma tabulação de forma a caracterizar a qualidade da energia elétrica de um sistema a partir da quantificação e alocação nesta tabela das características e números de afundamentos de uma determinada barra.

A seguir, serão vistas algumas formas de caracterização dos afundamentos, principalmente em sistemas trifásicos, e de caracterização da qualidade da energia.

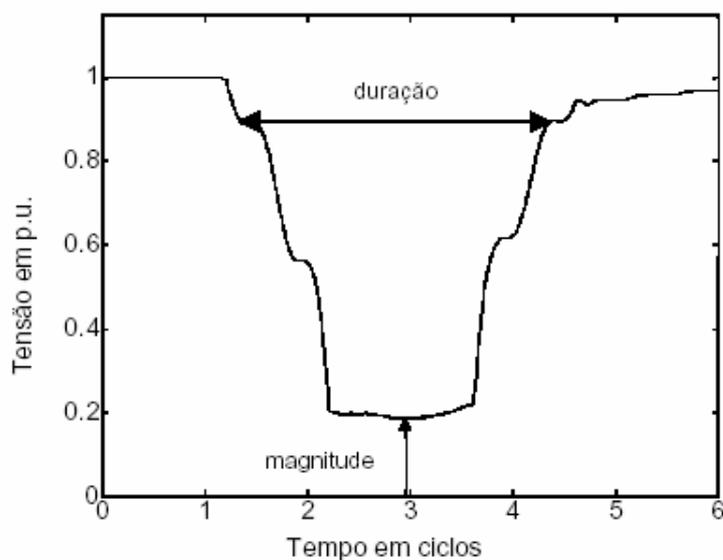


Figura 3.2 Caracterização de um afundamento monofásico

3.1.1. Caracterização do Afundamento Momentâneo de Tensão para um Sistema Trifásico

Uma ocorrência no sistema de potência, tal como uma falta, pode afetar uma, duas ou as três fases. A magnitude e a duração do afundamento de tensão resultante em cada

fase pode diferenciar-se substancialmente. No cálculo dos indicadores deve-se determinar como os eventos trifásicos são medidos.

Infelizmente, estes pontos ainda não estão padronizados e bem definidos.

Para fins de cálculo de indicadores, como será visto posteriormente, utiliza-se o procedimento chamado de agregação de fases, que consiste em atribuir um único conjunto de parâmetros (amplitude, duração, etc.) a uma ocorrência que provoque registro em mais de uma fase. Outro procedimento utilizado é a agregação temporal, que consiste em agregar eventos sucessivos ocorridos em um curto período de tempo, visando acomodar as ações de religadores automáticos, ou outras ocorrências repetidas (galho de árvore tocando repetitivamente num condutor, descargas atmosféricas), que na verdade estão relacionadas a um só evento. Assim, evita-se computar uma ocorrência inúmeras vezes pelos equipamentos de monitoração, distorcendo o real estado de qualidade do serviço.

Uma forma de caracterizar foi proposta pela UNIPED (Brooks et al., 1999), (IEEE, 2000), (ONS, 2001), onde a intensidade de um afundamento de tensão trifásico é definida como o maior desvio percentual em relação à tensão nominal, diferentemente do IEEE que a define como a menor tensão percentual remanescente ocorrida dentre as três tensões de fase.

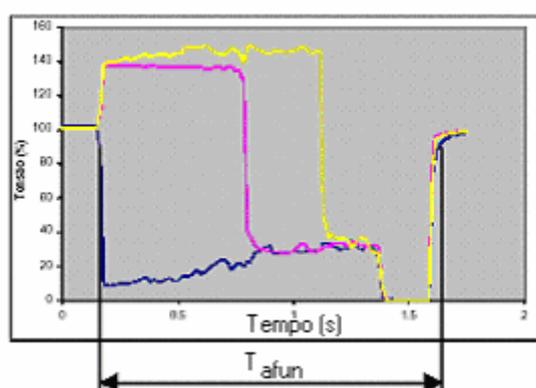


Figura 3.3 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão segundo a UNIPED.

Neste caso, os desvios percentuais são tomados em relação à tensão nominal. Por sua vez, a duração do afundamento é dada pelo período de tempo decorrido a partir do instante em que a tensão de uma das fases é igual ou inferior ao limite de 90 %, até o instante em que a tensão de nenhuma das fases seja inferior a este limite. A Figura 3.3 ilustra esta situação onde se observa um afundamento de tensão que seria de 0%, segundo a filosofia do IEEE, embora para este órgão os afundamentos sejam acima de 10% da tensão remanescente, (que corresponde a queda de 100% segundo a UNIPED - IEC) e duração correspondente a T_{afund} .

Outro método foi proposto pelo National Electricity Regulator, da África do Sul (NRS, 1998). Neste método, a intensidade de um afundamento de tensão trifásico é definida como a maior queda do valor RMS da tensão ocorrida nas três fases. Os desvios percentuais são tomados em relação a uma tensão declarada, por exemplo, tensão nominal ou tensão operativa do sistema. Por outro lado, a duração é caracterizada como sendo a duração associada à pior fase afetada em cada evento registrado, sendo dada pelo período de tempo decorrido a partir do instante em que a tensão desta pior fase é igual ou inferior ao limite de 90 %, até o instante em que a tensão desta fase seja superior a este limite. A Figura 3.4 apresenta a caracterização de um afundamento de tensão segundo esta modalidade de classificação, onde a intensidade do afundamento é dada por V_{afund} , e a duração por T_{afund} .

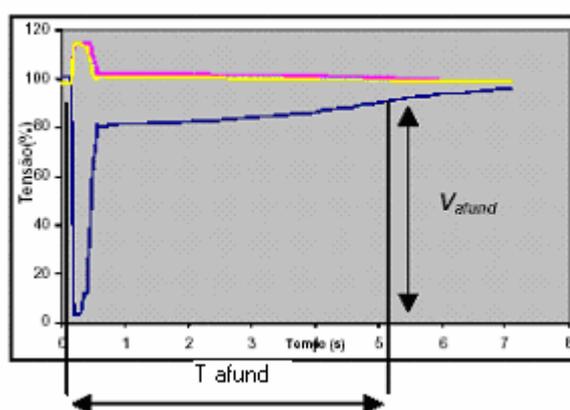


Figura 3.4 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão Segundo a Norma da África do Sul

A metodologia proposta pela ELECTROTEK (Brooks et al., 1999) enfoca tanto os afundamentos como as elevações de tensão, sendo que os principais parâmetros utilizados na caracterização destes fenômenos, consoante com os demais métodos, são a intensidade e a duração. A intensidade do afundamento de tensão é caracterizada pela máxima queda no valor eficaz de tensão ocorrida durante o evento, a qual é representada pela mínima tensão remanescente. Este método define a duração de um afundamento como sendo o período de tempo em que a tensão RMS viola um limite específico de tensão declarado para avaliar o distúrbio. Para o sistema trifásico, a intensidade e a duração de um afundamento de tensão são dados pelos valores correspondentes à fase onde se tem o maior desvio em relação à tensão especificada. A forma do afundamento de tensão em função do tempo afeta a caracterização de sua duração. Nos casos de afundamentos que não possuem forma retangular, esta metodologia atribui durações conforme limiares específicos. Logo, a um único evento pode ser atribuído mais de um valor de duração. A fim de ilustrar esta abordagem, considere-se o evento apresentado na Figura 3.5, abaixo.

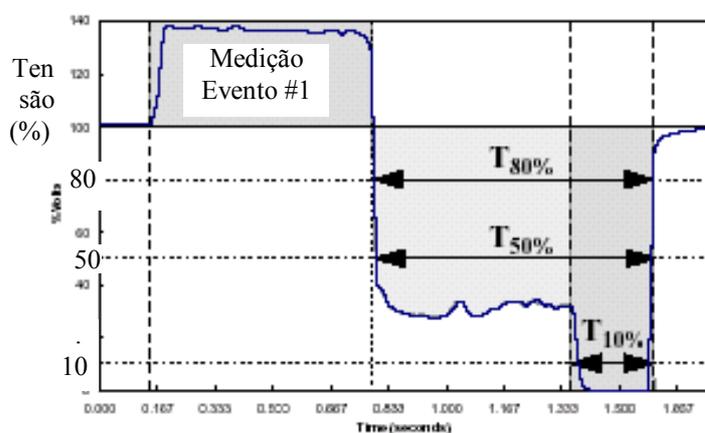


Figura 3.5 Caracterização de Afundamento Momentâneo de Tensão segundo a ELECTROTEK

Na Figura 3.5, a duração do afundamento é avaliada segundo três limiares: 80%, 50% e 10%. Os valores $T_{80\%}$, $T_{50\%}$ e $T_{10\%}$ representam as durações para os afundamentos cujos valores remanescentes de tensão são inferiores a 80%, 50% e

10%, respectivamente. Observa-se também que o valor de T80% é igual ao valor de T50%.

O método Bollen, (Bollen & Styvaktakis, 2000) ao contrário de outros métodos disponíveis, que tratam da caracterização dos afundamentos de tensão através de um valor para a magnitude e outro para a sua duração, permite que esta caracterização seja feita por meio de uma tensão complexa. Com isto, evita-se desprezar efeitos importantes como o salto do ângulo de fase e o afundamento pós-falta, o que ocorre por exemplo devido à desaceleração de motores de indução, permitindo que o comportamento dos equipamentos sensíveis, monofásicos e trifásicos, possam ser avaliados durante e depois da ocorrência do evento. Baseado na Teoria das Componentes Simétricas, o método utiliza uma classificação para os afundamentos de tensão proposta em (Bollen & Styvaktakis, 2000). Esta considera os diversos tipos de falta (trifásicas, bifásicas e monofásicas), as conexões estrela e delta utilizadas pelos diversos equipamentos elétricos e todos os tipos de conexões dos transformadores. Assume-se, também, que as impedâncias de seqüência positiva e negativa da fonte são iguais. Isto resulta em quatro tipos de afundamentos de tensão mostrados na Figura 3.6. O tipo A é devido às faltas trifásicas e os tipos B, C e D são devidos a faltas bifásicas e monofásicas. O tipo B contém componente de seqüência zero, raramente transferida para os terminais dos equipamentos, uma vez que, os equipamentos trifásicos são freqüentemente conectados em delta ou Y não aterrado.

Os equipamentos trifásicos normalmente são conectados em estrela, aterrada, ou delta e os equipamentos monofásicos de baixa tensão são conectados entre a fase e o neutro, que tem um número de afundamentos aí originados muito pequeno. Portanto, a grande maioria dos afundamentos desequilibrados são do tipo C ou D e esta distinção é suficiente, juntamente com a magnitude característica e o salto do ângulo de fase para caracterizar adequadamente o fenômeno.

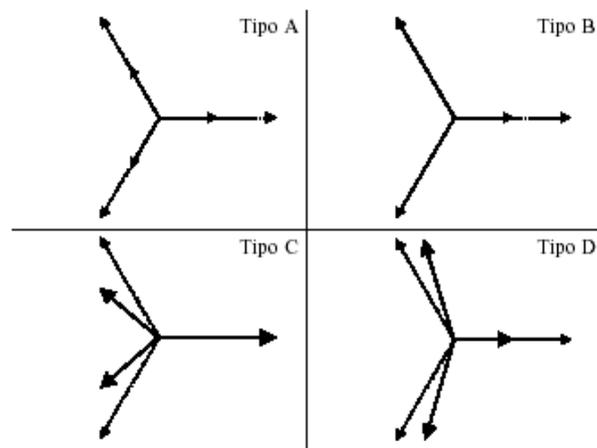


Figura 3.6 Tipos de Afundamentos Desequilibrados de Tensão

A magnitude característica e o salto do ângulo de fase são definidos como o valor absoluto e o valor do argumento do fasor, representando a tensão na menor fase para um afundamento tipo D e a tensão entre as duas menores fases para um afundamento tipo C.

Com este método o afundamento é definido através de três características: a “tensão característica”, o “fator PN” e a “tensão de seqüência zero”. O tipo do afundamento (k) é encontrado através do ângulo entre a tensão de seqüência positiva (V1) e a tensão de seqüência negativa (V2).

$$k = \text{arredondamento} \left(\frac{(\text{angulo } (V_2 - V_1)) - 30^\circ}{60} \right) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde

- k = 0: tipo Ca
- k = 1: tipo Dc
- k = 2: tipo Cb
- k = 3: tipo Da
- k = 4: tipo Cc
- k = 5: tipo Db

Foi visto acima que só é necessário caracterizar os curtos do tipo C e D. O tipo Ca caracteriza um curto do tipo C onde a fase “a” é a simétrica. Considerando-se todas as três possíveis fases simétricas, se obteria os seis subtipos dos afundamentos trifásicos desequilibrados acima.

A partir do tipo de afundamento, a tensão de seqüência negativa é recalculada para um valor correspondente para um afundamento característico:

$$\vec{V}_2' = \vec{V}_2 \cdot e^{-jk60^\circ} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde k é obtido de acordo com Eq. 3.1, e a seqüência negativa da medição. As “tensão característica” (V) e o “fator PN” (F) são obtidos de:

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \vec{V}_1 - \vec{V}_2' \\ \vec{F} &= \vec{V}_1 + \vec{V}_2' \end{aligned} \quad \text{Eq. 3.3}$$

A amplitude da tensão é definida como o valor absoluto da tensão característica.

O método magnitude-duração para a caracterização do evento leva a dois parâmetros. Várias outras propostas têm sido apresentadas para um único índice para cada evento. Embora isto leve a uma perda de informação, o método a um parâmetro simplifica a comparação entre os eventos, locais de medição e sistemas. A desvantagem geral de cada um destes métodos é que o resultado não está diretamente relacionado com o comportamento dos equipamentos sensíveis. Um aumento em um dos índices pode representar tanto uma melhoria como uma deterioração do desempenho do sistema. Existem quatro métodos para este tipo de classificação. Eles são (ONS, 2001):

- Método da “perda de tensão” - onde esta perda é definida como a integral da queda de tensão durante um evento.

$$L_V = \int \{1 - V(t)\} dt \quad \text{Eq. 3.4}$$

para a tensão em pu, ou

$$L_V = \int \left\{ 1 - \frac{V(t)}{V_{nom}} \right\} dt \quad \text{Eq. 3.5}$$

para a tensão em volts

- Método da “perda de energia” – que é definida a partir do índice L_E , dado por:

$$L_E = \int \{1 - V^2(t)\} dt \quad \text{Eq. 3.6}$$

para $v(t)$ em pu, ou

$$L_E = \int \left\{ 1 - \left[\frac{V(t)}{V_{nom}} \right]^2 \right\} dt \quad \text{Eq. 3.7}$$

para $V(t)$ em volts.

- Método proposto por (Thallam, 2000) – onde se dá uma definição da “energia do afundamento de tensão” (E_{VS}):

$$E_{VS} = \left\{ 1 - \frac{V}{V_{nom}} \right\}^2 \cdot T \quad \text{Eq. 3.8}$$

onde V é a magnitude da tensão remanescente em volts. No caso de se tratar de eventos não retangulares, propõe-se usar a equação a seguir:

$$E_{VS} = \int \left\{ 1 - \frac{V(t)}{V_{nom}} \right\}^2 dt \quad \text{Eq. 3.9}$$

- Método proposto por Heydt e Thallam (Thallam & Heidt, 2000) – de forma similar a (Thallam, 2000) considera-se indiretamente a curva de suportabilidade a afundamentos para computadores eletrônicos (curva CBEMA). Está relacionado com a perda de energia durante um afundamento. É usada a expressão:

$$W = \left\{ 1 - \frac{V}{V_{nom}} \right\}^{3,14} \cdot T \quad \text{Eq. 3.10}$$

com V sendo a magnitude e T sendo a duração do afundamento.

Para medições trifásicas, a perda de energia é somada para as três fases, conforme a expressão:

$$W = \left\{ 1 - \frac{V_a}{V_{nom}} \right\}^{3,14} \cdot T_a + \left\{ 1 - \frac{V_b}{V_{nom}} \right\}^{3,14} \cdot T_b + \left\{ 1 - \frac{V_c}{V_{nom}} \right\}^{3,14} \cdot T_c \quad \text{Eq. 3.11}$$

Para incluir eventos não retangulares uma expressão integral pode ser novamente utilizada.

3.1.2. Métodos para Contabilização dos Afundamentos Momentâneos de Tensão

Com os parâmetros definidos como no capítulo anterior, pode-se tabular os afundamentos de diversas maneiras. A partir desta tabulação, pode-se avaliar a qualidade de uma determinada barra ou sistema elétrico.

A UNIPEDE (Kagan et al., 2002) sugere a tabela a seguir. Com as definições de intensidade e duração do afundamento, a avaliação de um sistema elétrico é feito com a realização de monitoração em diversos pontos e, após um levantamento estatístico é preenchida cada célula da Tabela 3.1. Este valor representa, portanto, o valor esperado, por ano, com a probabilidade de 95% de não ser excedido, por duração e intensidade .

Tabela 3.1 Modelo para Tabulação dos Índices de ocorrência de Afundamento de Tensão (UNIPEDE)

Intensidade (%)	Duração [s]					
	$0,01 \leq t < 0,1$	$0,1 \leq t < 0,5$	$0,5 \leq t < 1$	$1 \leq t < 3$	$3 \leq t < 20$	$20 \leq t < 60$
$10 \leq v < 15$						
$15 \leq v < 30$						
$30 \leq v < 60$						
$60 \leq v < 99$						
$99 \leq v < 100$						

A tabela anterior também pode ser apresentada sob a forma gráfica, permitindo uma melhor visualização do conceito associado ao método. Esta representação está mostrada na Figura 3.7, tomando-se como base o conceito de tensão remanescente para o afundamento de tensão.

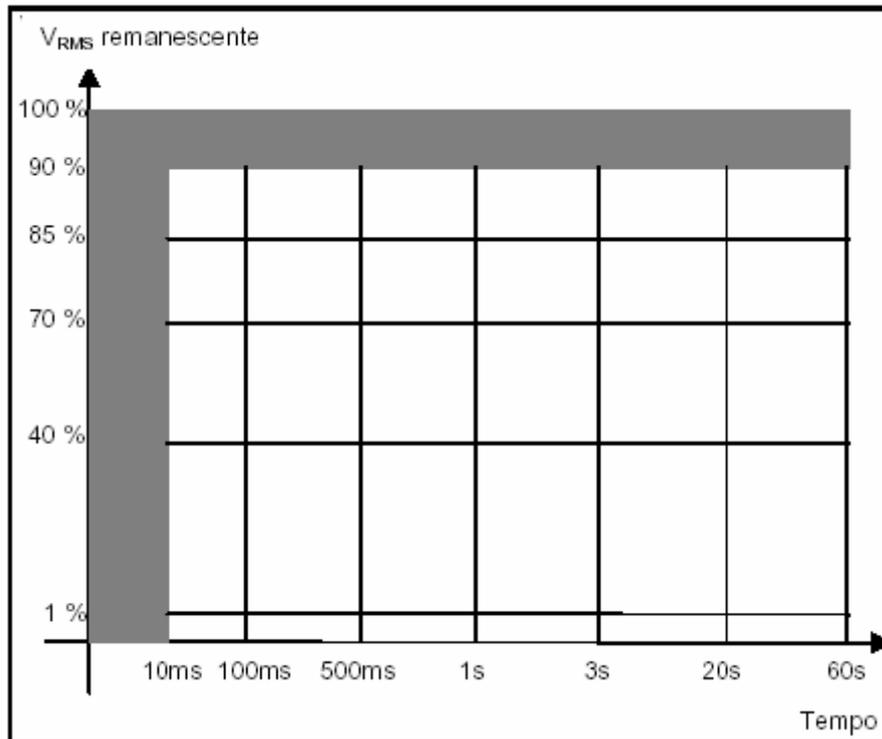


Figura 3.7 Representação Gráfica do método de análise de afundamentos da UNIPED

Existem outros métodos de quantificação dos afundamentos e, conseqüentemente, da avaliação da qualidade da energia, sendo que em alguns destes métodos já se propõem limites, tal como, um consumidor atendido em um dado nível de tensão, poderá estar sujeito a no máximo 20 afundamentos entre 20% e 100% (80% a 0% de valor remanescente) com duração entre 600 ms a 3000 ms (NRS, 1998), como é especificado na norma NSR 048 (África do Sul). Ver Figura 3.8 e Tabela 3.2. Alguns deles são:

- Método da África do Sul (NSR, 1998),
- Método do EPRI/ Electrotek (Brooks, 1999)

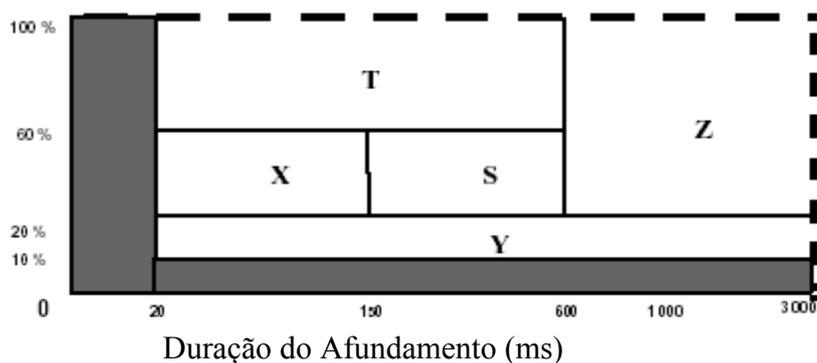


Figura 3.8 Caracterização dos Afundamentos segundo norma NSR 084 (África do Sul)

Tabela 3.2 Limites Definidos pela norma da África do Sul (NSR 048)

1	2	3	4	5	6
Faixa de Nível de Tensão da Rede	Número de afundamentos por ano				
	Categoria do afundamento				
	S	T	X	Y	Z
6,6 kV to ≤ 44 kV	30	30	100	150	20
6,6 kV to ≤ 44 kV Rural	69	54	215	314	49
> 44 kV to ≤ 132 kV	25	25	80	120	16
220 kV to ≤ 765 kV	11	6	45	88	5

Outros usam um indicador chamado SARFI_x (System Average RMS Variation Frequency Index_{voltage}) dado pela Eq. 3.12:

$$SARFI_x = \frac{\sum N_C}{N_T}$$

Eq. 3.12

Onde:

x – referência relacionada com o valor da tensão nominal, com valores de 90%, 80%, 70%, 50% e 10% (valor remanescente)

N_C – número de consumidores afetados por afundamentos de tensão, com intensidade de valor remanescente abaixo de x .

N_T – número de consumidores supridos por região a ser avaliada.

- Outros índices similares ao $SARFI_x$, mas onde se considera a curva de suportabilidade do equipamento e é representado na curva do plano magnitude x duração dos afundamentos. Dentre estas curvas, as mais conhecidas são as curvas CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association), ITIC (Information Technology Industry Council) e SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International Group).

Desta forma, associado a cada uma das curvas pode ser obtido um índice SARFI correspondente. Estes são denominados de SARFICBEMA, SARFIITIC e SARFISEMI.

Por exemplo, o SARFIITIC para afundamentos de tensão corresponde à contagem do número de eventos na região abaixo da envoltória inferior da curva ITIC, conforme pode ser visto na Figura 3.9.

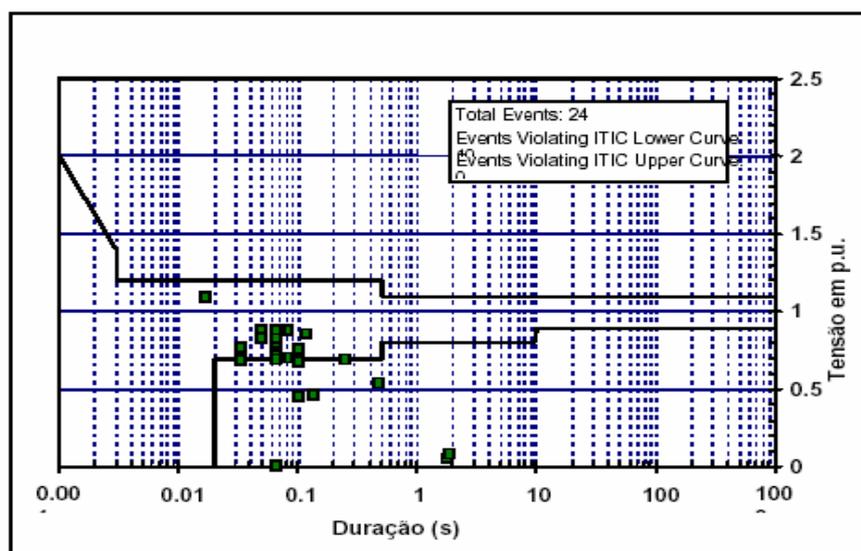


Figura 3.9 Curva ITIC Information Technology Industry Council

3.2. *Causas do Afundamento Momentâneo de Tensão.*

A principal causa do afundamento momentâneo de tensão são os curtos-circuitos na rede elétrica. As principais causas de curtos-circuitos são:

- Raios
- Árvores
- Queimadas
- Acidentes de Carros
- Falhas nos equipamentos

1. Raios

Descargas atmosféricas são a maior causa dos curtos que ocorrem nos sistemas de transmissão de alta tensão. O projeto de uma linha, principalmente a geometria da cabeça da torre, é feito de modo a minimizar os efeitos das descargas atmosféricas. Entretanto, nunca pode-se conseguir uma linha completamente blindada. Um valor típico de número de saídas por ano devido a surtos atmosféricos é da ordem de 0,9 a 1,4 desligamentos/100km/ano (Fonseca, 1999) e (Bichels, 1997). Quando uma descarga causa um curto, o afundamento chega a ser de 50% da tensão nominal, e pode durar de 4 a 7 ciclos. Um afundamento desta ordem pode causar a saída de todas as cargas da proximidade. Felizmente na maior parte do Nordeste o índice ceráunico é baixo.

2. Árvores

Ventos fortes, e a inexistência de uma política permanente de poda, pode fazer com que galhos de árvores toquem nas linhas energizadas causando o curto.

A Figura 3.10 ilustra o que acontece quando uma grande árvore toca uma linha de transmissão resultando em afundamentos para os consumidores A e B. Estes consumidores estão localizados próximo ao curto, apesar de que são afetados

diferentemente por causa do sistema de proteção. Assim que a tensão afunda para o consumidor A, as lâmpadas têm a suas intensidades luminosas diminuídas, mas rapidamente voltam ao normal. O sistema de proteção (relogador), retira de operação o trecho em que ocorreu o curto, causando uma interrupção do fornecimento para o consumidor B.

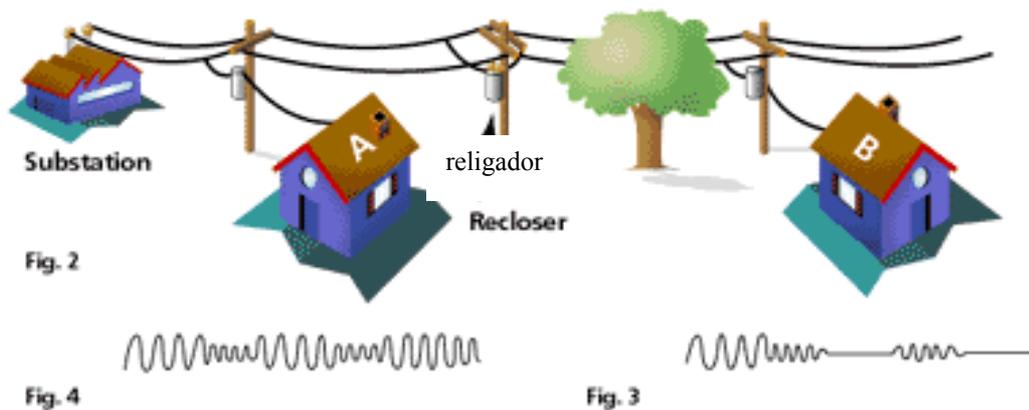


Figura 3.10 Afundamento Causado por Árvore

3. Queimadas

A prática da queimada sob as linhas de transmissão, normalmente para o corte da cana, é uma das maiores causas de curtos na região Nordeste.

