

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE SOLUÇÕES  
PARA MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS  
MOMENTÂNEOS DE TENSÃO**

**RODOLFO RIBEIRO DE OLIVEIRA**

Itajubá, Abril de 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODOLFO RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE SOLUÇÕES  
PARA MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS  
MOMENTÂNEOS DE TENSÃO**

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

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Abril de 2013  
Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

O48c

Oliveira, Rodolfo Ribeiro de

Uma contribuição à análise de soluções para mitigação de afun\_  
damentos momentâneos de tensão / Rodolfo Ribeiro de Oliveira. --  
Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013].

157 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Qualidade da energia. 2. Afundamentos de tensão. 3. Condi\_  
cionamento de energia. I. Carvalho Filho, José Maria de, orient. II.  
Silva, Carlos Henrique da, coorient. III. Universidade Federal de  
Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODOLFO RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DE SOLUÇÕES  
PARA MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS  
MOMENTÂNEOS DE TENSÃO**

Dissertação aprovado por banca examinadora em 30 de abril de 2013, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva (Co-Orientador)

Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá

Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira

Itajubá  
2013



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
 Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

**A N E X O II**

**FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA**

Título da Dissertação: "Uma Contribuição à Análise de Soluções para Mitigação de Afundamentos Momentâneos de Tensão"

Autor: Rodolfo Ribeiro de Oliveira

**JULGAMENTO**

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

**Observações:**

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
  - (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
  - (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A ou seja, APROVADO

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 30 de Abril de 2013.

Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá  
 1º Examinador - INATEL

Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira  
 2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva  
 3º Examinador (Co-Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. José Maria de Carvalho Filho  
 4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todos que de uma  
forma ou de outra contribuíram  
para sua conclusão.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Kennedy e Rita por todo e qualquer ato que fizeram pensando em mim, pensando no meu futuro. Terminar este trabalho é concretizar um sonho e também uma forma de agradecê-los por todo esforço feito para que eu pudesse chegar até aqui;

Ao meu irmão e familiares que sempre me instigaram a ser uma pessoa melhor, em especial minha Avó Teresa e minha Madrinha Regina que, por seus exemplos, me guiaram ser a pessoa que sou;

A Fabiana que dentre muitas outras coisas souber ser companheira. Soube ser a minha companheira para rir, para chorar, divertir, viajar, sonhar e também atrasar o término deste trabalho. Mas acima de tudo, foi responsável por me ajudar a juntar forças e seguir em frente nos momentos em que eu mais precisei;

Aos meus amigos que se fizeram presentes em todos os momentos de penar e diversão ao longo deste caminho. Cada um contribuiu à sua maneira para que eu tivesse forças para concluir esta jornada;

Aos professores do GQEE por todo conhecimento compartilhado e oportunidades concedidas para o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo desses últimos oito anos de vida acadêmica (Graduação e Mestrado);

Aos professores Thiago Clé de Oliveira e Carlos Henrique da Silva, sobretudo pelo apoio técnico e a amizade ao longo do desenvolvimento desta dissertação;

Ao professor José Maria de Carvalho Filho pela orientação, apoio, disponibilidade e todas as oportunidades oferecidas durante este processo;

Aos companheiros de república, de trabalho no GQEE e na UNIFEI pela amizade e momentos de descontração. O crescimento propiciado pela convivência com vocês não pode ser medido em palavras;

Aos profissionais da EDP Escelsa e Bandeirante pela parceria no P&D que proporcionou grande experiência pessoal e profissional durante os primeiros anos de desenvolvimento deste trabalho;

Aos funcionários do Instituto de Engenharia Elétrica, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e do Departamento de Registro Acadêmico, pelo auxílio nas horas mais improváveis e sobre os mais variados temas;

Aos colegas do Grupo CPFL Energia que ao longo deste último ano se tornaram parte da minha vida e merecem ser lembrados neste momento;

A CAPES e ao GQEE, pelo apoio financeiro;

Sem o apoio de todos Vocês dificilmente eu estaria aqui escrevendo estes votos de agradecimento.



# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	I
AGRADECIMENTOS .....	II
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>IV</b>
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	X
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E A RELEVÂNCIA DO TEMA .....	1
1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – CONCEITOS GERAIS .....</b>	<b>6</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	6
2.2. AFUNDAMENTO DE TENSÃO .....	6
2.2.1. <i>Considerações gerais</i> .....	6
2.2.2. <i>Caracterização do afundamento de tensão</i> .....	7
2.2.3. <i>Indicadores para afundamento de tensão</i> .....	9
2.2.4. <i>Variáveis de influência</i> .....	10
2.2.5. <i>Principais causas</i> .....	12
2.3. SENSIBILIDADE DAS CARGAS .....	12
2.4. FILOSOFIAS DE MITIGAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO .....	16
2.4.1. <i>Especificação do equipamento</i> .....	18
2.4.2. <i>Soluções para os sistemas de controle</i> .....	18
2.4.3. <i>Soluções gerais dentro da planta</i> .....	18
2.4.4. <i>Soluções no âmbito da concessionária</i> .....	19
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	20
<b>3. ARMAZENADORES DE ENERGIA .....</b>	<b>21</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
3.2. VOLANTE DE INÉRCIA .....	24
3.2.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	24
3.2.2. <i>Diferentes topologias e aplicações</i> .....	25
3.2.3. <i>Aspectos técnicos, econômicos e ambientais</i> .....	26
3.3. BATERIA .....	27
3.3.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	28
3.3.2. <i>Diferentes topologias e aplicações</i> .....	30
3.3.3. <i>Análise comparativa</i> .....	33
3.4. SUPERCAPACITOR .....	34
3.4.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	35
3.4.2. <i>Diferentes topologias e aplicações</i> .....	37
3.4.3. <i>Aspectos técnicos, econômicos e ambientais</i> .....	38
3.5. SUPERCONDUTOR (SMES) .....	39
3.5.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	39
3.5.2. <i>Diferentes topologias e aplicações</i> .....	41
3.5.3. <i>Aspectos técnicos, econômicos e ambientais</i> .....	42
3.6. ANÁLISE COMPARATIVA .....	43

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	47
<b>4. MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO ATRAVÉS DE SOLUÇÕES COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....</b>	<b>49</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	49
4.2. UPS ROTATIVO .....	50
4.2.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	51
4.2.2. <i>Diferentes topologias</i> .....	52
4.2.3. <i>Aspectos técnicos</i> .....	54
4.3. UPS ESTÁTICO .....	55
4.3.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	56
4.3.2. <i>Diferentes topologias</i> .....	57
4.3.3. <i>Aspectos técnicos</i> .....	64
4.4. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO – DVR .....	67
4.4.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	68
4.4.2. <i>Diferentes topologias</i> .....	69
4.4.3. <i>Aspectos técnicos</i> .....	74
4.5. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO – DYSC.....	75
4.5.1. <i>Princípio de funcionamento</i> .....	76
4.5.2. <i>Aspectos técnicos</i> .....	78
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	79
<b>5. MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO ATRAVÉS DE SOLUÇÕES SEM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....</b>	<b>82</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	82
5.2. REGULADORES DE TENSÃO.....	83
5.2.1. <i>Regulador de tensão com mudança eletrônica de tapes em transformador (TapChanger)</i> .....	83
5.2.2. <i>Regulador de tensão com mudança de tapes em transformador incremental (buck/boost)</i> .....	85
5.2.3. <i>Regulador de tensão constante (CVT – Trafo ferro-ressonante)</i> .....	86
5.3. CHAVE DE TRANSFERÊNCIA.....	88
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	92
<b>6. SOLUÇÕES RIDE THROUGH SYSTEM - RTS .....</b>	<b>94</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	94
6.2. ALIMENTAÇÃO CC DO SISTEMA DE CONTROLE .....	98
6.3. MUDANÇA DA RELAÇÃO V/Hz COM AJUSTE DE TAPE DO TRANSFORMADOR .....	98
6.4. MITIGAÇÃO REGENERATIVA.....	99
6.5. REDUÇÃO DA VELOCIDADE E/OU DA CARGA.....	101
6.6. UTILIZAÇÃO DE MOTOR COM TENSÃO REDUZIDA .....	101
6.7. ADIÇÃO DE CAPACITORES NO ELO CC.....	102
6.8. ADIÇÃO DE NEUTRO .....	103
6.9. CONVERSOR BOOST.....	104
6.10. CONVERSORES ATIVOS .....	105
6.11. RETIFICADOR HÍBRIDO TRIFÁSICO (RHT).....	106
6.12. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	107
<b>7. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>109</b>
7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	109
7.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....	110

7.2.1. Caracterização do sistema elétrico .....	110
7.2.2. Escolha dos processos monitorados .....	110
7.2.3. Definição do sistema de medição .....	113
7.2.4. Determinação da sensibilidade do processo .....	115
7.3. ESTUDO DE VIABILIDADE DE ALGUMAS POSSÍVEIS SOLUÇÕES .....	118
7.3.1. UPS estático.....	118
7.3.2. DVR.....	121
7.3.3. Solução combinada.....	126
7.3.4. Análise comparativa .....	128
7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	137
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>139</b>
8.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES .....	139
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	140
8.3. PUBLICAÇÕES.....	141
<b>9. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>151</b>
ANEXO 1 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO UPS PARA TODO O PROCESSO .....	151
ANEXO 2 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DO DVR PARA TODO O PROCESSO.....	152
ANEXO 3 - CÓDIGO FONTE UTILIZANDO PARA DETERMINAÇÃO DAS POTÊNCIAS DO DVR.....	153
ANEXO 4 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO UPS PARA OS MOTORES CC .....	157

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caracterização do afundamento de tensão segundo o ONS .....	7
Figura 2.2 – Caracterização do afundamento de tensão segundo o PRODIST .....	7
Figura 2.3 – Caracterização de afundamentos de tensão monofásicos (OLIVEIRA, 2008) ..	8
Figura 2.4 – Curva de tolerância CBEMA (LEBORGNE, 2003) .....	14
Figura 2.5 – Curva de tolerância ITIC (LEBORGNE, 2003) .....	14
Figura 2.6 – Curva de tolerância dos acionamentos a velocidade variável (LEBORGNE, 2003). .....	15
Figura 2.7 – Curva de tolerância segundo a norma SEMI F47- 0706 .....	16
Figura 2.8 – Soluções para reduzir os custos devido ao afundamento de tensão (DUGAN, MCGRANAGHAN, <i>et al.</i> , 2002). .....	17
Figura 3.1 – Esquema básico da bateria .....	28
Figura 3.2 – Realização de um ciclo de carga e descarga.....	29
Figura 3.3 – Estado de carga/descarga nos supercapacitores .....	35
Figura 3.4 – Supercapacitor do tipo ficha ou laminado (round).....	37
Figura 3.5 – Supercapacitor do tipo cilíndrico ou radial (spiral).....	37
Figura 3.6 – Supercapacitor do tipo prismático (prismatic) .....	37
Figura 3.7 – Diagramas esquemáticos: (a) Monofásico (b) Trifásico. ....	40
Figura 3.8 – Faixas potência x tempo de descarga dos sistemas de armazenamento de energia.....	44
Figura 3.9 – Custo específico de investimento para diferentes dispositivos de armazenamento de energia e sua respectiva autonomia .....	46
Figura 4.1 – Circuitos básicos do tipo I e do tipo II (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003). ....	52
Figura 4.2 – Detalhamento do princípio de funcionamento do UPS Rotativo tipo II (COTTULI e CHRISTIN, 2008). ....	53
Figura 4.3 – Diagrama básico da topologia reserva passiva, com componentes que melhoram seu desempenho frente a fenômenos de QEE (GONÇALVES, 2008).....	57
Figura 4.4 – Diagrama de blocos do UPS Reserva Passiva (VFD ou off-line) (GONÇALVES, 2008).....	59
Figura 4.5 – Diagrama de blocos do UPS Interativo de Linha (VI) (GONÇALVES, 2008).60	
Figura 4.6 – O diagrama de bloco do UPS tipo Delta (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003). ..61	
Figura 4.7 – Ilustração de vários modos de operação do UPS-Delta (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003). ....	63
Figura 4.8 – A estrutura básica de um UPS de dupla conversão de energia (VFI ou on-line) (GONÇALVES, 2008).....	64
Figura 4.9 – Faixa de potência típicas de uso das topologias dos UPS (GONÇALVES, 2008). ....	65
Figura 4.10 – Aplicações típicas de uso das topologias dos UPS (GONÇALVES, 2008)....	65
Figura 4.11 – Princípio de funcionamento e elementos básicos que compõem o DVR (JESUS e SAMESIMA, 2007).....	69
Figura 4.12 – DVR com energia extraída do lado da rede (GALASSI, 2006).....	70
Figura 4.13 – DVR com energia extraída do lado da carga (GALASSI, 2006). ....	71
Figura 4.14 – Barramento CC com tensão variável (GALASSI, 2006). ....	73
Figura 4.15 – DVR com barramento CC com tensão constante (GALASSI, 2006). ....	73
Figura 4.16 – Diagrama monofásico do DySC (GALASSI, 2006). ....	76
Figura 4.17 – Injeção de tensão com mesmo sinal que a rede (GALASSI, 2006). ....	76
Figura 4.18 – Injeção de tensão com sinal oposto da rede (GALASSI, 2006).....	77
Figura 4.19 – Diagrama unifilar do DVR .....	77
Figura 4.20 – Diagrama unifilar do DySC.....	78

Figura 5.1 – Regulador de tensão do tipo <i>TapChanger</i> (SARAIVA FILHO, 2002).....	83
Figura 5.2 – Características de entrada/saída de um regulador por degraus (MAULE, 2001) .....	84
Figura 5.3 – Regulador de tensão buck/boost (SARAIVA FILHO, 2002).....	85
Figura 5.4 – Circuito básico de um CVT (SARAIVA FILHO, 2002).....	86
Figura 5.5 – Características de entrada/saída de um CVT (MAULE, 2001).....	87
Figura 5.6 – Chave-estática de transferência STS. ....	89
Figura 5.7 – Fontes redundantes. ....	89
Figura 5.8 – Distribuição redundante. ....	89
Figura 5.9 – Distribuição redundante (comportamento em falha).....	89
Figura 5.10 – Transferência síncrona (TOSSI e BRAGA, 2011).....	90
Figura 5.11 – Transferência assíncrona. ....	91
Figura 6.1 – Modelo simplificado do ASD.....	94
Figura 6.2 – Forma vetorial dos AMTs. ....	95
Figura 6.3 – Curvas de tolerância do ASD (CUNHA e LEÃO, 2005).....	96
Figura 6.4 – Curvas de torque e velocidade do MIT com variação de frequência e tensão de alimentação para manter o fluxo magnético constante (CUNHA e LEÃO, 2005).....	100
Figura 6.5 – Tensão no elo CC com conversor controlado para diferentes frequências (CUNHA e LEÃO, 2005). ....	100
Figura 6.6 – ASD com método de adição de neutro (CUNHA e LEÃO, 2005).....	103
Figura 6.7 – Esquema de ligação do conversor boost.....	105
Figura 6.8 – ASD com retificador PWM. ....	106
Figura 6.9 – ASD com retificador híbrido trifásico (RHT) (COSTA, VIEIRA, <i>et al.</i> , 2011). .....	106
Figura 7.1 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição.....	110
Figura 7.2 – Localização dos medidores no sistema de distribuição.....	113
Figura 7.3 – Diagrama do processo produtivo (LEBORGNE, 2003).....	114
Figura 7.4 – Sensibilidade do processo Catenária 44 – Caracterizada pela intensidade do AMT (LEBORGNE, 2003).....	117
Figura 7.5 – Sensibilidade do processo Catenária 44 – Caracterizada pelo Método Clássico Intensidade x Duração (LEBORGNE, 2003) ....	117
Figura 7.6 – Circuito unifilar apresentando o sistema de alimentação com um DVR. ....	122
Figura 7.7 – Diagrama fasorial do sistema. ....	122
Figura 7.8 – Diagrama fasorial minimização da potência ativa injetada pelo DVR. ....	123
Figura 7.9 - Diagrama vetorial onde é minimizada a potência reativa injetada pelo DVR. ....	123
Figura 7.10 – Nova curva de sensibilidade para cada um dos projetos contemplados.....	133
Figura 7.11 – Diagrama unifilar para os Projetos 1 e 2 .....	135
Figura 7.12 – Diagrama unifilar para os Projetos 3 e 4 .....	136
Figura 7.13 – Diagrama unifilar para os Projetos 5 e 6 .....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Lista de eventos medidos .....	9
Tabela 2.2 – Indicadores SARFI-X calculados .....	9
Tabela 2.3 – Faixas indicativas da sensibilidade dos principais equipamentos utilizados na indústria .....	15
Tabela 2.4 – Limites da curva de tolerância SEMI F47 .....	16
Tabela 3.1 – Propriedades básicas dos principais tipos de bateria .....	34
Tabela 3.2 – Principais características das substâncias eletrolíticas.....	36
Tabela 3.3 – Classificação das soluções SMES.....	41
Tabela 3.4 – Classificação das soluções SMES de acordo com a faixa de potência .....	41
Tabela 3.5 – Custo de um sistema SMES de 1 MW .....	42
Tabela 3.6 – Quadro comparativo dos sistemas de armazenamento de energia estudados ...	45
Tabela 3.7 – Vantagens e Desvantagens das soluções estudadas .....	46
Tabela 4.1 – Classificação e características de classes normalizadas de UPS .....	58
Tabela 4.2 – Vantagens e desvantagens das topologias apresentadas .....	66
Tabela 5.1 – Comparativo entre STS e ATS .....	92
Tabela 6.1 – Exemplo de aplicação .....	101
Tabela 6.2 – Exemplo de aplicação .....	102
Tabela 7.1 – Planilha de registro de ocorrências de paradas de produção (LEBORGNE, 2003).....	111
Tabela 7.2 – Principais equipamentos que compõem o processo Catenária 44 .....	112
Tabela 7.3 – Registros de parada de produção (LEBORGNE, 2003) .....	115
Tabela 7.4 – Resumo da Especificação do Sistema UPS .....	120
Tabela 7.5 – Resultados das simulações para determinar a potência nominal do DVR.....	125
Tabela 7.6 – Estudo de Imunização para os diferentes projetos de DVR.....	125
Tabela 7.7 – Custo de instalação dos projetos .....	126
Tabela 7.8 – Resumo da Especificação do Sistema UPS .....	126
Tabela 7.9 – Exemplo de aplicação .....	127
Tabela 7.10 – Custo da solução combinada.....	128
Tabela 7.11 – Lista dos projetos a serem comparados e analisados .....	129
Tabela 7.12 – Valor calculado da VPL para os projetos analisados.....	131
Tabela 7.13 – Custo de Investimento e manutenção .....	132
Tabela 7.14 – Valor calculado da VPL para os projetos analisados.....	132
Tabela 7.15 – Lista dos projetos com VPL positiva .....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ASD	Adjustable Speed Drive
AT	Alta Tensão
ATS	Automatic Transfer Switch
BBM	Break Before Make
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufacturers Association
CC	Corrente Contínua
CCV	Catenary Continuous Vulcanization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CSENS	Custo Social da Energia Não Suprida
CSI	Fonte de Corrente Imposta
CVT	Constant Voltage Transformer
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DMED	DME Distribuição S.A.
DVR	Dynamic Voltage Restorer
DySC	Dynamic Sag Corrector
ELECTROTEK	Electrotek Concepts, Inc.
EPRI	Electric Power Research Institute
FCM	Fator de Carregamento Máximo
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FT	Curto-circuito do tipo fase-terra
FF	Curto-circuito do tipo fase-fase
FFT	Curto-circuito do tipo fase-fase-terra
FFF	Curto-circuito do tipo trifásico
FFFT	Curto-circuito do tipo trifásico-terra
FP	Fator de Potência
GQEE	Grupo de Estudos em Qualidade de Energia Elétrica
HSF	High Speed Flywheels
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPC	Índice de Preços ao Consumidor
ITIC	Information Technology Industry Curve
LSF	Low Speed Flywheels

M1, M2 e M3	Medidor 1, 2 e 3
MBB	Make Before Break
MT	Média Tensão
MTBF	Mean Time Between Failures
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
p.u.	por unidade
PEP	Ponto de equilíbrio de potência
PEAC	Power Electronic Applications Center
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse-Width Modulation
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	Root Mean Square (valor eficaz)
RTS	Ride Through System
SARFI	System Average RMS Variation Frequency Index
SED	Sistema Elétrico de Distribuição
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International
SEPIC	Single-ended primary-inductor converter
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
SCR	Silicon Controlled Rectifier
STS	Static Transfer Switch
TP	Transformador de Potencial
T <sub>c</sub>	Temperatura Crítica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UPFC	Unified Power Flow Controller
UPS	Uninterruptible Power Supply
VAL	Valor Atual Líquido
VA	Valor Atual
VFD	Voltage and Frequency Dependent
VFI	Voltage and Frequency Independent
VI	Voltage Independent
VLA	Vented Lead-Acid
VPL	Valor Presente Líquido
VRLA	Valve-regulated lead-acid
VSI	Fonte de Tensão Imposta
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração



## RESUMO

Nos últimos anos, a elevada complexidade da tecnologia empregada no controle dos processos industriais, bem como o aumento de sua vulnerabilidade, levou a consolidação de um grande número de soluções possíveis de serem empregadas para mitigar os efeitos nocivos dos afundamentos de tensão.