4. Acidentes de Carro

A colisão de um carro ou caminhão com uma torre ou um poste de distribuição, pode causar a queda de uma fase ou de toda a linha. O curto-circuito resultante pode levar a interrupções em alguns consumidores ou afundamentos, com todas as suas conseqüências, em outros.

5. Falhas de Equipamentos

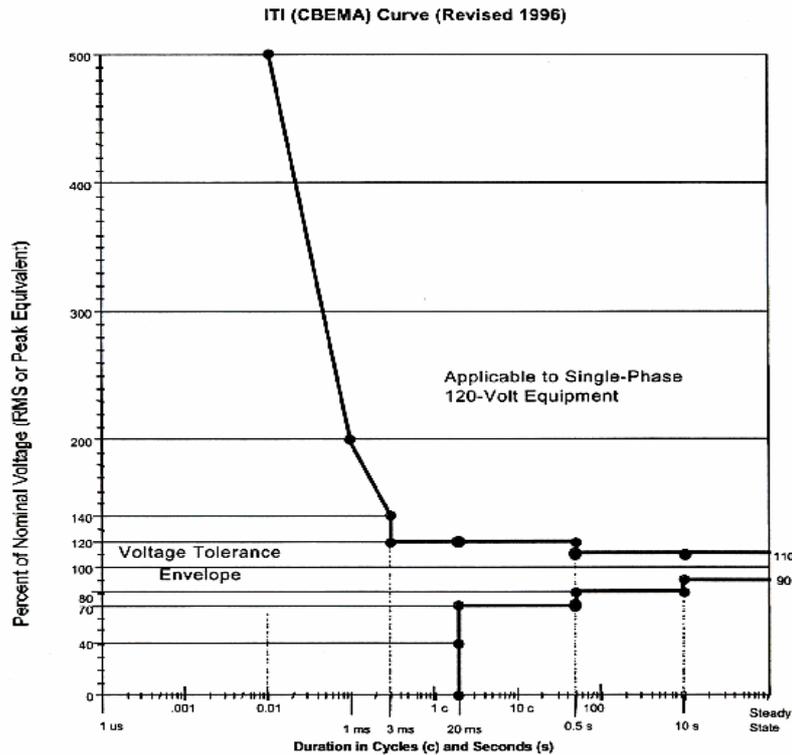
Todos os equipamentos do sistema elétrico tem um tempo de vida útil, e devem ser trocados ao fim. Entretanto, mesmo dentro da vida útil, falhas podem ocorrer, apesar de que o percentual de falhas devido a equipamentos é de pequena monta.

3.3. *Efeitos do Afundamento momentâneo de Tensão*

O afundamento momentâneo de tensão é a variação mais importante da qualidade da energia que afeta muitos tipos de consumidores industriais. O processo industrial tem se tornado mais automatizado, e os equipamentos têm se tornado cada vez mais sensíveis a estas subtensões momentâneas. Se apenas um equipamento do processo é afetado pelo afundamento, todo o processo pode ser interrompido. Deve-se ressaltar que o elemento mais fraco, num sistema industrial, em relação ao afundamento momentâneo de tensão, são os sistemas de controle, e são eles que causam a retirada de operação de todo o processo.

Assim como para caracterizar os afundamentos de tensão, amplitudes e durações são úteis para descrever a sensibilidade dos equipamentos. A CBEMA (Computer and Business Electronics Manufacturers Association) foi a primeira entidade a usar este conceito para descrever a sensibilidade dos equipamentos. Eles propuseram a curva CBEMA, que se tornou uma referência para descrever a sensibilidade do equipamento. Esta curva é reproduzida na norma IEEE Standard 446 (The Orange Book).

Pode-se usar esta curva de tolerância para equipamentos eletrônicos monofásicos de 120V, tais como computadores pessoais, equipamentos de fax, copiadoras e outros equipamentos eletrônicos, assim como todos os equipamentos tipo controladores lógicos programáveis e acionadores eletrônicos de máquinas, das indústrias. Esta curva deveria ser feita por equipamento, mas é um ponto de partida para se avaliar a susceptibilidade dos equipamentos eletrônicos quando a curva não é conhecida. Poucos fabricantes fornecem uma curva de susceptibilidade para seus equipamentos.



Published by:

Information Technology Industry Council (ITI)
1250 Eye Street NW, Suite 200, Washington DC 20005
<http://www.itic.org>

Figura 3.11 Curva de Suportabilidade dos Computadores

A curva descreve a amplitude da tensão como um percentual da tensão nominal, versus a duração do evento. O lado direito da curva mostra que o limite em regime permanente é mais ou menos 10 %. Isto significa, por exemplo, que a maioria dos equipamentos eletrônicos podem operar corretamente mesmo se a amplitude da tensão estiver entre 108V e 132V, obviamente para um sistema de distribuição de 120V.

Outra região importante deste gráfico é a duração entre 20ms e 0,5s. A tensão pode baixar até 70% da tensão nominal durante até 0,5s sem interferir com a operação deste equipamento, por exemplo. A maioria dos afundamentos das distribuidoras são de 70% (tensão remanescente) da tensão nominal e duram menos de 30 ciclos. Portanto, a maioria dos afundamentos da distribuição não resulta em mal funcionamento dos equipamentos eletrônicos ou em “reboot” de computadores. Se o consumidor estiver localizado próximo da ocorrência do curto, o afundamento de tensão pode ser mais

severo do que o de 70%, ou pode haver uma interrupção completa da alimentação. Infelizmente, os equipamentos nem sempre se comportam de acordo com a curva CBEMA. Alguns equipamentos são menos sensíveis e alguns equipamentos, como o controlador de velocidade ajustável da Figura 3.12 (Mueller & McGranaghan, 1994) é mais sensível. Um grupo de trabalho do IEEE (IEEE P1346) está atualmente trabalhando, nos EEUU, para estabelecer guias para compatibilidade dos equipamentos dos processos industriais.

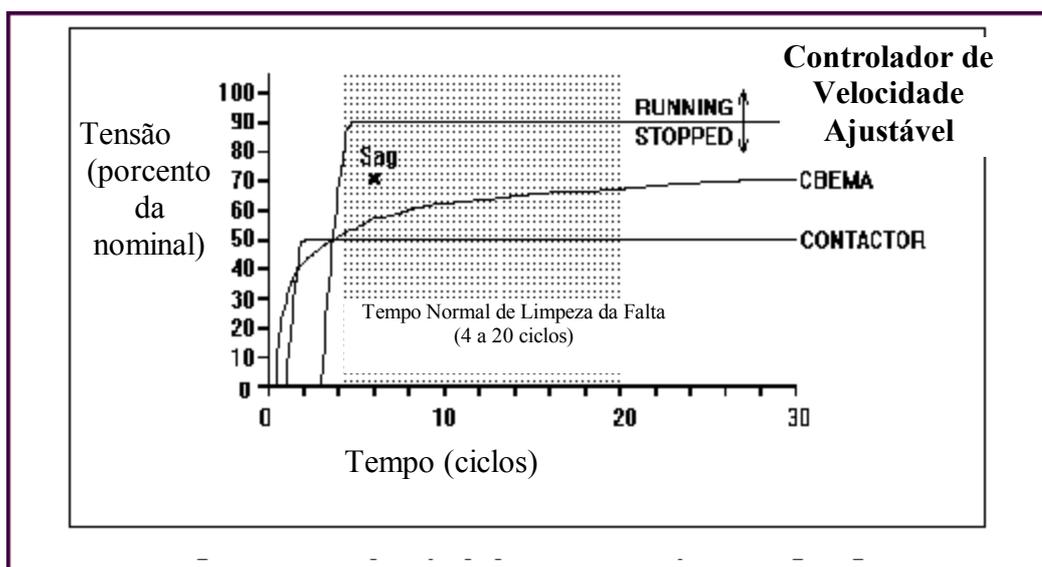


Figura 3.12 Curva do controlador de velocidade ajustável (ASD) mais sensível que a curva CBEMA

Quando o afundamento é superior à sensibilidade do equipamento, podem ocorrer problemas tais como

- Perda de memória e erros de dados
- Diminuição ou aumento da luminosidade das lâmpadas
- Oscilações nas telas dos monitores de vídeo
- Desligamento ou falha de equipamentos ou de todo o sistema industrial
- Sobreaquecimento dos sistemas elétricos de distribuição

3.4. Avaliação da qualidade de energia de um sistema

Os usuários finais podem avaliar o retorno econômico da aplicação de equipamentos compensadores se eles tiverem uma descrição do desempenho do sistema quando de afundamento momentâneo de tensão na barra do consumidor em análise.

Um gráfico como o da Figura 3.13 pode ser usado em conjunto com a sensibilidade do equipamento para estimar o número de vezes que o processo será interrompido e os seus custos associados. Não existem atualmente normas descrevendo como fornecer esta informação aos consumidores.

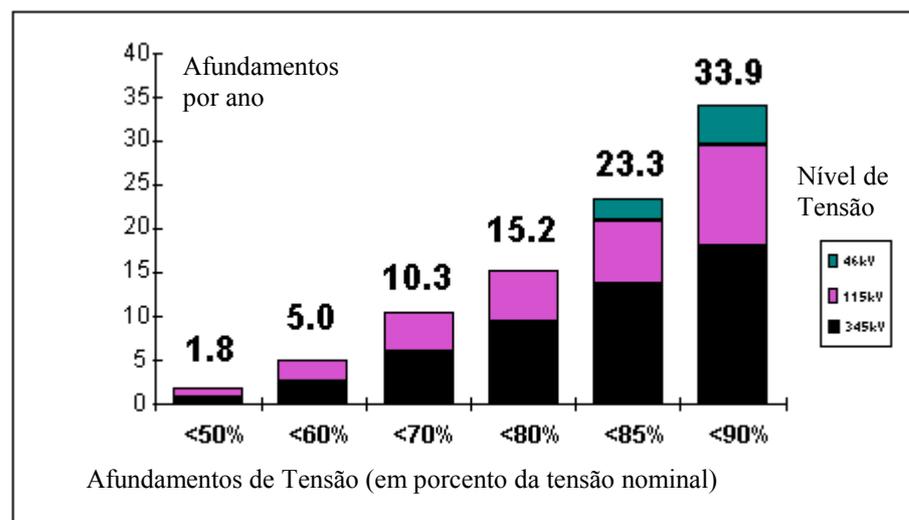


Figura 3.13 Percentual Acumulado dos Afundamentos por Ano, por Percentual do Afundamento

Qual o número esperado de afundamentos momentâneos de tensão por ano ? Este número modifica de ano para ano e é dependente de vários fatores que são específicos à localização do consumidor (índice cerâmico, somatório dos comprimentos dos alimentadores, manutenção dos alimentadores, poda de árvores próxima aos alimentadores). Entretanto, é possível desenvolver alguns números médios que dêem um referencial para comparação.

Um projeto do EPRI (Electric Power Research Institute dos EEUU) caracterizou o desempenho médio em sistemas de distribuição ao redor dos EEUU. O resultado representa, como o mostrado na Figura 3.14, um ano de monitoração em 24 concessionárias diferentes como registrado num documento técnico apresentado na

conferência PQA 94 em Amsterdã (SABIN, 1994). As barras representam o número médio de eventos, por mês, cujo valor residual de tensão (em % da nominal) está na faixa relacionada no eixo das abscissas, enquanto a curva (cujo valor está na ordenada da direita da curva) representa a probabilidade acumulada que um dado evento seja menor que a tensão mostrada no eixo das abscissas.

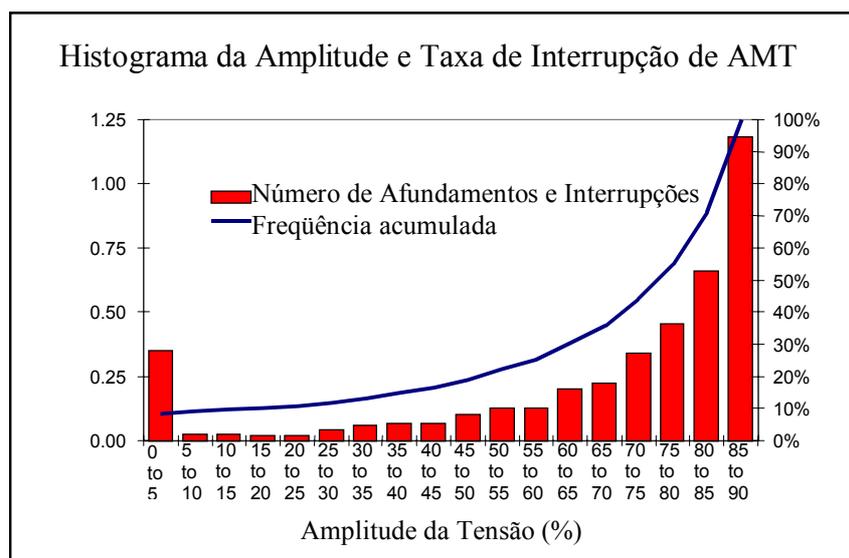


Figura 3.14 Interrupções de Tensão e Afundamentos Momentâneos de Tensão por Ano, em Porcento da Tensão Nominal

O resultado apresentado nesta figura é muito importante pois, ele começa a definir uma linha básica da qualidade da energia que pode se esperar em um ponto de um alimentador típico, bem como para se avaliar as perdas e contabilizar o retorno de investimentos na diminuição dos índices de interrupções.

A determinação do desempenho do sistema para os afundamentos momentâneos de tensão, bem como outros problemas de qualidade associados, envolve uma análise sob condições de falta, considerando-se a atuação da proteção e as condições pós-falta, para um sistema de potência suprindo um determinado consumidor.

Assim, faltas em uma grande área do sistema de potência podem afetar a operação de um consumidor com equipamentos sensíveis. Essas faltas podem ocorrer nos sistemas

de transmissão e distribuição. Para a maioria dos consumidores, ambas as condições devem ser estudadas.

Dessa forma, a primeira tarefa é estimar a expectativa de ocorrência de afundamentos momentâneos de tensão, interrupções momentâneas e elevações momentâneas de tensão para um determinado consumidor. A área do sistema de transmissão onde a ocorrência de faltas provoca afundamentos momentâneos de tensão abaixo de um determinado valor na barra de suprimento de um consumidor é denominada de Área de Vulnerabilidade (Dugan et al., 1996). Se um determinado equipamento do consumidor é sensível a afundamentos de tensão abaixo deste nível, a ocorrência de faltas em toda a Área de Vulnerabilidade pode provocar a saída deste equipamento. A análise da expectativa de ocorrência de faltas por ano nesta área de vulnerabilidade, definirá, por exemplo, o número esperado de afundamentos momentâneos de tensão por ano, abaixo de um determinado valor especificado.

Finalmente, métodos para melhorar o desempenho podem ser avaliados em diferentes níveis do sistema, considerando-se a sua expansão.

Por exemplo, o procedimento para análise de afundamentos momentâneos de tensão, pode ser resumido da seguinte forma, de acordo com a Figura 3.15 :

FLUXOGRAMA DE ANÁLISE DE
DESEMPENHO
DE AFUNDAMENTOS MOMENTÂNEOS DE TENSÃO PARA UM CONSUMIDOR

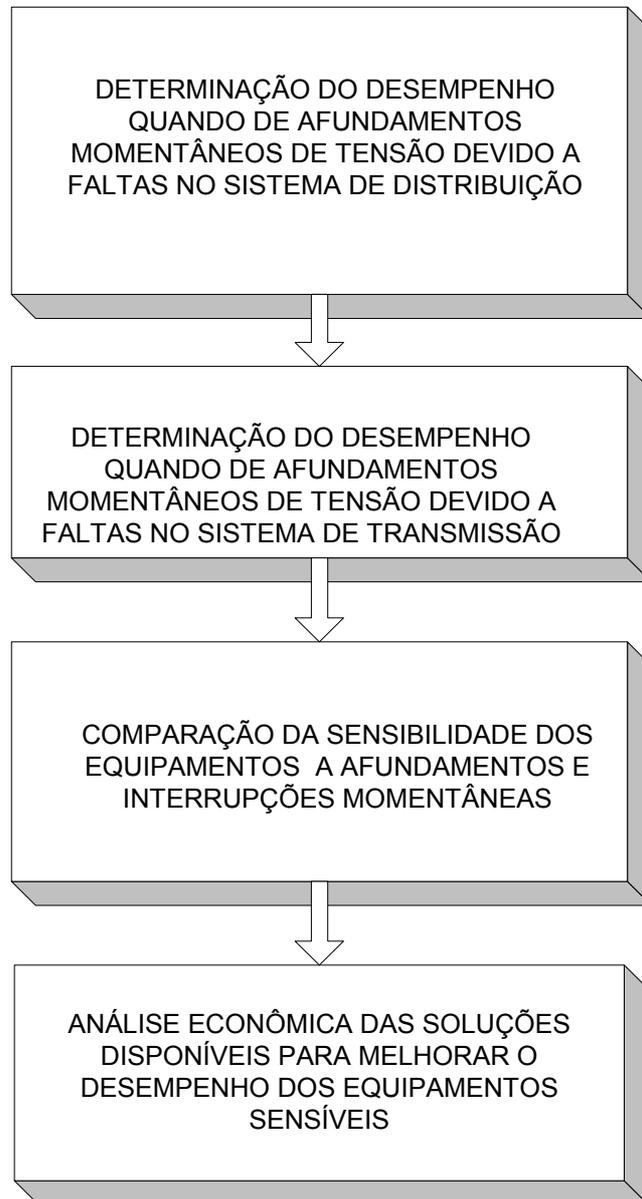


Figura 3.15 Fluxograma de Análise de Desempenho

A avaliação da qualidade de energia para um sistema de transmissão deve ser feita sem a consideração da localização do consumidor final. Para empresas de distribuição supridas em média tensão (< 138 kV), o desempenho do sistema de transmissão

corresponde ao número esperado de afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas devido a faltas no sistema de transmissão . Isto é medido, com base no comportamento da tensão da subestação de suprimento.

Um procedimento padrão pode ser usado para calcular a expectativa de desempenho, em termos de número esperado por ano, por exemplo, de afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas. O resultado do cálculo é o desempenho para afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas em uma selecionada barra do sistema de transmissão. Este procedimento inclui :

1. Construir uma tabela com o desempenho histórico e esperado para cada linha de transmissão em termos de números esperados de faltas por ano para, pelo menos, faltas monofásicas e trifásicas.
2. Realizar uma análise de curto circuito para determinar a área de vulnerabilidade para diferentes valores de afundamentos momentâneos especificados. Isto fornece o número total de quilômetros de circuitos que podem resultar em subtensões momentâneas abaixo do valor especificado. Esta análise deve ser realizada para, pelo menos, faltas monofásicas e trifásicas.
3. Converter a área de vulnerabilidade em um número esperado de eventos por ano ou por mês, em uma especificada localização. Isto é feito usando a área de vulnerabilidade e o desempenho esperado para faltas monofásicas e trifásicas nessa área.
4. Realizar os cálculos acima para diferentes severidades de afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas. O resultado pode ser apresentado sob a forma de histograma para ser utilizado por concessionárias e consumidores.

Na comparação técnica das alternativas de mitigação deve-se proceder uma análise para quantificar, em cada alternativa, os incrementos de qualidade que cada obra possa agregar .

Para consumidores que são supridos através do sistema de distribuição, o desempenho do sistema para afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas devido a eventos no sistema de distribuição deve ser calculado de forma similar. Faltas em circuitos paralelos e circuitos protegidos por fusíveis, normalmente resultam em

afundamentos momentâneos, enquanto faltas no alimentador do consumidor resultam, pelo menos, em interrupções momentâneas.

O desempenho total é a composição do desempenho devido ao sistema de transmissão e ao desempenho do sistema de distribuição. O histograma do desempenho deve separar a localização da falta, podendo-se distinguir entre as contribuições do sistema de transmissão e de distribuição.

3.5. *Formas de Atenuação*

A interrupção de um processo industrial de um consumidor pode significar um substancial custo de produção. Uma avaliação adequada de alternativas para melhorar as instalações do consumidor, o sistema de distribuição e transmissão requer uma comparação de custos versus benefícios.

Soluções podem ser implementadas em diferentes níveis do sistema para um consumidor que possua um processo sensível a afundamentos momentâneos e interrupções momentâneas. As alternativas seriam: proteger individualmente os equipamentos sensíveis, proteger um conjunto de equipamentos sensíveis ou adotar soluções no sistema de distribuição e transmissão para melhorar o desempenho.

As alternativas mais econômicas são geralmente aquelas mais próximas dos equipamentos sensíveis ou mesmo internas ao projeto do próprio equipamento (Dugan et al., 1996). O sentido dos custos das soluções pode ser apresentado na figura a seguir:

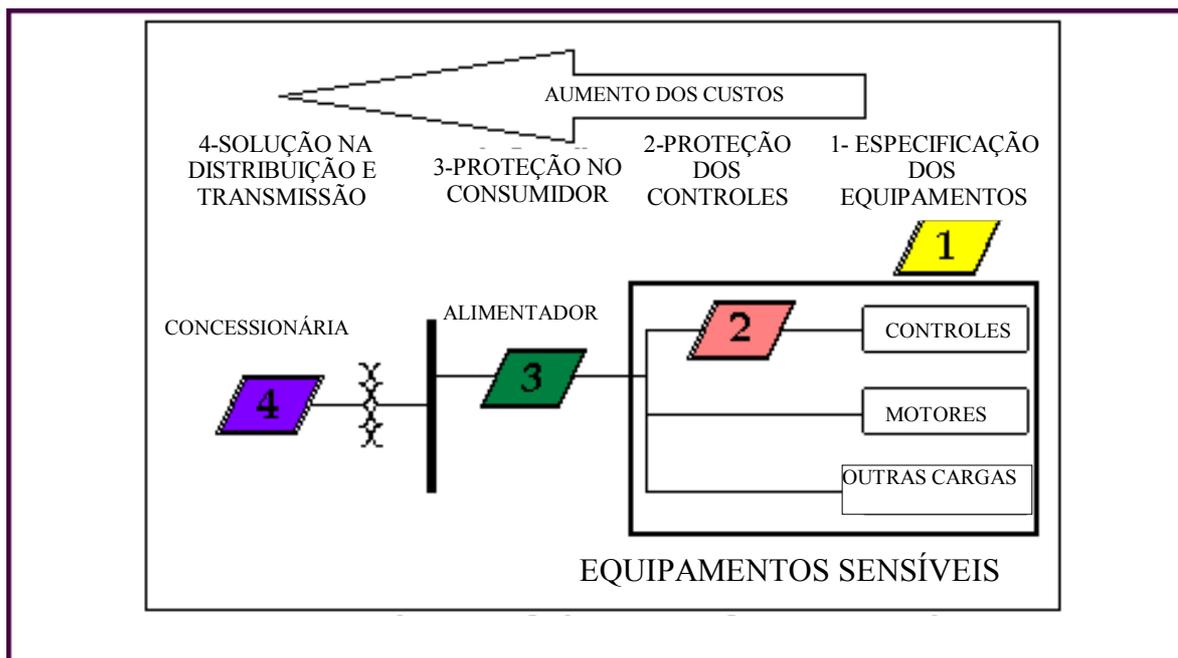


Figura 3.16 Sentido dos Custos das Soluções

Os aspectos a serem considerados nos estudos de soluções mitigadoras englobam, ao menos, as seguintes considerações:

1. A evolução dos sistemas de transmissão e distribuição previstos nos programas de obras.
2. Redução da intensidade das subtensões momentâneas via compensador síncrono, estático ou usinas térmicas.
3. Redução da intensidade das subtensões momentâneas por limitação das correntes de defeito.
4. Soluções mitigadoras via equipamentos condicionadores em nível de consumidor e sistemas de distribuição e transmissão.
5. Observar, entretanto, que caso haja mais de um consumidor sensível, uma solução na alta tensão pode ser mais econômica.

A avaliação é baseada nas medições a serem efetuadas nas subestações dos regionais e em consumidores industriais com cargas sensíveis, de forma que se possa quantificar os problemas de afundamentos momentâneos de tensão, associados à operação atual do sistema de transmissão e distribuição.

As medições devem associar os problemas de QE aos eventos que os causaram, de forma que se possa conhecer as causas dos distúrbios.

As medições a serem realizadas nos consumidores industriais devem quantificar a sensibilidade do processo associado a um particular consumidor industrial, de forma que se possa determinar que eventos nos sistemas de transmissão e distribuição resultarão na interrupção de seu processo industrial.

Várias ações podem ser realizadas pelas empresas de transmissão, distribuição e consumidor para reduzir o número e a severidade dos afundamentos de tensão, bem como, aumentar a suportabilidade dos equipamentos sensíveis a afundamentos de tensão.

3.5.1. Soluções em nível de Transmissão e Distribuição

As empresas de transmissão e distribuição estão cientes dos benefícios advindos da adoção de uma política adequada que previna a ocorrência de faltas. Estas atividades não somente melhoram a satisfação do consumidor, mas evitam os custos de possíveis danos aos equipamentos do sistema de transmissão e distribuição.

Duas opções básicas existem para redução do número e da severidade das faltas em seus sistemas:

1. Prevenir a ocorrência de faltas (atuar nas causas)
2. Reduzir os efeitos e a severidade das faltas (atuar nos efeitos)

A prevenção é função da manutenção e inclui atividades e procedimentos como por exemplo:

- Corte de árvores
- Lavagem de isoladores
- Utilizar cabos para - raios
- Utilizar para - raios de linhas

- Prevenir queimadas sob as linhas de transmissão
- Reduzir resistência de pé de torre
- Manter registro de ocorrências em linhas, identificando as freqüentemente afetadas
- Resolver os problemas de falha de um determinado componente ou equipamento.

Baseado nos procedimentos de prevenção de faltas pode-se reduzir o número de faltas. Entretanto, não é possível eliminar completamente as ocorrências de faltas no sistema.

A outra possibilidade consiste em reduzir os efeitos das faltas , em termos de duração e severidade, adotando os seguintes procedimentos :

1. Redução dos tempos de atuação da proteção;
2. Limitação das correntes de curto – circuito;
3. Prover alimentadores paralelos e redundantes para alimentar cargas sensíveis.

As alternativas acima propiciam uma redução na duração e severidade das faltas, reduzindo assim a consequência sobre as cargas sensíveis.

3.5.2. Soluções em nível de consumidor

As soluções em nível de consumidor geralmente envolvem a utilização de equipamentos condicionadores para cargas sensíveis. A utilização adequada destes equipamentos condicionadores requer um entendimento das capacidades do equipamento. Também é importante a definição dos requisitos das cargas sensíveis ou críticas a serem protegidas. Geralmente, devido aos custos elevados dos equipamentos condicionadores, estes são dedicados apenas às cargas sensíveis ou críticas.

Dentre as soluções disponíveis em nível de consumidor que podem prover uma mitigação dos afundamentos momentâneos de tensão, pode-se citar :

- On Line e Stand By UPS (Uninterruptible Power Supply). A potência destes equipamentos deve ser a mesma das cargas a serem compensadas.
- Conjuntos motor-gerador
- Transformadores ferroressonantes de tensão constante, também chamado transformador de tensão constante (CVTs), que são basicamente transformadores 1:1 que trabalham totalmente excitados, e que, portanto, a tensão secundária não é afetada por variações na tensão de entrada.
- Reatores supercondutores armazenadores de energia (SMES), ou armazenar em flywheels ou em capacitores e agora também supercapacitores.
- RegDT – regulador dinâmico de tensão (DVReg - Dynamic Voltage Regulator) , que é um transformador com a facilidade de variar a relação de transformação por meio de tiristores, em outras palavras um transformador com comutação em carga extremamente rápida.
- RDT (DVR) - restauradores dinâmicos de tensão (DVR - Dynamic Voltage Restorer).
- Chave de transferência estática

O uso destes equipamentos requer estudos específicos e rearranjo do sistema elétrico do consumidor. Tais estudos justificam-se em função dos benefícios econômicos que venham resultar para o consumidor. É, portanto, necessário que estes estudos contemplem a viabilidade econômico-financeira dos investimentos em equipamentos condicionadores.

Outro aspecto a ser considerado para consumidores que utilizam equipamentos sensíveis é aplicável na fase de aquisição destes equipamentos. Assim, na compra de equipamentos deve-se requerer a necessária capacidade de suportar afundamentos momentâneos de tensão. De uma forma geral, os fabricantes destes equipamentos estão cientes destes problemas e da necessidade de se prover a necessária capacidade de suportar afundamentos de tensão. Em alguns setores, os fabricantes estão

oferecendo novos modelos que, com poucas modificações, permitem uma extensão da capacidade de suportar afundamentos de tensão.

A concepção de projeto de equipamentos industriais com capacidade adicional de suportar afundamentos de tensão tem se tornado cada vez mais uma prática de projeto considerada por todos os fabricantes.

Infelizmente, até que os equipamentos apresentem a suportabilidade desejada, resta o uso de equipamentos condicionadores.

O resumo deste fenômeno é mostrado na Tabela 3.3 abaixo:

Tabela 3.3 Resumo do Fenômeno Afundamento Momentâneo de Tensão

Descrição	Diminuição da amplitude da tensão
duração	Milissegundos a alguns poucos segundos
Causas	Partidas de grandes cargas (motores) Curtos-circuitos Circuitos mal dimensionados
Efeitos	Perda das memórias dos equipamentos eletrônicos Diminuição do fluxo luminoso das lâmpadas Oscilações nos monitores de vídeo Saída de operação de equipamentos ou sistemas
Possíveis soluções	Deslocar os equipamentos sensíveis para circuitos diferentes dos das cargas perturbadoras. Reguladores de Tensão Transformadores a Tensão Constante (Transformadores Ferro-ressonantes) RegDT – regulador dinâmico de tensão (DVReg - Dynamic Voltage Regulator) Restauradores Dinâmicos de Tensão UPS - Uninterruptible power supply Motor Gerador Armazenadores com Capacitores e supercapacitores ou Flywheel ou Superconductores Chave de transferência estática

O próximo capítulo aprofundará a análise de uma destas alternativas de mitigação, o Restaurador Dinâmico de Tensão (Dynamic Voltage Restorer).

4. Restaurador Dinâmico de Tensão

4.1. Introdução

O Restaurador Dinâmico de Tensão, é um equipamento que conectado em série com cargas sensíveis compensa afundamentos ou elevações momentâneas de tensão. Durante a ocorrência de um destes eventos um inversor CC / CA usando a tecnologia de Modulação em Largura de Pulso (MLP - PWM) sintetiza uma forma de onda de tensão de frequência, amplitude e fase controladas. Um transformador série soma esta forma de onda criada e a superimpõe à tensão de rede. Além da compensação dos afundamentos momentâneos de tensão e das elevações momentâneas de tensão, o RDT (DVR) é capaz de injetar formas de onda complexas para a compensação de transitórios de chaveamentos e outros distúrbios presentes nas tensões de alimentação (Daehler & Affolter, 2000).

O primeiro Restaurador Dinâmico de Tensão foi instalado, em 1996, na subestação da fábrica de tapetes Orian Rug em Anderson, Carolina do Sul, Estados Unidos, onde uma variação momentânea de tensão poderia colocar fora de operação o computador que controla a tecelagem dos tapetes, causando um embaralhamento dos fios de algodão. A perda de produção continuaria a ocorrer pelas várias horas necessárias para restabelecer o equipamento.

O RDT (DVR) neste caso foi projetado para manter o suprimento durante o tempo suficiente para uma parada controlada do processo ou dar partida em geradores auxiliares, caso a ocorrência fosse de longa duração.

Um restaurador Dinâmico de Tensão é projetado para mitigar variações momentâneas de tensão em alimentadores que suprem cargas sensíveis. É uma alternativa economicamente mais viável, caso se considere o tipo que usa fonte externa através de conversor CA / CC, que o sistema de energia ininterrupta (SEI ou UPS - uninterruptible power source) visto que esta solução requer uma potência similar ao da carga a ser compensada, ou outra solução para o problema do afundamento momentâneo de tensão. É especialmente projetado para grandes cargas (acima de

2MVA) supridas por sistemas de distribuição. Um RDT (DVR) tipicamente requer menos de um terço do nominal de um UPS. Um RDT, além de poder compensar afundamentos, elevações e desequilíbrios de tensão, pode também ser usado para compensar tensões harmônicas no sistema de suprimento da carga sensível (Siemens, 2002).

O RDT (DVR) é um equipamento que se enquadra no rol dos equipamentos eletrônicos de potência. Pode-se dizer que pertence à terceira família dos equipamentos por ser de tecnologia de comutação forçada. Outros equipamentos de eletrônica de potência podem ser vistos na Figura 4.1. Por usar a tecnologia de comutação forçada pode ter tempo de resposta compatível, da ordem de 2 a 3 milisegundos (Siemens, 2002), com as demandas no caso de um curto-circuito na rede e seu conseqüente afundamento momentâneo de tensão.

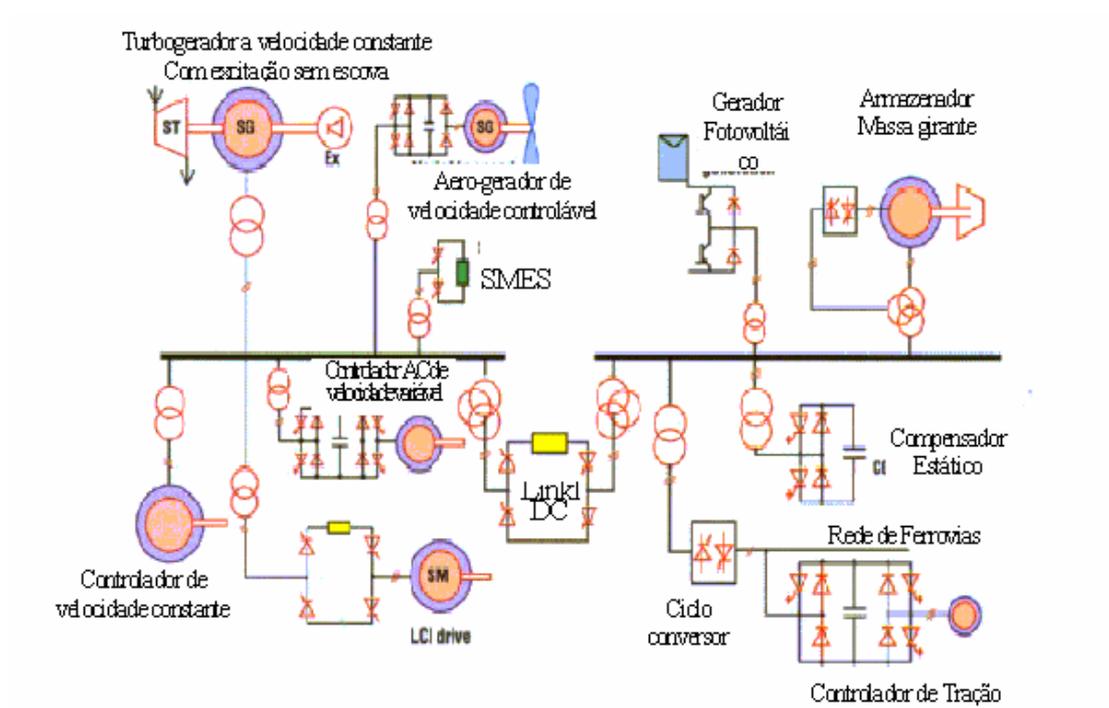


Figura 4.1 Recentes Aplicações da Eletrônica de Potência

A Figura 4.2 ilustra a injeção, de tensão de compensação, para que, na ocasião de um distúrbio, se possa oferecer à carga uma energia de qualidade. Como foi visto anteriormente utiliza-se um inversor CC AC, que geralmente é construído em

tecnologia IGBT, conectado em série com o sistema de energia através de um transformador elevador.

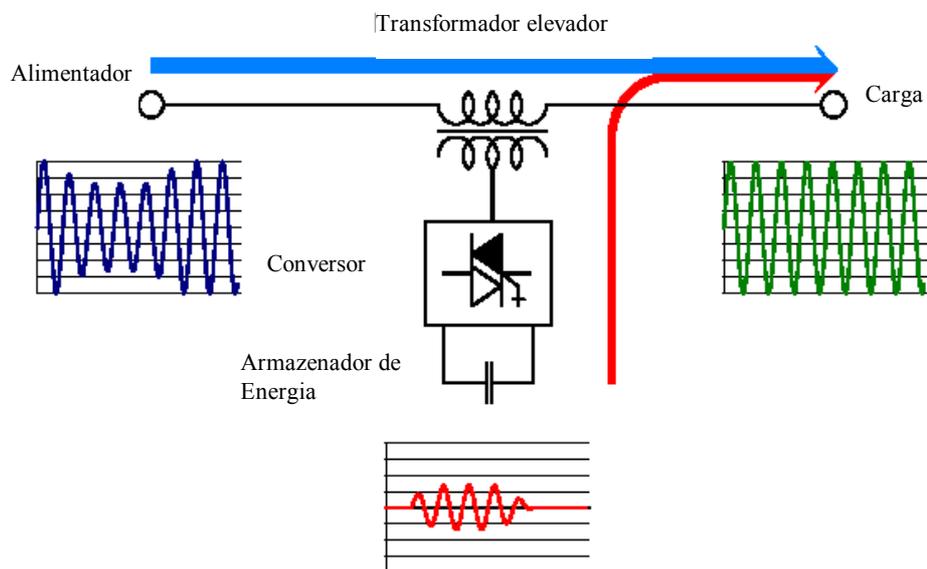


Figura 4.2 Funcionamento Esquemático de um RDT.

O RDT (DVR) injeta três tensões monofásicas ac em série com o alimentador de distribuição, e em sincronismo com a tensão de distribuição do alimentador. Por se injetar tensões de amplitude, fase, ângulo e frequências (harmônicas) controladas no alimentador, instantaneamente, através de um transformador série, o RDT (DVR) pode restabelecer a qualidade da energia no seu terminal de carga quando a qualidade da tensão do lado da carga estiver fora da especificação das cargas sensíveis. Por exemplo, para uma carga de 5MVA, cerca de 90% dos afundamentos momentâneos de tensão que causariam problemas, poderiam ser prevenidos por um RDT (DVR) de 2MVA com 1 MJ (1MW-segundo) de energia armazenada (Westinghouse, 1996).

A potência reativa trocada entre o RDT (DVR) e a rede é internamente gerada pelo RDT (DVR) sem nenhum componente reativo passivo AC, como reator ou capacitor. O capacitor do barramento CC não está associada com a potência nominal do equipamento. Para grandes variações (afundamentos profundos na tensão da rede) o RDT (DVR) pode, dependendo do tipo, suprir parte da potência da carga a partir de uma fonte de energia recarregável conectada no terminal CC do RDT (DVR), ou

através de um conversor CA / CC. Se for o caso de se ter energia armazenada, esta quantidade determina o máximo intervalo de tempo que o RDT (DVR) pode suprir a máxima tensão injetada num pior cenário.

Entre as vantagens apresentadas pelo RDT, caso se considere o tipo que usa fonte externa através de conversor AC / CC, em relação aos sistemas UPS (Uninterruptable Power Supply) estão:

1. Potência reduzida, normalmente uma fração da potência da carga protegida;
2. Ausência de banco de baterias para armazenamento de energia

Essas duas características estão associadas ao fato de o restaurador aproveitar as tensões sob distúrbio, injetando apenas o necessário para a compensação. Há disponíveis atualmente, diversas topologias para o RDT, cada uma com características e capacidades de compensação específicas. Uma delas é baseada na utilização de ponte retificadora para o suprimento de energia ao barramento de corrente contínua, conciliando a simplicidade e o baixo custo com a capacidade de injeção de potência ativa e reativa, além da compensação de variações momentâneas de tensão com até 0,5 pu., em regime permanente (Leão et al.,2003). A Figura 4.3 ilustra esta topologia.

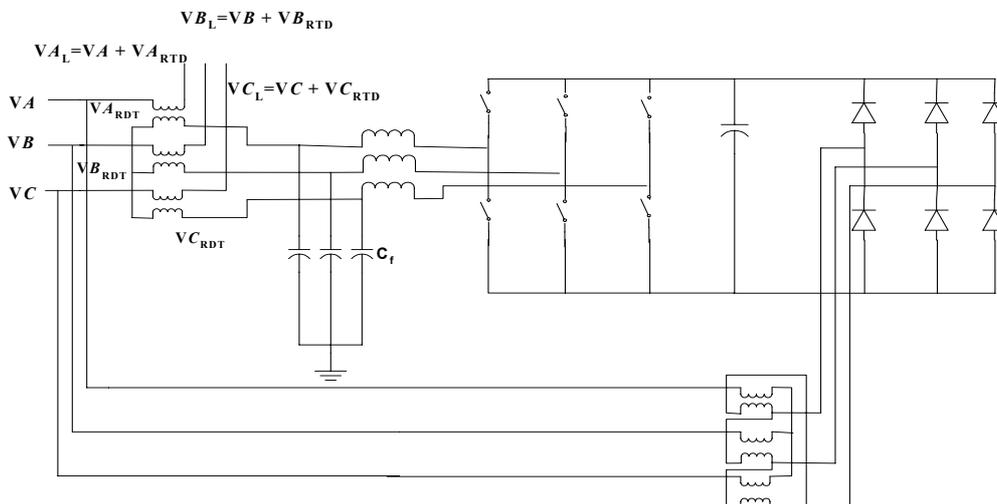


Figura 4.3 Diagrama Trifilar de um RDT (DVR) com o Barramento CC Alimentado por Diodos

4.2. Filosofias de projeto

Praticamente pode-se classificar os RDT (DVR) em dois tipos, quanto ao fornecimento de energia ao barramento CC (Silva, 1999):

- Sem fonte externa

Pode ser através do armazenamento através de equipamentos tais como: SMES (Superconductor magnetic energy storage – armazenador de energia magnética num supercondutor), flywheels (massas girantes), ar comprimido, baterias (Jenkins, 2002) e capacitores.

Num sistema SMES (Behnke et al., 1998) a energia é armazenada num campo magnético que é capaz de liberar energia em frações de ciclos para suprir uma diminuição súbita de tensão, ver Figura 4.4.

No modo de espera, a corrente continuamente circula através da chave normalmente fechada do regulador de tensão e do sistema de suprimento e de volta para o supercondutor magnético. O sistema de suprimento alimenta as pequenas perdas nas partes não supercondutoras do circuito. Quando um distúrbio é percebido, o sistema de controle direciona potência ativa e reativa para a carga. Quando a tensão sobre o capacitor cc alcança o nível selecionado a chave eletrônica se abre não suprimindo mais energia para o capacitor.

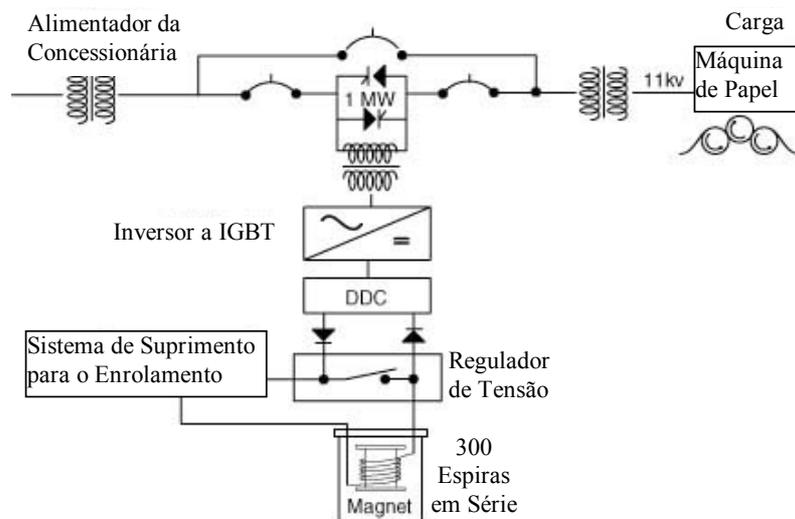


Figura 4.4 RDT (DVR) Com Armazenamento de Energia Através de SMES

O SMES, se recarrega em minutos e pode repetir a seqüência carga descarga milhares de vezes sem qualquer degradação do circuito magnético. O tempo de recarga pode ser acelerado para satisfazer os requisitos especificados dependendo da capacidade do sistema de suprimento. A Figura 4.5 abaixo mostra um RDT (DVR) deste tipo, sendo que portátil.

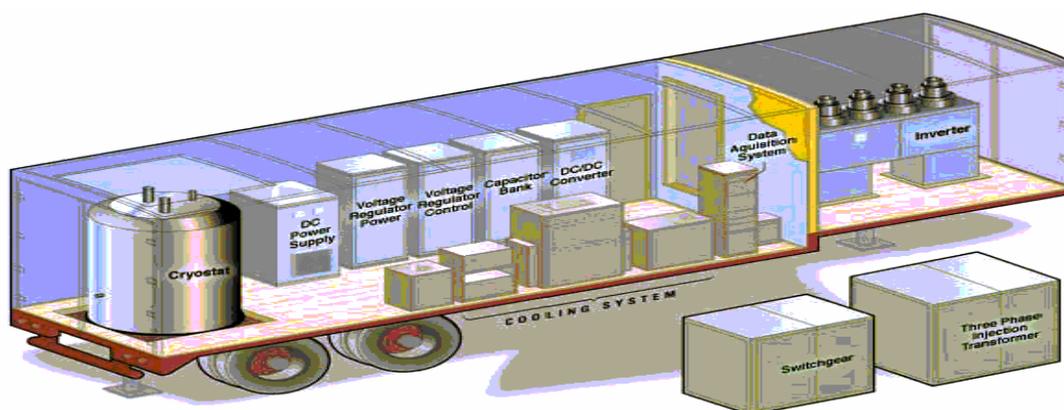


Figura 4.5 RDT (DVR) sem Fonte Externa, com Armazenamento em Campo Magnético Supercondutor

A diferença entre acumular num banco de capacitores e numa bateria é a quantidade de energia que economicamente é viável acumular. Por exemplo, para se proteger uma carga da ordem de 4MVA para afundamentos monofásicos e trifásicos de 50% e 38% respectivamente por até 150 milissegundos usa-se uma acumulação em capacitores. Para a mesma ordem de grandeza de potência, mas para suportar afundamento por 5 minutos ou uma interrupção do suprimento, usa-se baterias.

Outro modo de armazenar energia é em volantes (Flywheel) (Burg, 1998). A energia armazenada é a soma das energias cinéticas de todos os elementos de massa que compõem o volante. Para otimizar a razão energia massa o volante precisa rodar na sua velocidade máxima possível. Isto porque a energia cinética aumenta linearmente com a massa mas cresce com o quadrado da velocidade de rotação. Devido as grandes forças centrífugas envolvidas há um compromisso entre a velocidade e a densidade do material. Como maior velocidade é importante, a suportabilidade tensional é mais importante que a densidade. Com o objetivo de reduzir as perdas por atrito e ventilação pode-se usar eixos sem atrito (mancais magnéticos) e vácuo para

minimizar a resistência do ar e conseqüentemente um suprimento de energia de longo tempo. Os volantes chegam a ter uma eficiência de 80%.

Este sistema tem a vantagem de não sobrecarregar um sistema já submetido a uma degradação. Portanto permite a compensação do afundamento de qualquer profundidade e duração, desde que este sistema disponha da capacidade de armazenamento suficiente

A desvantagem é que se torna um equipamento mais caro, pois tem-se que armazenar uma energia suficiente para suprir toda a carga durante o intervalo de tempo necessário, para a eliminação do defeito pelos religadores ou disjuntores da concessionária de suprimento, ou, caso seja um defeito permanente, durante o tempo suficiente para uma parada controlada do equipamento ou dar partida a geradores auxiliares.

- Via sistema independente

O barramento CC, desde que alimentado por um sistema independente de capacidade suficiente, permite a compensação de qualquer afundamento seja qual for a duração e o valor remanescente. Isto pode se fazer através de uma rede de alimentação independente. Este sistema apresenta custo elevado por necessitar de uma rede alternativa.

- Via conversor CA / CC

Esta é a solução mais econômica uma vez que usa a própria rede de suprimento. Obviamente tem o inconveniente de poder levar a um colapso de tensão, caso a rede não tenha potência suficiente. É bom lembrar que a carga associada ao RDT (DVR) transforma-se numa carga de potência constante durante o curto.

Este esquema foi visto Figura 4.3

4.3. O RDT (DVR)

A idéia básica do RDT (DVR) é injetar tensão dinamicamente controlada V_{RDT} , gerada por um conversor de comutação forçada, em série com a tensão do sistema de

suprimento por meio de um transformador elevador (ver Figura 4.6 a seguir). As amplitudes instantâneas das três tensões da fase injetadas são controladas de tal forma que elimine qualquer efeito nocivo de uma flutuação na tensão V_L . Isto significa que qualquer diferença de tensão causada por um distúrbio no alimentador será compensado por uma tensão equivalente gerada pelo conversor e injetada na rede pelo transformador elevador T_1

Este princípio trabalha independentemente do tipo da falta da rede, desde que o alimentador compensado não seja desconectado da rede. Para a maioria dos casos práticos um projeto mais econômico pode ser alcançado por só se compensar as componentes de seqüências positiva e negativa da tensão de distúrbio vista pelo RDT. Esta consideração é razoável pois para uma configuração de distribuição típica a componente de seqüência zero não passa pelos transformadores abaixadores por causa de sua ligação em delta (Zhan, C., 2001).

No caso específico da Figura 4.6, o capacitor CC entre a unidade de armazenamento de energia e o inversor serve como um amortecedor de energia, e tem que ter a capacidade de absorver ou fornecer instantaneamente potência durante uma elevação ou um afundamento de forma a manter a tensão CC constante.

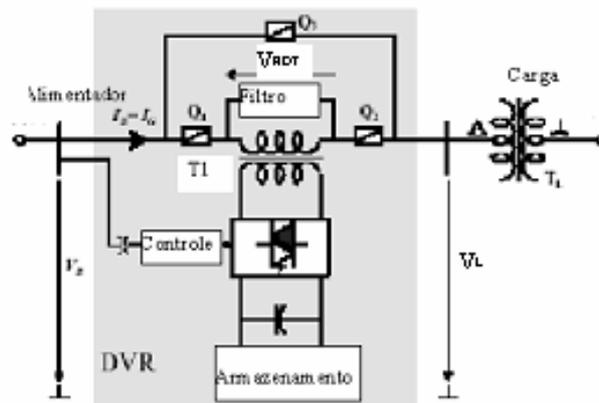


Figura 4.6 Diagrama Esquemático de um RDT

Na maior parte do tempo o RDT (DVR) não faz nada a não ser monitorar a tensão do barramento, o que significa que não injeta qualquer tensão ($V_{RDT} = 0$) independente

da corrente de carga. Portanto deve-se ter em conta as perdas do RDT (DVR) durante este regime de operação.

Em consequência, o equipamento deve ter um inversor, que para dar respostas rápidas deve ter comutação forçada, um transformador elevador, para poder tornar compatível a suportabilidade dos equipamentos eletrônicos de potência com as tensões dos alimentadores, um barramento CC, para servir de amortecedor nas solicitações instantâneas de potência, um sistema armazenador, caso se requeira autonomia para suprir potência ativa durante afundamentos, e se for um sistema via conversor CA / CC outro transformador, sendo que em paralelo com a rede, e um sistema de retificação que alimentaria o barramento CC.

A Figura 4.3 mostra um sistema deste tipo sendo que por ser o sistema de retificação a diodo não poderia funcionar com elevações momentâneas de tensão pois apesar de se poder retirar potência ativa da rede, não se poderia absorver da carga, injetando para a rede (a não ser que o capacitor do barramento CC seja dimensionado para uma tensão superior). Este é o caso visualizado nesta dissertação, pois se está interessado em controlar apenas as condições mais prejudiciais que são os afundamentos momentâneos de tensão. Caso se desejasse a possibilidade de também fornecer potência ativa para a rede seria necessário um retificador controlado e conseqüentemente um projeto mais oneroso.

Por outro lado, um sistema de retificação a MLP (modulação por largura de pulso) daria a flexibilidade de se corrigir a tensão do barramento CC, mesmo durante afundamentos, o que daria uma maior flexibilidade ao RDT, permitindo um controle da tensão CC e conseqüentemente podendo corrigir afundamentos superiores a 50%.

4.3.1. O transformador elevador série

O transformador elevador, que pode ser visto na Figura 4.7 a seguir, tem seu secundário curto-circuitado através do RDT, quando no modo de espera (Figura 4.7, (a)). Pode-se aplicar uma estratégia de comando das chaves de forma que não ocorram chaveamentos dos semicondutores neste modo de operação. Portanto, só as perdas de condução dos semicondutores, comparativamente baixas neste percurso da corrente

Existem diferentes maneiras de sintetizar correntes ou tensões, com forma, frequência e amplitude arbitrárias, de maneira a ser possível a utilização de topologias inversoras no condicionamento de energia elétrica.

Quando a energia transferida para o sistema não contém parcela ativa, a fonte que alimenta o inversor pode ser realizada apenas com elementos de acúmulo de energia, como capacitores ou indutores. Devido às menores perdas produzidas pelos capacitores, seu uso é mais difundido. No entanto, como foi visto na seção 4.2, a tecnologia de supercondutores já permite (embora com custos elevados) o armazenamento de grandes quantidades de energia sem perdas, nos chamados SMES (Superconductive Magnetic Energy Storage), ou em baterias, tornando este tipo de circuito mais indicado para eventuais aplicações em potência elevada.

A Figura 4.8 mostra uma estrutura típica de inversores trifásicos, tipo fonte de tensão, que pode sintetizar diferentes formas de tensões em seus terminais. Deve-se lembrar que num inversor de tensão (armazenamento em capacitores), o acoplamento com a rede exige a presença de elementos indutivos, uma vez que as tensões do barramento cc (capacitor) e da rede não são iguais. Devido à necessidade de filtragem das altas frequências, estes elementos indutivos são associados a capacitivos shunt. As chaves semicondutoras devem ser bidirecionais em corrente e unidirecionais em tensão. A operação correta do circuito exige que nunca conduzam 2 chaves de um mesmo ramo do inversor, pois isso colocaria em curto o capacitor.

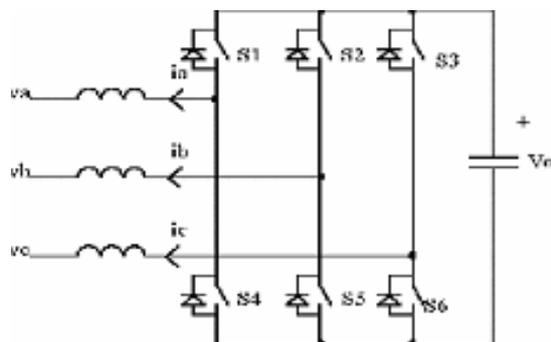


Figura 4.8 Circuito Inversor

É óbvio que para que seja possível o controle das formas de onda de tensão, o valor de V_{cc} deve ser maior do que os valores de pico máximos, de tensão, presente no sistema caso não haja um transformador de saída que no caso do RDT (DVR) é a

diferença entre a menor tensão permitida pela carga, e a tensão da rede submetida a um afundamento.