Este cenário tornou a escolha de um método de mitigação em detrimento de outros um processo complexo e que leva a uma exaustiva busca por bibliografias para subsidiar as análises necessárias.

Dessa forma, o objetivo desta dissertação é contribuir para a apresentação organizada e estruturada dos principais conceitos e soluções envolvidos no processo de mitigação dos afundamentos de tensão, abordando desde os sistemas de armazenamento de energia, soluções que utilizam ou não armazenamento de energia até soluções ride-through para acionamentos a velocidade variável.

Ademais, por meio de um exemplo de aplicação no qual se propõe o dimensionamento de algumas soluções para um processo de uma planta industrial real e o estudo de viabilidade técnica-econômica da implementação destas soluções, almeja-se também a sensibilização dos agentes do setor para a relevância/viabilidade da realização de estudos dessa natureza no âmbito dos consumidores industriais.

## **ABSTRACT**

In recent years, the high complexity of the technology used in industrial processes control, as well as the increasing of its vulnerability, led to a large number of possible solutions to be applied to mitigate the harmful effects of voltage sags.

This scenario became the choice of one mitigation method over others a complex process which leads to an exhaustive search for bibliographies in order to support the necessary analyzes.

Thereby, the main goal of this dissertation is to contribute to the organized and structured presentation of the main concepts and solutions involved in voltage sags mitigation, approaching from the energy storage systems and solutions which use or not energy storage, until ride-through solutions for adjustable speed drives.

Furthermore, through an application example which it is proposed the design of some solutions to a process on a actual industrial plant and technical-economic feasibility study for implementation of these solutions, also aims to awareness of the sector agents for the relevance / feasibility of such studies within industrial consumers

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E A RELEVÂNCIA DO TEMA

A energia elétrica pode ser considerada insumo básico para a maioria das atividades comerciais e industriais, também proporciona a melhora da qualidade de vida da população, bem como pode ser considerada fator determinante na produção de riquezas e desenvolvimento de um país.

A sociedade tem exigido produtos e/ou serviços com padrões de qualidade cada vez mais elevados e com a energia elétrica não tem sido diferente. Dessa forma, a energia elétrica pode ser tratada sob dois enfoques distintos: como produto e como serviço.

Portanto, a perspectiva atual do setor elétrico deixou de ser apenas gerar, transmitir, distribuir e comercializar o produto Energia Elétrica, mas também de prestar os serviços necessários à operação da rede e atender seus consumidores da melhor forma possível.

Diante disso, a discussão sobre a Qualidade da Energia se tornou um dos assuntos mais discutidos nos últimos anos. Em (ABREU, OLIVEIRA, *et al.*, 1997), com o intuito de propor a unificação da terminologia definiu-se a Qualidade da Energia da seguinte forma:

*“Energia elétrica de boa qualidade é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas.”*

Destaca-se que este conceito engloba aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos e nos mostra que a qualidade pode ser mensurada através dos indicadores qualidade de atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto.

A qualidade do atendimento versa sobre o aspecto comercial no âmbito do relacionamento diário entre os agentes, consumidor e concessionária. Em resumo,

---

refere-se à presteza, à celeridade e a eficiência do atendimento aos consumidores por parte da concessionária.

A qualidade do serviço versa sobre a continuidade do fornecimento de energia elétrica, ou seja, oferecer continuidade plena e oferta suficiente de energia elétrica.

A qualidade do produto trata da conformidade do produto energia elétrica, ou seja, a concessionária deve fornecer energia elétrica com tensões equilibradas e sem deformações de forma de onda.

Todo este cuidado com a definição do conceito da Qualidade da Energia deve-se a preocupação cada vez mais evidente por parte dos agentes do setor elétrico (poder concedente, concessionárias, consumidores ou fabricantes de equipamentos) em compreender e propor soluções para mitigar seus efeitos. Esta preocupação pode ser evidenciada em (ANEEL, 2012) devido ao sinal dado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL em sua Agenda Regulatória Indicativa Biênio 2012-2013, que, visando a elencar temas passíveis de regulamentação ou aperfeiçoamento, apresenta em seu item 38 a intenção de regulamentar os Indicadores da Qualidade do Produto. Esta preocupação foi ratificada pela Agência em sua Agenda Regulatória Indicativa Biênio 2013-2014 (ANEEL, 2013)<sup>1</sup> e também por meio do Projeto Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento cujo tema é “Sistema de Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica” (ANEEL, 2013)<sup>2</sup>.

Neste contexto, merecem atenção especial os afundamentos de tensão, também conhecidos na literatura internacional como “voltage sag” ou “voltage dip”. A expansão dos processos industriais e a intensificação do uso de eletrônica de potência, microeletrônica e de microprocessadores com o objetivo de melhorar a eficiência, o gasto energético e o controle dos mesmos, trouxe consigo novas preocupações quanto ao aumento da sensibilidade das cargas e, por consequência, o aumento da vulnerabilidade dos processos industriais frente a este fenômeno.

Ressalta-se que o aumento na vulnerabilidade dos processos industriais tem evidenciado prejuízos consideráveis ao setor industrial devido às interrupções nos processos produtivos, que por sua vez refletem nas concessionárias por conta do desgaste de sua imagem empresarial e por eventuais ressarcimentos de danos

---

aos seus consumidores. Restando, aos fabricantes de equipamentos, o desafio de promover imunidade a baixo custo comercial. Ademais, conforme exposto em (NOVAES, 2007) cabe destacar que todo este cenário de preocupação com os custos associados às interrupções dos processos produtivos tem indicado uma nova era nas tratativas comerciais entre concessionárias e indústrias, na qual os contratos de energia deverão ser firmados de forma diferenciada levando em consideração o padrão de qualidade da energia exigido pelo contratante, sendo estes padrões, juntamente com incentivos fiscais e requisitos logísticos, um fator preponderante na escolha do local de instalação de novas indústrias.

Dessa forma, conclui-se que a compreensão do fenômeno aliado ao conhecimento da sensibilidade do processo, bem como a avaliação das diferentes maneiras de mitigação dos efeitos nocivos são de suma importância para que os ganhos auferidos por conta da modernização dos processos produtivos não sejam anulados devido à intensificação das interrupções nestes processos.

## **1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO**

Em consonância com a evolução da complexidade da tecnologia empregada no controle dos processos industriais e o aumento de sua vulnerabilidade, a quantidade e a variedade de soluções empregadas para mitigar os efeitos nocivos dos afundamentos de tensão também aumentaram significativamente nos últimos anos. Este fato torna a escolha de um método de mitigação em detrimento de outros um processo complexo e que leva a uma exaustiva busca por bibliografias para subsidiar as análises necessárias.

A análise dos custos associados às interrupções no processo produtivo já ensejaram diversos trabalhos, assim como a busca por novas alternativas para mitigar estas interrupções levaram ao desenvolvimento de alguns equipamentos e as campanhas de medição ajudaram a definir a sensibilidade de alguns processos. No entanto, nota-se uma pequena movimentação no sentido de organizar e estruturar as soluções sobre a mitigação dos efeitos nocivos dos afundamentos de tensão.

De fato, após a releitura das principais referências bibliográficas tangíveis ao tema em tela, observa-se que as mesmas não analisam de forma adequada o uni-

verso de soluções passíveis para minimizar/eliminar estes efeitos. Os trabalhos até então publicados apresentam de forma direcionada a análise de um grupo específico de soluções semelhantes ou se restringem ao desenvolvimento de um protótipo visando a uma determinada aplicação.

Diante do contexto apresentado, o objetivo desta dissertação é contribuir para a apresentação organizada e estruturada dos principais conceitos e soluções envolvidos no processo de mitigação dos afundamentos de tensão. Ademais, almeja-se também a sensibilização dos agentes do setor para a relevância/viabilidade da realização de estudos dessa natureza no âmbito dos consumidores industriais.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

De forma a organizar e estruturar as informações coletadas no amplo levantamento bibliográfico realizado, este trabalho está dividido em 9 (nove) capítulos e 4 (quatro) anexos.

O presente capítulo refere-se à introdução do trabalho, descrevendo sua relevância no contexto atual, apresentando os principais objetivos e contribuições almejados com o desenvolvimento desta dissertação.

O segundo capítulo apresenta os principais conceitos e definições referentes aos afundamentos de tensão e suas filosofias de mitigação. Este capítulo visa a fornecer a fundamentação teórica necessária para entender este fenômeno de qualidade da energia de forma a compreender as diferentes maneiras de mitigá-lo.

O terceiro capítulo discorre sobre as principais formas de armazenamento de energia utilizadas comercialmente para integrar/complementar algumas soluções. Primeiramente, serão apresentados os princípios de funcionamento, as diferentes topologias e os aspectos técnicos e econômicos de cada uma das formas de armazenamento e na sequência será apresentada uma análise comparativa ressaltando as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Uma vez garantida a fundamentação teórica necessária a respeito dos afundamentos de tensão, de suas estratégias de mitigação e também das principais formas de armazenamento de energia, serão apresentados nos capítulos subsequentes as principais soluções utilizadas para minimizar/eliminar os efeitos nocivos provocados por tais fenômenos.

---

Neste sentido, o quarto capítulo aborda as soluções que fazem uso de elementos armazenadores de energia, destacando-se os sistemas de alimentação ininterrupta (UPS rotativo e estático) e os restauradores dinâmico de tensão (DVR e DySC).

Já o quinto capítulo aborda as soluções que não fazem uso de elementos armazenadores de energia, destacando-se os reguladores de tensão e a chave de transferência.

Em complemento aos capítulos anteriores, o sexto capítulo apresenta as principais soluções ride-through utilizadas para minimizar os efeitos dos afundamentos de tensão em acionamentos a velocidade variável.

Uma vez concluída toda fundamentação teórica que envolve a mitigação do afundamento de tensão, apresenta-se no sétimo capítulo um estudo de caso contemplando: a obtenção da sensibilidade de um determinado processo industrial, o dimensionamento de três diferentes soluções obedecendo aos critérios técnicos para atender a carga e por fim uma análise de viabilidade econômica para implementação das referidas soluções.

O oitavo capítulo contempla as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e, adicionalmente, apresenta uma série de novos questionamentos que poderão ser utilizados como sugestão no desenvolvimento de novos trabalhos.

Todo o material bibliográfico consultado para a elaboração deste trabalho se encontra listado em ordem alfabética no nono capítulo intitulado referências.

Por fim, os anexos utilizados para o dimensionamento das soluções apresentadas no capítulo sete se encontram no final deste documento.

---

## **2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – CONCEITOS GERAIS**

### **2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados ao tema afundamentos de tensão, destacando as principais causas e variáveis de influência.

Na sequência serão apresentados os conceitos que envolvem a definição da sensibilidade de cargas e processos, sobretudo dos equipamentos industriais.

Finalmente, serão apresentadas as principais filosofias adotadas para mitigação dos efeitos destes distúrbios nos equipamentos e processos.

### **2.2. AFUNDAMENTO DE TENSÃO**

#### **2.2.1. Considerações gerais**

Em nível internacional existem diferentes definições para o termo afundamento de tensão. As principais são atribuídas ao “Institute of Electric and Electronics Engineers” – IEEE (EUA) (IEEE, 1995)<sup>1</sup> e a “International Electrotechnical Commission” – IEC (Europa) (IEC, 1996), .

Na literatura técnica, (MCGRANAGHAN, MUELLER e SAMOTYJ, 1993), (CONRAD e BOLLEN, 1997) consensualmente definem afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para valores inferiores a 0,9 p.u..

Em âmbito nacional, destaca-se o Módulo 25.6 dos Procedimentos de Rede do ONS e o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST da ANEEL.

O Módulo 25.6 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2009) define afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,90 p.u. e 0,10 p.u., por um período de tempo de 1 ciclo a 1 minuto. De acordo com a duração, o afundamento é classificado como momentâneo ou temporário, conforme apresentado na Figura 2.1.



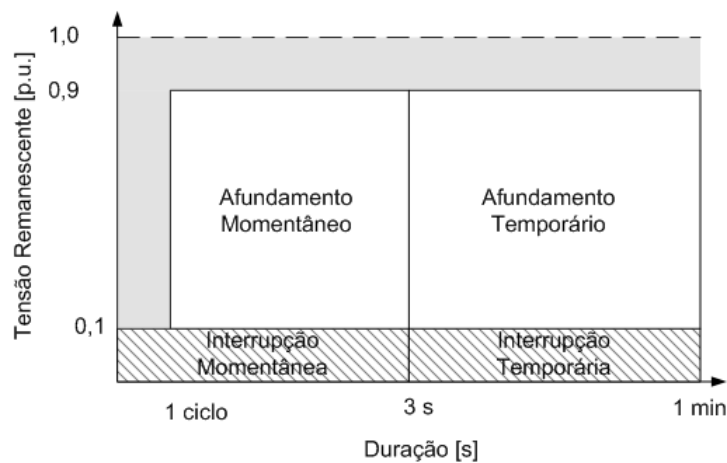


Figura 2.1 – Caracterização do afundamento de tensão segundo o ONS

O Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2009) define afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,90 p.u. e 0,10 p.u., por um período de tempo de 1 ciclo a 3 minutos. De acordo com a duração, o afundamento é classificado como momentâneo ou temporário, conforme apresentado na Figura 2.2.

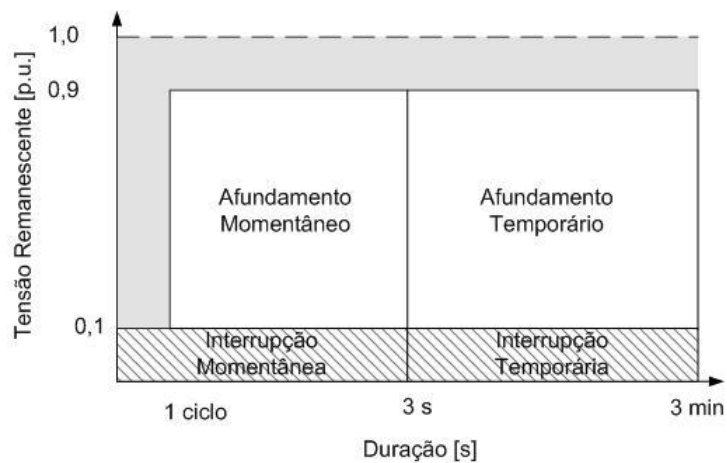


Figura 2.2 – Caracterização do afundamento de tensão segundo o PRODIST

Por se tratar de legislação vigente no Brasil, o entendimento a ser utilizado nos capítulos subsequentes será o do PRODIST.

### 2.2.2. Caracterização do afundamento de tensão

Quando o evento é monofásico, a intensidade, duração e a frequência de ocorrência são os parâmetros necessários para fornecer informações suficientes sobre o distúrbio. A intensidade e a duração do distúrbio podem ser definidas a partir do gráfico da evolução do valor eficaz da tensão, como mostrado na Figura 2.3.

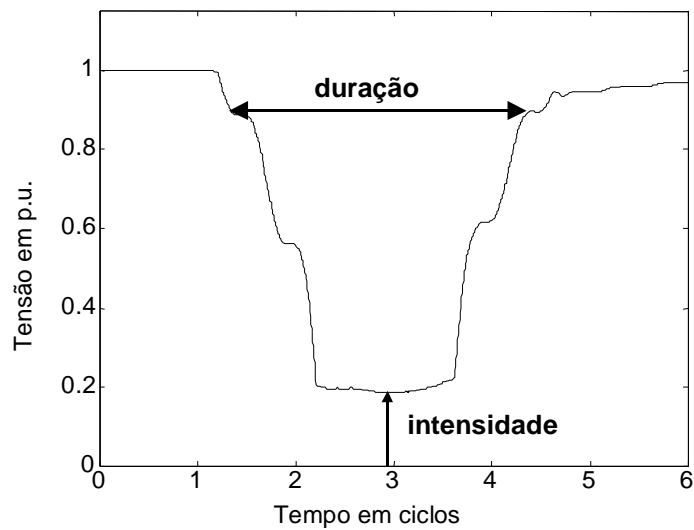


Figura 2.3 – Caracterização de afundamentos de tensão monofásicos (OLIVEIRA, 2008)

Quando o evento é trifásico e envolve mais de uma fase, deve-se realizar o procedimento denominado de agregação de fases com o intuito de atribuir apenas um conjunto de parâmetros (intensidade, duração e frequência) ao evento.

Na literatura técnica são encontradas três propostas de agregação de fases, sendo que todas consideram a intensidade do afundamento como sendo a menor tensão remanescente dentre as fases.

- Agregação pela união das fases: Neste método, tem-se a duração do evento como o intervalo de tempo decorrido após a violação do limite de 0,9 p.u. da primeira fase até o momento que a última fase deixa de violar este mesmo limite;
- Agregação pelos parâmetros críticos: Obtém-se o intervalo de tempo com violação do limite de 0,9 p.u. para cada fase individualmente e define a duração do evento como sendo o maior valor dentre eles; e
- Agregação pela fase crítica: Neste procedimento, obtém-se a fase com menor tensão eficaz remanescente e define a duração do evento como sendo o intervalo de tempo que esta fase viola o limite de 0,9 p.u..

### 2.2.3. Indicadores para afundamento de tensão

O PRODIST ainda não estabelece uma métrica para avaliar o impacto dos afundamentos de tensão. A dificuldade da realização de campanhas de medição para criar um banco de dados histórico que permita conhecer o desempenho do sistema elétrico brasileiro diante deste fenômeno é clara. Isto limita ações de grandes indústrias em prol da melhoria da eficiência de seus processos produtivos através da melhoria da Qualidade da Energia fornecida pelas concessionárias. Diante desta realidade faz-se necessário lançar mão da experiência de outros países na definição de indicadores tornando assim possível melhorar as análises técnico-econômicas realizadas para direcionar os investimentos.

Dentre as diversas propostas existentes para a definição de indicadores destaca-se a metodologia proposta pelo EPRI / ELECTROTEK (BROOKS, DUGAN, *et al.*, 1998), (IEEE, 2004) que define o SARFI, 'System Average RMS Variation Frequency Index'. Este indicador nos dá ideia da frequência com a qual a tensão remanescente fica abaixo de um determinado valor. Por exemplo, para o SARFI 90 faz-se a contagem de todos os eventos que a tensão remanescente foi inferior a 0,90 p.u..

Supondo-se que para uma dada medição hipotética obteve-se os registros apresentados na Tabela 2.1, obtêm-se os indicadores apresentados na Tabela 2.2:

Tabela 2.1 – Lista de eventos medidos

Data	Hora	Tensão Remanescente [p.u.]	Duração [s]
13/01/2012	10:21:55	0,45	1,37
20/01/2012	20:21:29	0,73	0,02
09/02/2012	13:05:39	0,12	4,64
10/02/2012	07:11:28	0,10	1,70
12/02/2012	03:22:32	0,63	4,62
13/03/2012	21:28:32	0,86	0,14
04/04/2012	18:36:29	0,04	1,20
02/05/2012	11:42:06	0,68	0,45
06/05/2012	15:18:37	0,72	2,64
09/05/2012	15:40:43	0,55	4,32
27/05/2012	03:41:29	0,50	3,91

Tabela 2.2 – Indicadores SARFI-X calculados

Indicador	Número de eventos	Indicador por 30 dias
SARFI-90	11	1,81
SARFI-70	8	1,32
SARFI-50	5	0,82

#### 2.2.4. Variáveis de influência

A análise do afundamento de tensão é bastante complexa, o que torna necessário entender os diversos fatores que afetam suas características.

- **Tipo de falta:** As faltas no sistema elétrico são classificadas como trifásicas (FFF) ou trifásicas para a terra (FFFT), bifásicas (FF) ou bifásicas para a terra (FFT), e fase-terra (FT). Os afundamentos causados por faltas trifásicas são simétricos e de grande intensidade, porém são bem raros de acontecer. Já os afundamentos causados por faltas fase-terra ocorrem com maior frequência, porém são desequilibrados e assimétricos.
- **Localização da falta:** A localização da falta no sistema elétrico ajuda a prever o montante de consumidores que serão afetados. Por exemplo, uma falta localizada no sistema de transmissão afetará potencialmente uma quantidade maior de consumidores que uma falta localizada na rede de distribuição. Isso se deve ao fato do sistema de transmissão ser malhado e atender uma grande área geográfica, enquanto a rede de distribuição normalmente atende consumidores concentrados em um sistema radial.
- **Resistência de falta:** A resistência de falta é obtida através da associação da resistência do arco elétrico entre o condutor e a terra, para defeitos fase-terra ou entre dois ou mais condutores, para defeitos envolvendo fases, da resistência de contato devido à oxidação no local da falta e da resistência do pé-de-torre, para defeitos englobando terra. Raramente a resistência de falta é nula e desprezá-la significa obter valores de afundamentos de tensão mais severos, principalmente, em sistemas de distribuição (BLACKBURN, 1987).
- **Tensão pré-falta:** Em estudos de curto-circuito normalmente adota-se a tensão pré-falta como 1 p.u., porém esta premissa nem sempre é verdadeira. Assim, deve-se analisar a curva de carga do circuito e a existência de reguladores de tensão de forma a evitar erros nos cálculos.
- **Conexão dos Transformadores:** A conexão dos transformadores locali-

zados entre o ponto de falta e o barramento de alimentação dos consumidores influencia diretamente as características do afundamento percebido pela carga. De acordo com (BOLLEN, 1997) os transformadores podem ser agrupados em três categorias de acordo com suas características construtivas. A primeira refere-se às conexões  $Y-\Delta$ ,  $\Delta-Y$ ,  $Y_{\text{aterrado}}-\Delta$  e  $\Delta-Y_{\text{aterrado}}$ , que filtram a componente de sequência zero e inserem defasamento angular nas componentes de sequência positiva e negativa. Já a segunda refere-se às conexões  $Y-Y$ ,  $\Delta-\Delta$ ,  $Y_{\text{aterrado}}-Y$  e  $Y-Y_{\text{aterrado}}$ , que também filtram a componente de sequência zero, mas são construídos de forma a não inserir defasamento angular. Por fim, a terceira refere-se às conexões  $Y_{\text{aterrado}}-Y_{\text{aterrado}}$ ,  $Y_{\text{aterrado}}-\Delta-Y_{\text{aterrado}}$ , que não filtram a componente de sequência zero e também não inserem defasamento angular nas componentes de sequência positiva e negativa.