Diferentes técnicas de modulação podem ser empregadas. As mais usuais são a MLP (modulação por largura de pulso – PWM em inglês) e a por histerese (quando se trata de controle de corrente).

Uma maneira de obter um sinal alternado de baixa frequência é através de uma modulação em alta frequência.

É possível obter este tipo de modulação ao comparar uma tensão de referência (que seja imagem da tensão de saída buscada), com um sinal triangular simétrico cuja frequência determine a frequência de chaveamento. A frequência da onda triangular (chamada portadora) deve ser, no mínimo 20 vezes superior à máxima frequência da onda de referência, para que se obtenha uma reprodução aceitável da forma de onda desejada, após efetuada a filtragem. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora (triangular). Tem-se, assim, uma Modulação por Largura de Pulso MLP (PWM).

A tensão de saída é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável.

A Figura 4.9 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com 2 níveis, na frequência da onda triangular (SPWM Sinusoidal Pulse Width Modulation).

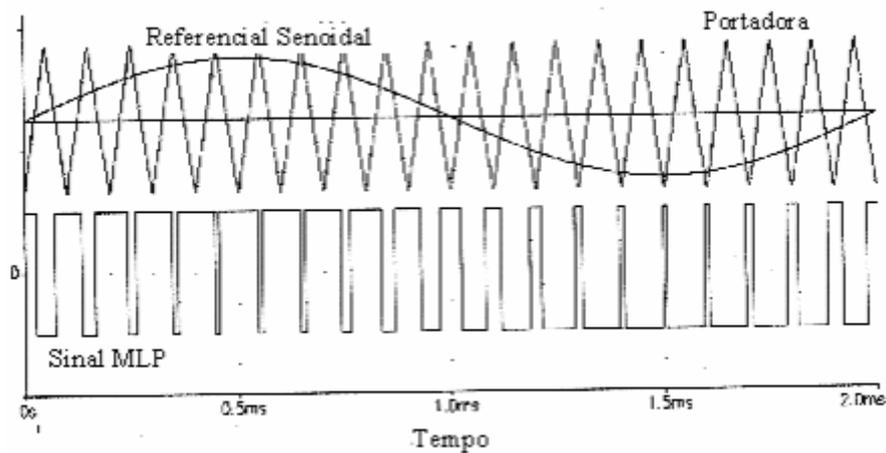


Figura 4.9 Modulação de uma Onda Senoidal

Entre outras possibilidades em se tratando de inversor trifásico, 2 arranjos podem ser feitos: utilizando 3 inversores monofásicos (o que exige 12 chaves, e é chamado de ponte completa) ou um arranjo chamado de semi-ponte, com 6 chaves, como o mostrado na Figura 4.10 (Pomílio, 2000).

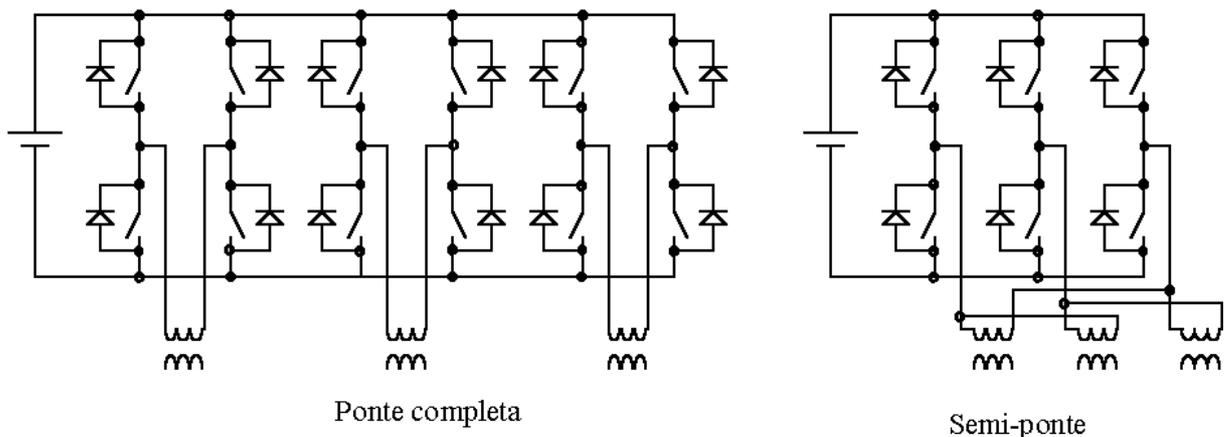


Figura 4.10 Inversores Trifásico em Ponte e Semi-Ponte

Em termos do conversor em semi-ponte, o sinal de comando enviado a cada ramo do inversor é do tipo 2 níveis (quando uma chave liga, a complementar desliga). Assim, a tensão de fase apresenta-se em 2 níveis (0 ou V). No entanto, a tensão de linha (entre 2 fases) apresenta-se de 3 níveis (0, V e -V), como se observa na Figura 4.11. Nesta Figura 4.11 podem também ser vistas as formas de ondas filtradas (filtro passa-baixa

com frequência de corte acima da frequência da onda de referência senoidal). Além disso, a frequência de chaveamento da tensão de linha apresenta o dobro da frequência da tensão de fase, como se nota no espectro conforme pode ser visto na Figura 4.12. Neste espectro se nota que a frequência da ordem de 2000Hz existente na tensão de fase, inexistente na tensão de linha.

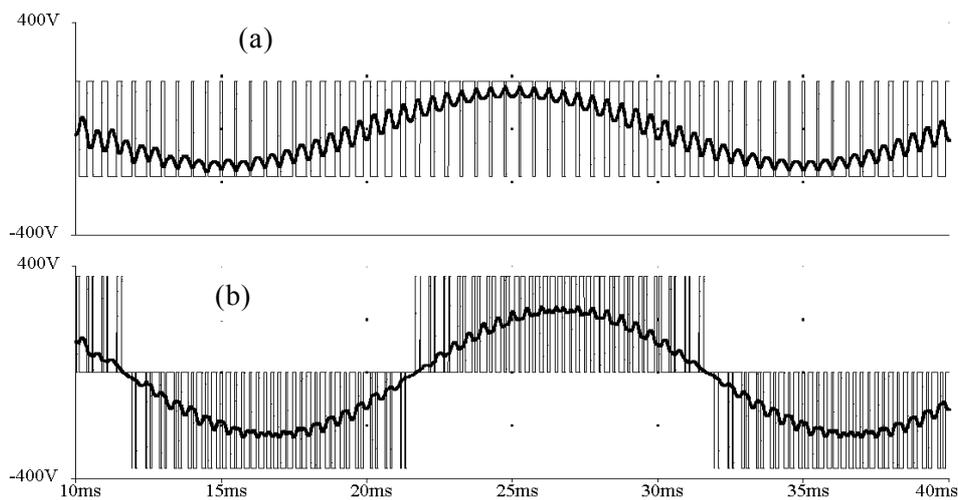


Figura 4.11 Tensões Típicas de Saída do Inversor (a) Tensão de Fase, (b) Tensão de Linha (entre fases)

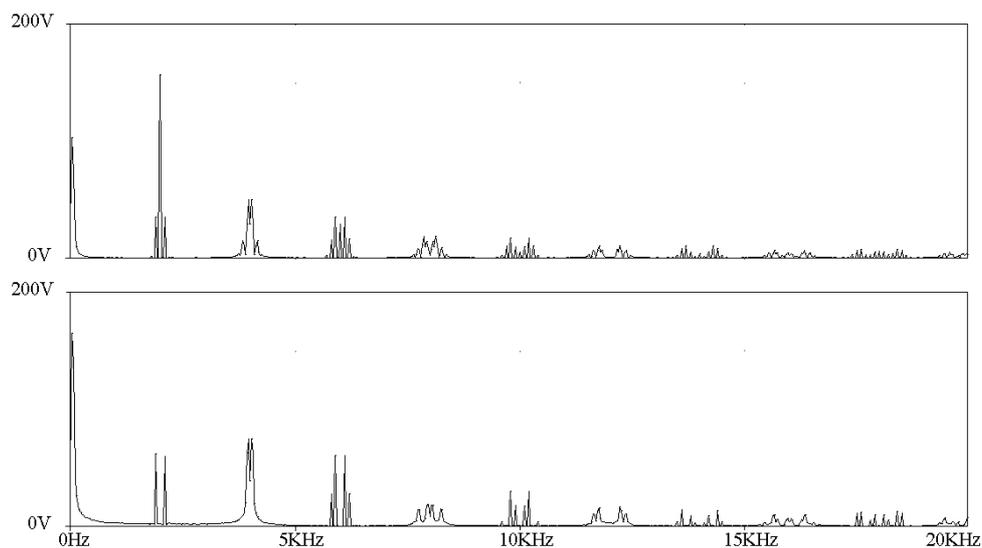


Figura 4.12 Espectro Típico das Tensões de Fase e de Linha de um Inversor MLP (2 e 3 níveis)

O obtenção de uma onda senoidal que recupere a onda de referência é facilitada pela forma do espectro. Note-se que, após a componente espectral relativa à referência, aparecem componentes nas vizinhanças da frequência de chaveamento. Ou seja, um filtro passa baixas com frequência de corte acima de 50/60 Hz é perfeitamente capaz de produzir uma atenuação bastante efetiva em componentes na faixa dos KHz. Uma redução ainda mais efetiva das componentes de alta frequência é obtida com o uso de filtro de ordem superior (Pomílio, 2000).

O uso de um filtro não amortecido pode levar ao surgimento de componentes oscilatórias na frequência de ressonância, que podem ser excitadas na ocorrência de transitórios na rede ou na carga. Em regime elas não se manifestam, uma vez que o espectro da onda MLP não as excita. O uso de filtros amortecidos pode ser indicado em situações em que tais transitórios possam ser problemáticos, com a inevitável perda de eficiência do filtro (Pomílio, 2000).

Uma alternativa que apresenta como vantagem o espalhamento do espectro é o uso de uma frequência de chaveamento não fixa, mas que varie, dentro de limites aceitáveis, de uma forma, idealmente, aleatória. Isto faz com que as componentes de alta frequência do espectro não estejam concentradas, mas apareçam em torno da frequência base, como se observa na Figura 4.13. Note que a referência, neste caso um nível contínuo, não sofre alteração.

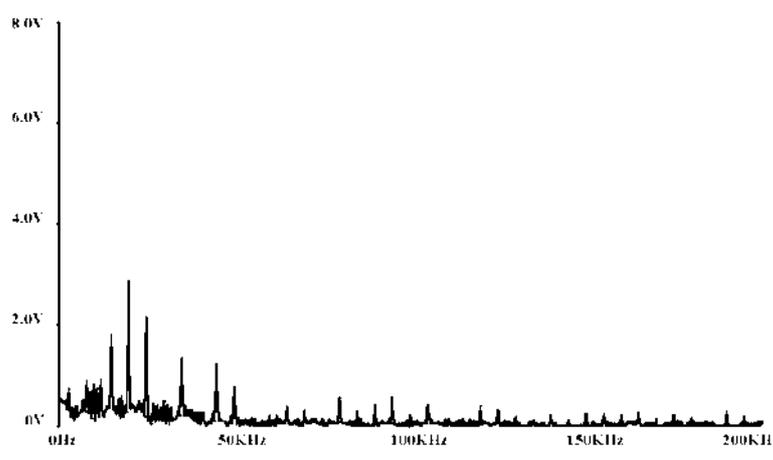


Figura 4.13 Espectro de sinal MLP (referência cc) com portadora de frequência variável

Em relação ao elemento armazenador de energia, o capacitor cc, caso o inversor forneça apenas energia reativa, não precisa de uma fonte de potência interna ou externa.

O estágio de saída deve ser adaptado de modo a ser obtida uma tensão filtrada dos componentes relativos à frequência de chaveamento, obtendo-se apenas a tensão fundamental sintetizada pelo inversor. Geralmente é utilizado um filtro de saída.

A Figura 4.14, a seguir mostra este conversor.

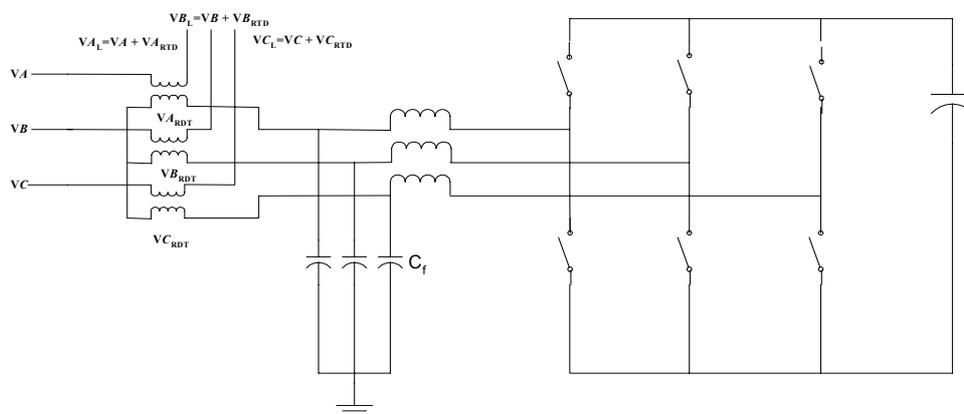


Figura 4.14 Transformador Elevador Filtro e Conversor do RDT

A tensão CA que aparece sobre os capacitores de filtro, C_f , representa o valor da tensão de saída sintetizada pelo filtro. Esta tensão está aplicada ao primário dos transformadores, os quais transferem a tensão à rede, de modo que a tensão aplicada à carga seja a soma da tensão inicial da rede (V_A) com a tensão de compensação (V_{ARDT}).

Dependendo da fase entre a corrente da carga e esta tensão, tem-se que o inversor pode ou não estar fornecendo (ou absorvendo) potência ativa. No caso de compensação reativa pura, as tensões sintetizadas devem estar defasadas de 90 graus das correntes, como mostrado na Figura 4.15, na qual o compensador está sintetizando um capacitor. Esta Figura 4.15, apresenta a forma de onda da tensão sintetizada por um inversor MLP, bem como a corrente na carga. Na tensão nota-se a

presença de componentes de alta frequência, enquanto a corrente, por efeito da carga simulada, surge melhor filtrada.

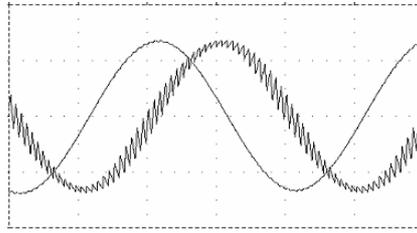


Figura 4.15 Forma de Onda Sintetizada de Tensão

4.3.2.1.1. Modulação Vetorial (Space Vector Modulation)

Existem diferentes técnicas de geração dos padrões MLP em um inversor trifásico. O método analógico consiste em comparar a referência de cada fase com uma onda triangular na frequência de chaveamento. Seu inconveniente é propriamente a geração dos sinais analógicos de referência, com defasagens e amplitudes corretas.

Outro modo de determinar as larguras de pulso dos interruptores da ponte inversora é pela chamada modulação vetorial, que se baseia num modelo fasorial no plano α - β (Van der Broeck et al., 1988), (Ogasawara et al., 1989) e (Buso et ali., 1994)

A produção de uma forma qualquer de tensão, neste circuito, pode, em princípio, ser feita em malha aberta, desde que seja utilizada a referência correta.

Como visto anteriormente, devem estar em condução simultaneamente um interruptor de cada braço do inversor.

As tensões de um sistema trifásico podem ser representadas em um sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$, sendo as componentes no referencial dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Considerando as oito possibilidades de estados das chaves do inversor, as tensões de fase, bem como as componentes V_α e V_β estão resumidas na Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1 Tensões na Saída de um Inversor Trifásico

Chaves			Van	Vbn	Vcn	V_α	V_β	Vetor
S1	S2	S3						
0	0	0	0	0	0	0	0	$\vec{V}_0 = 0$
0	0	1	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$2\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$	$\vec{V}_5 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j240^\circ}$
0	1	0	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$2\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$	$\vec{V}_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j120^\circ}$
0	1	1	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot$	0	$\vec{V}_4 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j180^\circ}$
1	0	0	$2\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot$	0	$\vec{V}_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j0^\circ}$
1	0	1	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-2\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$	$\vec{V}_6 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j300^\circ}$
1	1	0	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-2\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$	$\vec{V}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC} \cdot e^{j60^\circ}$
1	1	1	0	0	0	0	0	$\vec{V}_7 = 0$

Os vetores ativos \vec{V}_1 a \vec{V}_6 podem ser representados no plano $\alpha\beta$ conforme indicado na Figura 4.16. Os estados das chaves correspondentes aos vetores estão indicados entre parêntesis.

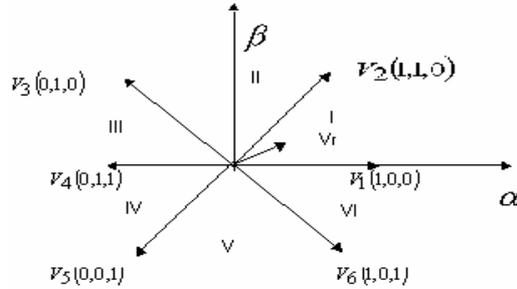


Figura 4.16 Vetores espaciais produzidos em inversores trifásicos

Para implementar a técnica de MLP vetorial, o plano $\alpha\beta$ é dividido em seis setores, indicados por I, II, III, IV, V e VI na Figura 4.16. Considere-se que deseja-se produzir um vetor tensão na saída do inversor diferente dos vetores \vec{V}_0 a \vec{V}_7 disponíveis. Pelo método de MLP vetorial, os vetores \vec{V}_0 e \vec{V}_7 e os vetores ativos que definem o setor onde o vetor tensão de referência está localizado são empregados para compor, em termos médios, a tensão de referência (Van der Broeck et al., 1988). Por exemplo, se o vetor de referência V_r da Figura 4.16 deve ser aplicado à carga e T_s é o período de chaveamento, então V_r pode ser escrito como:

$$\vec{V}_R = \frac{1}{T_s} \cdot \left(\int_0^{T_0} \vec{V}_0 \partial t + \int_{T_0}^{T_0+T_1} \vec{V}_1 \partial t + \int_{T_0+T_1}^{T_0+T_1+T_2} \vec{V}_2 \partial t + \int_{T_0+T_1+T_2}^{T_0+T_1+T_2+T_7} \vec{V}_7 \partial t \right) \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$\vec{V}_R = \frac{T_1}{T_s} \cdot \vec{V}_1 + \frac{T_2}{T_s} \cdot \vec{V}_2 \quad \text{Eq. 4.3}$$

Assim, aplicando o vetor ativo V1 durante o intervalo de tempo $\delta' = T_1/T_s$, o vetor ativo V2 durante o intervalo $\delta'' = T_2/T_s$ e vetor nulo durante o resto do intervalo de chaveamento T_s , as tensões médias aplicadas corresponderão ao vetor V_r .

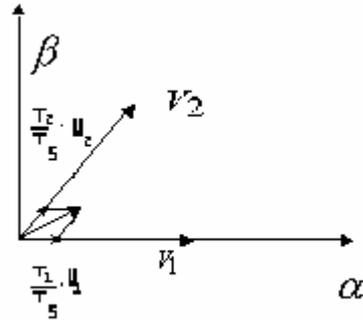


Figura 4.17 Vetores que compõem o vetor tensão de referência V_r

A Figura 4.17 permite a visualização gráfica da equação Eq. 4.3. Os intervalos de aplicação dos vetores nulos (denominados de períodos de roda livre) são geralmente distribuídos igualmente no início e no final de cada período de chaveamento. Uma consequência desta escolha é a redução do conteúdo harmônico total dos sinais de tensão de saída.

A implementação digital do método de MLP vetorial requer a determinação do setor onde o vetor tensão de referência está localizado, de modo a permitir a escolha dos dois vetores ativos a aplicar. Uma vez conhecidos o setor e os vetores ativos V_i e V_k , duas expressões são usadas para encontrar os respectivos intervalos de tempo δ' e δ'' (razões cíclicas) durante os quais esses vetores devem ser aplicados. Se, por exemplo, o vetor tensão de referência estiver no setor I, como indicado na Figura 4.17, os vetores ativos são V_1 e V_2 e seus intervalos de aplicação são:

$$\delta' = \frac{|\vec{V}_r|}{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC}} \cdot T_s \cdot \frac{\text{sen}(60^\circ - \theta)}{\text{sen}(60^\circ)} \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$\delta'' = \frac{|\vec{V}_r|}{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{DC}} \cdot T_s \cdot \frac{\text{sen } \theta}{\text{sen}(60^\circ)} \quad \text{Eq. 4.5}$$

Onde θ é a posição do vetor V_r no plano $\alpha\beta$. Expressões similares são obtidas se o vetor de referência se situar em outros setores.

Vale salientar que o esforço computacional para implementar a técnica exatamente como descrito é bastante elevado. Alguns trabalhos foram apresentados na literatura propondo algoritmos de implementação do MLP vetorial ou métodos de MLP equivalentes ao vetorial com esforço computacional reduzido.

No caso do RDT, a tensão que se deseja produzir é o valor da diferença entre a tensão de referência desejada (por exemplo 0,8 pu da tensão nominal) em cada fase, e a tensão remanescente do afundamento. Este valor pode ser chamado de erro. A forma de onda e a fase deste erro podem ser obtidas do sistema de controle, conforme será visto adiante.

Foi implementado no SIMULINK um algoritmo para determinar as razões cíclicas das chaves de forma que o inversor produza as tensões de referência. O algoritmo está apresentado no diagrama de blocos da Figura 4.18 detalhada pelas (Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21).

A Figura 4.19, mostra a coleta de 120 valores da forma de onda a ser amostrada. É feita através do mecanismo de dar um retardo na onda que passou por um processo de amostragem & retenção. Quando houver diferença é que houve uma amostragem. O programa Patamar.m (Anexo 1), vê esta diferença e calcula as componentes dos valores instantâneos da tensão nos eixos cartesianos.

**Com Blocos Discretos
Fixed Step
Discrete**

Disparo das Chaves por
Space Vector Modulation
Usando os programas:
sextante.m
combinacaoilinear.m

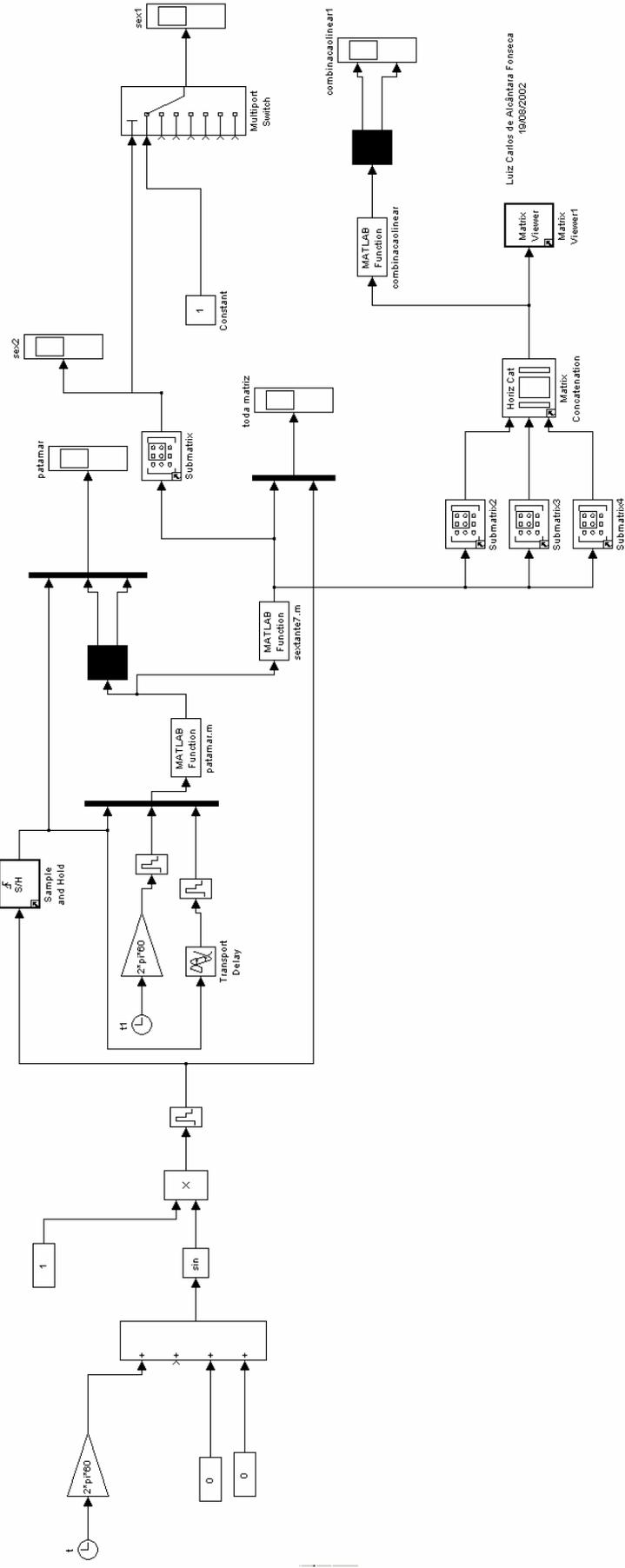


Figura 4.18 Modelagem no SIMULINK para o Cálculo dos Ciclos de Trabalho de uma Onda Senoidal

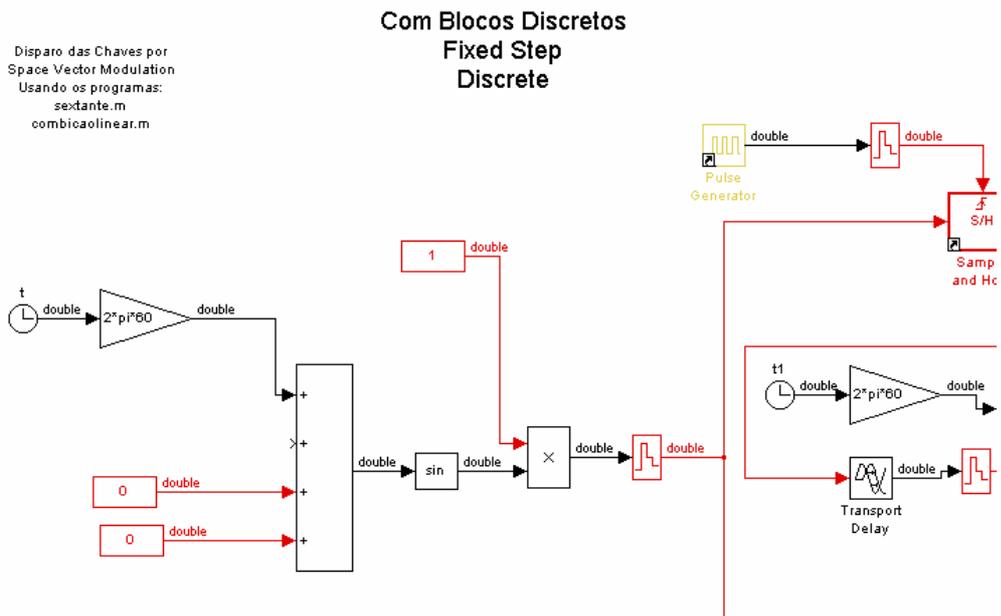


Figura 4.19 Amostragem da Onda de Referência Senoidal

A Figura 4.20, mostra como foi obtida a localização do ponto amostrado no setor do hexágono (sextante), ou seja, calcula a localização do vetor no espaço cartesiano. Isto é feito a partir do programa Sextante.m, ver Anexo 1.

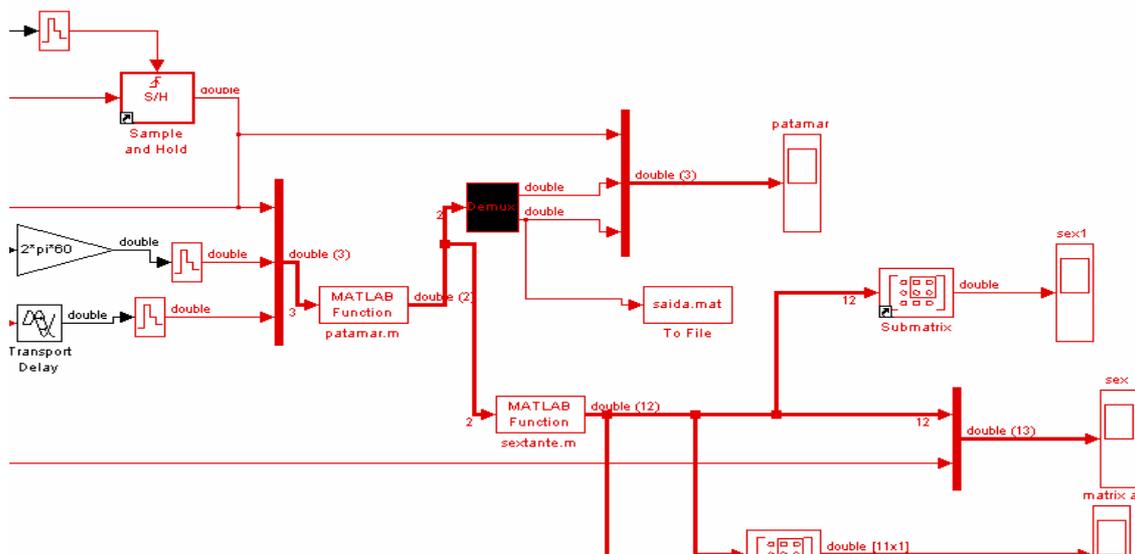


Figura 4.20 Detecção do Valor da Amostra e Alocação no Setor (Sextante)

A Figura 4.21, mostra a etapa onde são calculadas as razões cíclicas, ou seja, são calculadas as componentes dos vetores limitantes do sextante onde o vetor está localizado. Isto é feito através do programa CombinacaoLinear.m, ver o Anexo 1.

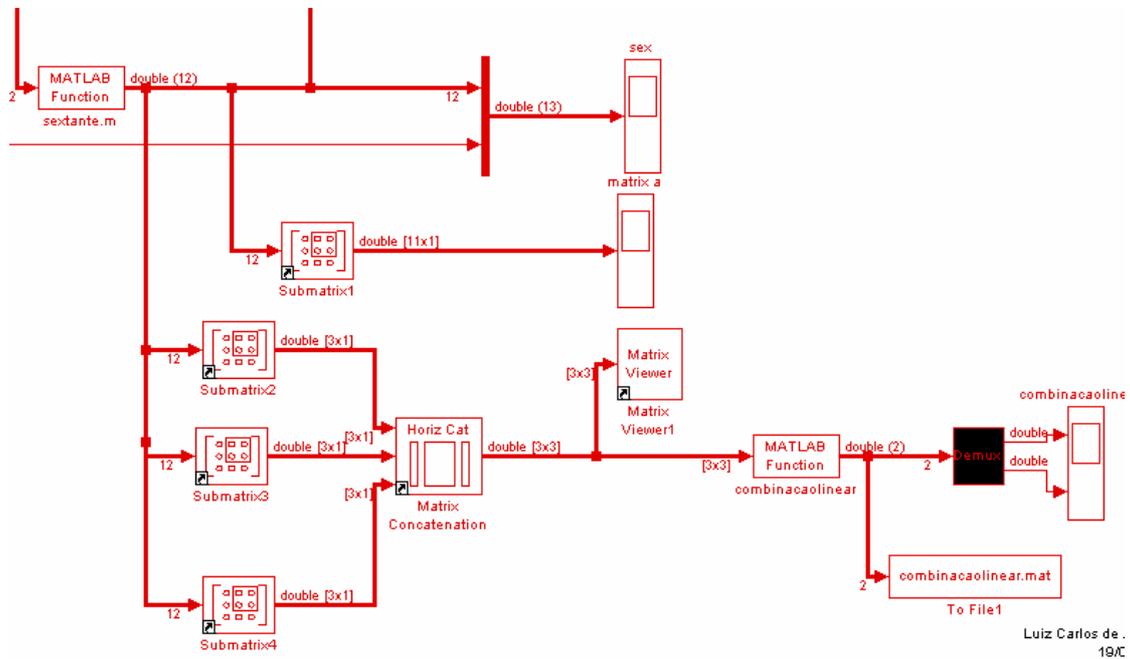


Figura 4.21 Através do Programa Combinação Linear Cálculo das Razões Cíclicas

A Figura 4.22, mostra o cálculo do sextante de cada valor amostrado da onda senoidal de referência, e a Figura 4.23, os valores das razões cíclicas δ' e δ'' .

A partir dos ciclos de trabalho se pode disparar as chaves dos conversores, e conseqüentemente se obter as tensões necessárias para compensar os afundamentos.

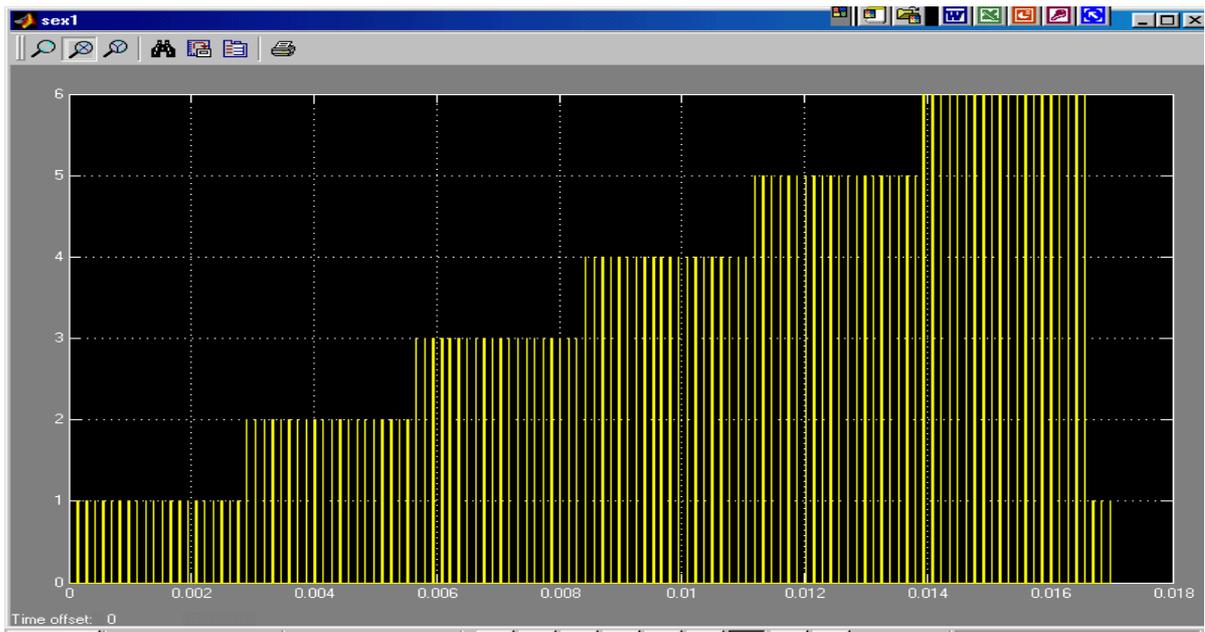


Figura 4.22 Saída do Cálculo do Sextante

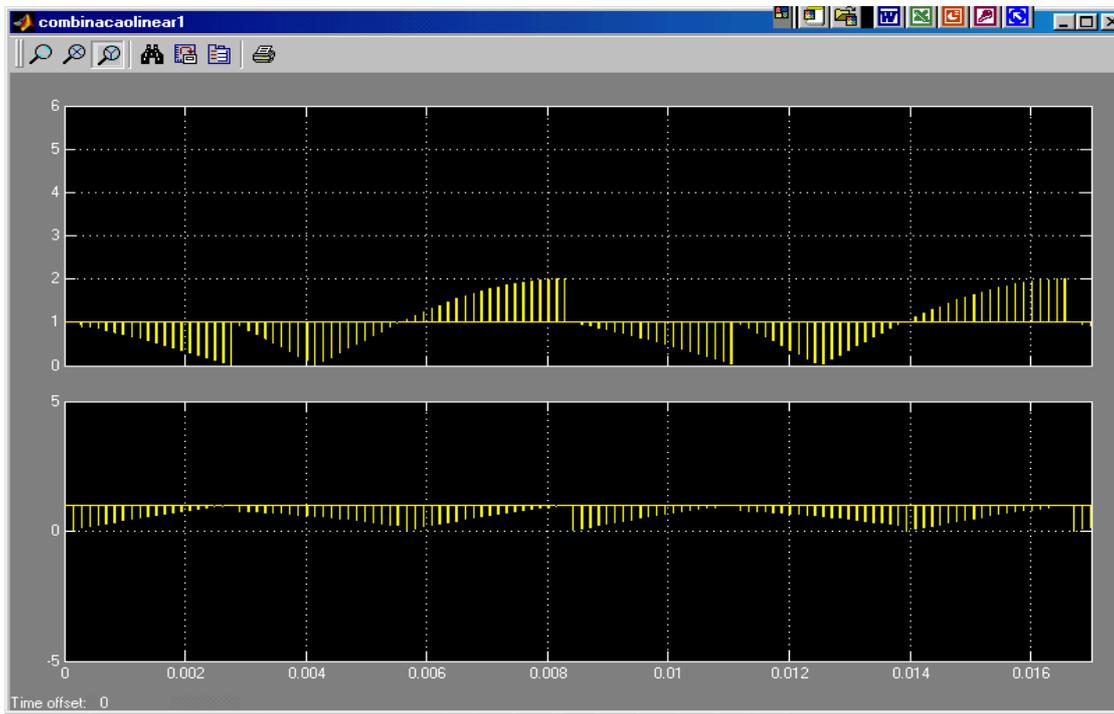


Figura 4.23 Saída dos Valores das razões Cíclicas δ' e δ''

4.3.2.2. O Circuito Retificador

Conforme já mencionado, o barramento CC pode ser alimentado de diversas formas, sendo mais comum, o uso de um circuito retificador alimentado pela própria rede. Algumas das alternativas para implementar o circuito retificador são através de uma ponte trifásica com diodos ou tiristores, ou por uma ponte hexafásica com transformador de interfase. Os valores da tensão CC nos terminais destas pontes são:

$$V_{CC} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_a \cdot \cos \alpha = 2,34 \cdot V_a \cdot \cos \alpha \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$V_{CC} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot V_a \cdot \cos \alpha = 1,17 \cdot V_a \cdot \cos \alpha \quad \text{Eq. 4.7}$$

Onde V_a é tensão fase-neutro (valor rms), com a relação de transformação 1:1. e α é o ângulo de disparo dos tiristores da ponte.

Com diodos o $\cos(\alpha)$ é sempre 1 pois não se tem controle do disparo.

Com um sistema tiristorizado, pode-se observar que para se ter uma tensão controlada no secundário de forma que mantenha a tensão CC constante é necessário sobre-dimensionar os tiristores. Para se elevar a tensão CC, num afundamento, seria necessário uma V_a (tensão secundária do transformador retificador) maior, o que demandaria uma suportabilidade maior dos tiristores.

Uma alternativa seria um sistema de retificação também com modulação por largura de pulso (Habetler, 1993). Este esquema apresentaria, adicionalmente a vantagem de:

- Fator de potência unitário, e
- Reduzida introdução de harmônicos no sistema

Similarmente ao controle tiristorizado é também possível um fluxo de potência reverso, o que permitiria ao RDT (DVR) ter a disponibilidade de atenuar elevações momentâneas de tensão.

Um esquema de controle para este tipo de dispositivo pode ser visto na referência (Lee D-C.,2000). A idéia original foi proposta por (Noguchi T., 1998), é chamada de Controle Direto de Potência (DPC, Direct Power Control) e é similar ao conhecido controle direto de torque (DTC Direct Torque Control) para motores de indução.

4.3.3. O Controle / PLL

Primeiramente deve-se analisar os diversos componentes do sistema que corresponde ao RDT. Os equipamentos envolvidos, como se pode ver na Figura 4.3, são:

- O transformador para o retificador, caso a alimentação seja externa;
- O sistema de retificação, para alimentação do barramento cc;
- O barramento cc;
- O sistema de inversão;
- O filtro;
- O transformador elevador

Daí os sistemas de controle que devem abranger as seguintes funções:

- Manter a tensão do consumidor dentro do limite especificado e para isto é necessário:
 - Detectar a frequência a fase e a amplitude das tensões da rede para fornecer o erro que acionará o disparo das chaves
 - Controlar a tensão de saída do filtro, ver capítulo 4.3.4
 - Manter a tensão do barramento CC constante;
 - Considerar, quando do controle da tensão de saída do filtro, as variações na carga, quando o RDT (DVR) estiver atuando

O sistema de controle é extensivamente examinado na referência (Silva, 1999), não tendo sido implementado nesta dissertação.

É claro que para se fornecer a diferença de tensão que complete a tensão nominal da carga é necessário o controle de sincronismo e o controle de amplitude de tensão. Uma informação acurada do ângulo de fase e da frequência é crítico para o controle do RDT, que tem de operar sob condições desequilibradas e distorcidas. Desequilíbrios de tensão causam erros na determinação do ângulo de fase quando se usam métodos convencionais. O sincronismo entre as tensões do sistema e as tensões geradas pelo conjunto de inversores e transformadores é feito por um oscilador bloqueado em fase, ou PLL, (phase locked loop), visando capturar a componente positiva da tensão.

Existem várias maneiras de usar um PLL para detectar a frequência e o ângulo espacial do vetor de tensão. A Figura 4.24 mostra um exemplo que foi utilizado nas referências (Cavaliere, 2001), (Aredes, 1996) e (Akamatsu & Itho, 1998). Outros esquemas de PLL podem ser encontrados em (Kaura, & Blasko, 1997). O PLL da Figura 4.24 (Cavaliere, 2001), é um circuito que realiza a detecção da frequência e fase dos sinais de seqüência positiva das tensões do sistema elétrico mesmo que estes estejam misturados a sinais de harmônicos e de seqüências negativa e zero. A seguir é feito um breve resumo do funcionamento do PLL.

Conforme mostrado no esquema da Figura 4.24, as tensões medidas são colocadas em função dos valores fase-fase, v_{ab} e v_{bc} . Os valores de tensão v_a , v_b , e v_c , são normalizados.

As tensões fase-fase normalizadas são multiplicadas por correntes fictícias criadas através da realimentação do sinal de frequência observado, w , e integrado, $w.t + q$. O resultado desta operação são as potências P_1 e P_2 , as quais são somadas resultando na potência P .

Em regime permanente, as correntes fictícias fazem um ângulo de 90° adiantadas em relação às tensões. Quando isto ocorre, a potência P é zero, o circuito se estabiliza, e a frequência e fase das tensões está detectada.

Para uma implementação real, o PLL necessita de um sinal de reinicialização de seu integrador. Isto ocorre porque o integrador não pode ficar integrando indefinidamente sem que haja saturação. No esquema mostrado na Figura 4.24, o integrador é “resetado” quando o valor de $\omega + t$ atinge $+\pi$ radianos, e neste instante, este mesmo integrador recebe a condição inicial de $-\pi$ radianos.

Uma amostra do transitório de partida do PLL da Figura 4.24 é dada nas Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27. Nestas figuras, é observado o desempenho dinâmico do PLL na detecção da frequência do sistema. O resultado da Figura 4.25, mostra a frequência, em radianos por segundo, Figura 4.26 o sinal de ângulo, e Figura 4.27 a tensão de teste do instante de partida do PLL até o regime permanente. A tensão de teste, V_a , e a tensão de teste reproduzida, V_{aPLL} , são variáveis criadas para ilustrar a capacidade do PLL gerar um sinal de sincronismo a partir de um sinal medido. A tensão de teste reproduzida é obtida do sinal de ângulo, $\omega.t + \varphi$, adicionado o atraso de 90° .

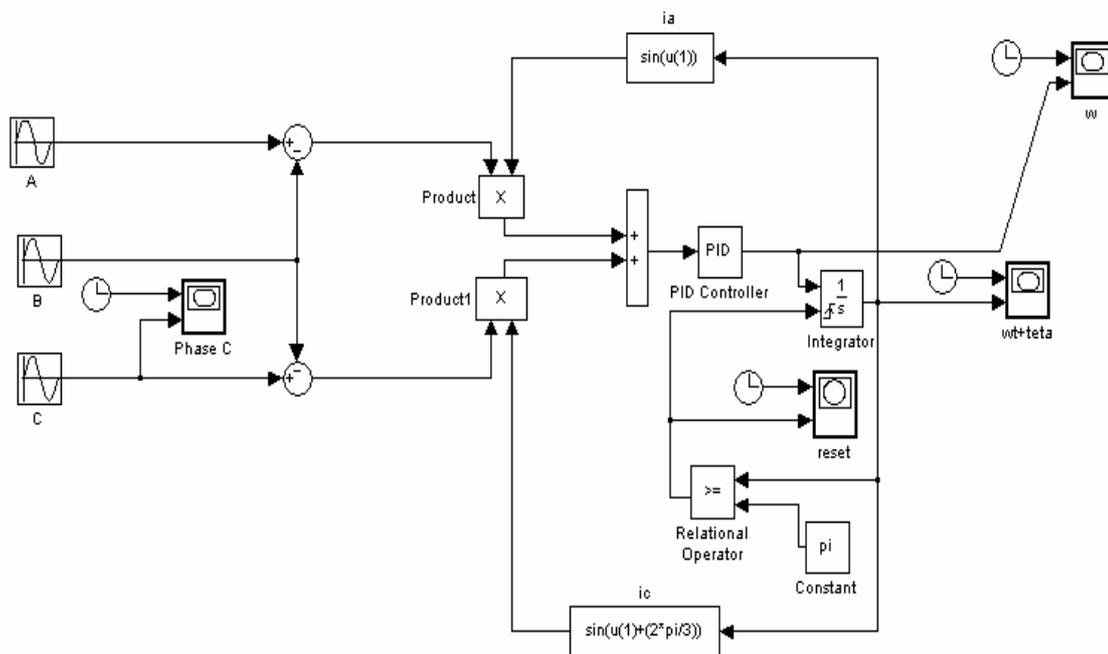


Figura 4.24 Esquema de oscilador bloqueado em fase

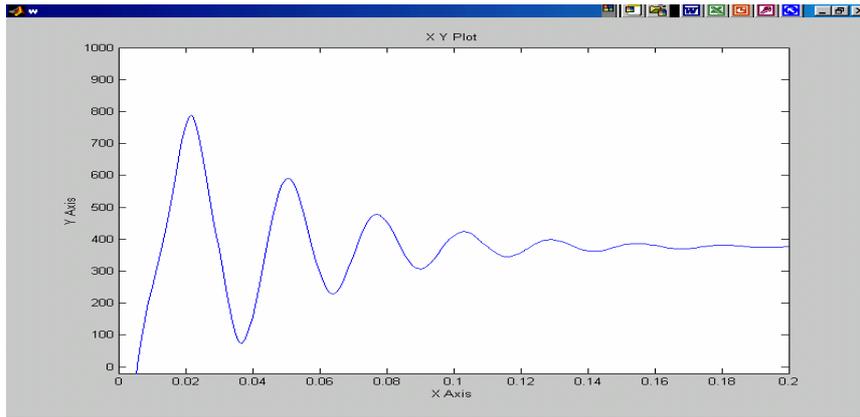


Figura 4.25 Detecção da Frequência da Rede pelo Oscilador Bloqueado em Fase em Radianos por Segundos (ω (rad/s) x tempo)

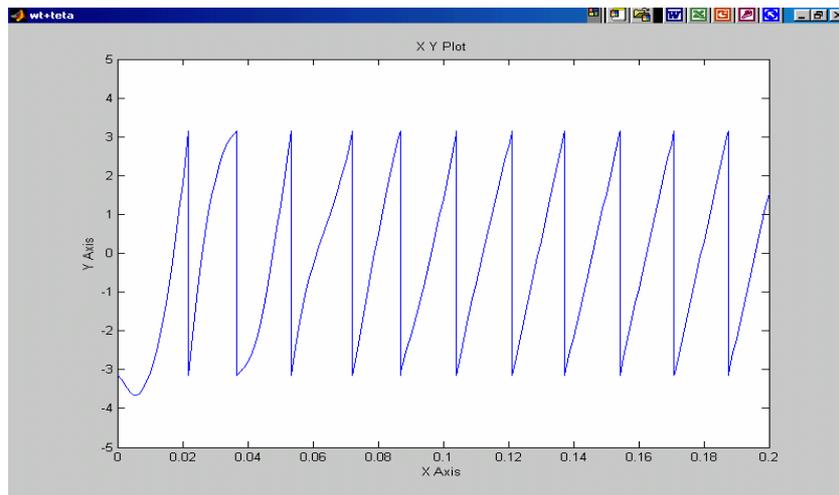


Figura 4.26 Detecção do Cruzamento com o Zero pelo Oscilador Bloqueado em Fase



Figura 4.27 Tensão de Teste, V_a , e a Tensão de Teste Reproduzida, V_{aPLL} com Sinal Gerado pelo Oscilador Bloqueado em Fase

Durante os primeiros instantes da partida, enquanto não há o sincronismo dos sinais, a frequência detectada, ω , oscila e estas oscilações são propagadas para o ângulo de sincronismo e, por consequência, para a tensão de teste. Este circuito obtém o valor de frequência (377 rad/s) em aproximadamente 150 ms. A partir deste momento, a frequência detectada se estabiliza e as oscilações antes vistas no sinal de ângulo e na tensão de teste reproduzida desaparecem. Neste instante, o sinal de ângulo está sincronizado e a tensão de teste reproduzida fica perfeitamente sobreposta à tensão de teste, como é mostrado na Figura 4.27.

Pode-se aumentar ou diminuir o tempo de resposta dinâmica ajustando os ganhos do controlador proporcional-integral. Porém, deve-se observar que um PLL “rápido” pode levar o RDT (DVR) a uma resposta oscilante e um PLL “lento” pode levar a grandes erros de compensação durante transitórios. Observa-se que este PLL só realiza a detecção de frequência e fase. Este dispositivo não detecta as amplitudes, que são sujeitas a perturbações provocadas por componentes de seqüência negativa e zero, inclusive harmônicos.

Em outro esquema, além da frequência e da fase, também se disponibiliza o sinal equivalente ao valor rms da amplitude da tensão. Este esquema pode ser visto na

Figura 4.28, a seguir, baseado nas referências (Kaura, & Blako, 1997) e (Silva, 1999).

Neste caso, as tensões de fase V_a , V_b , e V_c , são obtidas das amostras das tensões das linhas. Elas são transformadas para um referencial estacionário com as tensões componentes V_α e V_β através da transformada da Eq. 4.1. A partir destas tensões, obtêm-se as grandezas em eixos síncronos V_d e V_q através de:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & +\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.8}$$

O ângulo θ desta transformação é gerado por uma malha de controle, cuja entrada é um sinal de referência para a tensão de eixo em quadratura V_q^* . Se esta referência é feita constante, as ações proporcional e integral da malha de controle farão com que o ângulo θ seja tal que as grandezas V_d e V_q sejam contínuas. Nesta situação, a entrada do bloco de integração, será igual à frequência da rede e a informação sobre a amplitude do vetor tensão estará contida nas grandezas V_d e V_q . Para uma tensão de referência $V_q^* = 0$, a tensão de eixo direto, V_d será igual à amplitude do vetor associado às tensões da rede. Portanto, este arranjo de Oscilador Bloqueado em Fase permite se obter os valores instantâneos da frequência, fase e amplitude da tensão da rede.

A saída V_d , que é igual à amplitude do vetor associado às tensões trifásicas, no caso 100V, pode ser visto na Figura 4.29. A Figura 4.30 apresenta a saída V_q .