- **Sistema de Proteção:** O sistema da proteção influencia diretamente a duração do distúrbio por conta do tempo de eliminação da falta. O tempo de eliminação da falta é contabilizado somando-se o tempo de sensibilização e atuação dos relés com o tempo de abertura e extinção de arco dos disjuntores. O tempo de atuação dos relés é definido pela curva de resposta tempo por corrente (instantâneo ou temporizado) e também da parametrização utilizada para obter a seletividade desejada. Já o tempo de eliminação do curto circuito por parte do disjuntor depende exclusivamente de suas características construtivas.
- **Sistema de Religamento:** O sistema de religamento influencia diretamente a frequência de ocorrência de distúrbios, bem como se os mesmos são de natureza temporária ou permanente. Na existência de religamento, deve-se lançar mão do procedimento chamado de agregação temporal para a correta quantificação de eventos e assim evitar a contabilização de mais de um distúrbio para o mesmo fato gerador. A agregação temporal sintetiza uma série de eventos por um único conjunto de características, normalmente a intensidade e duração.
- Outras variáveis são as **taxas de falta de linhas de transmissão e distribuição** e a **topologia da rede de transmissão e distribuição**.

### **2.2.5. Principais causas**

Os principais fatos geradores de afundamentos de tensão no sistema elétrico são a energização de transformadores, partida de motores e a ocorrência de curtos-circuitos. Ressalta-se que a ocorrência de curtos-circuitos é a principal causa dos afundamentos de tensão, sobretudo em redes de distribuição e transmissão devido à extensa quilometragem de linhas aéreas expostas às intempéries e descargas atmosféricas.

Em redes de distribuição, o problema é ainda mais crítico pela não existência de cabo guarda. Outras causas de ocorrência de curtos-circuitos em linha de transmissão são as queimadas em plantações, vendavais, contatos por animais e aves e diminuição da capacidade dielétrica dos isoladores. Com menor frequência os curtos-circuitos também ocorrem em subestações e em sistemas industriais.

## **2.3. SENSIBILIDADE DAS CARGAS**

Os impactos dos afundamentos de tensão são percebidos de forma diferenciada pelos consumidores industriais e residenciais em função da sensibilidade das cargas e processos envolvidos em cada segmento.

No ambiente industrial, estes efeitos dependem da sensibilidade do processo industrial envolvido, destacando-se os processos de fabricação contínuos (têxtil, laminação, plásticos e papel). Os impactos são normalmente percebidos sob a forma de interrupções do processo produtivo, levando à perda de insumos ou a longos períodos de parada de produção devido à necessidade de reparos e de peças e equipamentos de reposição.

No âmbito dos consumidores residenciais, estes efeitos se traduzem no impedimento total ou parcial da utilização das funções dos eletroeletrônicos e eletrodomésticos, como por exemplo, a perda de memória/programação de determinados equipamentos. Nestes casos, os impactos geralmente não se traduzem em perdas financeiras, mas sim na perda de imagem das concessionárias perante aos seus consumidores.

Neste trabalho se analisará, prioritariamente, a sensibilidade das cargas industriais cuja vulnerabilidade é fruto da combinação tanto da sensibilidade dos equipamentos eletroeletrônicos instalados, como dos processos industriais envol-

vidos.

Com apresentado em (LEBORGNE, 2003), esta sensibilidade pode ser representada por uma região no plano *tensão versus tempo*, no qual os eixos representam respectivamente a intensidade e a duração dos afundamentos de tensão. Por serem os parâmetros mais utilizados, a intensidade e/ou duração do afundamento foram utilizadas em (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2002) para dividir os equipamentos sensíveis em três categorias, sendo elas: equipamentos sensíveis apenas à magnitude do evento, equipamentos sensíveis à magnitude e a duração do evento e equipamentos sensíveis a outras características que não sejam a magnitude e a duração.

- Equipamentos sensíveis apenas à magnitude do evento: Este grupo inclui dispositivos como, por exemplo, relés de subtensão, controle de processos, reguladores de velocidade de motores e diversos tipos de máquinas automatizadas;
- Equipamentos sensíveis à magnitude e a duração do evento: Este grupo inclui praticamente todos os equipamentos que usam fontes eletrônicas de suprimento;
- Equipamentos sensíveis a outras características do evento que não sejam a duração ou magnitude: Alguns dispositivos são sensíveis a outras características tais como desequilíbrio de fases durante o evento e salto de ângulo.

Atualmente, para a avaliação da sensibilidade dos equipamentos tem-se utilizado como referência algumas curvas típicas, como por exemplo, a curva ITIC que é uma atualização da curva CBEMA.

Originalmente, a curva CBEMA (IEEE, 1987) foi desenvolvida para representar a sensibilidade de computadores *mainframe*, no entanto tem sido muito utilizada também na avaliação da sensibilidade de microcomputadores, equipamentos microprocessados, entre outros componentes eletroeletrônicos.

A Figura 2.4 apresenta a curva CBEMA, na qual se observa três regiões distintas de operação, sendo elas a região de imunidade, região de susceptibilidade e as regiões de sensibilidade identificadas pelas letras A, B e C, respectivamente.

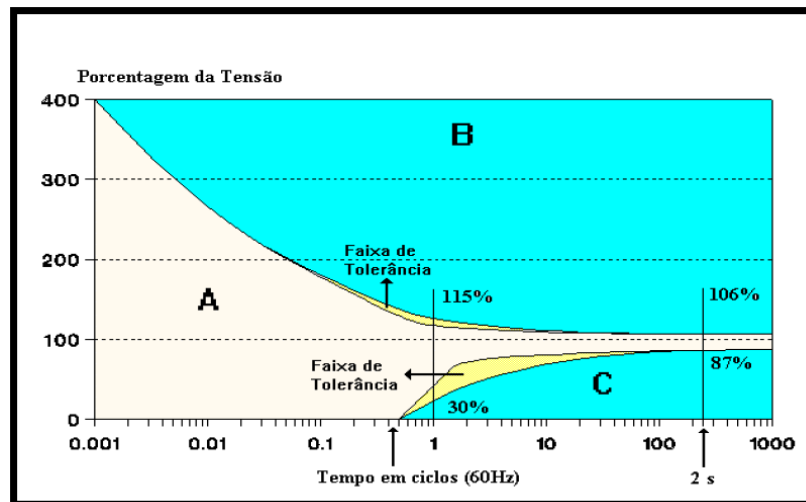


Figura 2.4 – Curva de tolerância CBEMA (LEBORGNE, 2003)

Vale destacar que as regiões B e C são as críticas, pois em B existe a possibilidade de rompimento da isolação devido à ocorrência de sobretensões transitórias e elevações de tensão. Já na região C, caracterizada pelos afundamentos de tensão, depara-se com o risco eminente de parada do equipamento/processo produtivo.

Diante do aumento do emprego de componentes eletrônicos no controle dos processos e a disseminação da tecnologia da informação, foi necessário modificações na CBEMA visando a melhor caracterização da sensibilidade destes equipamentos (ITIC, 2000). Esta nova curva foi nomeada de ITIC (IEEE, 1995)<sup>2</sup>, apresentada na Figura 2.5, com as mesmas premissas de classificação por regiões utilizadas na CBEMA.

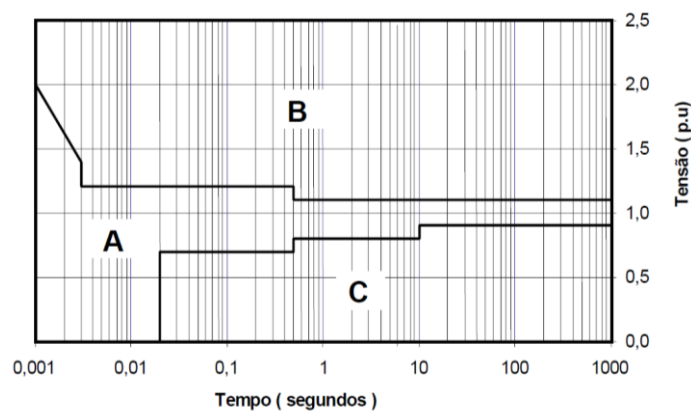


Figura 2.5 – Curva de tolerância ITIC (LEBORGNE, 2003)



A sensibilidade dos acionamentos a velocidade variável (Adjustable Speed Drive – ASDs) frente aos afundamentos de tensão também pode ser representada por meio do plano *tensão versus tempo*, como apresentado na Figura 2.6. De forma semelhante à análise realizada para as curvas anteriores, apresentam-se três regiões de operação: interrupção, incerteza e imunidade. Destaca-se que na região de interrupção o equipamento certamente irá falhar independentemente da marca ou modelo.

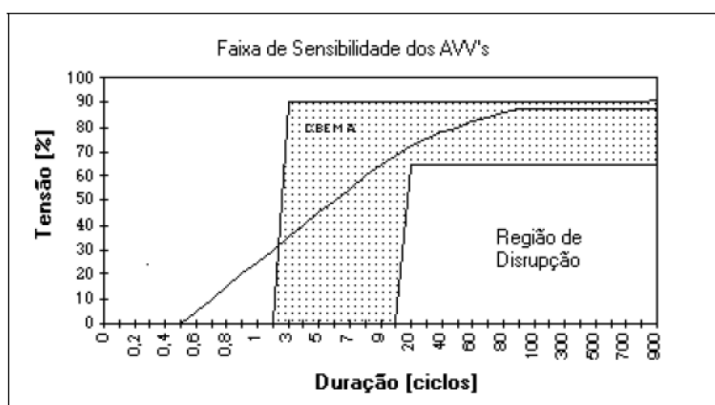


Figura 2.6 – Curva de tolerância dos acionamentos a velocidade variável (LEBORGNE, 2003).

O estabelecimento de padrões de comportamento para equipamentos eletrônicos de modelos e fabricantes distintos é uma tarefa bastante difícil, no entanto em (CARVALHO FILHO, 2000) apresenta-se faixas indicativas da sensibilidade dos principais equipamentos utilizados na indústria, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Faixas indicativas da sensibilidade dos principais equipamentos utilizados na indústria

Tipo de equipamento	Duração [ms]	Intensidade [p.u.]
PLCs – Controladores Lógicos Programáveis	616	0,45 – 0,75
ASDs – 5 HP (PWM)	83	0,60 – 0,80
Relés Auxiliares	33	0,60 – 0,78
Contatores	83	0,40 – 0,60

Outra forma de representar a sensibilidade das cargas que utilizam semicondutores é por meio da curva SEMI F47, esta metodologia surgiu de um acordo entre os fabricantes e consumidores visando à melhoria da produtividade deste setor.

Originalmente, esta curva foi apresentada em (SEMI F47-0200, 1999), no entanto, em (SEMI F47-0706, 2006) foram implementadas algumas melhorias e na nova versão, definiu-se que os equipamentos deveriam continuar operando sem

interrupções durante as condições definidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Limites da curva de tolerância SEMI F47

Condição	Limites
Imunidade obrigatória	50% de tensão remanescente por 200 ms (12 ciclos)
	70% de tensão remanescente por 500 ms (25 ciclos)
	80% de tensão remanescente por 1 s (50 ciclos)
Imunidade recomendada	0% de tensão remanescente por 1 ciclo
	80% de tensão remanescente por 10 s (600 ciclos)

Dessa forma, a Figura 2.7 apresenta a versão mais recente da curva de tolerância SEMI F47 especificada para afundamentos de tensão, na qual os marcadores vermelhos e amarelos representam os pontos de imunidade obrigatórios e recomendados respectivamente. Ressalta-se que a referida norma visa à obtenção deste nível de imunidade dos processos sem a utilização de sistemas ininterruptos de energia (UPS).

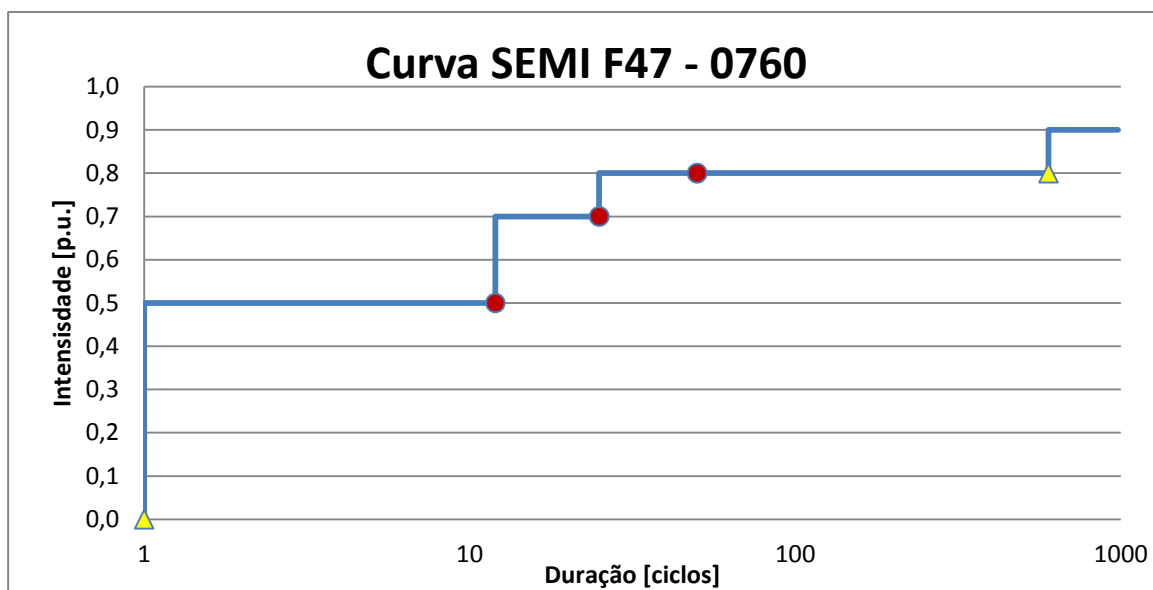


Figura 2.7 – Curva de tolerância segundo a norma SEMI F47- 0706

## 2.4. FILOSOFIAS DE MITIGAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Com a conscientização das elevadas perdas econômicas associadas às ocorrências de afundamentos de tensão que provocam paradas de processo industriais, deu-se início ao desenvolvimento de um grande número de soluções com o objetivo de reduzir a quantidade e a severidade dos eventos, bem como minimizar

a sensibilidade dos equipamentos ou até mesmo imunizá-los frente a afundamentos de tensão.

As ações corretivas podem ser implementadas pelas indústrias, pelas concessionárias ou pelos fabricantes, de tal forma que o universo de soluções é frequentemente estruturado em quatro categorias: especificação dos equipamentos, soluções para os sistemas de controle, soluções gerais dentro da planta industrial e soluções no âmbito da concessionária. A categorização das soluções pode ser representada através do fluxograma apresentado na Figura 2.8, na qual se percebe que o custo tende a aumentar quando as ações de mitigação são tomadas no sentido da carga para fonte de suprimento. O melhor custo benefício é atingido ao especificar a suportabilidade dos equipamentos mais sensíveis ainda no processo de compra.

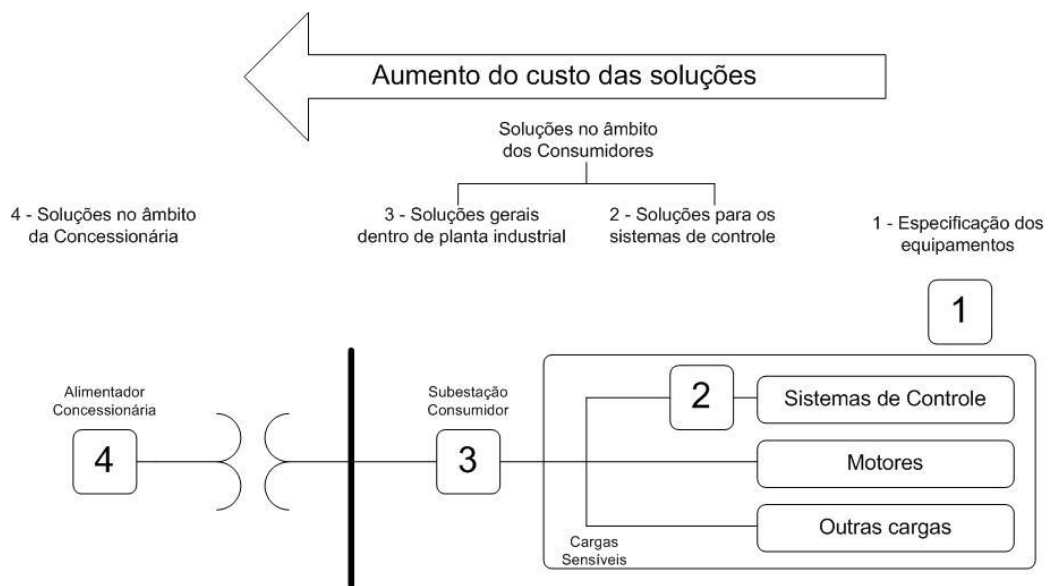


Figura 2.8 – Soluções para reduzir os custos devido ao afundamento de tensão (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2002).

De forma generalista pode-se dizer que as soluções no âmbito das concessionárias têm caráter mais preventivo, ou seja, combatem as causas e/ou origens dos distúrbios. Já as soluções no âmbito dos consumidores têm caráter mais corretivo, combatem os efeitos dos afundamentos de tensão nos equipamentos e auxiliam os fabricantes na redução da vulnerabilidade dos seus produtos frente a estes distúrbios.

### **2.4.1. Especificação do equipamento**

Durante a etapa de especificação deve-se definir um procedimento com o intuito de avaliar a criticidade dos equipamentos para o processo e para segurança dos usuários. Os equipamentos que forem considerados críticos devem ter níveis adequados de suportabilidade garantidos ainda no processo de compra, sendo recomendável suportar tensão residual de, no mínimo, 0,70 p.u. (Curva ITIC) e ideal suportar tensão residual de, no mínimo, 0,50 p.u. (Curva SEMI F-47) (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2002). As curvas de suportabilidade do equipamento de interesse devem estar disponíveis para facilitar o estudo de compatibilidade do equipamento com as condições da rede onde ele será instalado. Esse tipo de solução tende a ser mais barata, no entanto os fabricantes dificilmente têm a disposição equipamentos que satisfaçam as peculiaridades de forma imediata (MAULE, 2001).

### **2.4.2. Soluções para os sistemas de controle**

A dessensibilização da proteção dos equipamentos industriais pode trazer benefícios significativos e deve ser considerada com uma alternativa técnica e econômica para evitar paradas do processo produtivo. Também vale considerar a importância de garantir que os circuitos de alimentação das funções de força e de comando sejam independentes, pois devido à baixa potência dos circuitos de comando a instalação de fontes auxiliares de energia ininterruptas despendem menor investimento (SANTOS, CAMARGO e LIMA, 2005). É conveniente instalar fontes auxiliares quando o equipamento suporta o afundamento de tensão, mas seu sistema de controle não e por isso o processo como um todo acaba sendo desligado.

### **2.4.3. Soluções gerais dentro da planta**

Devido à boa relação custo benefício, esse grupo de soluções tende a ser o mais aplicável para aumentar a suportabilidade dos equipamentos, controles e proteções frente aos afundamentos de tensão. Nesta busca, deve-se avaliar as particularidades de cada processo de forma a identificar a melhor solução.

- Pequenas cargas: Normalmente envolvem soluções para o sistema de controle ou equipamentos individuais constituídos normalmente de cargas monofásicas;
- Equipamentos individuais ou grupos de equipamentos: Normalmente representam as soluções para equipamentos críticos que podem ser convenientemente agrupados. Trata-se de um método bastante econômico, especialmente quando previsto ainda na etapa de projeto da instalação industrial;
- Grandes grupos de cargas ou toda instalação industrial em baixa tensão: Se a instalação possuiu um grande grupo de cargas consideradas críticas estas devem ser agrupadas em uma mesma subestação, na qual será instalada a solução; e
- Média tensão ou no sistema de alimentação: Este tipo de solução deve ser adotada quando toda a instalação industrial precisar ser imunizada.

#### **2.4.4. Soluções no âmbito da concessionária**

A topologia da rede e os ajustes do sistema de proteção têm uma grande influência sobre os parâmetros dos afundamentos de tensão e as interrupções percebidas pelos consumidores. De forma a melhorar a qualidade do fornecimento de energia e diminuir o número e a severidade desses fenômenos, as concessionárias podem agir prevenindo a ocorrência de curtos-circuitos, por exemplo: através da manutenção preventiva, poda de árvores, substituição da rede nua por rede compacta ou isolada e substituição de isoladores e para raios, instalação de novas cruzetas e chaves seccionadoras unipolares, intercalação de postes em circuitos, retirada de objetos estranhos da rede, proteção contra animais, melhoria da malha de aterramento, realização de inspeções termográficas para facilitar a detecção de possíveis defeitos, estudos de planejamento de curto prazo e identificação das linhas com maior incidência de descargas atmosféricas.

Outra ação citada em (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2002) é reavaliar as práticas do sistema de proteção utilizadas em sua rede. Uma forma de melhorar o tempo de eliminação das faltas é através da instalação de religadores automáti-

---

cos, chaves repetidoras, mudanças na topologia da rede e desabilitar a atuação rápida do trip dos disjuntores e/ou religadores. Esta prática de desativar a atuação rápida do trip evita o desligamento do alimentador por completo devido a uma falta em um ramal, no entanto os consumidores do ramal sensibilizado sofrerão uma interrupção sustentada e a concessionária terá um custo adicional para substituir o fusível queimado além dos indicadores de continuidade DEC e FEC aumentados. Já quanto à mudança da topologia da rede sugere-se a migração do consumidor para uma barra menos susceptível aos afundamentos de tensão, alimentadores exclusivos para cargas perturbadoras e para cargas sensíveis, alimentação das cargas de maior potência através de barras com maior nível de curto-circuito.

A título de exemplo, através de uma ação conjunta da Companhia Paranaense de Energia - COPEL e uma unidade consumidora, estudos mostraram uma redução de 70% da área de vulnerabilidade do consumidor com a mudança de sua conexão para uma nova barra (OMORI e PRADO, 2005). Como destacado em (MAULE, 2001), apesar de ser uma solução atraente, a mudança na rede pode gerar custos elevados e às vezes esbarra em impossibilidades técnicas.

## **2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os principais conceitos relacionados ao tema afundamento de tensão, apresentando as diferentes formas de conceituação encontradas na literatura técnica, caracterização de eventos, indicadores, variáveis de influência e suas principais causas. Apresentou-se também o conceito de sensibilidade das cargas e processo destacando as principais curvas de sensibilidade utilizadas. Fechando o capítulo, foram apresentadas as principais filosofias utilizadas para mitigação dos AMTs, tanto no âmbito do sistema da concessionária como do consumidor.

## 3. ARMAZENADORES DE ENERGIA

### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de armazenamento de energia podem ser utilizados para unificar, normalizar e expandir a capacidade de fornecimento de energia das fontes renováveis, por exemplo, energia eólica e fotovoltaica. Também são utilizados para gerenciar picos de demanda e evitar o pagamento de multas por ultrapassagem de demanda contratada, para melhoria da qualidade da energia fornecida a um determinado equipamento ou processo, ou como fonte auxiliar de energia na ausência da alimentação principal.

O armazenamento da energia pode ser feito através de sistemas de ar comprimido, barragens (energia potencial), bombeamento de água, bateria (energia química), galões de combustível, energia térmica, supercapacitor, supercondutor e volante de inércia. E de acordo com (FARRET e SIMÕES, 2006), estas diferentes formas de armazenamento podem ser comparadas entre si através de alguns parâmetros, de forma a classificar qual possui o melhor desempenho para uma determinada aplicação. Estes parâmetros são: capacidade de armazenamento, energia específica, potência específica, densidade de energia, eficiência física, eficiência energética, taxa de recarga, auto descarga, tempo de vida, ciclos de carga e descarga e investimento. Na sequência, apresenta-se uma descrição mais detalhada de cada parâmetro.

- **Capacidade de armazenamento:** Representa a quantidade de energia elétrica possível de ser armazenada. A unidade do sistema internacional é joule (J), no entanto sua ordem de grandeza é pequena. Por isso, utiliza-se o watt hora (Wh) como unidade padrão, sendo o trabalho de 1 (W) por uma hora equivalente a 3600 (J).
- **Energia específica:** A energia elétrica armazenada por unidade de massa expressa em (Wh/kg). Pode ser utilizado para obter, de forma aproximada, a massa do sistema de armazenamento de energia necessária para uma dada aplicação.

- 
- **Potência específica:** A potência elétrica armazenada por unidade de massa expressa em (W/kg). Os sistemas de armazenamento de energia não podem operar com máxima potência por períodos muito longos, pois senão sua vida útil e sua eficiência elétrica podem ser afetadas.
  - **Densidade de energia:** A energia elétrica armazenada por unidade de volume expressa em (Wh/m<sup>3</sup>). Pode ser utilizado para obter, de forma aproximada, o volume do sistema de armazenamento de energia para uma dada aplicação.
  - **Eficiência física:** Representa a potência elétrica armazenada em um dado volume e massa. Os sistemas de baterias utilizados em transportes ferroviários utilizam muito este parâmetro, pois algumas vezes aceita-se redução na eficiência elétrica em benefício da eficiência física.
  - **Eficiência elétrica:** Representa a porcentagem da energia armazenada que efetivamente será transformada em trabalho.
  - **Taxa de recarga:** É taxa com a qual a energia será armazenada até o sistema estar completamente carregado. Alguns sistemas levam 10 horas para se descarregar e 14 horas para se recarregar.
  - **Auto descarga:** Indica o tempo necessário para o sistema de armazenamento se descarregar quando não está sendo utilizado. Esta perda de carga acontece devido as correntes de fuga e dissipação de calor.
  - **Vida útil:** Representa o espaço de tempo entre a entrada em serviço do equipamento e a sua desativação por avaria completa. Expressa a ideia de durabilidade do sistema e varia de acordo com a tecnologia empregada e a intensidade do uso. As baterias costumam ter um pequeno tempo de vida em aplicações que exigem repetidos ciclos de carga e descarga.
  - **Ciclos de carga e descarga:** O número de vezes que o sistema de armazenamento de energia pode ser carregado e descarregado sem alterações significativas na sua capacidade de armazenamento.



- **Investimento:** Representa o custo em euro ou dólar por quilowatt hora (US\$/kWh ou €/kWh) para projetar, especificar, preparar o local da instalação e instalar um sistema de armazenamento de energia.

Como apresentado em (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003), a maioria dos distúrbios do Sistema Elétrico de Distribuição (SED) são temporários, não excedendo 3 segundos. Estes distúrbios são provenientes de descargas atmosféricas ou religamentos automáticos da rede que acontecem entre 0,3 e 3 segundos. Apenas 3% dos eventos relacionados à falta de energia possuem um caráter menos transitório podendo se estender por minutos, horas ou até mesmo dias. Essas características distintas levam a condição de proporcionalidade inversa entre a autonomia e a potência, ou seja, para períodos não muito longos pode-se obter uma alta transferência de potência e para períodos muito longos a transferência de potência deverá ser mais moderada. Ainda devem ser satisfeitos os seguintes requisitos: alta capacidade de armazenamento de energia, baixa taxa de auto descarga, rápida taxa de recarga, baixa exigência de manutenção e alta confiabilidade.

Neste contexto, o foco deste capítulo será apresentar os principais sistemas de armazenamento que são capazes de suprir de forma parcial ou completa, a energia não fornecida pela fonte principal de alimentação durante um Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT até que a normalidade do fornecimento de energia seja reestabelecida. Os sistemas serão apresentados levando em conta sua ordem histórica, sendo eles:

- Volante de inércia (Flywheel);
- Bateria;
- Supercapacitor; e
- Supercondutor (SMES).

## 3.2. VOLANTE DE INÉRCIA

Os primeiros registros do uso de volantes de inércia para o armazenamento de energia mecânica remontam a centenas de anos. No entanto, a intensificação do uso desta tecnologia deu-se com as máquinas a vapor durante a Revolução Industrial. Na década de 70, esta tecnologia foi utilizada no processo de enriquecimento de urânio, fato que recolocou o uso de volante de inércia como uma alternativa interessante para o armazenamento de energia. Inicialmente, os avanços da eletrônica de potência e no controle digital de equipamentos se mostraram uma alternativa ao uso de volantes de inércia. Entretanto, atualmente esta mesma tecnologia vem sendo utilizada para melhorar a eficiência dos sistemas baseados em volantes de inércia de forma a propiciar soluções com um bom custo benefício.

### 3.2.1. Princípio de funcionamento

A construção do volante de inércia baseia-se no conceito de momento de inércia, o qual quantifica a distribuição da massa de um corpo em torno de um eixo de rotação. Quanto maior for o momento de inércia do corpo maior será a dificuldade de fazê-lo abandonar a inércia, ou seja, colocá-lo em movimento quando o mesmo estiver em repouso ou tentar pará-lo quando estiver em movimento. A maior contribuição para o aumento do momento de inércia deve-se a porção de massa que está mais afastada do eixo de giro. Assim, quanto mais distante a massa estiver localizada em relação ao eixo de giro, maior será seu momento de inércia.

Em suma, o volante de inércia é um disco usado para armazenar a energia mecânica na forma de energia cinética, assim esta energia pode ser convertida em energia elétrica quando necessário.

A energia armazenada no volante varia quadraticamente com a velocidade angular ( $\omega$ ) e linearmente com o momento de inércia ( $J$ ), conforme equação (3.1). Portanto, para um melhor aproveitamento, os volantes devem estar na máxima velocidade de operação possível.

$$E_{cinética} = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad 3.1$$

### 3.2.2. Diferentes topologias e aplicações

A capacidade de armazenamento de energia do volante de inércia pode ser modificada de acordo com o material, o momento de inércia e a velocidade de rotação do disco. Atualmente, existem duas topologias que vem sendo aplicadas para solução de problemas de qualidade da energia elétrica: Low Speed Flywheels (LSF) e High Speed Flywheels (HSF). Em geral, a energia armazenada pelo volante é da ordem de 0,5 a 500 kWh (FARRET e SIMÕES, 2006).

Os volantes de baixa velocidade (LSF) precisam ter um momento de inércia maior para compensar a baixa velocidade de rotação que é da ordem de até 6.000 rpm. Normalmente, são construídos com aço e não necessitam girar no vácuo, mas apenas em um vácuo parcial ou em um gás de baixa densidade para reduzir as perdas por fricção. O acréscimo de massa devido ao material utilizado e o tamanho do raio do volante resultam em um conjunto que ocupa um grande espaço físico e consideravelmente pesado. Os sistemas de volante de baixa velocidade podem ser capazes de fornecer energia por um intervalo de tempo de 10 a 50 s (IEA PVPS TASK 3, 2004).

Os volantes de alta velocidade (HSF) precisam ter um momento de inércia menor para poder atingir velocidade de rotação na faixa de 10.000 a 100.000 rpm. Normalmente, são construídos com fibra de vidro ou de carbono, que são aproximadamente 5 vezes mais leves do que o aço. Para reduzir as perdas por atrito o volante deve girar no vácuo. A redução de massa devido ao material utilizado e a redução no raio do volante resultam em um conjunto bem mais leve e compacto. Os sistemas de volante de alta velocidade são capazes de fornecer energia por horas (IEA PVPS TASK 3, 2004).

Os volantes de inércia são adequados para aplicações que requerem ciclos contínuos, alta confiabilidade e pequeno tempo de armazenamento de energia. A aplicação de soluções que fazem uso de volantes de inércia é recomendada por serem capazes de resistir às mudanças bruscas de velocidade, fato que ajuda a manter a rotação da máquina que está acoplada a ele. Algumas aplicações típicas são: UPS, mitigação de problemas de QEE e carros elétricos e trens (aceleração e frenagem regenerativa).

### 3.2.3. Aspectos técnicos, econômicos e ambientais

**Energia específica:** A energia específica depende do material cujo qual o volante foi construído, por exemplo, para o rotor de aço tem-se aproximadamente 5 Wh/kg e para o rotor de material composto acima de 100 Wh/kg.

**Potência específica:** A potência específica depende do conversor de energia, da máquina elétrica (motor/gerador) e do acoplamento do volante. Pode variar até 1600 W/kg.

**Auto descarga:** A taxa de auto descarga é de aproximadamente 72%/mês, o que mostra que o volante de inércia não é recomendado para armazenamento de longo prazo.

**Ciclos de recarga e tempo de vida:** O volante de inércia é indicado para aplicações onde o número de ciclos é determinante na escolha das soluções. Neste caso, o ciclo de recarga não depende das taxas da carga e descarga. O volante de inércia é projetado para mais de 100.000 ciclos em 20 anos de tempo de vida.

**Tolerância à temperatura:** Na média, a faixa de temperatura em condições de operação é de 0° até 40°. Perdas e tempo de vida não são dependentes da temperatura.

Independentemente do material utilizado, o custo do volante propriamente dito para uma dada capacidade de fornecimento de energia gira em torno de U\$700 - U\$800 por kWh (IEA PVPS TASK 3, 2004). O custo dos materiais compostos (fibra de carbono ou vidro) é aproximadamente 15 vezes maior que do aço, no entanto o valor final acaba sendo equiparado devido pequenas dimensões e o baixo peso dos volantes a base destes materiais.

O custo total do volante de inércia também inclui o custo do acoplamento do volante ao sistema, dos rolamentos e do sistema de eletrônica de potência. A faixa de custo para instalação de volantes de inércia de baixa velocidade (LSF) é de aproximadamente 200 a 800 U\$/kW e para volante de inércia de alta velocidade (HSF) é de aproximadamente 1.000 a 3.000 U\$/kW (IEA PVPS TASK 3, 2004).

Os problemas com a segurança operativa, como o aquecimento das partes externas e o arremesso de destroços em alta velocidade, foram reduzidos de acordo com a evolução dos materiais utilizados para construir o encapsulamento.

Aspectos ambientais a serem considerados são: a não emissão de poluentes e a possibilidade de reciclagem dos componentes eletrônicos e das partes metálicas.

### 3.3. BATERIA

Os fenômenos elétricos associados às baterias permaneceram muitos anos sem uma explicação consistente, sendo seus primeiros relatos datados entre 625 – 550 a.c., nos quais mostram as observações de Tales de Mileto quanto às propriedades eletrostáticas adquiridas por tecidos de seda após serem friccionada com Âmbar.

Ao longo dos anos vários cientistas se arriscaram a entender e explicar estes fenômenos, como por exemplo, os naturalistas que observaram a geração de energia por alguns seres vivos, Luigi Galvani (1737 – 1798) explicou os espasmos sofridos pelos músculos da perna, Alessandro Volta (1745 – 1827) propôs o primeiro modelo geração em corrente contínua (célula galvânica, conhecida como a primeira pilha da história) e Michael Faraday (1791 – 1867) estudou a eletrólise de sais, ácidos e bases, o que lhe permitiu obter as leis básicas da eletrólise. Outras contribuições foram fornecidas por Svante Arrhenius, Peter Debye, Enrich Hückel, Josiah Willard Gibbs e Walther Nernst, das quais se destacam os estudos que permitiram relacionar a quantidade de eletricidade e sua ação química na formação dos produtos, bem como explicar a condutância, o potencial eletroquímico, termodinâmica eletroquímica e outras propriedades de soluções iônicas.

Devido à maturidade destes conceitos, as baterias de chumbo ácido encontraram uma ampla gama de aplicações e as pesquisas se concentraram na aceleração do processo de formação, no desenvolvimento de novos processos de fabricação e nas teorias de funcionamento. Este cenário levou a descoberta de novos arranjos e matérias a serem utilizados na confecção de baterias, como por exemplo, as baterias Níquel-Cádmio. Hoje, as baterias são uma das formas de armaze-

namento de energia mais robustas e utilizadas em projetos de centros de processamentos de dados e aplicações de baixa/média potência.

### 3.3.1. Princípio de funcionamento

A bateria, também conhecida como acumulador, consiste na associação de células galvânicas em série ou em paralelo de forma a obter a tensão e a corrente necessárias para alimentar uma determinada carga. A célula galvânica, apresentada na Figura 3.1, é constituída de um conjunto de dois eletrodos, de composições diferentes, mergulhadas em uma substância eletrolítica e afastadas entre si por um separador de material isolante e poroso para que seja possível a passagem dos íons e por consequência a circulação de corrente elétrica. Os eletrodos podem ser metais, ligas metálicas, compostos intermetálicos ou grafite. E a solução eletrolítica pode ser sais fundidos, solventes adequados ou soluções com eletrólitos capazes de dissociar íons quando dissolvidas em água.

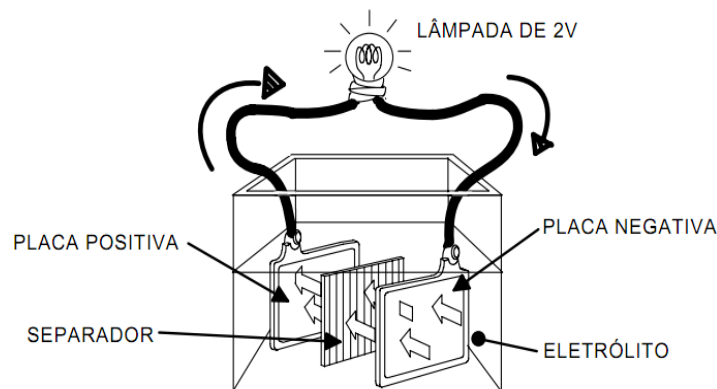


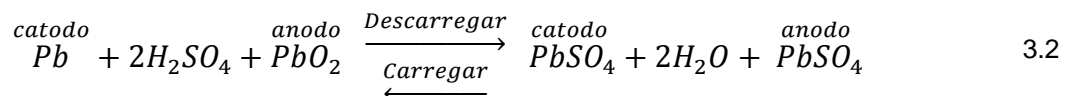
Figura 3.1 – Esquema básico da bateria

Basicamente existem duas categorias de baterias, as de células primárias que não podem ser recarregadas e as de células secundárias que são recarregáveis. A bateria com célula primária produz energia elétrica através de uma reação eletroquímica irreversível e, por isso, não podem ser recarregadas. Suas configurações mais comuns são: alcalina, carbono-zinco ou cloro-zinco, lítio, óxido de prata, zinco-ar ou mercúrio. Já as baterias de células secundárias produzem energia elétrica através de uma reação eletroquímica reversível e, por isso, podem ser recarregadas. As baterias chumbo-ácido representam grande parte do mercado des-

te tipo de bateria, pois permitem a reciclagem de quase todo o material empregado em sua construção.

O material utilizado para construir os eletrodos define o tipo da bateria, os mais utilizados são chumbo, lítio, níquel, hidretos metálicos e sódio. De forma a ilustrar o princípio de funcionamento da bateria será utilizada a composição do tipo chumbo-ácida, por ser a forma mais comum e com o custo benefício apropriado para a maioria das aplicações.

Neste caso, o eletrodo positivo é construído com peróxido de chumbo ( $PbO_2$ ) e o eletrodo negativo é com chumbo metálico ( $Pb$ ) sob a forma esponjosa. O eletrólito é uma solução de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  e água. Durante o processo de descarga, os dois eletrodos são transformados em sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ), o eletrólito perde uma parte do seu ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ , e a proporção de água aumenta, conforme descrito em 3.2.



As reações químicas que ocorrem durante o processo de descarga são reversíveis e por isso a bateria pode ser recarregada. No entanto, à medida que os ciclos de carga e descarga aumentam, a capacidade de reversibilidade da reação diminui e por consequência a bateria não se recarrega mais. A Figura 3.2 apresenta o ciclo de carga/descarga de forma simplificada.

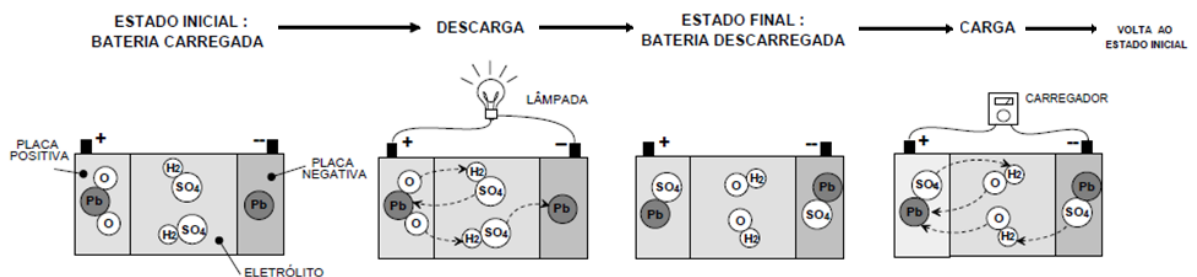


Figura 3.2 – Realização de um ciclo de carga e descarga

### 3.3.2. Diferentes topologias e aplicações

Como apresentado em (CHAGAS, 2007), as baterias são classificadas em quatro tipos de acordo com sua aplicação.

- Baterias de arranque: Utilizadas para dar partida em motores à combustão e como fonte de energia em automóveis. Em sistemas automobilísticos são dimensionadas para fornecer baixa potência em longos períodos, já em partida de motor a potência solicitada é maior;
- Baterias tracionárias: Utilizadas em regimes mais severos de carga, necessitando de potência, energia e longa vida cíclica, principalmente quando operam em regimes de descarga profunda. Normalmente aplicadas em empilhadeiras elétricas, paleteiras elétricas, equipamentos de movimentação em aeroportos, trens, metrô e veículos elétricos em geral;
- Baterias estacionárias: Utilizadas como fontes reserva de energia e potência. Normalmente aplicadas em hospitais, centros de processamentos de dados, centrais elétricas e telefônicas; e
- Baterias para aplicações especiais: Utilizadas em aplicações que não incluem as mencionadas anteriormente, como por exemplo, sistemas fotovoltaicos e carros elétricos.