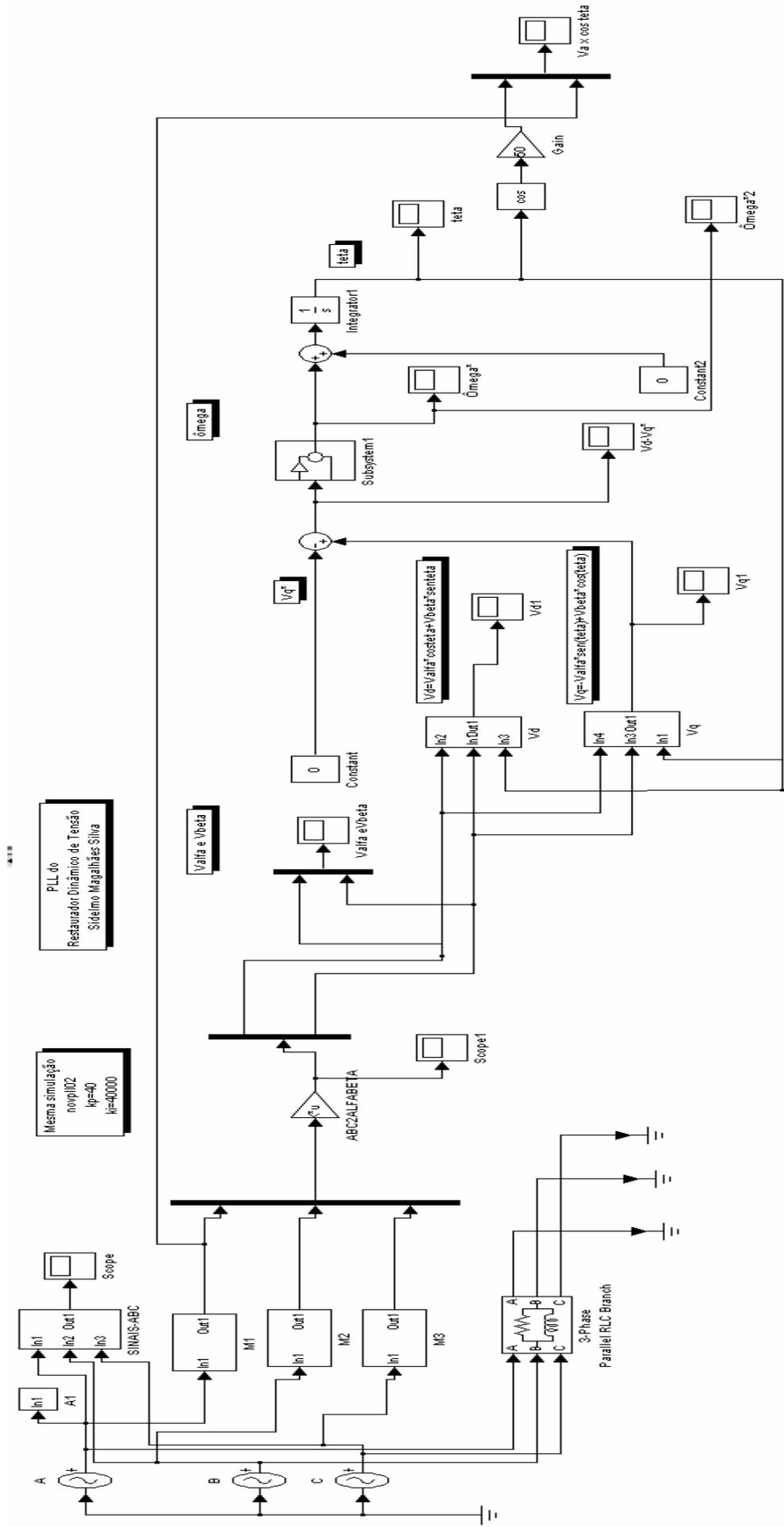


Figura 4.28 Oscilador Bloqueado em Fase - Parte 1

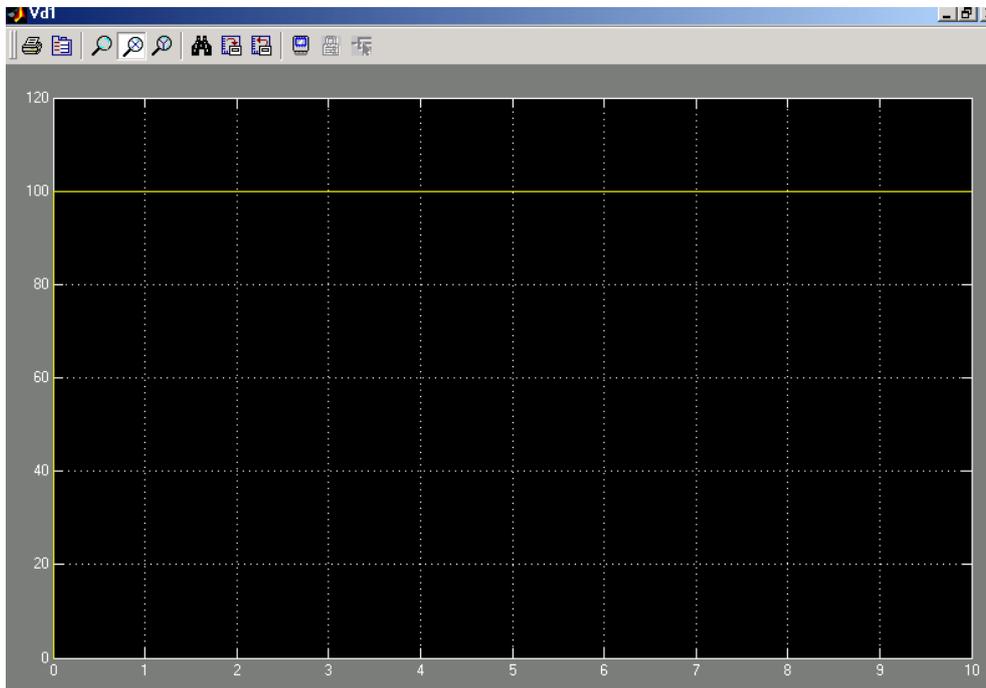


Figura 4.29 Saída V_d do Oscilador Bloqueado em Fase

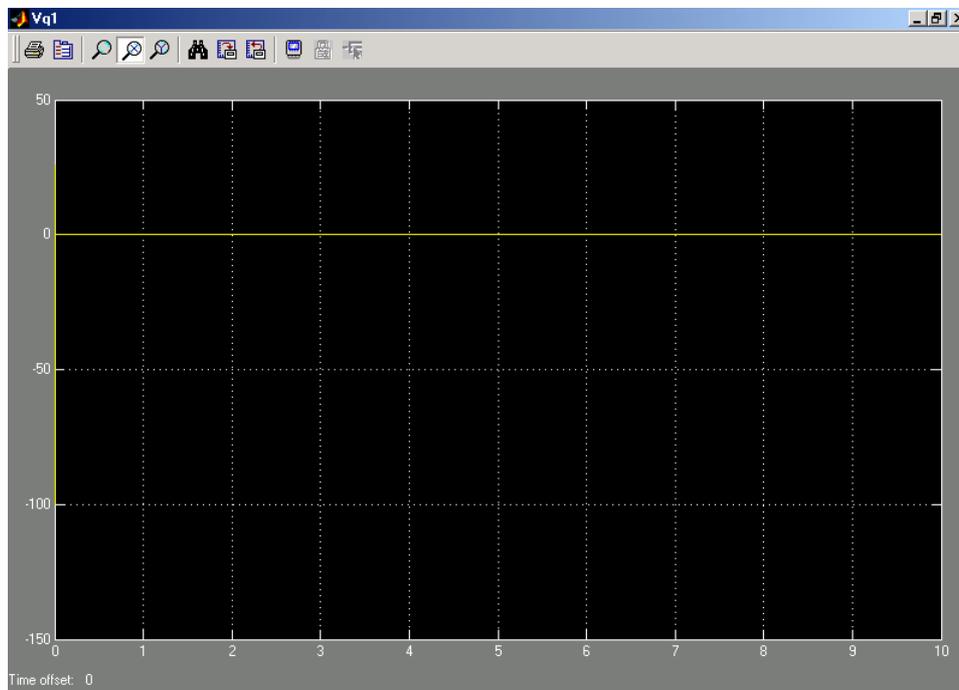


Figura 4.30 Saída V_q do Oscilador Bloqueado em Fase

As funções de proteção do RDT (DVR) podem ser implementadas via software. Proteção de corrente diferencial do transformador, ou curto-circuitos no lado da carga a ser protegida são dois exemplos das muitas funções de proteção possíveis. Dependendo da condição particular da falta interna ao RDT, que o torne inoperante, uma proteção e controle rápida deve chavear o RDT (DVR) para o modo de espera, assegurando um fluxo de energia ininterrupto para a carga (Daehler & Affolter, 2000).

Com o avanço da micro eletrônica, controle digital em tempo real usando processadores digitais de sinais (DSP – Digital Signal Processor) se tornou relativamente fácil. Os processadores digitais de sinais tornaram a maioria das instruções possíveis de serem executadas em um único ciclo e que algoritmos complexos de controle e proteção sejam processados rapidamente.

4.3.4. O filtro

O modelo dinâmico do filtro é semelhante ao de um motor CC, com coeficiente de amortecimento e constantes de torque e velocidade $B=0$ e $k_t = k_e = 1$. Portanto, as mesmas técnicas, aplicadas ao controle de velocidade de motores CC, podem ser utilizadas para o controle da tensão no filtro de saída do inversor (Ryan et al., 1997).

A Figura 4.31, mostra o controle trifásico do filtro, onde é usada a transformação das grandezas do sistema trifásico para um referencial síncrono.

4.3.5. Dimensionamento do RDT

No caso em estudado no Capítulo 5, o que se deseja compensar são os afundamentos momentâneos de tensão, por serem os mais comuns. Outra alternativa seria um sistema UPS que seria mais caro, mas que poderia viabilizaria um suprimento, inclusive, para interrupções. Portanto, ocasiões de interrupção momentânea de tensão, fenômeno de pequena probabilidade, não serão contempladas. Daí a escolha do RDT (DVR) via conversor CA / CC, como o mostrado na Figura 4.3, ao invés do sistema de energia ininterrupta (UPS).

Considerou-se como carga sensível toda a potência da indústria, ou seja, 19MVA.

Foi visto também que as redes de sub-transmissão são supridas através de transformadores cujo secundário está conectado em delta. Portanto, o restaurador dinâmico de tensão para esta indústria, não necessita da capacidade de síntese de tensão de seqüência zero.

Tipo de Carga

Em relação ao tipo de carga, deve-se lembrar que pode ser:

- Impedância constante – característica das cargas resistivas.
- Potência constante – característica dos motores
- Corrente constante – característica dos retificadores.

O dimensionamento do RDT (DVR) foi feito considerando a carga (19MVA) totalmente impedância constante, potência constante ou corrente constante. Mas, como há predominância de motores, foi considerado o dimensionamento obtido para cargas tipo potência constante.

4.3.5.1. Filosofia de Projeto do restaurador dinâmico de tensão.

Existem três filosofias de projeto do restaurador dinâmico de tensão que são (Silva, 1999):

- Compensação total da carga

O restaurador dinâmico de tensão injeta P e Q de tal forma haja o retorno da tensão e do ângulo da carga à situação anterior ao afundamento.

- Minimização da potência ativa injetada.

Neste caso, deve-se obter o ângulo de defasagem entre as tensões na carga antes e durante a ocorrência do afundamento, tal que minimize a potência ativa do restaurador dinâmico de tensão:

$$REAL \sum_{I=a,b,c} V_{RDTi} \cdot I_{Li} \rightarrow 0 \quad \text{Eq. 4.9}$$

Considerando a Figura 4.32, pode-se obter o diagrama fasorial da Figura 4.33.

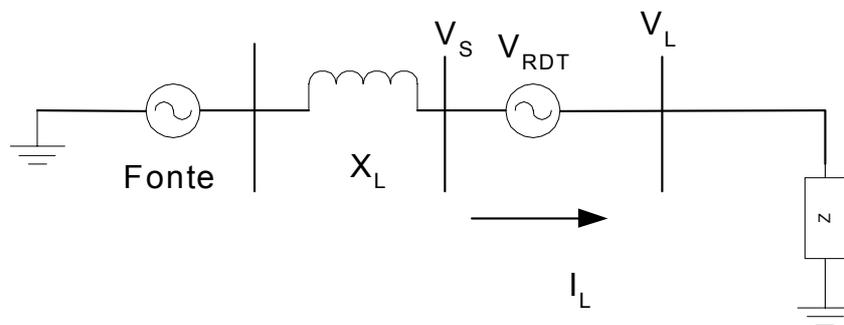


Figura 4.32 Sistema de Alimentação com um RDT

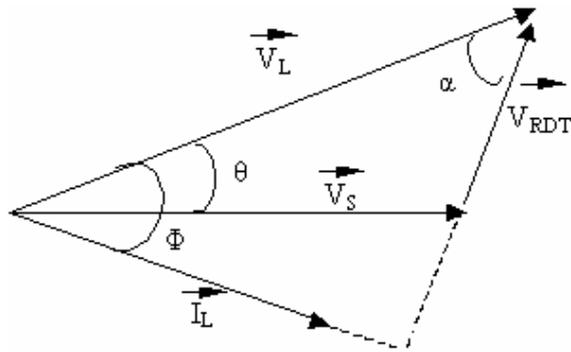


Figura 4.33 Diagrama Fasorial do Sistema da Figura 4.32

$$\vec{V}_L = \vec{V}_S + \vec{V}_{RDT} \quad \text{Eq. 4.10}$$

onde:

V_L = tensão nos terminais da carga

V_S = tensão da rede submetida a um curto

V_{RDT} = tensão injetada pelo RDT (DVR)

Considerando a potência ativa nula, a tensão V_{RDT} e a corrente no RDT, que é a mesma da carga, devem estar defasadas de 90 graus. Portanto,

$$\alpha = 90^\circ - \phi \quad \text{Eq. 4.11}$$

onde Φ é o fator de potência da carga

Desmembrando a equação das tensões considerando os componentes ortogonais das tensões

$$V_S \cdot \cos \theta + V_{RDT} \cdot \cos (90 - \phi) = V_L \quad \text{Eq. 4.12}$$

e

$$V_s \cdot \sin \theta + V_{RDT} \cdot \sin(90^\circ - \phi) = V_L \quad \text{Eq. 4.13}$$

A resolução destas duas equações conduz aos seguintes resultados

$$V_{RDT} = -\frac{V_S \cdot \sin \theta}{\cos \Phi} \quad \text{Eq. 4.14}$$

$$\cos(\theta + \Phi) = \frac{V_L \cdot \cos \Phi}{V_S} \quad \text{Eq. 4.15}$$

Estas equações permitem o cálculo do módulo e ângulo do vetor tensão a ser injetado pelo restaurador dinâmico de tensão para correção da tensão da rede segundo a filosofia da injeção nula de potência ativa.

Quando se deseja a minimização da potência ativa injetada é necessário que se faça com que a corrente da carga esteja em fase com a tensão da rede, de acordo com a Figura 4.34 a seguir

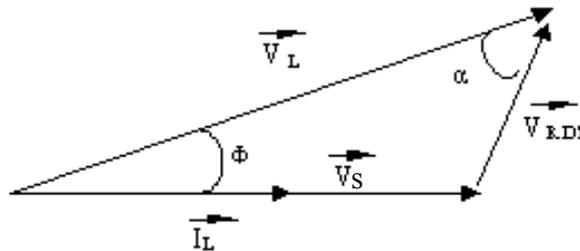


Figura 4.34 Diagrama Vetorial onde é Minimizada a Potência Ativa Injetada pelo RDT

- Minimização da potência aparente injetada.

Esta filosofia se consegue através de se obter a tensão injetada pelo restaurador dinâmico de tensão em fase com a tensão da rede, como pode ser vista na Figura 4.35 a seguir.

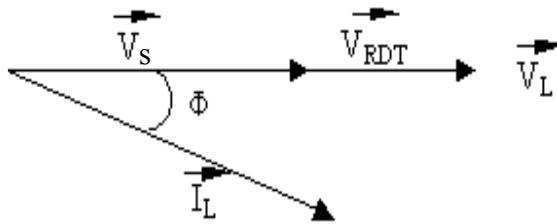


Figura 4.35 Diagrama Vetorial onde é Minimizada a Potência Reativa Injetada pelo RDT

Foram consideradas estas três filosofias de projeto, ou seja:

- 1 – minimização da potência ativa;
- 2 – minimização da potência aparente e
- 3 – compensação total;

e também foram calculadas para os três tipos de carga quais sejam:

- 1 – impedância constante;
- 2 – potência constante e
- 3 – corrente constante

Foi elaborado o programa DVR, para o cálculo da potência nominal do restaurador dinâmico de tensão necessário para a compensação da indústria têxtil em estudo, o que é dado pela corrente da carga, multiplicada pelo máximo desvio relativo da tensão necessária para a condição normal de funcionamento da carga (Burg, P. von, 1998). O programa DVR pode ser visto no Anexo 2.

Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 4.2, a seguir:

Tabela 4.2 Projeto do RDT (DVR) Para a Indústria em Análise

Tipo de Carga	Afundamento	Critério de Projeto	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
1	0,7	1	425,6	806,6	912,0
		2	496,5	100,8	506,6
		3**	538,2	80,1	544,1
			571,2	199,4	605,0
2		1	665,0	1260,3	1425,0
		2	775,0	157,0	790,7
		3	840,9	125,2	850,2
			892,6	311,6	945,4
3		1	532,0	1008,3	1140,0
		2	620,6	126,0	633,3
		3	672,7	100,1	680,1
			714,1	249,0	756,3
1	0,5	1	1438,9	806,6	1649,6
		2	1486,9	302,5	1517,4
		3	1519,4	173,2	1529,2
			1542,9	88,0	1545,4
2		1	2248,3	1260,3	2577,4
		2	2327,5	472,6	2375,0
		3	2374,0	270,6	2389,4
			2410,9	137,5	2414,8
3		1	1798,6	1008,2	2061,9
		2	1862,0	378,1	1900,0
		3	1899,2	216,5	1911,5
			1928,7	110,0	1931,8
1	0,1*	1	3465,6	806,6	3558,2
		2	3475,7	705,8	3546,6
		3	3481,7	679,9	3547,5
			3486,4	662,9	3548,9
2		1	5415,0	1260,3	5559,7
		2	5430,8	1102,8	5541,6
		3	5440,1	1062,4	5542,9
			5447,5	1035,7	5545,1
3		1	4332,0	1008,0	4447,7
		2	4344,6	882,2	4433,3
		3	4352,1	849,9	4434,3
			4358,0	828,6	4436,1

* Para esta intensidade de afundamento a configuração do RDT (DVR) não poderia ser com um retificador não controlado.

** Com o critério da compensação total foi usado variações de tensão, antes e durante o curto monofásico e trifásico diferentes, daí a obtenção de valores diferentes de potências.

Deve-se lembrar que a carga característica de uma indústria têxtil tem um comportamento do tipo potência constante (tipo – 2 predominância de motores). Para esta característica de carga e para afundamentos de 0,5 pu, a maior potência foi de 7MVA ($3 \cdot 2375 \text{kVA}$), para o projeto mais econômico que é o da minimização da potência aparente. Este valor corresponde a 36% da potência da carga a ser compensada.

5. Estudo de Caso

Neste capítulo, são analisados os problemas de afundamento momentâneo de tensão que afetam cargas industriais sensíveis, provocados por faltas nos sistemas de transmissão e distribuição.

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os resultados das avaliações da QE num consumidor industrial (19MW - 13,8kV) de um sistema de distribuição regional suprido pela CHESF conforme (GTQE, 1997) e reanalisado conforme (Fonseca et al., 2002), tendo sido corrigidos alguns dados e incorporado o resultado do dimensionamento do RDT (DVR) de acordo com o seção 4.3.5.

Esta análise abrange o levantamento de dados de desempenho das linhas da CHESF e da concessionária, o levantamento da área de vulnerabilidade para várias alternativas de mitigação em nível de sistema (transmissão e distribuição). Em seguida, é feita uma comparação econômica, considerando os benefícios destas alternativas em termos de diminuição do número de saídas por ano da indústria. Também é considerada uma solução em nível local através do RDT, sendo também feito um comparativo econômico.

Para cada alternativa analisada, foi quantificada a redução do número esperado de afundamentos de tensão inferior a 0,8 p.u. da tensão da barra de 13,8 kV da indústria, valor abaixo do qual pode ocorrer desligamento das cargas deste consumidor.

Os principais problemas de afundamento de tensão estão associados aos afundamentos momentâneos de tensão, decorrentes de faltas no sistema de transmissão e distribuição. Dessa forma, nas análises, foram determinadas as áreas do sistema de transmissão e distribuição (área de vulnerabilidade) onde a ocorrência de faltas provoca afundamentos momentâneos de tensão abaixo de 0,8 pu da tensão na barra da indústria (13,8kV).

A análise das possibilidades de melhoria do afundamento de tensão no regional contemplou a avaliação dos afundamentos de tensão na condição básica e, sobre estas condições, alternativas de mitigação, tal como a adição de linha expressa de 69kV ou 230kV, aumento da impedância dos transformadores de aterramento, separação de barramentos.

Foram estudados dois casos bases, o primeiro e o segundo ano. No segundo ano, foram consideradas obras de ampliação da rede, mas não diretamente motivadas pela melhoria da qualidade da energia do consumidor em apreço, embora tal melhoria ocorra com a adição de um circuito de reforço na transmissão, colocado por necessidade de ampliação da rede.

5.1. Diretrizes e Critérios

Foram adotados, na realização do estudo, os seguintes critérios e diretrizes :

1. Custos

Em nível de transmissão e sub-transmissão foram utilizados os custos médios da ELETROBRÁS (ELETROBRÁS, 2001).

2. Alternativas de Estudo

Foram consideradas alternativas mitigadoras em nível de transmissão, distribuição e localmente no consumidor.

3. Sensibilidade da Carga

Considerou-se que as cargas sensíveis na região da indústria apresentam uma sensibilidade elevada para afundamentos momentâneos de tensão superiores a 20% , ou seja , para uma tensão inferior a 0,8 pu, parte significativa da carga pode se desconectar do sistema de distribuição (Bingham R. P., 1998).

4. Tipos de Falhas

Os tipos de faltas a serem considerados para avaliação da severidade dos afundamentos momentâneos de tensão foram os curtos-circuitos monofásicos e trifásicos.

5. Níveis de Severidade dos Afundamentos de Tensão

Para se avaliar o nível de severidade das faltas supervisionou-se a tensão na carga na barra do consumidor estabelecendo-se a classificação de três faixas de afundamentos de tensão :

- Tipo A : a menor tensão na carga encontra-se na faixa de 0,8 a 0,7pu
- Tipo B : a menor tensão na carga encontra-se na faixa de 0,7 a 0,5pu
- Tipo C : a menor tensão na carga encontra-se na faixa de 0,5 a 0,1pu

6. Taxa de Falhas em Linhas de Transmissão e Distribuição

Com base no levantamento das taxas de falhas de curta duração de linhas de transmissão da CHESF adotaram-se para os níveis de 500KV, 230KV e 138KV, as seguintes taxas de ocorrências de faltas :

Tabela 5.1 Taxa de Falhas Por 100 Km Por Ano do Sistema de Transmissão

Nível de Tensão das Linhas de Transmissão	Taxa De Falhas Por 100 Km Por Ano
500KV	0,93 faltas/100km/ano
230KV	0,97 faltas/100km/ano
138KV	4,39 faltas/100km/ano

Para o sistema de Distribuição adotaram-se os dados resultantes das medições num regional suprido pela CHESF.

Tabela 5.2 Taxa de Falhas Por 100 Km Por Ano do Sistema de Sub-Transmissão e Distribuição

Nível de Tensão das Linhas de Transmissão	Taxa De Falhas Por 100 Km Por Ano
69KV	15 faltas/100km/ano
13,8KV	205 faltas/100km/ano

7. Distribuição das Taxas de Falhas

Os registros de ocorrências de faltas contemplam as ocorrências de faltas trifásicas(3F), trifásicas à terra (3FT), bifásicas à terra (2FT), bifásicas (2F) e monofásicas (FT) e ainda àquelas das quais não se dispõe de informações. Estas faltas foram agrupados em dois conjuntos (3F , 3FT e 2FT) e (2F e FT e sem informação). As faltas do conjunto (3F , 3FT e 2FT) produzem afundamentos de tensão muito próximos do curto-circuito trifásico e foram contabilizadas e simulados por faltas trifásicas. As faltas do conjunto (2F e FT e sem informação) foram contabilizadas e simuladas como monofásicas.

Considerando estes dois conjuntos de faltas, a distribuição das taxas de falhas para cada nível de tensão pode ser visto na Tabela 5.3, a seguir :

Tabela 5.3 Distribuição Percentual do Tipo de Falta e Taxa de Falha por Nível de Tensão

Nível de Tensão	Falta		Taxa de Falhas por 100Km/ano
	Trifásicas	Monofásicas	
500KV	10%	90%	0,93
230KV	15%	85%	0,97
138KV	25%	75%	4,39
69KV	30%	70%	15
13,8KV	40%	60%	205,0

5.2. Alternativas de Mitigação

A concepção das alternativas para mitigação dos problemas de afundamento de tensão são descritas na tabela a seguir. O objetivo de cada alternativa é resumido na Tabela 5.4 com base no seu efeito esperado sobre a redução do número de afundamentos de tensão ou da severidade dos afundamentos de tensão na indústria em análise.

Tabela 5.4 Alternativas de Mitigação

Alternativa	Descrição	Objetivo
A0	Abertura das Barras de 13.8 kV de algumas subestações	Redução das correntes de Curto - Circuito e conseqüente redução dos afundamentos de tensão
A1	Alimentação exclusiva para a indústria em 69kV	Isolar o consumidor das faltas no 69kV e 13.8kV do regional de Natal
A2	Alimentação da indústria em análise em 230kV	Isolar o consumidor das faltas no 69kV e 13.8kV do regional.
A3	Aumento da impedância do transformador de Aterramento	Redução das correntes de Curto - Circuito monofásicos e conseqüente redução dos afundamentos de tensão
A4	Instalação de compensadores síncronos 2x40MVAR no 230kV da subestação da transmissora	Aumento da regulação de tensão reduzindo os afundamentos de tensão
A5	Lançamento de um 2º circuito de reforço da transmissão (além do já planejado para o segundo ano)	Reforço do sistema transmissão
A6	Composição das alternativas A0 e A3	Efeito combinado destas alternativas
A7	Composição das alternativas A0 , A1 , A4 , A3	Efeito combinado destas alternativas
A8	Instalação de compensador síncrono 150MVAR no 230kV da subestação da transmissora	Aumento da regulação de tensão reduzindo os afundamentos de tensão
A9	Instalação de compensador síncrono 10MVAR na indústria em análise	Aumento da regulação de tensão reduzindo os afundamentos de tensão

5.3. Análise Técnica das Alternativas

Objetivo deste capítulo é avaliar as vantagens técnicas das diversas alternativas mitigadoras e os ganhos proporcionados pelas alternativas.

São estudados dois casos bases, o primeiro e o segundo ano cuja diferença se deve, principalmente, pelo comissionamento de um circuito de reforço na transmissão, previstos para o segundo ano do estudo. São quantificados os benefícios proporcionados, em termos de redução em relação ao previsto para o primeiro ano, do número esperado de afundamentos de tensão, inferior a 0,8 pu da tensão na barra de 13.8kV da indústria em análise, para os casos base.

A Figura 5.1 apresenta os números de afundamento de tensão igual ou superior a 20% (tensão remanescente 0,8 pu), por nível de tensão, por mês, para os casos base do primeiro e do segundo ano. Pode-se observar na abscissa o nível de tensão, enquanto na ordenada é apresentado o número de afundamentos, para o primeiro e o segundo ano. No gráfico do segundo ano é, também, apresentada a diminuição do número de afundamentos principalmente proporcionado pelo comissionamento do segundo reforço de transmissão para a região em estudo.

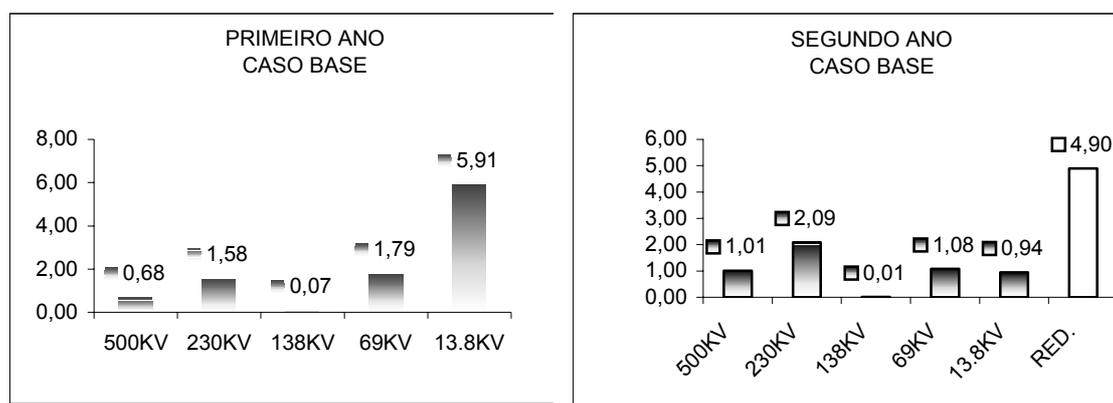


Figura 5.1 Número de Afundamentos Iguais ou Maiores que 20% (0,8 pu remanescente). Comparação dos Casos Bases do Primeiro e Segundo Anos de Estudo

No caso base segundo ano, a área incolor correspondente a 4,9 afundamentos de tensão, representa a redução do número de ocorrência do primeiro ano para o segundo ano, ou seja, uma redução de 48,85% no número de ocorrência de afundamentos de tensão. A redução em afundamentos de tensão por nível de tensão é muito significativa no 13.8 kV, passando de 5,91 ocorrências por mês no primeiro ano para 0,94 no segundo ano. De forma mais modesta, tem-se a redução no 69 kV de 1,79 ocorrência por mês no primeiro ano para 1,08 no segundo ano. Por outro lado, no sistema de transmissão, aumenta a expectativa de afundamentos de tensão nos níveis de 230 kV e 500 kV, devido aos reforços em linhas de transmissão.

5.3.1. Análise Técnica das Alternativas Mitigadoras

Apresentam-se, nas Figura 5.2 e Figura 5.3 a seguir, uma comparação entre as alternativas mitigadoras e os respectivos casos bases. Os valores estão expressos em termos do número esperado de afundamentos momentâneos de tensão por mês, superior a 20% (inferior a 0,8 pu) da tensão na barra de 13.8 kV da indústria em análise, e foram obtidos de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.4.