Ainda podem ser classificadas quanto ao tempo de utilização.

- Longa duração: Utilizada para alimentar cargas mais constantes por tempos superiores a 3 horas. Caracterizadas por eletrodos mais espessos;
- Aplicação geral: Construção muito parecida com as baterias de longa duração, no entanto possui uma melhor condutividade. Ideal para alimentar cargas por períodos entre 1 e 3 horas; e



- Curta duração: Utilizadas para alimentar grandes cargas por um curto período de tempo. Caracterizadas por eletrodos mais finos. Ideal para alimentar cargas por até 1 hora.

Outra forma de classificar as baterias é quanto ao material utilizado para sua construção sendo eles: Chumbo-ácido, Níquel-cádmio, Níquel-zinco, Hidreto metálico e Sódio-Enxofre. No entanto, em (IEEE, 2006) apresenta-se os tipos de bateria recomendados para aplicações em sistemas UPS.

- Chumbo - ácida ventilada (VLA - Vented lead-acid);
- Chumbo - ácida regulada por válvula (VRLA - Valve-regulated lead-acid);
- Níquel – Cádmio ventilada (Vented Ni-Cd); e
- Níquel – Cádmio selada (Sealed Ni-Cd).

### **Baterias chumbo ácida**

#### a) Chumbo - ácida ventilada (VLA - Vented lead-acid)

Está é a forma mais utilizada de bateria chumbo-ácida. Suas placas são montadas de forma paralela e imersas em líquido eletrolítico. Dependendo da espessura das placas, entre outros fatores, as placas podem fornecer valores elevados de corrente de curta duração devido à baixa resistência interna. Esse tipo de bateria deve ter seu reservatório de água constantemente abastecido, e por emitir gases nocivos à saúde e explosivos deve ser instalada em sala acondicionada com controles especiais do ar ambiente e da iluminação à prova de explosão.

As baterias estacionárias ventiladas, quando totalmente carregadas, possuem tensão entre 2,06 V/célula e 2,10 V/célula. Essa variação deve-se a mudanças na temperatura e no peso específico. Sua vida útil é de aproximadamente 15 anos a uma temperatura de 25°C e de aproximadamente 12 anos a uma temperatura de 30°C. Considera-se o fim da vida útil quando a capacidade da bateria atinge 80% da capacidade nominal (capacidade declarada pelo fabricante).

#### b) Chumbo - ácida regulada por válvula (VRLA - Valve-regulated lead-acid)

As baterias VRLA podem ser de dois tipos: as de eletrólito gel e as de eletrólito absorvido nos separadores. Durante os anos 70, os pesquisadores desenvolvem

---

ram as baterias chumbo-ácido reguladas por válvula, que poderiam operar em qualquer posição. O eletrólito líquido fora retido nos separadores ou no gel.

Estas baterias permitem a recombinação da maior parte dos gases produzidos durante o seu funcionamento, o que reduz as perdas de água. As baterias VRLA são usadas principalmente em aplicações estacionárias. Sua capacidade vai de poucos Ah até vários milhares de Ah e são encontradas em sistemas de telecomunicações e UPS de todos os tamanhos, instalados em centros de distribuição de energia, hospitais, bancos, aeroportos e instalações militares. Devido ao baixo custo e à manutenção reduzida, as baterias seladas são a melhor escolha em muitas aplicações.

As baterias estacionárias seladas, quando totalmente carregadas, possuem tensão entre 2,06 V/célula e 2,17 V/célula. Essa variação deve-se a mudanças na temperatura e no peso específico. Ao contrário das baterias chumbo-ácido ventiladas, as baterias seladas são projetadas para operarem em condições controladas de sobre tensão, de forma a evitar a formação excessiva de gases durante a carga. A carga em excesso pode sobrecarregar o sistema de recombinação de gases e acentuar a depleção de água.

As baterias chumbo-ácido não estão sujeitas ao denominado efeito memória. Deixar a bateria em carga flutuante por um período de tempo prolongado não causa nenhum dano. A retenção de carga é a melhor entre todas as baterias recarregáveis. Enquanto que as baterias Ni-Cd se auto descarregam, aproximadamente, 40 % da sua energia armazenada em três meses, a bateria VRLA se auto descarrega na mesma quantidade, num período de um ano. As baterias VRLA (como no caso das ventiladas) devem sempre ser armazenadas carregadas. Deixar a bateria descarregada causa sulfatação irreversível das placas, uma condição que torna difícil, se não impossível, a posterior recarga das mesmas.

### **Baterias Níquel-Cádmio**

#### a) Níquel – Cádmio ventilada (Vented Ni-Cd)

A bateria de níquel-cádmio (Ni-Cd) é constituída de uma placa positiva de níquel oxihidróxido (NiOOH) e uma negativa de Cádmio (Cd) imerso em uma solução eletrolítica. Esta solução eletrolítica não faz parte da reação química, ou seja, não ocorre alteração do peso específico durante o processo de carga e descarga. O eletrólito mantém a habilidade de trocar íons entre as células, independente do nível de carga e também ajuda a manter a estrutura mecânica das células. São bastante resistentes a stress mecânico e elétrico, operam bem em uma ampla faixa de temperatura e suportam descargas frequentes.

A célula de Ni-Cd possui uma tensão de circuito aberto de 1,30 V e uma tensão nominal de descarga de 1,20 V. Os fabricantes recomendam uma tensão de flutuação entre 1,40 V/célula e 1,47 V/célula e tensão máxima de 1,45 V/célula e 1,65 V/célula. Dependendo das necessidades da aplicação é possível projetar células capazes de suportar altos valores de taxa de carga e descarga sem danos. Em alguns casos, também é possível armazenar energia por anos sem perdas e suportar descarga completa sem nenhum dano.

#### b) Níquel – Cádmio selada (Sealed Ni-Cd)

A bateria de Ni-Cd selada normalmente é utilizada em equipamentos eletrônicos e pequenos UPS, pois sua capacidade é um pouco limitada. As células são construídas a partir de eletrodos agrupados de forma que são enrolados em conjunto com um separador para formar uma placa cilíndrica.

O recipiente de célula é completamente selado e nenhum gás é liberado sob condições normais de operação. A forma construtiva se assemelha a Ni-Cd ventiladas, no entanto, possuem um reservatório próprio para a expansão e recombinação dos gases nocivos.

### **3.3.3. Análise comparativa**

A escolha do tipo de bateria normalmente é feita pelo fornecedor do equipamento, mas os usuários devem estar atentos ao tipo de bateria usada e aos pro-

cedimentos de manutenção requeridos, pois estes parâmetros podem influenciar a escolha do equipamento. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades básicas dos principais tipos de bateria.

Tabela 3.1 – Propriedades básicas dos principais tipos de bateria

<b>Propriedade</b>	<b>Chumbo-ácida</b>	<b>Ni-Cd</b>
Faixa de Potência	< 10 MW	1 – 100 kW
Auto Descarga	1 – 4%/mês	5 – 40%/mês
Energia específica (Wh/kg)	35 – 40	10 – 55
Potência específica (W/kg)	< 400	50 – 1.000
Eficiência	81 – 94%	60 – 83%
Necessidade de utilizar	180 dias	30 dias
Risco ao meio ambiente	Nociva, pois libera hidrogênio no processo de recarga	Baixo Risco (Químico e Elétrico)
Custo Aproximado (€/kWh)	50 - 150	500 - 3000

### 3.4. SUPERCAPACITOR

Em 1746, o físico holandês Pieter van Musschenbroek apresentou o primeiro modelo de capacitor, conhecido como garrafa de Leyden. Era constituído por uma garrafa de vidro tampada com uma rolha e preenchida por água. Também continha um condutor que conectava a mão do experimentador a água. John Bevis substituiu a água por materiais como granalha de chumbo, lâminas de ouro e por fim lâminas de cobre, de forma a diminuir o processo de oxidação e melhorar a condutividade. Suas experiências levaram a conclusão que a mão do experimentador era equivalente a ligar o terminal à terra e que a garrafa era equivalente ao material isolante. Assim, com o uso de placas planas de estanho como material isolante deu-se início a uma nova forma de construção de capacitores. Em 1750, Franz Ulrich Theodor Aepin u concluiu suas experiências utilizando o ar como dielétrico.

Em 1789, o físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz comprovou que a distância entre cargas positivas e negativas geradas na interface de um eletrodo e um eletrólito também ocorre em nível molecular. Essa teoria de capacitores de dupla camada serviu de base para o desenvolvimento dos primeiros protótipos comerciais. Em 1957, a General Electric registrou a patente de um ca-

pacitor que usava um eletrodo de carbono ativado muito poroso. A densidade de carga deste material permitiu o desenvolvimento prático de tecnologias que possibilitaram atingir altos valores de energia específica da ordem de 40 Wh/kg, sendo que alguns fabricantes afirmam ser possível alcançar o patamar de 60 Wh/kg.

Os capacitores de dupla camada, também são conhecidos como supercapacitores, ultracapacitores ou capacitores eletroquímicos. Neste trabalho, com o intuito de unificar a linguagem, será denominado supercapacitor.

### 3.4.1. Princípio de funcionamento

Os supercapacitores armazenam energia por meio de carga estática e se recarregam quando é aplicada uma diferença de potencial em seus terminais. Sua forma construtiva se assemelha a de uma bateria, pois possui dois eletrodos espaçados entre si e imersos em uma substância eletrolítica. Os eletrodos são construídos de material poroso, sendo o diâmetro destes poros da ordem de nanômetros. Quando carregado os dipolos estão dispostos como mostrado na Figura 3.3.

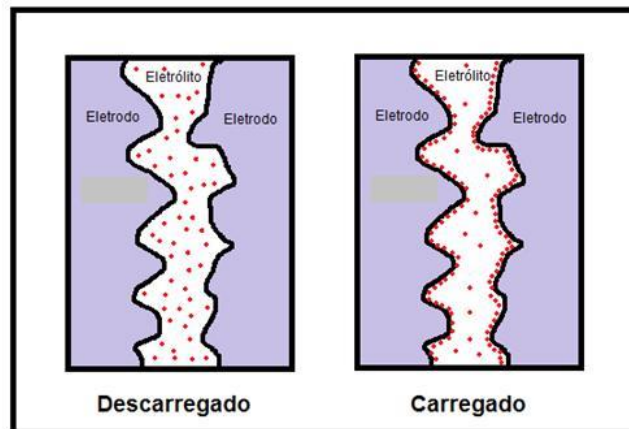


Figura 3.3 – Estado de carga/descarga nos supercapacitores

A carga  $Q$  (Coulombs) e a energia  $E_{ce}$  (Joules) armazenadas num supercapacitor podem ser calculadas pelas mesmas equações do capacitor convencional, conforme Equações (3.3) e (3.4). No entanto, a capacitância depende das características dos eletrodos, ou seja, área da superfície e a distribuição dos poros.

$$Q = C \times V$$

$$E_{ce} = \frac{1}{2} CV^2 \quad 3.4$$

Onde,

$E_{ce}$  – energia armazenada no campo elétrico

C - capacitância em Farads (F); e

V – tensão aplicada aos terminais do supercapacitor.

A capacidade de armazenamento pode ser expressa pela capacitância C, conforme equação (3.5), que mensura a quantidade de carga que pode ser armazenada nas placas condutoras. Outro conceito importante é a permissividade eletrostática ( $\epsilon$ ), que representa a facilidade de se estabelecer as linhas de campo no interior do material, ou seja, quanto maior for este valor maior será a capacidade de armazenamento de carga.

$$C = \epsilon \times \frac{A}{d} \quad 3.5$$

Onde,

C - capacitância em Farads (F)

$\epsilon$  - permissividade eletrostática F/m;

A – área das placas em m<sup>2</sup>; e

d – distância das placas em m.

O desempenho dos supercapacitores depende da capacitância específica do eletrodo (F/g ou F/cm<sup>3</sup>) e da condutividade da substância eletrolítica. A capacitância específica depende se o material é utilizado no polo positivo ou negativo e também se o eletrólito é orgânico ou aquoso. A maioria dos materiais a base de carbono possuem uma alta capacitância específica. No entanto, os materiais orgânicos possuem tensão de operação mais elevada. Essas particularidades podem ser observadas na Tabela 3.2 (FARRET e SIMÕES, 2006).

Tabela 3.2 – Principais características das substâncias eletrolíticas

	Aquoso	Orgânico
Capacitância específica (F/g)	75 – 175	40 - 100
Tensão de operação (V)	1	2,5

Os supercapacitores destacam-se pela alta capacitância, grande capacidade de acumular energia, curto espaço de tempo para carga e descarga e, em condições normais de operação, não ocorrem reações químicas. Enquanto os capacitores

res comuns possuem valores típicos de capacitância da ordem de nano a miliFarads, os supercapacitores atingem unidade de Farads. Estes altos valores são obtidos com o uso de materiais como carbono ativo, fibras de carbono ou óxido de rutênio ( $\text{RuO}_2$ ) que possuem uma superfície elétrica ativa muito maior que os filmes metálicos usualmente empregados na construção dos capacitores comuns.

### 3.4.2. Diferentes topologias e aplicações

Como apresentado em (IEA PVPS TASK 3, 2004), os Supercapacitores são divididos em duas categorias de acordo com o tamanho da sua capacitância:

- 0,05 a 100F, principalmente utilizados em eletrônica;
- 100 a 5000F usados em veículos elétricos e equipamentos de condicionamento da energia elétrica.

As principais formas construtivas são: ficha ou laminado (round), cilíndrico ou radial (spiral) e prismático (prismatic) e estão apresentadas na Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6 respectivamente.



Figura 3.4 – Supercapacitor do tipo ficha ou laminado (round)



Figura 3.5 – Supercapacitor do tipo cilíndrico ou radial (spiral)



Figura 3.6 – Supercapacitor do tipo prismático (prismatic)

Os supercapacitores possuem larga aplicação na indústria, em processos onde são exigidos pulsos elétricos rápidos, mas muito intensos e quando combina-

dos com soluções que utilizam baterias, são responsáveis por suprir as variações rápidas e deixando a carga do grupo de baterias apenas o suprimento de variações longas. Esse procedimento diminui a entrada do grupo de baterias reduzindo seu ciclo de operação e prolongando sua vida útil.

Inicialmente, os supercapacitores eram utilizados para auxiliar a partida dos motores utilizados em tanques e submarinos. Hoje, algumas aplicações típicas são: UPS, cargas rápidas (flashes fotográficos) e veículos de transporte público, como trens e metrô (aceleração e frenagem regenerativa).

### 3.4.3. Aspectos técnicos, econômicos e ambientais

**Tensão de fornecimento:** Os sistemas que utilizam supercapacitores podem ser adequados para diferentes valores de tensão a partir da associação série ou paralelo das células. No caso de um sistema de alta tensão, as células normalmente são instaladas em módulos que possuem um sistema automático para balancear a tensão entre as células. Durante a operação, a tensão das células varia muito de acordo com o estado da carga do capacitor, portanto, limita-se a tensão mínima em 0,5 V, fornecendo 75% da energia disponível. Como não existe um padrão, no mercado é possível encontrar células de 1 ou 2,3 V e módulos de 12, 14, 24, 42, 56 e 75 V.

**Eficiência:** A eficiência é dependente do tempo de descarga, portanto, da corrente de descarga. Da ordem de 85% (curto período – 10 segundos) até quase 100% (longo período – 1 minuto).

**Energia específica:** 0,1 até 5 Wh/kg.

**Potência específica:** 50 até 10000 W/kg.

**Auto descarga:** A energia perdida devido a auto descarga do supercapacitor é representativa e varia de um equipamento para o outro. Ela também é dependente da temperatura de armazenamento. Como exemplo, as perdas podem variar de 50% em um mês a 35% em quatro dias.

**Ciclos de recarga e tempo de vida:** O supercapacitor é projetado para atuar entre  $10^5$  até  $5 \times 10^5$  ciclos em 10 anos.



**Tolerância à temperatura:** Na média, a faixa de temperatura em condições de operação é de 40° até 60°.

O custo dos supercapacitores vem caindo na última década, por exemplo, em 1997 o custo era aproximadamente de 150 a 500 €/Wh, já em 2002 o custo era aproximadamente de 50 a 150 €/Wh e próximo de 2005 estimava-se o custo em 15 €/Wh (IEA PVPS TASK 3, 2004). No entanto, para aumentar sua aplicação deve-se reduzir o custo de componentes como o eletrodo de carbono, eletrólito e da substância eletrolítica.

### **3.5. SUPERCONDUTOR (SMES)**

Supercondutividade é um fenômeno no qual certos materiais, alguns metais e cerâmicas, apresentam uma resistência elétrica desprezível quando são resfriados a temperaturas muito baixas. A Temperatura Crítica ( $T_c$ ) é o valor de temperatura para o qual a resistência elétrica do material começa a cair acentuadamente. Para a maioria dos supercondutores a temperatura crítica é aproximadamente 4 K (-269 °C) e são resfriados utilizando hélio líquido. No entanto, a partir da década de 80 um novo tipo de supercondutor feito de cerâmica de óxido de cobre (copper oxide ceramic) passou a ser utilizado e sua temperatura crítica é de 100 K (-173 °C) e são resfriados utilizando nitrogênio líquido ou um fluido refrigerante especial.

Os baixos valores de resistência elétrica apresentados por esses materiais facilitam a circulação de corrente e com baixíssimas perdas. Algumas experiências mostraram que malhas de fios supercondutores podem transmitir correntes elétricas por centenas de anos sem nenhuma perda considerável. Novas pesquisas estão sendo realizadas de forma a construir um novo conceito de supercondutor, no qual o espaço entre o cabo e o isolante seria preenchido com hélio.

Dessa forma, a corrente elétrica preencheria toda a seção transversal e percorreria toda a extensão do condutor de forma a permitir maior flexibilidade e possibilidade de redução de custo.

#### **3.5.1. Princípio de funcionamento**

O funcionamento do sistema de armazenamento de energia por supercondutores (SMES) consiste em armazenar energia no campo magnético criado atra-

vés da corrente contínua que circula em uma grande bobina constituída por fios supercondutores resfriados por um fluido em temperatura criogênica.

O supercondutor armazena energia proporcionalmente ao valor da indutância e ao quadrado da corrente que passa pelas  $N$  espiras, como indicado pela equação 3.6.

$$E(t) = \frac{1}{2} Li(t)^2 \quad 3.6$$

A título de exemplo, um material ferromagnético típico com 2 T de indução magnética, terá densidade de energia de aproximadamente  $555,6 \text{ Wh/m}^3$ , o qual tem ordem de grandeza maior do que os supercapacitores e menor do que das baterias.

A Figura 3.7 apresenta o esquema de controle de carga e descarga de um supercondutor para um sistema monofásico e um sistema trifásico. Estas topologias requerem um conversor com fluxo de potência bidirecional. Durante o processo de carga ou descarga, o supercondutor deve estar polarizado na mesma direção da circulação da corrente.

Dessa forma, para que o supercondutor possa ser carregado, o esquema de controle deve aplicar uma tensão negativa em seus terminais. Já para que o supercondutor possa ser descarregado, a tensão aplicada em seus terminais deve ser positiva.

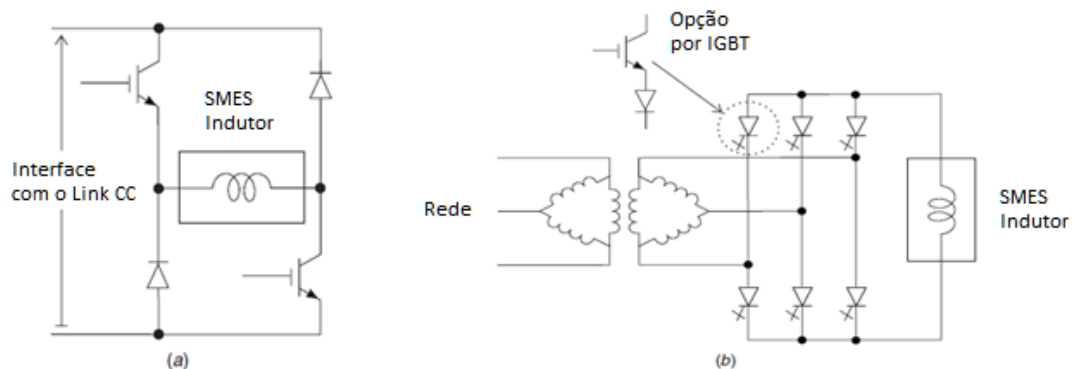


Figura 3.7 – Diagramas esquemáticos: (a) Monofásico (b) Trifásico.

### 3.5.2. Diferentes topologias e aplicações

Os sistemas SMES podem ser constituídos por supercondutores com baixa (LTSC) ou alta (HTSC) temperatura crítica e fornecer potência da ordem de 1 até 5000 MW para atuar em tempos na faixa de alguns segundos até horas.

A Tabela 3.3 apresenta a classificação das soluções SMES quanto ao material e sua temperatura crítica (IEA PVPS TASK 3, 2004).