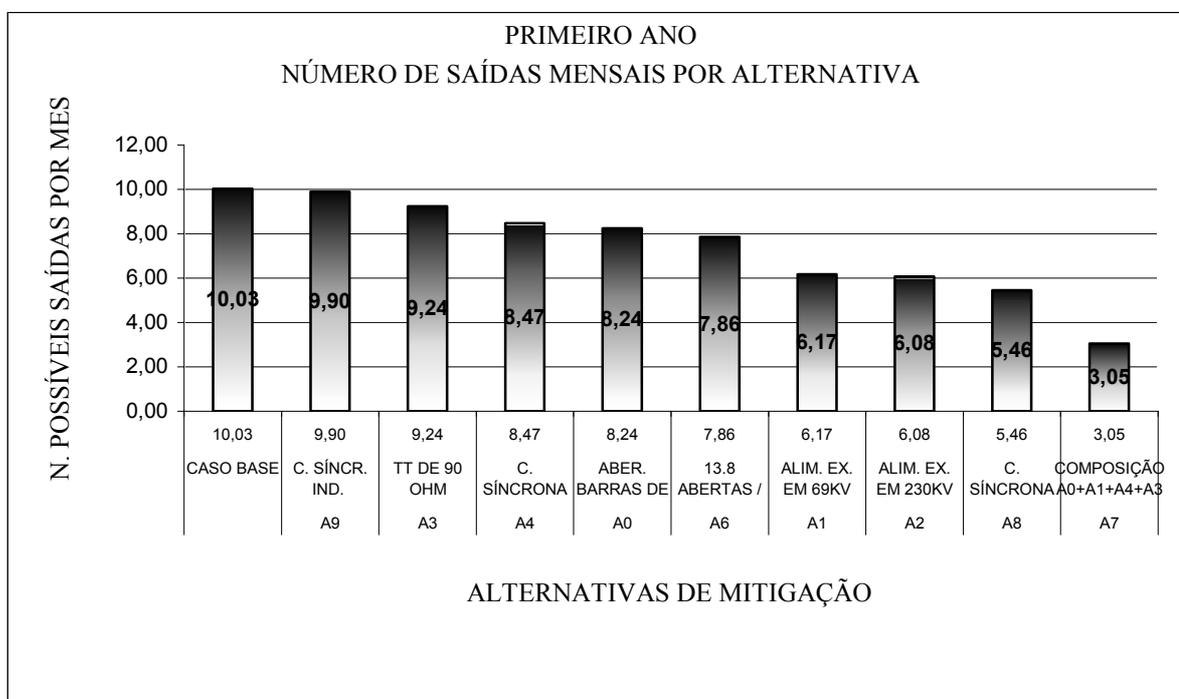


Figura 5.2 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Fim do Primeiro Ano(nº médio esperado).

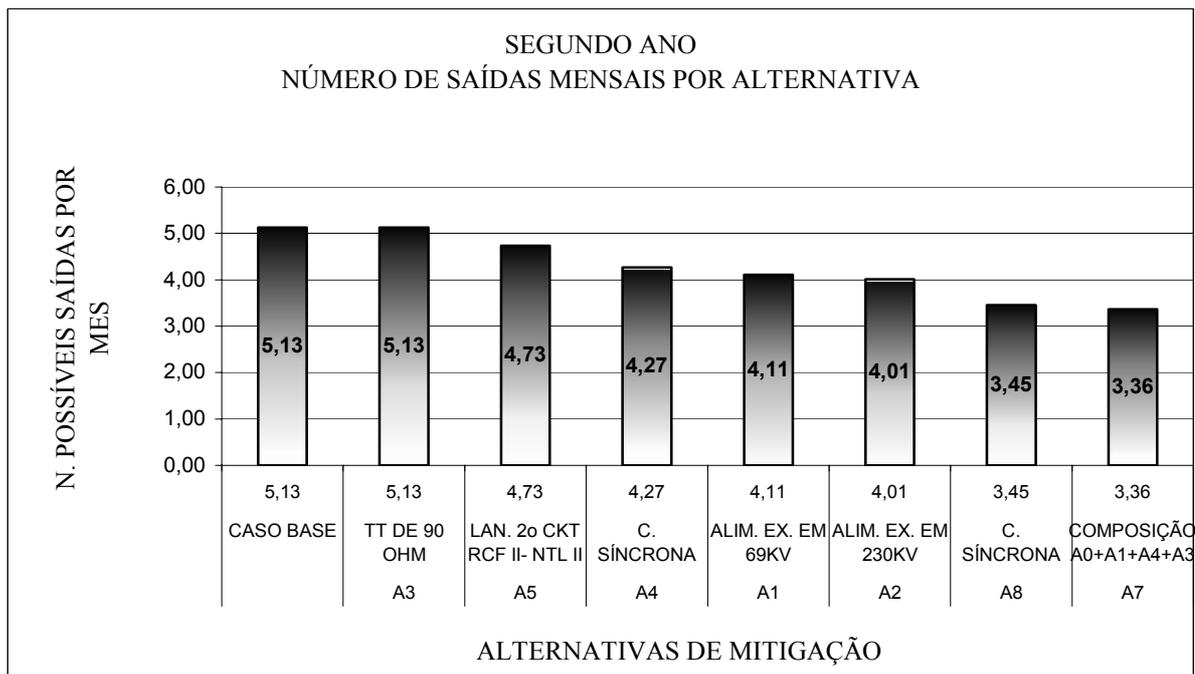


Figura 5.3 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o fim do segundo ano.

Nas Figura 5.4 e Figura 5.5, estes resultados são expressos em por cento dos respectivos casos base, o que permite uma melhor comparação entre as alternativas.

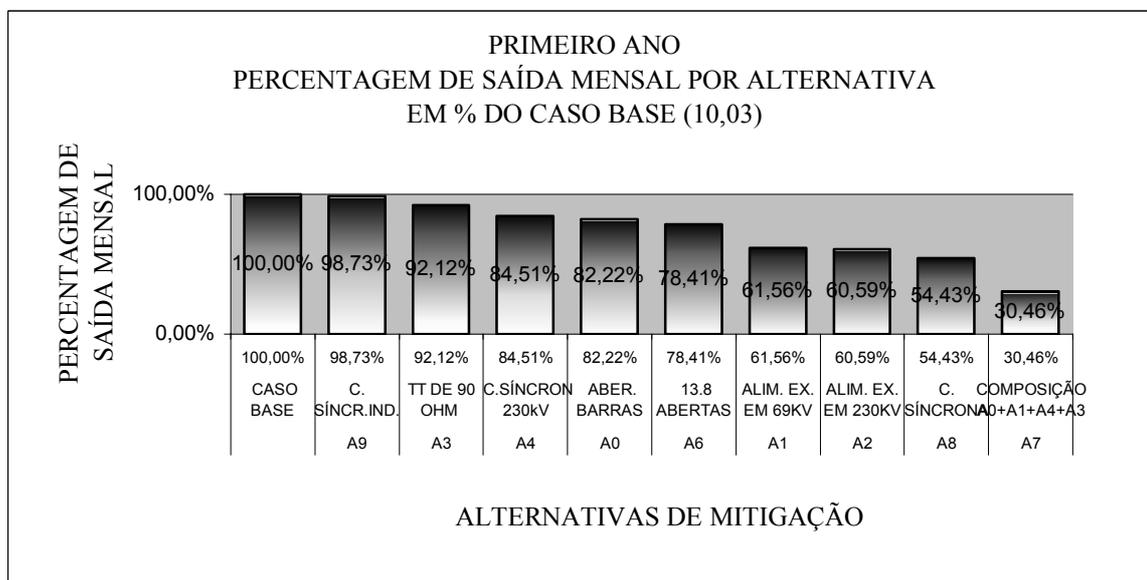


Figura 5.4 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Primeiro Ano

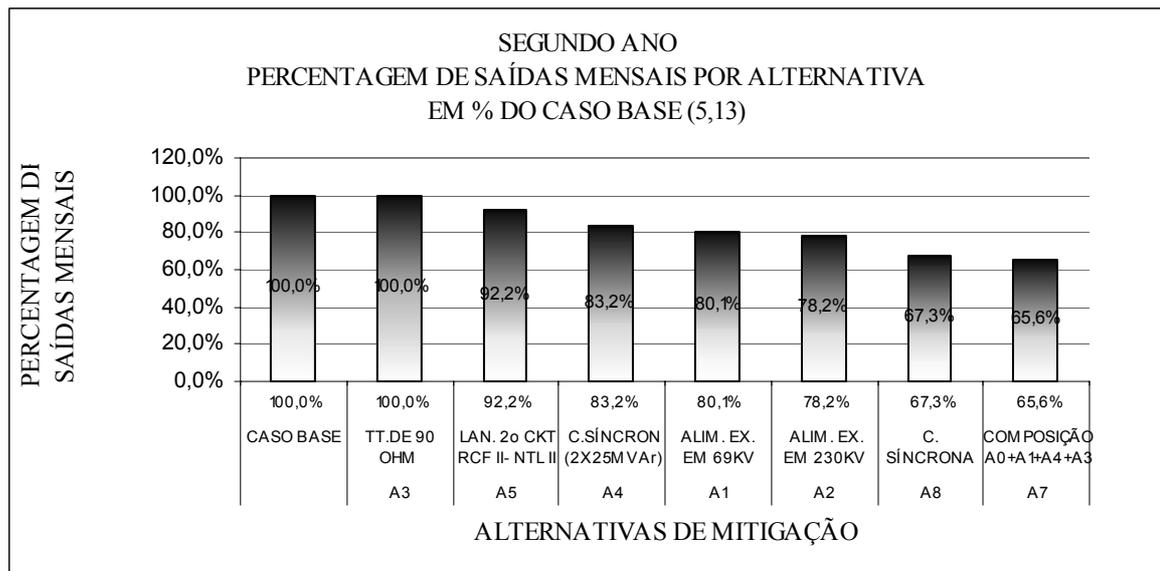


Figura 5.5 Distribuição dos Afundamentos de Tensão para o Segundo Ano.

As figuras anteriores mostram claramente os benefícios da alternativa A7, com redução de afundamentos de tensão de 70% e 35% em relação aos casos bases do fim do primeiro ano e do fim do segundo ano, respectivamente.

Observa-se, de forma global, que as diferenças entre as alternativas para o fim do primeiro ano e o fim do segundo ano, resultantes dos reforços de linhas de transmissão, conduzem a uma redução da expectativa de afundamentos provocados por defeitos na distribuição e aumento dos afundamentos provocados por defeitos na transmissão.

5.3.2. Perspectivas de soluções em nível de Consumidor

Os itens anteriores contemplam as soluções mitigadoras em nível de transmissão e distribuição. Entretanto, é possível estimar os benefícios da utilização de equipamentos condicionadores em nível de consumidor. Esta análise pode ser realizada se considerarmos a capacidade de mitigação dos equipamentos condicionadores.

Pode-se afirmar que a grande parte dos equipamentos condicionadores conseguem compensar afundamentos na faixa de 0,8 pu a 0,5 pu da tensão na carga. Isto já seria suficiente, pois como pode ser visto nas Figura 5.6 e Figura 5.7 os afundamentos

abaixo de 50% representam 9,3% e 21,4% do total dos afundamentos com tensão remanescente inferior a 0,8 pu. Este critério leva a escolha de condicionadores de menores dimensões.

Considerando-se a compensação dos afundamentos superiores a 50%, quantificou-se a diminuição do número esperado de afundamentos de tensão permitindo avaliar os benefícios com equipamentos condicionadores em nível de consumidor, especificamente o RDT. Pode-se observar, nas Figura 5.6 e Figura 5.7, que a introdução deste equipamento provocará uma diminuição de 9,1 e 4,0 afundamentos respectivamente para o primeiro e segundo anos, devido à compensação de tensões remanescentes entre 0,5 pu e 0,8 pu.

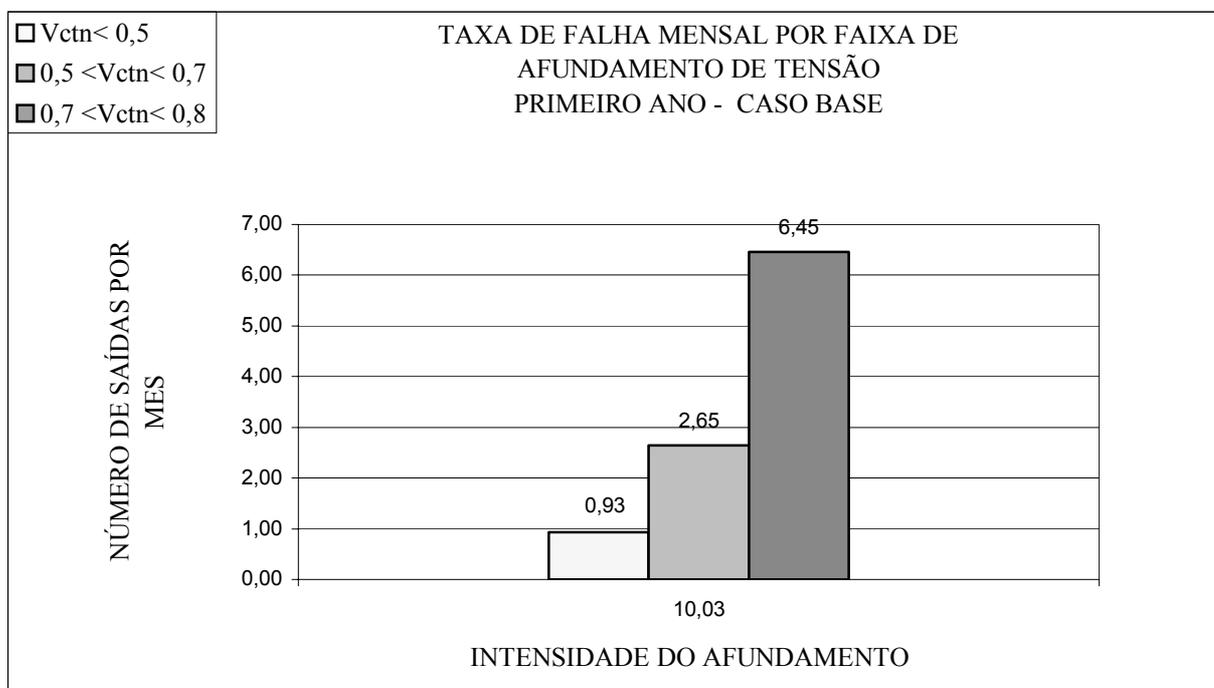


Figura 5.6 Afundamentos por Intensidade para o Primeiro Ano

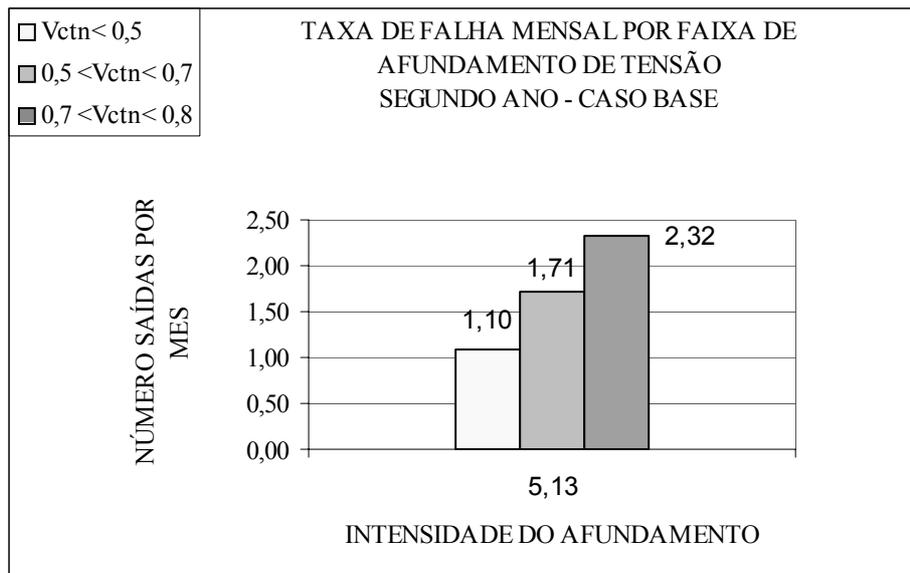


Figura 5.7 Afundamentos por Intensidade para o Segundo Ano

A Tabela 5.5 apresenta estes benefícios. Desta tabela, pode-se observar os ganhos bastante significativos proporcionados pela utilização de equipamentos condicionadores na indústria em análise. Observa-se que, para o primeiro ano, o número de afundamentos de 20% a 50% (entre 0,8 pu e 0,5 pu de tensão remanescente) foi de 9,1 (6,45 afundamentos de 20% a 30%, mais 2,65 afundamentos de 30% a 50%).

Tabela 5.5 Benefícios da utilização do RDT

Nº	Alternativa	Redução Nº ocorrências Primeiro Ano / mês	Redução Nº ocorrências segundo ano / mês	Benefícios o Primeiro Ano % de 10,03 (*)	Benefícios segundo ano % de 5,13 (*)
CB	Caso base	9,1	4,0	90,7	78,6

(*) Valores correspondentes ao caso base.

5.4. Análise Econômica das Alternativas

5.4.1. Solução em nível de Transmissão e Distribuição

A avaliação das alternativas mitigadoras pode ser resumida na Tabela 5.6 a seguir, onde são apresentados os benefícios de cada alternativa mitigadora em relação ao caso base, em termos da expectativa do número médio de ocorrências por mês de afundamentos de tensão na indústria em análise com severidade abaixo de 0,8 pu.

Tabela 5.6 Comparação das soluções em nível de Transmissão / Distribuição

Nº	Alternativas	Primeiro Ano		Segundo Ano	
		Nº ocorrências / mês	Nº ocorrências/mês (% c. base)	Nº ocorrências / mês	Nº ocorrências/mês (% c. base)
	Caso base	10,03	100	5,13	100
A0	Abertura de barras	8,24	82,2	(*)	(*)
A1	Alim. em 69 kV	6,17	61,5	4,11	80,1
A2	Alim. em 230kV	6,08	60,6	4,01	78,2
A3	TT de $X_0/X_1 \cong 10$	9,24	92,1	5,13	100
A4	CS de 2x40MVA _r	8,47	84,5	4,27	83,2
A5	2º Reforço de Transmissão	-	-	4,73	92,2
A6	Comp. A0+A3	7,86	78,4	5,13	100,0
A7	Comp.A0+A1+A4+A	3,05	30,5	3,36	65,6
A8	CS 150 MVA _r	5,46	54,4	3,45	67,3
A9	CS 10MVA indústria	9,90	98,7	5,13	100,0

(*) Abertura das barras de 13,8 kV foi considerada em todas alternativas de segundo ano.

Os benefícios de cada alternativa mitigadora podem ser contabilizados para cada ano horizonte, em termos de redução do número médio esperado de ocorrências de afundamentos momentâneos de tensão por mês em relação ao respectivo caso base (primeiro ano e segundo ano).

A Tabela 5.7 apresenta a redução da expectativa de ocorrências de afundamentos momentâneos de tensão por mês, em por cento, dos respectivos casos bases.

Para se determinar os benefícios econômicos de cada alternativa, pode-se calcular os custos da energia não suprida ao consumidor. Estes custos podem ser estimados por dois índices:

- Custo da energia não suprida da CHESF - CENS : R\$ 40,00/MWh, considerada o mesmo que a tarifa;
- Custo social da energia não suprida - CSENS : US\$ 1.000,00/MWh

Tabela 5.7 Comparação dos Benefícios das Alternativas

Nº	Alternativas	Benefício para Primeiro Ano (% de 10,03)	Benefícios segundo ano (% de 5,13)
	Caso base	0.0	0.0
A0	Abertura de barras	17,8	-
A1	Alim.em 69 kV	38,5	19,9
A2	Alim.em 230kV	39,4	21,8
A3	TT de $X_0/X_1 \cong 10$	7,9	0.0
A4	CS de 2x40MVAr	15,5	16,8
A5	2º Reforço de Transmissão	-	7,8
A6	Comp. A0+A3	21,6	-
A7	Comp.A0+A1+A4+A3	69,5	34,4
A8	CS 150 MVAr	45,6	32,7
A9	CS 10MVA indústria em análise	1,3	-

Assumindo que o processo da indústria em análise é complexo para ser reinicializado, pode-se estimar para cada afundamento momentâneo de tensão uma interrupção média de uma hora. Assim, o custo da energia não suprida e o custo social da energia não suprida seriam :

Para o Primeiro Ano

Custo CHESF:

$$\text{CENS} = \text{Benefício (\%)} / \text{mês} \times 10,03 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times$$

$$\text{R\$ } 40,00 / \text{MWh}$$

Custo Social:

$$\text{CSENS} = \text{Benefício (\%)} / \text{mês} \times 10,03 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times$$

$$\text{US\$ } 1.000,00 / \text{MWh} \times 3,6 \text{ R\$/US\$}$$

Para segundo ano

Custo CHESF:

$$\text{CENS} = \text{Benefício (\%)} / \text{mês} \times 5,13 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times \text{R\$ } 40,00 / \text{MWh}$$

Custo Social:

$$\text{CSENS} = \text{Benefício (\%)} / \text{mês} \times 5,13 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times \text{R\$ } 1.000,00 / \text{MWh} \times 3,6 \text{ R\$/US\$}$$

Onde : Benefício (em %) é a redução (em % do caso base) do número esperado de afundamentos momentâneos de tensão por mês.

Estas hipóteses conduzem aos valores dos benefícios de cada alternativa mitigadora, apresentados na Tabela 5.8 :

Tabela 5.8 Contabilização dos Benefícios

Nº	Alternativas	Valor da ENS (R\$) Primeiro ano	Valor da ENS (R\$) Segundo ano	Valor Social da ENS (R\$) Primeiro ano	Valor Social da ENS (R\$) Segundo ano
A0	Abertura de barras	16.282,30		1.465.407,00	

A1	Alim. em 69 kV	35.583,23	9.310,31	3.202.490,74	837.930,10
A2	Alim. em 230kV	36.040,60	10.199,23	3.243653,85	917.933,47
A3	TT de $X_0/X_1 \cong 10$	7.226,41	0.0	650.377,29	0.0
A4	CS de 2x40MVA _r	14.178,41	7.859,96	1.276.056,72	707.398,27
A5	2º Reforço de Transmissão	-	3.649,27	-	328.434,91
A6	Comp. A0+A3	19.758,29	-	1.778.246,78	-
A7	Comp.A0+A1+A4+A3	63.574,15	16.094,21	5.721.673,68	1.448.482,18
A8	CS 150 MVA _r	41.529,01	15.298,86	3.737.611,29	1.376.900,21
A9	CS 10MVA indústria em análise	1.189,15	-	107.024,11	-

Os custos associados às alternativas mitigadoras para os horizontes fim do primeiro ano e fim do segundo ano, estão sumarizadas na Tabela 5.9, a seguir:

Tabela 5.9 Custo das Alternativas

Nº	Alternativas	Custos (R\$)
A0	Abert. barras	-
A1	Alim.em 69 kV	3.556.350,00
A2	Alim.em 230kV	4.418.660,00
A3	TT de $X_0/X_1 \cong 10$	285.000,00
A4	CS de 2x40MVA _r	6.447.560,00
A5	2º Reforço de Transmissão	10.434.949,00
A6	Comp. A0+A3	285.000,00
A7	Comp.A0+A1+A4+A3	10.033.910,00
A8	CS 150 MVA _r	19.308.810,00
A9	CS 10MVA na indústria	3.391.610,00

Totalizando-se os benefícios de cada alternativa para o fim do primeiro ano e o fim do segundo ano e calculando-se a relação custo/benefício, obtêm-se os valores registrados na Tabela 5.10. As melhores alternativas são aquelas que apresentam a menor relação custo/benefício.

Tabela 5.10 Relação Custo/Benefício

Nº	Alternativas	Benefício p/ os dois anos ENS (R\$)	Benefício Social p/ os dois anos ENS (R\$)	Custo (R\$)	Custo/Benefício	Custo/Benefício Social
A0	Abertura de barras	16.282,30	1.465.407,00	-	-	-
A1	Alim.em 69 kV	44.893,54	4.040.420,84	3.556.350,00	79,22	0,88
A2	Alim.em 230kV	46.239,83	4.161.587,32	4.418.660,00	95,56	1,06
A3	TT de $X_0/X_1 \cong 10$	7.226,41	650.377,29	285.000,00	39,44	0,44
A4	CS de 2x40MVA _r	22.038,37	1.983.454,99	6.447.560,00	292,56	3,25
A5	2º Reforço de	3.649,27	328.434,91	10.434.949,00	2859,46	31,77
A6	Comp. A0+A3	19.758,29	1.778.246,78	285.000,00	14,42	0,16
A7	Comp.A0+A1+A4	79.668,36	7.170.155,86	10.033.910,00	125,95	1,40
A8	CS 150 MVA _r	56.827,87	5.114.511,50	19.308.810,00	339,78	3,78
A9	CS 10MVA	1.189,15	107.024,11	3.391.610,00	2852,13	31,69

Observação: A troca dos transformadores de aterramento (Alternativa A3) será feita independente de custos, pois o valor X_0/X_1 para o segundo ano ultrapassa o valor de critério de planejamento. A abertura dos barramentos também será feita também por necessidade do sistema (superação do nível de curto-circuito). Portanto, estas alternativas não serão consideradas. Fica como proposta para casos similares.

As alternativas mais atrativas, ou seja, de menor relação custo/benefício seriam:

Tabela 5.11 Escolha das Alternativas Mais Atrativas

Nº	Alternativas	Custo/ Benefício	Custo/ Benefício Social	Redução Último Ano
A1	Alimentação em 69 kV	79,22	0,88	19,9%
A2	Alimentação em 230 kV	95,56	1,06	21,83%
A7	Composição A0+A1+A3+A4	125,95	1,40	34,4%
A8	CS 150 MVar	339,78	3,78	32,75%

A alternativa A8 na subestação abaixadora da CHESF 230 kV tem uma relação Custo/Benefício de aproximadamente 2,7 vezes o da A7 sendo, portanto, a alternativa A8 muito onerosa considerando-se apenas o benefício de afundamento de tensão.

A alternativa A7 apresenta um custo/benefício 59% e 32% superior as alternativas A1 e A2, mas leva a redução nos afundamentos de tensão significativamente superior (70% relativa ao primeiro ano). Dessa forma, as alternativas A1, A2 e A7 foram consideradas as mais atrativas, dentre as analisadas.

5.4.2. Solução em nível de Consumidor

O objetivo deste capítulo é avaliar a relação de custo / benefício da solução mitigadora baseada no uso de um restaurador dinâmico de tensão.

O custo de soluções mitigadoras em nível de consumidor industrial em análise é bastante elevado em termos de custo de investimento (US\$ 300,00 / kVA). Considerando este custo de investimento qual seria a relação custo / benefício de possíveis soluções mitigadoras em nível de consumidor ? Estas soluções seriam mais atrativas que em nível de sistema ? Para responder estas questões deve-se considerar os resultados apresentados na Tabela 5.5, bem como os da seção 4.3.5. A Tabela 5.5 mostra que utilização de equipamentos condicionadores pode conduzir aos benefícios em termos de redução do número de afundamentos de tensão como apresentado na Tabela 5.12.

A contabilização dos benefícios considerando o custo social da energia não suprida (ENS) de US\$ 1000,00 por MWh conduz aos seguintes valores:

$$\text{CSENS}_{10 \text{ ano}} = (90,7 / 100) / \text{mês} \times 10,03 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times \text{US\$ } 1.000,00 \text{ MWh} \times 3,6 \text{ R\$/US\$} = \text{R\$ } 7.466.989,96$$

$$\text{CSENS}_{20 \text{ ano}} = (78,0 / 100) / \text{mês} \times 5,13 \times 12 \text{ meses} \times 19 \text{ MW} \times 1 \text{ hora} \times \text{US\$ } 1.000,00 \text{ MWh} \times 3,6 \text{ R\$/US\$} = \text{R\$ } 3.284.349,12$$

Tabela 5.12 Valoração dos benefícios de equipamentos condicionadores na indústria em análise.

Nº	Alternativas	Benefícios Primeiro ano % de 10,03	Benefícios Segundo ano % de 5,13	Valor Social da ENS Primeiro ano (R\$)	Valor Social da ENS Segundo ano (R\$)
CB	Caso Base	90,7	78,6	7.466.989,96	3.284.349,12

O custo de investimento para o total da carga da indústria em análise de 19 MW, o que demandará a necessidade de 7MVA em equipamentos condicionadores, conforme foi visto na seção 4.3.5, pode ser estimado com base no valor de US\$300,00/kVA, o que resulta em 7000kVA x US\$ 300,00/kVA x 3,6R\$/US\$ = R\$ 7.560.000,00.

Assim a relação custo / benefício referente ao uso do RDT (DVR) para o primeiro ano e segundo ano está indicado na Tabela 5.13 a seguir:

Tabela 5.13 Relação Custo/Benefício

Nº	Alternativas	Benefício Social para os dois anos ENS (R\$)	Custo (R\$)	Custo / Benefício Social
CB	Caso Base	10.751.339,08	7.560.000,00	0,70

A Tabela 5.14 a seguir compara as relações custo / benefício social, das alternativas em nível de transmissão e distribuição com a da solução em nível de consumidor.

Tabela 5.14 Relação Custo/Benefício Social por Grau de Atratividade
Decrescente

Nº	Alternativas	Custo / Benefício Social
	Com RDT (DVR)	0,7
A1	Alimentação em 69 kV	0,88
A7	Comp. A0+A1+A3+A4	1,40
A2	Alimentação em 230 kV	1,06

Tais aspectos mostram as perspectivas de viabilidade econômica das soluções em nível de consumidor e podem justificar, em função do custo de interrupção do processo da indústria em análise, um estudo específico do consumidor, contemplando a avaliação de suas instalações, opções de aplicação de equipamentos condicionadores e análise de viabilidade econômico - financeira.

6. Conclusões

Com a sofisticação dos equipamentos de controle nas indústrias, principalmente com o crescimento e a popularização dos sistemas computadorizados e os sistemas eletrônicos, aumentou a sensibilidade dos sistemas de produção à qualidade da energia, principalmente, no caso das indústrias, ao afundamento momentâneo de tensão.

Seja pela quase inevitabilidade destas ocorrências, seja pelo alto custo das soluções em nível de sistema, deve-se sempre buscar soluções mais próximas dos consumidores possível.

A sofisticação da microeletrônica e da eletrônica de potência para aplicações industriais também deu origem a soluções para o sistema de suprimento em que se utiliza a eletrônica de potência. Ou seja, devido à necessidade de respostas rápidas demandadas para manter quase instantaneamente os níveis de tensão, surgiram soluções tal como o restaurador dinâmico de tensão, cujo tempo de resposta e a flexibilidade de ajuste causaram, no caso estudado, a diminuição de mais de 90% (para o primeiro ano de operação) das saídas de operação da indústria.

Estudos de viabilidade econômica, onde se considere não o custo social da energia não suprida, índice este sujeito a diversas interpretações, mas às perdas nas próprias indústrias causadas pela perda da produção, devem ser realizadas para justificar a aquisição destes equipamentos.

Por outro lado, caso as concessionárias sejam penalizadas pelo custo social, seria o caso de se fazer análises comparativas entre esta solução local ou outros investimentos no sistema, o que, como foi visto, apresenta baixa relação custo / benefício, por ser uma solução próxima da carga.

As concessionárias também podem oferecer um serviço onde a qualidade da energia, principalmente, sob o ponto de vista de afundamento momentâneo de tensão, seja superior ao exigido pelas agências reguladoras. No Brasil, ainda não existe uma exigência quanto a afundamento momentâneo de tensão, mas como foi visto, já existe no mundo, e em breve também haverá no Brasil. Como as tarifas são diferenciadas para estas áreas de melhor qualidade, há a possibilidade de que um investimento em equipamentos do tipo RDT (DVR) seja, também para as concessionárias, economicamente vantajosa.

6.1. *Sugestões de Continuidade*

O MATLAB – SIMULINK, tem ferramentas para simular, além do próprio sistema de controle, os equipamentos do sistema de potência (SimPowerSystems), os equipamentos eletrônicos de potência e os sistemas processadores de sinais digitais (DSP Blockset), o que a princípio, dá condições de simular todo o RDT, associado a um segmento do sistema de transmissão. Algumas partes do RDT (DVR) foram simuladas em SIMULINK no desenvolvimento desta dissertação, tais como o filtro, o sistema de retificação associado à rede de transmissão, oscilador bloqueado em fase, o sistema de modulação vetorial (SVM). No entanto, não foi possível ainda a montagem de todo o equipamento. Sabe-se que, em eletrônica de potência, vários tipos de análise precisam ser feitas. Para cada tipo de análise, existe um grau adequado de detalhamento da simulação no qual os componentes de circuito e o controle devem ser representados. É necessário reduzir até chegar ao nível do detalhamento das chaves para se obter as sobretensões, perdas, e outras sobrecargas nos componentes devido à característica não ideal das chaves. Portanto, uma das sugestões de continuidade seria a modelagem completa do RDT (DVR) associado ao sistema de potência. Deve ser vista a possibilidade da simulação em EMTDC, pela necessidade da simulação de grande parte do sistema de transmissão.

Outra sugestão está relacionada à tensão do barramento CC. É necessário se ter a resposta de quanto tempo se manteria a tensão CC a valores que permitissem a síntese da tensão V_{rdt} uma vez que, caso seja usado retificadores para alimentação do

barramento CC, estes retificadores também estariam submetidos ao afundamento de tensão.

Finalmente estes outros itens também devem ser estudados:

- Dimensionamento do filtro de saída
- Relação de transformação do transformador elevador.

7. Referências Bibliográficas

ABB, Dynamic Voltage Restorer, Principles of Operation, 2002

ABREU, J. P. G., CARVALHO J. M., CARVALHO P. L., Análise Do Impacto De Voltage Sags Sobre Equipamentos Eletrônicos, XIV SNPTEE Belém, 1997

AKAMATSU, M., ITHO, D., A Novell PLL and Frequency Detecting Method Suited for Abnormal Voltages Under Fault Conditions in the Power System”, Transactions IEEE, Japan Vol 118 B No 9 1998

ANEEL Resolução No 24 De 27 De Janeiro De 2000

ANSI C84.1 American National Standard for Electrical Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz),-1995

AREDES, M. Active Power Conditioners” PhD Thesis, Technische Universität Berlim, Berlin 1996

BEHNKE, M. R., BUCKLES, W. E., HUDSON, R. M., Development And Testing Of A 1.7 Mva Superconducting Magnetic Energy Storage Based Sag Protector. Electrical Energy Storage System Applications & Technologies, International Conference, Chester, 1998.

BICHELS, A., Determinação do Perfil de Afundamentos de Tensão em um Barramento de Subestação. XIV SNPTEE, Belém, 1997

BINGHAM, R. P., Sags and Swells. Revised February, 1998

BOLLEN, M. H. J., STYVAKTAKIS, S., Characterization Of Three-Phase Unbalanced Sags, as Easy as One, Two, Three”, IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, 2000.

BONATTO, B. D., MERTENS Jr, E. A., SILVA, E. S., DIAS L. F. S., Power Quality Assessment at Sensitive Loads, IEEE/PES T&D 2002, São Paulo, 2002.

BROECK, H. W., SKUDELNY, H. C., STANKE, G. V., Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors. IEEE Trans. Industry Applications, 1988.

BROOKS, D. L., GUNTHER, E., SUNDARAM W. A., Recommendations for Tabulating RMS Variation Disturbances With Specific Reference to Utility Power Contracts Palo Alto, Cigré 36.05 / CIRED 2 CC02,1999

BURG P., ALLMELING, J., Flywheel Based Power Quality Improvement In A Medium Voltage Grid. Electrical Energy Storage System Applications & Technologies, International Conference, Chester, 1998.

BUSO, S., ROSSETTO L., TOMASIN, T. P., POMILIO, J., A. Soft-Switched Current-Fed PWM Inverter with Space Vector Modulation". Proc. Of IEEE IAS'94, Denver, 1994

CAVALIERE, C. A., C. Análise de STATCOM Operando em sistemas desbalanceados. Tese de Mestrado na UFRJ, Rio de Janeiro, 2001

CHOON D., LMYOUNG, G. L., LEE, K. D., Method for voltage sag mitigation, Power Winter Meeting IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 36, NO. 3, Singapore, 2000.

DAEHLER, P., AFFOLTER, R., Requirements and Solutions for Dynamic Voltage Restorer, A Case Study. Power Winter Meeting, Sigapura, 2000

DAEHLER, P., AFFOLTER, R., Dynamic Voltage Restorer Requirements And Solutions For Dynamic Voltage Restorer, A Case Study, Turgi, 2002

DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN M. F., BEATY, H. W., Electrical Power Systems Quality 1a Edição, 1996

ELETROBRAS, Referência de Custos LTS e SEs de AT e EAT, DE/DEA/DEAT, 2001.

EPRI Waveform Characteristics Of Voltage Sags: Statistical Analysis”, WO-5461, 1998.

EPRI, Waveform Characteristics of Voltage Sags: Definition and Algorithm Development, TR-113044, 1999.

FONSECA L. C. A., ANDRADE, V. S., MACHADO A. C., Power Quality in an Industry Supplied by a Long Radial Transmission System. A Methodology of Avaliation of the Sag Using the ANAQUALI (CEPEL), VIII SEPOPE, Brasília, 2002

FONSECA L. C. A., VASCONCELOS A. N., OLIVEIRA P. N., MUNIZ F. A., A Qualidade De Energia Em Uma Indústria Suprida Por Um Longo Sistema Radial. Uma Metodologia De Avaliação Do Sag. III SBQEE, Brasília, 1999

GTQE – CTST – GCPS Estudo de Qualidade de Energia da Área de Natal. 1997

GUEIROS, D. A. C., BRONZEADO, H. S., CAVALCANTI T. H. Aspectos de Contratos de Fornecimento Diferenciados por Cláusulas Associadas à Qualidade da Energia Elétrica. XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999

HABETLER T. G., DC-Bus Voltage Control of Three-Phase AC/DC PWM Converters Using Feedback Linearization. IEEE Transactions On Power Electronics vol8, no 1 1993

HABETLER, T. G., A Space Vector-based Rectifier Regulator for ac/dc/ac Converters. European Power Electronics Conference, EPE '91, Firenze, 1991.

HONGFA, D., JUN, G., XIANZHONG, D., New Concepts of Dynamic Voltage Restoration for Three-Phase Distribution Systems IEEE /PES SM2000 Proceedings July 15-22, 2000

IEC 61000-2-5 Classification Of EM Environments Classification Of EM Environments Voltage Dips And Short Interruptions, Voltage Dips And Short Interruptions, Limits On Equip Fluctuations < 16A

IEEE Emerald Book (IEEE Std. 1100-1992), Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment IEEE, 345 E. 47th St., New York, NY, 10017-2394, 1992.

IEEE Std.1346 (D2.0,9/95), “Recommended Practice For Evaluating Electric Power Systems Compatibility With Electronic Process Equipment – Working Group Electric Power System Compatibility With Industrial Process Equipment -Pt 1. Voltage Sags“, Industrial & Commercial Power System, 1994 (Draft);

IEEE, Guide for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems. Rated 1 kV through 38 kV P1409, IEEE PES 1997 Winter Meeting, New York 1997

IEEE, Voltage Sag Indices- Draft 1.2 - Working Document for IEEE P 1564 and CIGRE 36-07, 2000

JENKINS N. Final Report: Battery Storage For Power Quality Improvement, Epsrc Grant GR/M03405/01 UMIST, Manchester 2002.

KAGAN, N., FERRARI, E. L., MATSUO M. N., DUARTE S., X., CAVARETTI, J. L., TENÓRIO, A., SOUZA, L. R., Proposição de Protocolo, Indicadores e Metodologia de Monitoramento de VTCDs em Sistemas Elétricos de Distribuição XV SENDI, 2002.

KAURA, V. & BLASKO, V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997

LEÃO P. C. A., OLIVEIRA J. C., RODRIGUES K. D., Conversores de Frequência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Temporários de Tensão (“Voltage Sags”). Revista Controle e Automação Vol. 14 No. 1 Jan. Fev. e Março 2003.

LEE D-C, LEE G-M, LEE, K-D. DC-Bus Voltage Control of Three-Phase AC/DC - PWM Converters Using Feedback Linearization IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 36, No. 3, May/June 2000

MARTINS A. A., CHAVES M. L. R., Diminuição de Vida Útil, Aumento da Temperatura e Derating de Cabos Elétricos Monofilares em BT. XVI SNPTEE, 2001

MUELLER D., McGRANAGHAN M., Effects of Voltage Sags in Process Industry Applications. McGraw-Hill 1996

NOGUCHI T., TOMIKIO H., KONDO, S., TAKAHASHI, I., Direct Power Control of PWM Converter Without Power-Source Voltage Sensors. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 34, No 3, 1998.

NRS – 048, ELECTRICITY SUPPLY – QUALITY OF SUPPLY – Part 1 Minimum Standards, For Application By The National Electricity Regulator, South Africa, 1998.

OGASAWARA, S., AKAGI, H. NABAE, A. A Novel PWM Scheme of Voltage Inverter Based on Space Vector Theory. European Power Electronics Conference, EPE '89, Aachen, 1989

ONS-2.1-022/2001 Estado da Arte de Indicadores para Afundamentos de Tensão

POMÍLIO, J. A., Eletrônica de Potência, <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/elpot.html>, 2000.

RAMOS, A. J. P., BRONZEADO, H. S., LINS, L. R., Proposta de Procedimentos entre Empresas de Energia Elétrica e seus Consumidores Visando a Melhoria da Qualidade da Energia Elétrica, XIV SNPTEE, Belém, 1997.

REI ANDRÉA Et Ali. Regulação e Monitoração da Qualidade na Rede Básica – Indicadores de Continuidade de Serviço, XVI SNPTEE, Campinas 2001

RYAN, M., J., BRUMSICKLE, W., E., LORENZ, R., D., Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverters. IEEE-Transactions on Industry. Application., vol. 33, no. 2, , 1997.

SABIN D. D., GREBE T. E., SUNDARAM A., RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance.

Proceedings of the IEEE/PES 1999 Winter Meeting Power, pp. 1235-1240, New York, New York, Fevereiro 1999

SIEMENS, Power Quality Active Compensation. Power Engineering Guide. Transmission and Distribution.,4th Edition, 2002

SILVA S. M., Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão Tese de Mestrado. UFMg, 1999

THALLAM, R. S., Comments On Voltage Sag Indices, IEEE P1564 Internal Document, 2000;

THALLAM, R. S., HEYDT, G. T., Power Acceptability And Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense, IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, 2000.

VAN DER BROECK, H. W., SKUDELNY, H. C., STANKE, G. V., Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, pp 142-150, Jan/Feb 1988

WESTINGHOUSE POWER GENERATION, Dynamic Voltage Restorer, 1996 segundo o site da University of Missouri-Rolla.

http://www.ece.umn.edu/links/power/Energy_Course/energy/facts/dvr.htm

ZHAN, G. L. D., BOLLEN, M. H. J., A Method For Characterizing Unbalanced Voltage Dips (Sags) With Symmetrical Components, IEEE Power Engineering Letters, 1998.

8. Anexo 1

```
% patamar.m
%
%
% Programa para a Detenção do valor da amostra
% Luiz Carlos de Alcantara Fonseca
% 14/08/2002
%
%
function [z] = patamar(a,teta,velha)
if a~=velha
    amax=a/sin(teta);
    x=amax*cos(teta);
    y=a;
else
    x=0;
    y=0;
end
z=[x,y];
```

```

% Sextante.m
%
%
% Programa para a Alocacao de um Fazor nos Sextantes
% Luiz Carlos de Alcantara Fonseca
% 13/08/2002
% Tem que entrar con os dados de x(eixo real) e y (abcissa)
%
%
function [sexa] = sextante(x,y)
sessenta=60*pi/180;
tan60=abs(tan(sessenta));
tangente=y/x;
if x>=0 & y>=0
    if abs(tangente)>tan60
        sexa(1,1)=2.0;
    else
        sexa(1,1)=1.0;
    end
end
if x>=0 & y<=0
    if abs(tangente)>tan60
        sexa(1,1)=5.0;
    else
        sexa(1,1)=6.0;

    end
end
if x<=0 & y>=0
    if abs(tangente)>tan60
        sexa(1,1)=2.0;
    else
        sexa(1,1)=3.0;
    end
end
if x<=0 & y<=0
    if abs(tangente)>tan60
        sexa(1,1)=5.0;
    else
        sexa(1,1)=4.0;
    end
end
if x==0 & y==0
    sexa(1,1)=0;
end

a(3,1)=0;
a(3,2)=0;

```

```

a(3,3)=0;
switch sex
    case 1; % primeiro sextante
        a(1,1)=1;
        a(2,1)=0;
        a(1,2)=cos(sessenta);
        a(2,2)=sin(sessenta);
        a(1,3)=x;
        a(2,3)=y;
%    combinao linear
    case 2; % segundo sextante
        a(1,1)=cos(sessenta);
        a(2,1)=-cos(sessenta);
        a(1,2)=sin(sessenta);
        a(2,2)=sin(sessenta);
        a(1,3)=x;
        a(2,3)=y;
%    combinao linear
    case 3 %terceiro sextante
        a(1,1)=-cos(sessenta);
        a(2,1)=sin(sessenta);
        a(1,2)=-1;
        a(2,2)=0;
        a(1,3)=x;
        a(2,3)=y;
%    combinao linear
    case 4 % quarto sextante
        a(1,1)=-1;
        a(2,1)=0;
        a(1,2)=-cos(sessenta);
        a(2,2)=-sin(sessenta);
        a(1,3)=x;
        a(2,3)=y;
%    combinao linear
    case 5 % quinto sextante
        a(1,1)=-cos(sessenta);
        a(2,1)=cos(sessenta);
        a(1,2)=-sin(sessenta);
        a(2,2)=-sin(sessenta);
        a(1,3)=x;
        a(2,3)=y;
%    combinao linear
    case 6 % sexto sextante
        a(1,1)=cos(sessenta);
        a(2,1)=-sin(sessenta);
        a(1,2)=1;
        a(2,2)=0;
        a(1,3)=x;

```

```
    a(2,3)=y;
%    combinao linear

otherwise
    disp('valor desconhecido')
    a(1,1)=1;
    a(2,1)=1;
    a(1,2)=1;
    a(2,2)=1;
    a(1,3)=1;
    a(2,3)=1;
end
sex(2,1)=0;
sex(3,1)=0;
sexa=[sex,a];
```

```
function [z1] = combincaolinear(a)
```

```
if a(1,1)==0 & a(2,1)~= 0
```

```
    a(4,1)=a(1,1);  
    a(4,2)=a(1,2);  
    a(4,3)=a(1,3);
```

```
    a(1,1)=a(2,1);  
    a(1,2)=a(2,2);  
    a(1,3)=a(2,3);
```

```
    a(2,1)=a(4,1);  
    a(2,2)=a(4,2);  
    a(2,3)=a(4,3);
```

```
end
```

```
if a(1,1)==0 & a(2,1)==0 & a(3,1)~=0
```

```
    a(4,1)=a(1,1);  
    a(4,2)=a(1,2);  
    a(4,3)=a(1,3);
```

```
    a(1,1)=a(3,1);  
    a(1,2)=a(3,2);  
    a(1,3)=a(3,3);
```

```
    a(3,1)=a(4,1);  
    a(3,2)=a(4,2);  
    a(3,3)=a(4,3);
```

```
end
```

```
if a(2,1)==0 & a(3,1)~=0
```

```
    a(4,1)=a(2,1);  
    a(4,2)=a(2,2);  
    a(4,3)=a(2,3);
```

```
    a(2,1)=a(3,1);  
    a(2,2)=a(3,2);  
    a(2,3)=a(3,3);
```

```
    a(3,1)=a(4,1);  
    a(3,2)=a(4,2);  
    a(3,3)=a(4,3);
```

```
end
```

```
if a(2,1)~=0
```

```
    k21=-(a(2,1)/a(1,1));  
    a(2,2)=a(1,2)*k21+a(2,2);  
    a(2,3)=a(1,3)*k21+a(2,3);  
    a(2,1)=0;
```

```

else

    k3=-a(1,2)/a(2,2);
    a(1,2)=a(2,2)*k3+a(1,2);
    a(1,3)=a(2,3)*k3+a(1,3);

end

a(1,2)=a(1,2)/a(1,1);
a(1,3)=a(1,3)/a(1,1);
a(1,1)=1;

if a(2,2)~=0
%
    % Divisao por zero porque ?
%
    a(2,3)=a(2,3)/a(2,2);
else
    a(2,3)=1;
end

x1=abs(a(1,3));
y1=abs(a(2,3));
z1=[x1,y1];
end

```

9. Anexo 2

```
%          Calculo dos Nominais de DVR
%
%
%          Luiz Carlos de Alcantara Fonseca   21/11/2002   Versao 003
%
%
clear all
disp('*****
*****')
disp('***** Entrada de Dados do Programa DVR
*****')
disp('*****
*****')
fprintf('\n')
fprintf('\n')

sl = input('Qual a potencia da carga a ser compensada (KVA) ');
cosfi = input('Qual o fator de potencia da carga ');
fi=-acos(cosfi);
senfi=sin(fi);
tipo = input('Qual o tipo da carga : (1- Z const, 2- P const, 3- I const) ');
tensao= input('Qual a tensao nominal da carga : (V) ');
miniv= input(' Qual a menor tensao minima suportavel na carga (em pu) ');
mono= input(' Qual a tensao ocorrida no curto monofasico ( em pu) ');
tri=input(' Qual a tensao ocorrida no curto trifasico ( em pu) ');
crit = input('Qual o criterio de compensação do DVR : (1- Mini P Ativa, 2- Mini S
(Aparente), 3- Comp total) ');
if crit == 3
    teta1f = input('Qual a diferença angular da tensao do sistema antes e depois do curto
monofasico (graus) ');
    teta3f = input('Qual a diferença angular da tensao do sistema antes e depois do curto
trifasico (graus) ');
    teta1f = (pi/180)*teta1f;
    teta3f = (pi/180)*teta3f;
end
raiz3=sqrt(3);
invraiz3=1/raiz3;
%
% Começando o calculo
%
%          Calculo das Potencias Ativa e Reativa Nominais da Carga
%
```

```

ploadn=1000*sl*cos(fi);
ploadn=-1000*sl*sin(fi);
ploadn = ploadn / (raiz3*tensao*cosfi);
%
%
%      Calculo da impedancia para o tipo da carga impedancia constante
%      Tensao da Carga no Referencial Zero
%
%***** Carga do Tipo 1
%*****
if tipo==1 %      Z constante
    %      ***** Considerando a Tensao Nominal *****
    %

    rload = ploadn / (3*iloadn^2);
    xload = qloadn / (3*iloadn^2);
    zload = rload + i * xload ;

%***** Carga do Tipo 2
%*****

elseif tipo==2 %      P constante
    %      ***** Considerando Tensao Nominal *****
    %      Calculo da Corrente S = sl , P = ploadn e vl = miniv

    ipcte = (ploadn / ( 3 * ( tensao * invraiz3) *cosfi))*(cosfi + i * senfi);

%***** Carga do Tipo 3
%*****

else tipo==3 %      I constante

    iload = (ploadn / ( 3 * ( tensao * invraiz3) *cosfi))*(cosfi + i * senfi);

end

%
%
%      Calculo do Vdvr  m = 1 - Curto monofasico
%      m = 2 - Curto trifasico
%
vl = miniv * tensao * invraiz3;

%
```

```

%      Calculo da Corrente para a tensao minima suportavel pela carga
%      Para o tipo de carga impedancia constante

if tipo==1 %      Z constante
load = vl / zload;
end

%
%      Calculo da Potencia do DVR
%

%
%      Filosofia de Minimizaçao da Potencia Ativa
%

if crit == 1

    vs(1) = mono * tensao * (cosfi + i*senfi)* invraiz3 ;
    vs(2) = tri * tensao * (cosfi + i*senfi)* invraiz3;
end

%
%      Filosofia de Compensação Total
%
if crit == 3
    vs(1) = mono * tensao * (cos(teta1f) + i*sin(teta1f))* invraiz3 ;
    vs(2) = tri * tensao * (cos(teta3f) + i*sin(teta3f))* invraiz3;
end
%
%
%
%      Filosofia de Minimizaçao da Potencia Aparente
%
if crit == 2
    vs(1) = mono * tensao*invraiz3;
    vs(2) = tri * tensao*invraiz3;
end
%
%
%
%      Calculo do Vdvr
%
for m=1:1:2
vdvr(m)= vl - vs(m); % A tensao da carga esta no referencial
end

```

```

for m=1:1:2
    if tipo==2 & m==1
        iload = ipcte * (1/miniv);
    end
    if tipo==2 & m==2
        iload = ipcte *(1/miniv);
    end
    angulodvr = angle(vdvr(m))-angle(iloa);
    pdvr(m) = abs(vdvr(m))* abs(iloa) * cos(angulodvr);
    qdvr(m)= abs(vdvr(m))* abs(iloa) * sin(angulodvr);
end
fprintf('\n')
fprintf('\n')
disp('*****
*****')
disp('***** Saida do Programa DVR
*****')
disp('*****
*****')

fprintf('***** Calculo dos Nominais do DVR
*****\n')
fprintf('\n')
fprintf('***** Dados de Entrada
*****\n')
fprintf('* Potencia da carga a ser compensada (KVA) =
%6.3f *\n',sl )
fprintf('* Fator de potencia da carga =
%6.3f *\n',cosfi )
fprintf('* Tipo da carga (1- Z const, 2- P const, 3- I const) =
%6.3f *\n',tipo )
fprintf('* Tensao nominal da carga : (V) =
%6.3f *\n',tensao )

fprintf('* Menor tensao minima suportavel na carga (em pu) =
%6.3f *\n',miniv )

fprintf('* Tensao ocorrida no curto monofasico ( em pu) =
%6.3f *\n',mono )
fprintf('* Tensao ocorrida no curto trifasico ( em pu) =
%6.3f *\n',tri )

fprintf('* Crit. de Comp. do DVR : (1- Mini P , 2- Mini S , 3- Comp total ) =%6.3f
*\n',crit )
if crit == 3
    fprintf('* Diferença angular da tensao do sistema antes e depois do curto
monofasico (graus) =%6.3f *\n',teta1f/(pi/180) )

```

```

    fprintf('* Diferença angular da tensao do sistema antes e depois do curto trifasico
(graus) = %6.3f      *\n',teta3f/(pi/180) )
end
fprintf('*****
*****\n')

fprintf('\n')
fprintf('\n')
fprintf('*****      Dados de Saida
*****\n')
if crit == 1
    fprintf('*****Criterio da Potencia Ativa
Minima*****\n')
elseif crit==2
    fprintf('*****Criterio da Potencia Aparente
Minima*****\n')
else
    fprintf('*****Criterio da Compensação
Total*****\n')
end

fprintf('\n')
fprintf('*****
*****\n')
fprintf('Potencia ativa monofasica do dvr para curto monofasico (KW) = %6.3f
*\n',pdvr(1)/1000)
fprintf('*****
*****\n')
fprintf('Potencia reativa monofasica do dvr para curto monofasico (KVAr)= %6.3f
*\n',qdvr(1)/1000)
fprintf('*****
*****\n')
fprintf('Potencia ativa monofasica do dvr para curto trifasico (KW)= %6.3f
*\n',pdvr(2)/1000)
fprintf('*****
*****\n')
fprintf('Potencia reativa monofasica do dvr para curto trifasico (KVAr)= %6.3f
*\n',qdvr(2)/1000)
fprintf('*****
*****\n')

```