Tabela 3.3 – Classificação das soluções SMES

	Supercondutores com baixa temperatura crítica (LTSC)	Supercondutores com alta temperatura crítica (HTSC)			
<b>Temperatura</b>	- 269 °C	- 173° C			
<b>Fluido Refrigerante</b>	Hélio	Nitrogênio			
<b>Material</b>	Nióbio Titânio	Ítrio Bário Cobre	Bismuto Chumbo Cálcio Cobre	Tálio Bário Cálcio Cobre	Mercúrio Bário Cálcio Cobre
<b>Tecnologia</b>	Disponível	Em Desenvolvimento		Desenvolvimento Futuro	

A Tabela 3.4 apresenta a aplicação das soluções SMES quanto à faixa de potência (IEA PVPS TASK 3, 2004).

Tabela 3.4 – Classificação das soluções SMES de acordo com a faixa de potência

	Unidade de Pequeno Porte		Unidade de Médio Porte		Unidade de Grande Porte
<b>Faixa de Energia</b>	1 – 10kWh	10 – 100 kWh	1 – 100MWh	5 – 100MWh	1.000 – 10.000kWh
<b>Faixa de Potência</b>	1 – 10MW	100 – 1.000MW	1 – 10MW	500 – 5.000MW	1.000 – 5.000MW
<b>Tempo de Carga</b>	1 – 10s	0,1 – 3s	10m – 50h	20s – 10m	1 – 10h
<b>Aplicação</b>	UPS e Condicionadores de energia		Fonte de energia de Back-up e Centralizador da energia gerada em fazendas eólicas e parques solares		Estabilização de tensão

A necessidade de resfriamento dos sistemas HTSC é menor dos que nos sistemas LTSC. No entanto, a quantidade de material supercondutor utilizado para construir um LTSC é maior para obter a mesma indutância e por isso acabam sendo até 60% mais caro que os sistemas HTSC. As perdas são quase inexpressíveis, da ordem de 2% a 3% por operação de descarga. O sistema de resfriamento tem a importante função de garantir esta alta eficiência e a alta confiabilidade.

Devido à sua capacidade de descarregar instantaneamente grandes blocos de energia, a aplicação principal do SMES é garantir a qualidade de energia de um sistema de distribuição em eventuais apagões ou distúrbios de tensão. No entanto, existem algumas outras aplicações como, por exemplo, em trens de alta velocidade, levitação magnética e centralizador da energia gerada em fazendas eólicas e parques solares e finalmente em equipamentos de ressonância magnética.

### 3.5.3. Aspectos técnicos, econômicos e ambientais

**Tensão de fornecimento:** Pequenas mudanças de temperatura, da densidade de corrente ou no campo magnético crítico podem causar variações na tensão de fornecimento. Por isso, o sistema de refrigeração deve ser bem robusto de forma a manter sempre a temperatura adequada para operação do sistema SMES.

**Eficiência:** Os sistemas SMES geralmente apresentam eficiência da ordem de 90% a 99%.

**Energia e potência específica:** É capaz de fornecer alta potência instantaneamente, bem como é a forma de armazenamento de energia com a maior potência específica hoje disponível no mercado. Sua energia específica é da ordem de 4 a 75 Wh/kg e sua potência específica é da ordem de 1.000 a 100.000 W/kg.

**Serviço e tempo de vida:** O SMES pode repetir o ciclo de carga e descarga milhares de vezes sem nenhuma avaria. Tipicamente, o tempo de vida é estimado em 100.000 ciclos ou 20 anos. No entanto, a operação do sistema e o tempo de vida não são influenciados pela severidade da descarga.

O preço continua sendo o maior empecilho para o aumento do uso desta tecnologia. A Tabela 3.5 apresenta o custo de um sistema SMES de 1 MW a partir da soma dos custos dos componentes que compõem o sistema.

Tabela 3.5 – Custo de um sistema SMES de 1 MW

Tempo de descarga (s)	1	30	60
Sistema de Resfriamento (K€)	33	114	162
Fluido refrigerante (K€)	232	374	472
Inversor de frequência (K€)	600	900	1200
Total (K€)	865	1388	1834

---

Analisando os dados da tabela observa-se que o custo do inversor de frequência equivale a 65% do total. Com o advento do desenvolvimento de novas soluções de eletrônica de potência espera-se a redução do custo total da solução.

Os sistemas SMES são pequenos, silenciosos e seguros. No entanto, grandes unidades trabalham com um campo magnético muito elevado, da ordem de 9 T ou mais. Visando a viabilização comercial desta tecnologia, tem-se dirigido esforços consideráveis para o estudo dos efeitos a saúde devido à exposição aos campos magnéticos.

### **3.6. ANÁLISE COMPARATIVA**

Cada sistema de armazenamento de energia tem suas particularidades técnicas e operativas para obter o melhor desempenho, e por isso neste capítulo apresentam-se as principais informações abordadas e discutidas até momento com o intuito de comparar os sistemas de armazenamentos de energia estudados.

A principal diferença entre estes sistemas é o tempo de fornecimento da energia armazenada, que no caso das baterias pode se estender de alguns poucos segundos a dezenas de horas, enquanto nos demais sistemas restringem-se a períodos muito curtos. Entretanto, a pequena autonomia é compensada pela potência que pode ser transferida, como pode ser visualizado na Figura 3.8.

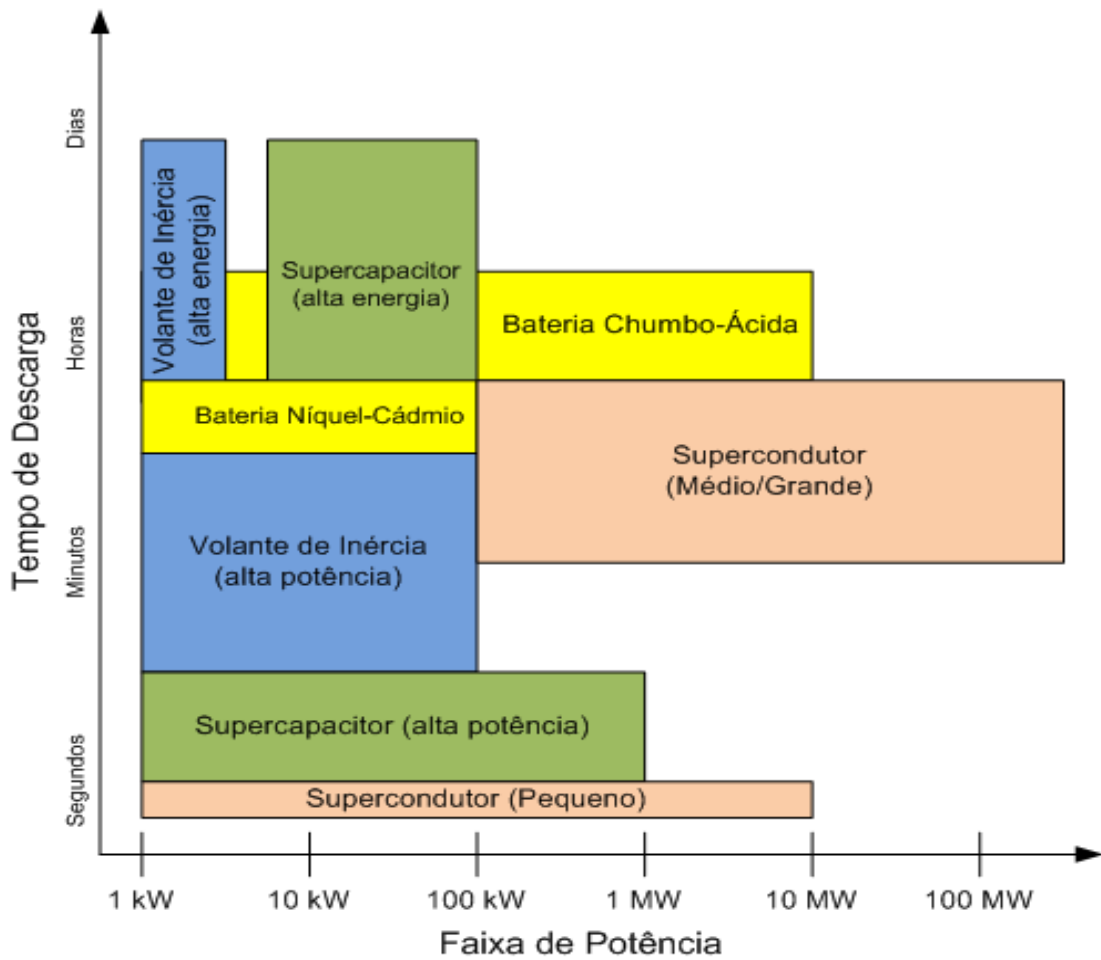


Figura 3.8 – Faixas potência x tempo de descarga dos sistemas de armazenamento de energia

Cabe destacar que cada sistema de armazenamento de energia tem particularidades que devem ser consideradas na escolha de um ao invés dos outros. Dentro deste contexto, apresenta-se na Tabela 3.6 um comparativo entre os sistemas de armazenamento de energia estudados envolvendo os principais parâmetros de cada um deles.

Tabela 3.6 – Quadro comparativo dos sistemas de armazenamento de energia estudados

	<b>Volante de inércia</b>	<b>Bateria Chumbo-ácida</b>	<b>Bateria Níquel-Cádmio</b>	<b>Supercapacitor</b>	<b>Supercondutor</b>
<b>Faixa de Potência</b>	< 5kW (Maior Autonomia) < 100kW (Maior Potência)	< 10MW	< 100kW	< 1MW	< 5.000MW
<b>Autonomia</b>	Segundos a Horas	Horas	Horas	< 1 minuto	Segundos a Horas
<b>Auto descarga</b>	72%/mês	1 – 4%/mês	5 – 40%/mês	50%/mês	-
<b>Histórico de Aplicação</b>	Várias décadas	Várias décadas	Alguns anos	Pouco Anos	Pouco Anos
<b>Energia Específica (Wh/kg)</b>	5 – 100	35 – 40	10 – 55	0,1 – 5	4 – 75
<b>Potência Específica (W/kg)</b>	<1600	< 400	50 – 1.000	50 – 10.000	1.000 – 100.000
<b>Eficiência</b>	80 – 90%	81 – 94%	60 – 83%	85 – 100%	90 – 99%
<b>Tempo de Recarga</b>	Segundos a minutos	10 x Tempo de descarga	10 x Tempo de descarga	Segundos	Segundos a Horas
<b>Tempo de Vida Útil (anos)</b>	> 20	3 – 15	5 – 15	> 10	20
<b>Número de Ciclos Completos</b>	>10 <sup>5</sup>	100 – 1500	500 - 3000	10 <sup>5</sup> – 5x10 <sup>5</sup>	100.000
<b>Condições de Operação</b>	Extensa faixa de temperatura	Estreita faixa de temperatura	Extensa faixa de temperatura	Extensa faixa de temperatura	Restrita faixa de temperatura (Criogênicas)
<b>Confiabilidade</b>	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta
<b>Segurança</b>	Equipamento rotativo trabalhando em alta velocidade	Controle rigoroso do despejo de ácido	Tensão controlada para evitar a formação de gases	Tensões Elevadas de operação	Controle rigoroso da temperatura de resfriamento
<b>Manutenção</b>	Moderada	Moderada/Alta	Moderada/Alta	Moderada	Alta
<b>Impacto Ambiental</b>	Baixíssimo	Nociva, pois libera hidrogênio no processo de recarga	Moderada	Nocivo em caso de incineração	Baixo devido a temperatura
<b>Custo aproximado (€/kWh)</b>	700 – 1.000	50 – 150	220 – 3.200	50.000 – 150.000	800 – 1.800
<b>Grau de Maturidade</b>	Moderado/Elevado	Elevado	Moderado/Elevado	Moderado	Baixo

Observa-se que as fontes de energia de curta duração ainda estão em fase de desenvolvimento e os custos de investimento ainda são relativamente altos. A

Figura 3.9 apresenta a curva do custo específico do investimento pela autonomia da solução. Porém, destaca-se que estes custos tendem a cair com a evolução tecnológica e do aumento do volume de produção.

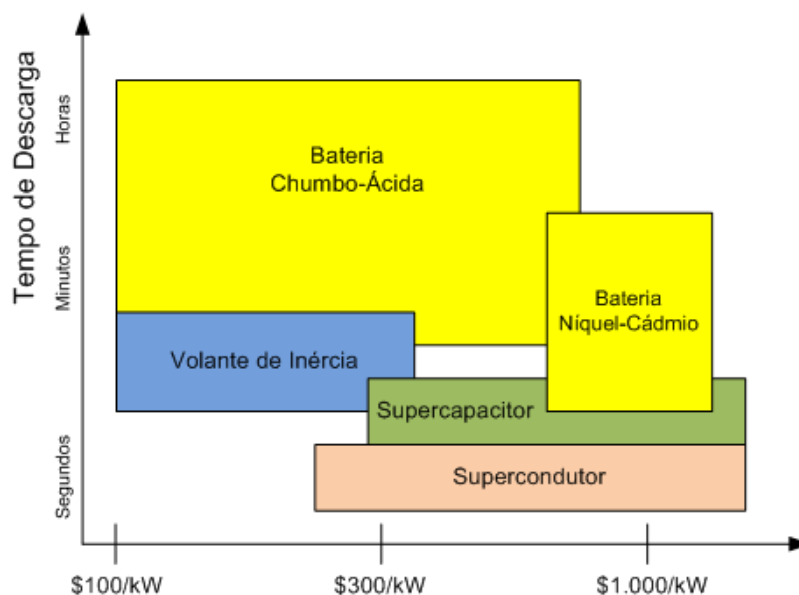


Figura 3.9 – Custo específico de investimento para diferentes dispositivos de armazenamento de energia e sua respectiva autonomia

Por fim, apresenta-se na Tabela 3.7 as principais vantagens e desvantagens dos sistemas de armazenamento estudados.

Tabela 3.7 – Vantagens e Desvantagens das soluções estudadas

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Volante de inércia</b>	Vida útil, elevada potência específica, elevada eficiência	Elevado custo e perdas significativas (alta taxa de auto descarga)
<b>Bateria Chumbo-ácida</b>	Elevada eficiência, elevada potência específica, baixo custo, tecnologia madura com grande disponibilidade no mercado, baixa taxa de auto descarga, segurança operativa e alguns modelos não necessitam de manutenção	Baixa energia específica, considerável impacto ambiental, baixa vida útil, necessidade de manutenção constante devido à degradação dos componentes, necessidade de considerável espaço físico para instalação e liberação de hidrogênio (risco de explosão)
<b>Bateria Níquel-Cádmio</b>	Vida útil, elevada potência específica, elevada eficiência	Elevado custo, baixa eficiência, perdas significativas (alta taxa de auto descarga) e utilização de material tóxico (Cádmio)
<b>Supercapacitor</b>	Vida útil, elevada potência específica, elevada eficiência	Elevado custo, baixa densidade de energia e perdas significativas (alta taxa de auto descarga)
<b>Supercondutor</b>	Vida útil, elevada potência específica	Custo, necessidade de considerável espaço físico para instalação, complexo sistema de refrigeração (temperaturas criogênicas)



### 3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais sistemas de armazenamento, sendo eles: volante de inércia (Flywheel), bateria, supercapacitor e supercondutor (SMES). Estes sistemas são capazes de suprir parte ou toda a energia não fornecida pela fonte principal de alimentação durante certo período de tempo associado à autonomia do armazenador de energia.

Em uma primeira análise, destaca-se a dualidade dos modelos para o armazenamento de energia no Volante de Inércia, que ocorre em uma massa girante, no Supercapacitor, em um campo elétrico, e no Supercondutor no campo magnético. No entanto, cada forma de armazenamento tem as suas particularidades que as tornam bem diferentes entre si e, portanto, torna-se necessário conhecer os benefícios e as limitações de cada uma delas de forma a identificar para quais aplicações são recomendadas.

Cabe ressaltar que o sistema de armazenamento de energia com baterias chumbo-ácida ainda é uma solução mais madura e barata que existe no mercado. No entanto, algumas conclusões a respeito das outras formas de armazenamento são apresentadas na sequência.

As baterias de Níquel-Cádmio já atingiram um nível de maturidade para competir com as chumbo-ácidas, mesmo sendo tecnicamente inferior em termos de auto descarga e eficiência. Pode ser uma solução interessante para ser aplicada em regiões de clima frio, porém, o preço praticado pelo mercado ainda dificulta sua maior aplicação.

O uso de supercapacitores é recomendado para casos que necessitem de alta potência em um curto período de tempo, entretanto, deve-se considerar sua baixa energia específica, elevada taxa de auto descarga e seu elevado custo de implantação.

O uso de volante de inércia também é recomendado para casos que necessitem de alta potência em um curto período de tempo, entretanto, deve-se considerar sua elevada taxa de auto descarga e seu elevado custo de implantação.

O uso de supercondutores ainda não é recomendado para aplicações isoladas.

Apesar de ser a solução com melhor custo benefício para a maioria das aplicações existentes, ressalta-se que as baterias chumbo-ácida ainda necessitam de melhorias no seu desempenho, principalmente em relação ao ciclo de vida.

Por fim, destaca-se a importância dos armazenadores para o desenvolvimento das chamadas redes inteligentes (Smart Grids), como por exemplo, a utilização de baterias em fazendas eólicas e solares para armazenamento da energia gerada no período mais produtivo, visando a otimização do suprimento da rede quando os ventos não forem favoráveis e/ou durante a noite, conforme amplamente discutido em (GONZÁLEZA, SUMPORA, *et al.*, 2012) e (DIVYA e OSTERGAARD, 2009).

## 4. MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO ATRAVÉS DE SOLUÇÕES COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As soluções com armazenamento de energia são aquelas que possibilitam a operação da carga durante a ocorrência dos distúrbios por meio da utilização de um sistema de armazenamento de energia auxiliar. Assim, normalmente aplica-se este tipo de solução para suprir cargas de missão crítica, como por exemplo, o suprimento de energia a equipamentos de informática (Servidores de Bancos, Controle de Tráfego aéreo e banco de dados empresariais) e de controle/automação. No entanto, possuem o inconveniente de serem soluções de custo elevado de implementação e manutenção.

Os novos questionamentos oriundos da evolução do estudo da Qualidade da Energia levaram ao desenvolvimento de soluções, que além de mitigar AMTs e/ou pequenas interrupções, também fossem capazes de garantir que as cargas essenciais pudessem operar da maneira mais adequada possível evitando que os distúrbios do sistema principal de energia não fossem transferidos para a carga.

De acordo com (KING e KINIGHT, 2003), existem quatro razões básicas para a utilização de soluções com armazenamento de energia, sendo elas:

- Segurança Humana: instalações que alimentam equipamentos eletromédicos, sistemas de controle de voo, instalações de usinas nucleares;
- Segurança Nacional: sistemas de comunicação, instalações militares, controle do espaço aéreo;
- Perdas de Dados: situações em que a perda de informações ou dados possam ser irrecuperáveis, por exemplo, em experimentos realizados em centros de pesquisas; e
- Perdas Financeiras: processos industriais e instalações bancárias.

Assim, a primeira solução com armazenamento de energia utilizada foi o UPS rotativo que funcionava à base de um conjunto moto-gerador diesel, que em

---

operação normal da carga atuava como um motor e girava um volante de forma a armazenar energia na forma cinética. Na falta da fonte principal, o conjunto motorizador passava a atuar como um gerador mantido em funcionamento pela energia armazenada no volante de inércia. Os UPS rotativos foram amplamente utilizados até meados da década de 70, pois os componentes de eletrônica de potência ainda não eram capazes de transformar grandes blocos de energia. O avanço tecnológico permitiu a evolução da eletrônica de potência e em função da necessidade de chaveamento de cargas cada vez maiores e em tempos cada vez menores, deu-se origem ao sistema estático de potência, e de controle digital. Devido à inexistência de partes rotativas, estes sistemas de alimentação de energia ininterrupta ficaram conhecidos como UPS estáticos.

A solução com armazenamento de energia mais utilizada na indústria sem dúvida é o UPS. No entanto, em alguns casos este sistema se mostra oneroso e diminui sua relação de custo benefício.

O avanço da eletrônica de potência aliado à baixa de custos nos microprocessadores e sistemas de controle permitiu a viabilização de soluções mais complexas e eficazes para solucionar problemas de AMTs, como o DVR e DySC.

O Restaurador Dinâmico de Tensão (Dynamic Voltage Restorer – DVR) basicamente é um compensador estático em série com a carga, cuja finalidade é injetar diferentes sinais de tensão a fim de corrigir, sobretudo os AMTs. Outra solução é o Dynamic Sag Corrector (DySC), basicamente é uma topologia patenteada do DVR e também se baseia na compensação série dos distúrbios de tensão através da injeção do sinal de compensação gerado por meio de um inversor.

Por fim, destaca-se que serão abordados neste capítulo o princípio de funcionamento, as diferentes topologias existentes e os principais aspectos técnicos relacionados às soluções citadas.

## **4.2. UPS ROTATIVO**

Em face da necessidade de fornecimento contínuo de energia durante um AMT, seja em aplicação na área de telecomunicações, suporte à vida, processos

---

industriais de alto valor agregado ou mesmo em centros de processamento de dados, identifica-se como adequada a instalação de um sistema UPS.

Na década de 1960, os centros de processamentos de dados começaram a exigir sistemas auxiliares para garantir o fornecimento de energia frente a distúrbios de energia, em especial AMTs. Uma das primeiras soluções apresentadas para estes casos foi o fornecimento de energia por meio de grupos geradores diesel operando em paralelo ao sistema de alimentação principal. Este sistema era constituído por um elemento de armazenamento cinético chamado volante de inércia (flywheel) que, em eventual necessidade, fornecia energia suficiente para o acionamento do motor diesel.

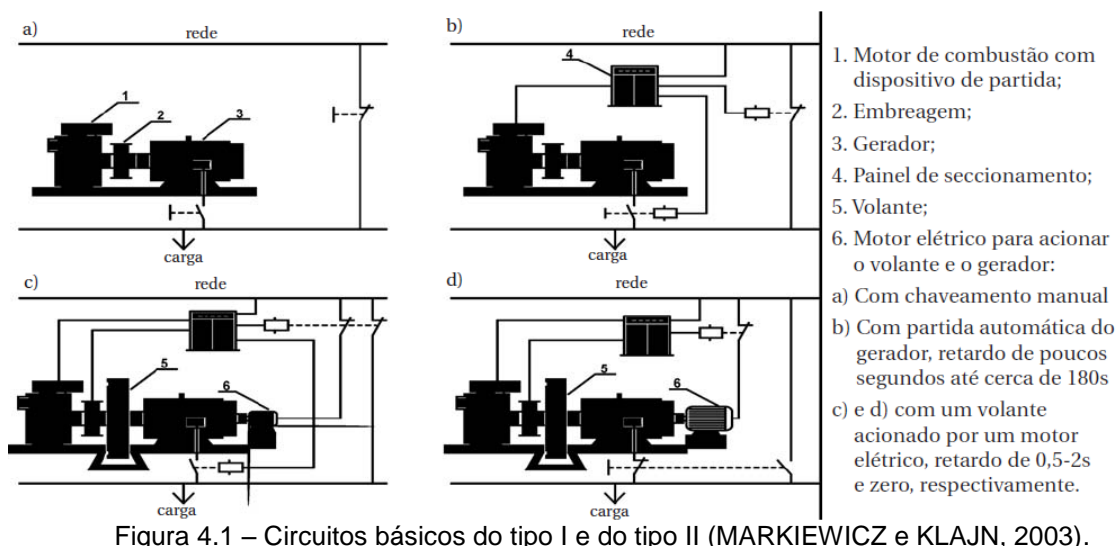
Esta solução ficou conhecida como UPS Rotativo e ainda hoje é utilizada, pois se trata de uma solução bastante robusta.

#### **4.2.1. Princípio de funcionamento**

O UPS rotativo se baseia em uma tecnologia que tem como forma final de suprimento de energia um equipamento rotativo (grupo motor-gerador), podendo o armazenamento de energia ser estático ou rotativo (COTTULI e CHRISTIN, 2008). Basicamente, o UPS rotativo (tipo II) tem seu princípio de funcionamento suportado por um conjunto motor-gerador diesel, que em operação normal da carga atua como um motor e carrega um sistema de armazenamento de energia. Na falta de fonte principal, o conjunto motor-gerador passa atuar como um gerador de energia que é mantido em funcionamento pela energia armazenada previamente. Os grupos moto-geradores normalmente consistem de um ou mais motores de combustão interna que são movidos a diesel, um gerador para converter a energia mecânica em elétrica, sistemas de controle, regulação e painéis. Este tipo de solução possui uma ampla faixa de potência, da ordem de vários kW a poucos MW, e é utilizado para suprir longos períodos sem energia, de várias horas até dias, pois sua autonomia está associada à capacidade de reserva de combustível projetada (COTTULI e CHRISTIN, 2008).

### 4.2.2. Diferentes topologias

As principais topologias de UPS rotativo são amplamente discutidas em (COTTULI e CHRISTIN, 2008), (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003) e (TOSSI e MARTINI, 2011). A Figura 4.1 apresenta as formas mais comuns de utilização do sistema UPS rotativo, aqui identificadas como tipo I e tipo II.



Nas soluções do tipo I, o fornecimento de energia à carga passa a ser feito pelo grupo motor-gerador quando ocorre uma falha no sistema de alimentação principal. Neste arranjo, há claramente um atraso entre detecção da falha e o momento em que o gerador assume o fornecimento de energia para a carga. Isto ocorre, pois o motor necessita de um tempo para atingir sua velocidade nominal e, por consequência, estabilizar a geração de energia. Para as soluções do tipo I, utiliza-se um banco de baterias para fornecer a energia necessária para a partida do motor diesel. No arranjo mais simples, apresentado na Figura 4.1.a, o chaveamento é realizado de forma manual. Entretanto, o arranjo apresentado em Figura 4.1.b conta com o chaveamento automático com tempo típico na ordem de 6 - 15 segundos para unidades pequenas e até 180 segundos para grupos maiores.

As soluções do tipo II possuem um volante de inércia acoplado mecanicamente ao conjunto motor/gerador, como pode ser melhor observado na Figura 4.2. Durante o fornecimento normal de energia pelo sistema de alimentação principal, o motor acelera o gerador e o volante de inércia à velocidade nominal de rotação, na qual se tem a maior quantidade de energia armazenada de forma cinética no vo-

lante. No arranjo da Figura 4.1.c, quando ocorre uma falta da alimentação principal a embreagem eletromagnética conecta o volante ao motor, que parte e aciona o gerador. Todo esse processo é concluído em aproximadamente 0.5 - 2 segundos.

No arranjo mostrado na Figura 4.1.d, durante a operação normal do sistema, a energia não é fornecida pela rede de distribuição, mas sim pelo gerador que é acionado por um motor elétrico alimentado pela rede. No caso de falha da alimentação, a embreagem eletromagnética conecta o volante de inércia ao conjunto motor/gerador e a energia cinética armazenada neste volante é transferida para este conjunto motor/gerador. Assim, o motor aciona o gerador que passa a fornecer energia elétrica com tempo de transferência igual à zero. Alguns fabricantes, utilizam uma máquina síncrona como conjunto motor/gerador no arranjo da Figura 4.1.d (EURO-DIESEL). Quando o fornecimento de energia pelo sistema de alimentação principal está normal, a máquina síncrona atua como motor, acionando o eixo principal e assim o volante, armazenando a energia cinética. Na eventual falta do sistema principal de energia, a máquina síncrona passa a atuar como gerador fornecendo a energia necessária para o funcionamento da carga. Esta inversão de funções é sustentada pela energia cinética armazenada no volante de inércia.

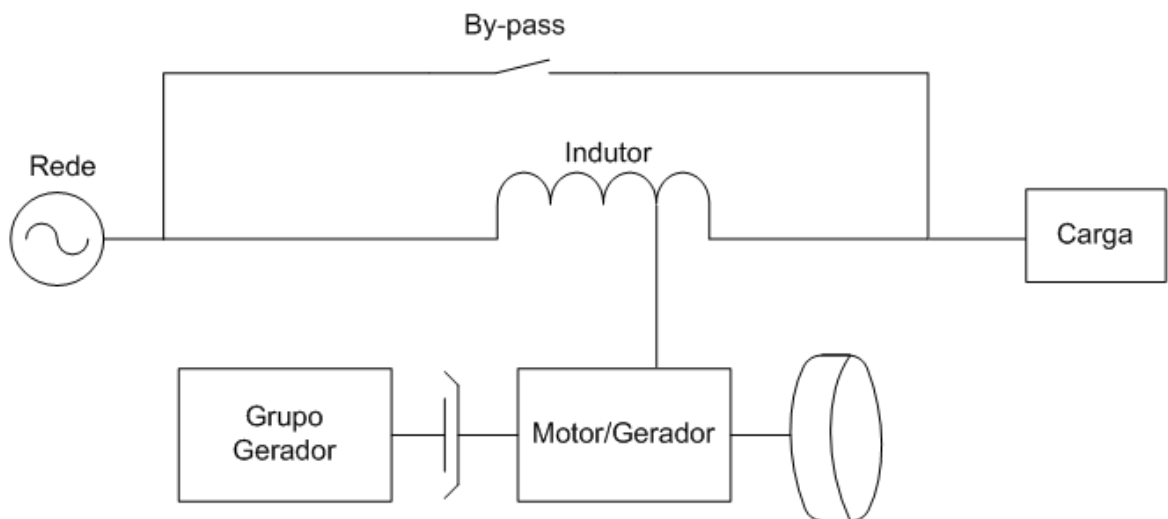


Figura 4.2 – Detalhamento do princípio de funcionamento do UPS Rotativo tipo II (COTTULI e CHRISTIN, 2008).

Cabe destacar que, para as soluções apresentadas, apenas o arranjo da Figura 4.1.d é capaz de mitigar AMTs, para todos os tipos de aplicações, visto que

o tempo de transferência necessário para os demais arranjos podem não atender as necessidades operativas da carga a ser protegida.

### 4.2.3. Aspectos técnicos

Para os UPS Rotativos não há necessidade de salas com climatização especial para a instalação dos equipamentos. No entanto, de acordo com (TOSSI e MARTINI, 2011) devem ser considerados os seguintes cuidados quanto as instalação de centrais de geração a diesel.

- Cuidados com o abastecimento e conservação do óleo diesel, com bombas e sistemas redundantes. A alimentação do combustível é tão importante e crítica quanto a da própria rede de energia elétrica e deve ser tratada com o mesmo rigor e princípios de redundância;
- Ventilação da sala dos equipamentos mecânicos. O sistema conversor é mantido em operação ininterrupta e, além de “girar”, converte perdas de energia em calor que deve ser removido de forma eficiente;
- Manutenção do conjunto. Com variações de acordo com cada fabricante, exige-se a substituição periódica (em torno de 5 a 8 anos) dos componentes rotativos. A sala deve ser projetada com espaços e acessos para fácil, rápida e segura intervenção; e
- Separação das salas de máquinas da sala de painéis e equipamentos.

Um ponto muito positivo dos projetos com UPS rotativos é que todo o conjunto eletromecânico, quadros de potência, automação e controle é um único pacote do mesmo fabricante.

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (SILVA e MOURA) para este tipo de solução.

Vantagens:

- Atende a maior parte das exigências para fontes reservas de energia e também para alimentação permanente;



- A autonomia deste sistema está diretamente ligada à capacidade de armazenamento de combustível;
- É possível conseguir um tempo de transferência igual à zero, visando à mitigação de AMTs; e
- É possível melhorar sensivelmente a qualidade de energia para a carga.

Desvantagens:

- Conjuntos de alta potência são grandes, pesados, requerem uma grande quantidade de combustível armazenada e possuem alto nível de ruído (70 - 95 dB);
- Necessitam de sistemas de ventilação, como entradas de ar e sistemas de exaustão; e
- Devem ser instalados em áreas separadas, relativamente distantes dos edifícios ocupados.

### **4.3. UPS ESTÁTICO**

O UPS estático é utilizado como fonte de reserva de energia para as cargas críticas, nas quais o tempo de transferência tem que ser muito pequeno ou zero para minimizar, ou até mesmo eliminar, os efeitos dos afundamentos de tensão e breves interrupções do fornecimento de energia. Em geral, quando o sistema de alimentação principal da carga está operando normalmente, o sistema de armazenamento de energia utilizado pelo UPS estático será carregado para que na falta de fonte principal possa assumir o fornecimento de energia a carga.

Os sistemas de armazenamento mais utilizados neste tipo de solução são os bancos de baterias e a autonomia da solução está intimamente ligada à capacidade de armazenamento de energia desse banco.

A topologia do sistema UPS irá determinar os benefícios adicionais de sua aplicação, como por exemplo, operar como um regulador de tensão e ajudar a melhorar a Qualidade da Energia entregue a carga.

### 4.3.1. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento deste tipo de equipamento consiste em detectar o distúrbio e isolar a carga, alimentando a mesma com a energia oriunda do sistema de armazenamento de energia, tipicamente banco de baterias, por tempo suficiente para permitir a interrupção ordenada dos processos ou alimentar a carga até o reestabelecimento da alimentação principal. Esta é uma solução comum para pequenas cargas, computadores críticos ou controles eletrônicos de cargas em ambientes industriais.

Apesar das diferentes topologias existentes, o UPS estático é constituído de quatro componentes básicos, sendo eles:

- Chave de transferência;
- Retificador ou carregador de bateria;
- Sistema de armazenamento de energia (Banco de Baterias); e
- Inversor.

**Chave de transferência:** A chave de transferência tem como função realizar o chaveamento entre o sistema de alimentação principal (p.ex. concessionária) e o sistema de armazenamento de energia auxiliar (p.ex. baterias). Seu sistema de chaveamento é mecânico e o tempo de transferência é da ordem 4ms e 8ms.

**Retificador:** O Retificador tem como função transformar a tensão alternada proveniente do sistema de alimentação principal em tensão contínua para alimentar o link CC, no qual o sistema de armazenamento auxiliar (p.ex. Bateria) está conectado. Por isso, este componente também é conhecido como carregador de bateria.

**Sistema de armazenamento de energia (Banco de Baterias):** O sistema de armazenamento de energia tem a função de fornecer energia à carga na ausência parcial e/ou total do sistema de alimentação principal. Dentre os principais sistemas de armazenamento apresentados no Capítulo 3 desta dissertação, destaca-se para este tipo de aplicação a ampla utilização dos bancos de baterias. Este banco normalmente é constituído de um conjunto de baterias conectadas em série

de tal forma que a tensão necessária para alimentar o elo CC projetado seja alcançada.

**Inversor:** O inversor tem como função realizar a conversão da tensão contínua em tensão alternada para alimentar a carga de acordo com suas necessidades operacionais. Normalmente, o inversor é composto de transistores de potência de chaveamento rápido (IGBT) e o chaveamento é realizado em frequência muito superior a 60 Hz.

Visando ao melhor desempenho frente aos distúrbios de QEE provenientes da rede de alimentação CA, como por exemplo, sobretensões e harmônicos, adicionalmente utilizam-se componentes como filtros de linha, transformadores isoladores, conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 4.3.

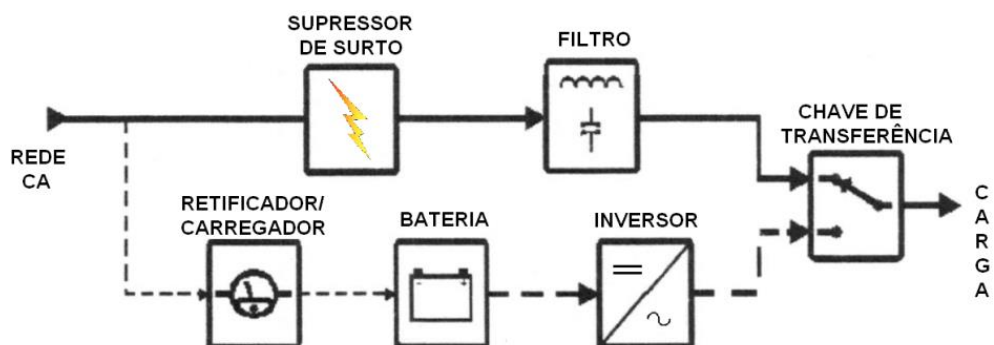


Figura 4.3 – Diagrama básico da topologia reserva passiva, com componentes que melhoram seu desempenho frente a fenômenos de QEE (GONÇALVES, 2008).

#### 4.3.2. Diferentes topologias

A topologia do UPS indica a natureza básica da concepção do sistema e os diversos tipos disponíveis hoje no mercado provocam muitas vezes alguma confusão, como por exemplo, a ideia de que existem apenas UPS “standby”, UPS “on-line” e UPS Híbrido.

Estes termos, de uso frequente, não descrevem corretamente muitos dos sistemas UPS existentes. Por isso, conforme descrito em (GONÇALVES, 2008) a IEC 62040-3 publicada em 1999 (IEC, 1999) e adotada pelo CENELEC como norma EN 50091-3 (CENELEC, 1999) definiu a classificação básica dos sistemas UPS e também classificou o desempenho de cada topologia de acordo com os fenômenos de QEE presentes nas redes de energia CA.

No Brasil, a norma NBR 15014/2003 (ABNT, 2003) define os três tipos de topologias de forma muito semelhante à IEC 62040-3/1999. Portanto, os termos adotados pela norma brasileira são: Standby, Interativo e On line. Já a NBR 15204/2005 (ABNT, 2005) é a norma brasileira que estabelece os limites de desempenho e requisitos básicos de segurança dos UPS estáticos, até 3,0 kVA. Contudo, esta norma não possui a mesma classificação, quanto aos fenômenos de QEE, utilizada pela IEC 62040-3/1999.

A norma distingue três classes de UPS, indicando a dependência da tensão de saída e frequência de saída nos parâmetros de entrada:

- VFD (Tensão e frequência de saída dependentes da alimentação principal);
- VI (Tensão de saída independente da alimentação principal); e
- VFI (Tensão e frequência de saída independentes da alimentação principal).

Entretanto, na prática, esta classificação corresponde à classificação em função da estrutura interna:

- Reserva passiva (off-line);
- Interativo de linha; e
- Dupla conversão (on-line).

A Tabela 4.1 apresenta as principais propriedades destas classificações.

Tabela 4.1 – Classificação e características de classes normalizadas de UPS

Classificação pela EN 50091-3	VFD	VI	VFI
	Reserva Passiva (off-line)	Interativo De Linha	Conversão Dupla (on-line)
Custo	Menor	Médio	Maior
Regulação de tensão	Nenhum	Limitado	Sim
Regulação de frequência	Nenhum	Nenhum	Sim
Tempo de transferência	4 – 8 ms	4 ms	Zero

**Reserva passiva (VFD):** Este tipo de UPS, apresentado na Figura 4.4 , fornece energia para a carga pela alimentação principal ou por meio de um filtro/condicionador para remover os transitórios ou prover uma medição da regula-

ção de tensão. O retificador fornece a corrente de carregamento da bateria. Na ausência da alimentação principal, “modo energia armazenada”, a energia fornecida para a carga é provinda do sistema de armazenamento de energia via inversor.

A transferência do modo “normal” para “energia armazenada” acontece quando a tensão de alimentação principal está fora da tolerância por meio de uma chave com um tempo de transferência pequeno (mas não normalizado). Esta é a topologia mais simples, mais compacta e menos cara, mas tem algumas desvantagens sérias, por exemplo, não prover nenhum isolamento da carga de perturbações ocorridas no lado da fonte e nem regulação de tensão ou frequência.

Como apresentado em (TOSSI, 2011), o tempo de transferência entre o sistema de alimentação principal e o sistema de armazenamento de energia auxiliar é da ordem de 4 a 8 ms. Dessa forma, ocorre uma breve interrupção de energia no momento do chaveamento, tornando esta topologia inadequada para muitas aplicações, especialmente as que utilizam sistemas de tecnologia da informação.

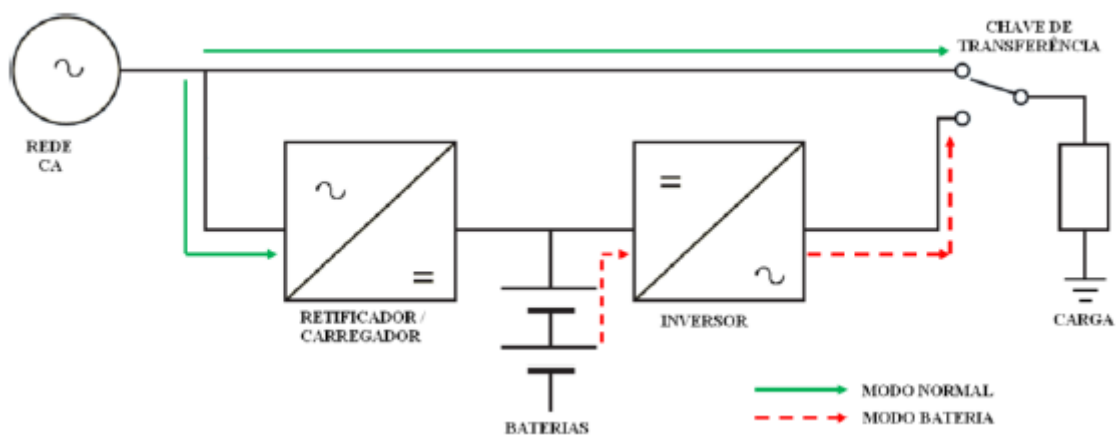


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do UPS Reserva Passiva (VFD ou off-line) (GONÇALVES, 2008).

**Interativo de linha (VI):** A topologia interativa de linha é mostrada na Figura 4.5. O inversor é bidirecional, ou seja, atua como um retificador para carregar a bateria quando a alimentação normal está disponível, mas atua como um inversor para produzir energia de reserva da bateria quando a alimentação normal não está disponível. O UPS interativo de linha tem três modos de operação. No “modo normal”, a carga é alimentada por meio de uma chave estática, sendo que o inversor

opera para fornecer o condicionamento da tensão de saída e para carregar a bateria secundária garantindo que a frequência de saída seja igual à frequência da alimentação normal.

No “modo bateria” a carga é alimentada com energia acumulada na bateria através do inversor. A chave estática abre para prevenir um retorno para a alimentação principal. E por fim, este tipo de UPS também pode operar em “modo by-pass”, no qual a carga é conectada diretamente com a alimentação principal, possibilitando assim uma alternativa para quando o UPS falhar ou houver necessidade de manutenção.

Como apresentado em (TOSSI, 2011), o tempo de transferência entre o sistema de alimentação principal e o sistema de armazenamento de energia auxiliar é da ordem de 4 ms. Dessa forma, ocorre uma breve interrupção de energia no momento do chaveamento, tornando esta topologia inadequada para muitas aplicações.

O UPS interativo de linha apresenta menor custo do que a topologia de conversão dupla, que será apresentada a seguir. No entanto, possui algumas desvantagens como não permitir o controle da frequência, ocorrência de defeitos no isolamento da alimentação principal e a limitação no grau de condicionamento que pode ser obtido.

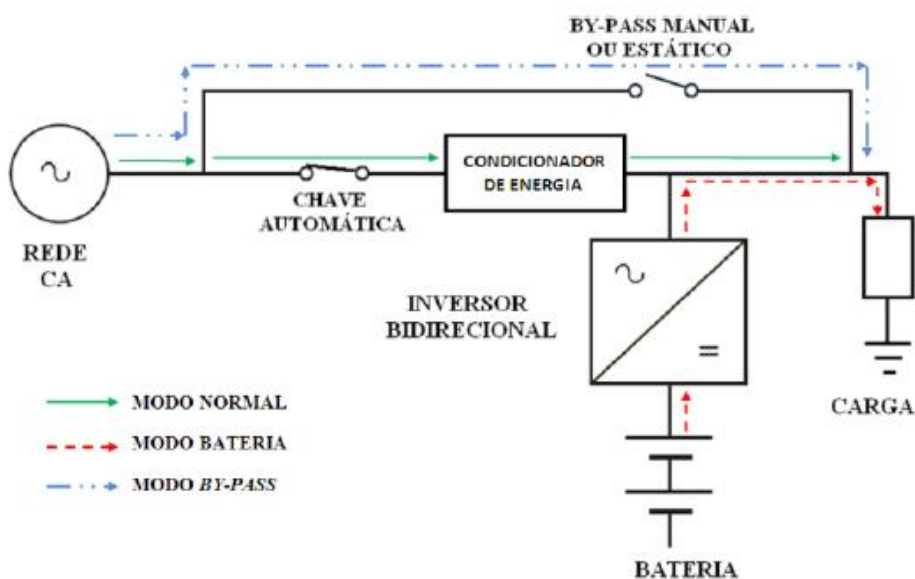
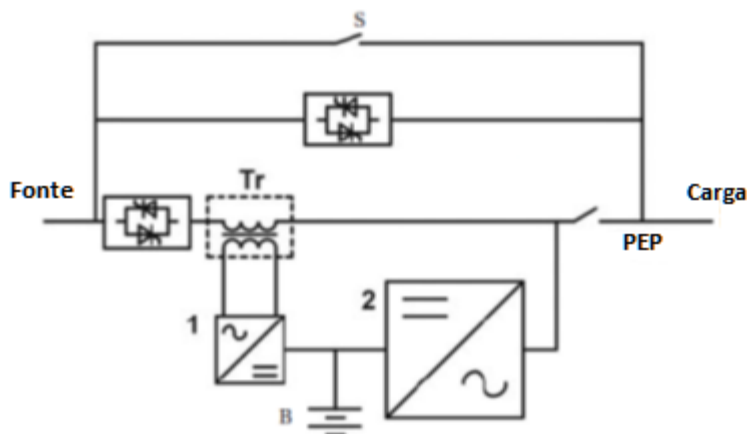


Figura 4.5 – Diagrama de blocos do UPS Interativo de Linha (VI) (GONÇALVES, 2008).

Uma variação do UPS interativo de linha é o chamado UPS-Delta, apresentado na Figura 4.6. Este sistema é equipado com dois inversores CC/CA: o inversor delta (1) e o inversor principal (2). Ambos inversores são conectados à mesma bateria (B), sendo a potência nominal do inversor delta cerca de 30% da potência da carga e a do inversor principal 100% da potência da carga. O inversor delta é ligado ao secundário do transformador (Tr) e o primário ligado em série entre a rede e a saída do UPS.



1, 2 - Conversores;  
S - Chave bypass;  
Tr - Transformador;  
B - Bateria do acumulador;  
PEP - Ponto de equilíbrio de potência.

Figura 4.6 – O diagrama de bloco do UPS tipo Delta (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003).

O inversor principal (2) é a fonte de tensão fixa que controla a amplitude e a forma de onda da tensão de saída no ponto (PEP). Assim, a tensão no primário do transformador é o resultado da diferença entre a tensão de rede efetiva na entrada do UPS e a tensão fixa no (PEP). A tensão no enrolamento primário controla a tensão no enrolamento secundário. O papel do inversor delta é produzir a corrente no enrolamento secundário, que induz no enrolamento primário uma corrente de tal valor que ela compensa a diferença de potência entre as tensões na rede e no PEP. Além disso, o conversor delta corrige o fator de potência e o inversor principal compensa as componentes harmônicas da corrente de carga. Assim, a corrente fornecida pela rede tem uma forma senoidal e está em fase com a tensão de alimentação.

Os cinco modos de operação típicos do UPS-Delta são mostrados na Figura 4.7 e descritos a seguir:

- Em operação normal, quando a tensão de alimentação é igual à do PEP, a tensão no primário do transformador é igual à zero (Figura 4.7.a). Ambos os inversores, (1) e (2), estão funcionando e a carga é alimentada apenas pela rede. Para cargas reativas e para correntes de carga não senoidais, ambos inversores trabalham juntos para corrigir o fator de potência e as harmônicas da corrente fornecida pela rede.
- Se a tensão de alimentação é mais baixa do que aquela no PEP, a tensão no primário do transformador ( $T_r$ ) é diferente de zero (Figura 4.7.b). O inversor principal (2) penaliza a rede com uma corrente adicional e o inversor-delta (1) gera a corrente no secundário do transformador para induzir no primário uma corrente mais alta que, multiplicada pela tensão de rede, resulta na potência de demanda. Assim, uma corrente mais alta é solicitada da alimentação para compensar sua tensão menor, e os 100% da potência da carga são alimentados pela rede.
- Se a tensão da rede é mais alta do que a tensão fixa no PEP (Figura 4.7.c), a polaridade da diferença da tensão no primário do transformador ( $T_r$ ) é oposta àquela no caso anterior mostrado na Figura 4.7.b. O inversor-delta (1) solicita uma menor corrente da rede de alimentação, enquanto que uma corrente adicional é fornecida ao PEP pelo inversor-delta (1) e pelo inversor principal (2) para estabilizar a corrente de carga no valor da demanda. A tensão primária do transformador é controlada pela tensão da rede e é mantida a tensão de saída no PEP no valor nominal, fixo, pelo inversor principal.
- No caso de falta de energia, o UPS-Delta opera no modo de alimentação de energia armazenada (Figura 4.7.d) com toda a carga sendo alimentada pela bateria através do inversor principal (2).
- Em condições operacionais normais, independentemente do valor da tensão de alimentação, a bateria secundária (B) é continuamente carregada (Figura 4.7.e). Após a operação em modo de energia armazenada, a bateria é recarregada pelo inversor principal (2) que drena uma corrente adicional da alimentação para este propósito.



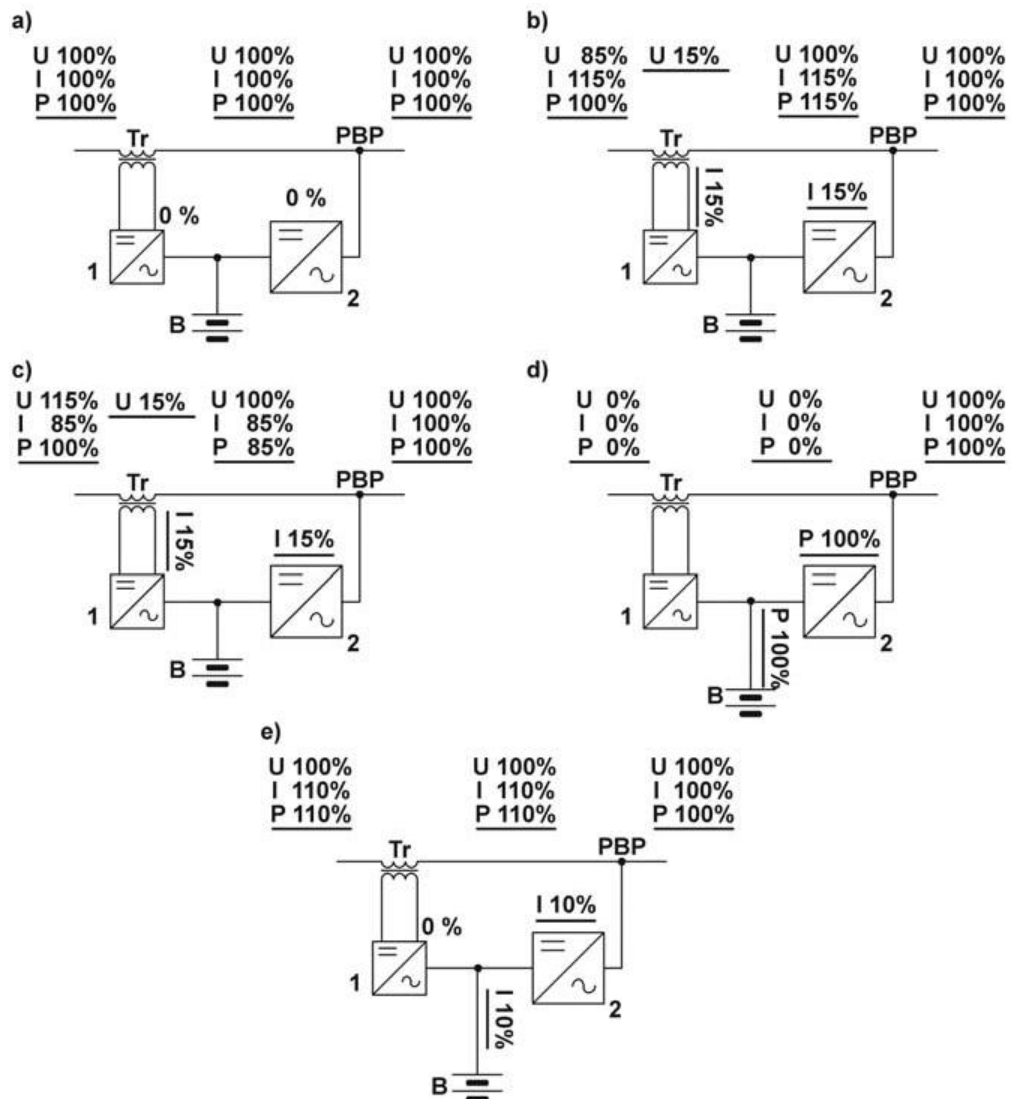


Figura 4.7 – Ilustração de vários modos de operação do UPS-Delta (MARKIEWICZ e KLAJN, 2003).

**Dupla Conversão (VFI):** A topologia de dupla conversão é mostrada na Figura 4.8. Ela é conectada em série e a potência total da carga é suprida pelo inversor de saída. Em “modo normal”, a carga é alimentada pela combinação de retificador/carregador/inversor - daí o nome “conversão dupla”. A bateria é ligada ao link de CC e é carregada continuamente.

No “modo bateria”, o inversor alimenta a carga com energia da bateria. Sob o ponto de vista da carga nada mudou - a energia é fornecida pelo inversor, mas agora a fonte de energia para o inversor é diferente. O tempo de transferência é absolutamente zero e, assim, esta topologia é ideal para cargas sensíveis, sobretudo a AMTs.

No “modo by-pass”, a chave estática conecta a carga diretamente com a alimentação normal, no caso de falha do UPS. As vantagens da conversão dupla são: bom isolamento em relação à fonte a montante, boa regulação de tensão, boa regulação de frequência (se apropriado) e o tempo de transferência zero entre as fontes de energia. Note que, se for utilizado o bypass, a frequência de saída deve estar sincronizada com a da alimentação normal, negando a capacidade de controle da frequência e, se a tensão de saída nominal é diferente da fonte, será necessário um transformador no bypass. As desvantagens da conversão dupla são: custo mais alto e menor eficiência marginal.

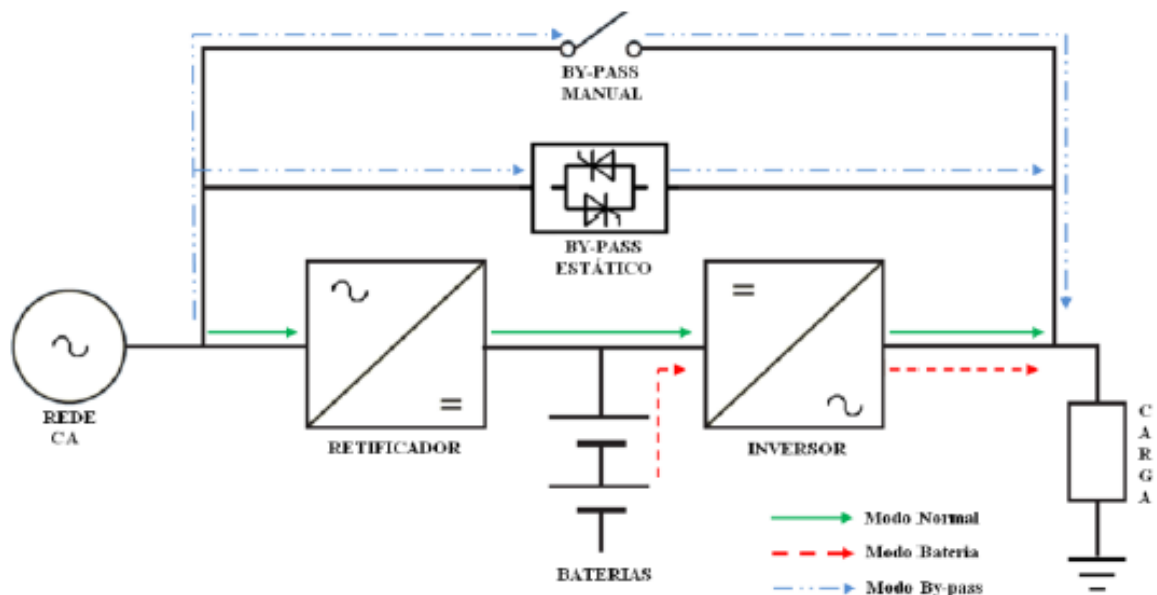


Figura 4.8 – A estrutura básica de um UPS de dupla conversão de energia (VFI ou on-line) (GONÇALVES, 2008).

### 4.3.3. Aspectos técnicos

Os sistemas UPS estão disponíveis em potências de 200 VA até 50 kVA (monofásicos) e de 10 kVA até aproximadamente 4000 kVA (trifásicos), como ilustrado na Figura 4.9 por topologia, com alta eficiência da ordem de 90% a 97% dependendo do número de conversores utilizados e do sistema de armazenamento de energia. Suas principais aplicações estão apresentadas também por topologia na Figura 4.10.

	0,5 kVA	1,5 kVA	3 kVA	10 kVA	100 kVA	>1.000 kVA
<b>Reserva Passiva (off-line)</b>						
<b>Interativo de Linha</b>						
<b>Dupla Conversão (on-line)</b>						

Figura 4.9 – Faixa de potência típicas de uso das topologias dos UPS (GONÇALVES, 2008).

	<b>Reserva Passiva (off-line)</b>	<b>Interativo de Linha</b>	<b>Dupla Conversão (on-line)</b>
Computadores pessoais			
Equipamentos de redes de computadores			
Centrais de computadores			
Indústria			
Centrais de Telecomunicações			

Figura 4.10 – Aplicações típicas de uso das topologias dos UPS (GONÇALVES, 2008).

Os sistemas de UPS também podem ser caracterizados pelo grau de isolamento que proveem entre sistema de alimentação principal, bem como quanto ao grau de melhoria da qualidade de energia entregue a carga.

Os dispositivos UPS VFD são limitados para uso com cargas que podem tolerar pequenas faltas de energia, pois existe um tempo de transferência, embora pequeno. Os dispositivos UPS VI são para uso em cargas que exigem um nível mais alto de estabilidade de tensão. Os dispositivos UPS VFI são para uso em cargas que demandam uma melhor qualidade de energia e maior confiabilidade de fornecimento. Normalmente, utilizam-se os dispositivos on-line, com a conversão dupla.

As topologias apresentadas possuem suas particularidades, as quais passam a ser fatores determinantes para a escolha de uma em detrimento das outras.

Dessa forma, a Tabela 4.2 apresenta as principais vantagens e desvantagens (GONÇALVES, 2008).

Tabela 4.2 – Vantagens e desvantagens das topologias apresentadas

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Reserva Passiva (off-line)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto simplificado dos circuitos retificador, inversor e controle;</li> <li>• Baixo custo de fabricação se comparado com outras topologias;</li> <li>• Dimensão reduzida do equipamento; e</li> <li>• Alto rendimento na transferência de energia à carga quando o UPS estiver operando no modo normal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não regula a tensão de saída;</li> <li>• Não regula a frequência de saída;</li> <li>• Não isola a carga;</li> <li>• Forma de onda da tensão de saída, entregue a carga, é normalmente quase quadrada;</li> <li>• Baixa eficiência quando supre cargas não-lineares; e</li> <li>• Tempo de transferência do modo normal para o modo bateria (4 – 8 ms).</li> </ul>
<b>Interativo de Linha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor desempenho se comparado com a topologia reserva passiva;</li> <li>• Melhor isolamento se comparado com a topologia reserva passiva;</li> <li>• Melhor regulação da tensão de saída se comparado com a topologia reserva passiva;</li> <li>• Baixo custo de fabricação se comparado com UPS Dupla Conversão de mesma potência;</li> <li>• Dimensão reduzida do equipamento se comparado com UPS Dupla Conversão de mesma potência; e</li> <li>• Alto rendimento na transferência de energia à carga quando o UPS estiver operando no modo normal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulação da tensão de saída limitada pelo condicionador de energia;</li> <li>• Não regula a frequência de saída;</li> <li>• Isolamento limitada fornecida à carga;</li> <li>• Baixa eficiência quando supre cargas não-lineares; e</li> <li>• Tempo de transferência do modo normal para o modo bateria (4 ms).</li> </ul>
<b>Dupla Conversão (on-line)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Isolação da carga frente aos fenômenos de QEE presentes na rede CA;</li> <li>• Limites de tensão de entrada maiores;</li> <li>• Ótima regulação da tensão na saída do equipamento;</li> <li>• Excelente regulação na frequência de saída do UPS, e se desabilitar a chave estática o equipamento pode trabalhar como um conversor de frequência;</li> <li>• Em caso de interrupção da tensão da rede de energia CA, a transferência para o modo bateria é instantâneo, não perceptível pela carga; e</li> <li>• Em caso de defeito interno no equipamento a transferência para o modo <i>by-pass</i> não é sentida pela carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo devido à complexidade do projeto, construção e também pela utilização de dois conversores em série;</li> <li>• Devido à dupla conversão da energia, o rendimento do UPS é menor se comparado com as outras topologias; e</li> <li>• Na falta da chave de transferência estática, a confiabilidade do equipamento é comprometida.</li> </ul>

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (SILVA e MOURA) para este tipo de solução.

Vantagens:

- Um dos mais baixos custos de armazenamento de energia;
- Sistema de fácil aquisição e instalação;
- Proporciona uma solução ride-through para os afundamentos de tensão de grande amplitude e duração.

Desvantagens:

- Vida útil entre 2 a 5 anos com uma forte necessidade de monitoramento e exigências de manutenção;
- Menor confiabilidade de operação comparada com os principais dispositivos do sistema elétrico.

#### **4.4. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO – DVR**

A solução com armazenamento de energia mais utilizada na indústria é, sem dúvida, o UPS, mesmo que em alguns casos este sistema se mostre oneroso, aumentando sua relação de custo benefício. O avanço tecnológico permitiu a evolução dos componentes empregados em eletrônica de potência possibilitando a construção de soluções mais específicas, como por exemplo, o chaveamento de carga em um tempo menor e com valores mais elevados de corrente e tensão.

Aliado a redução de custos nos microprocessadores e estudos buscando novas filosofias de controle, a evolução dos componentes de eletrônica de potência permitiu o nascimento de soluções mais complexas e eficazes para solucionar problemas de QEE.

O Restaurador Dinâmico de Tensão (Dynamic Voltage Restorer - DVR) é uma destas soluções e, basicamente, se resume a um compensador estático em série com a carga, cuja finalidade é injetar diferentes sinais de tensão a fim de corrigir AMTs. Outra solução é o Dynamic Sag Corrector (DySC), basicamente é uma topologia patenteada do DVR (DIVAN, GARCIA e NAVES, 2005) e que será apresentado no subcapítulo 4.5.

O primeiro registro de instalação de um DVR é datado de 1996 na Carolina do Sul pela Westinghouse (PRAVEEN, MUNI, *et al.*, 2004). Depois desta primeira experiência, várias outras foram realizadas ao redor do mundo e com desenvolvimento contínuo foram estruturadas diversas configurações e estratégias de controle para aplicação comercial.

Hoje, o DVR é o que há de mais moderno na mitigação de AMTs, cuja aplicação é voltada para consumidores com potência total na faixa de 100 kW a 10 MW (JESUS e SAMESIMA, 2007). Os fabricantes de condicionadores de energia têm direcionado seus equipamentos para atender potências superiores a 2 MVA, o que acaba inviabilizando a aquisição deste tipo de equipamento pela indústria brasileira. De acordo com o estudo de (SILVA, 1999), a parcela significativa de cargas sensíveis a AMTs teriam potência inferior a 500 kVA. Nesta faixa de potência os dispositivos semicondutores e os demais componentes teriam custo baixo suficiente para se tornar aplicável o DVR na indústria nacional (GALASSI, 2006).

#### **4.4.1. Princípio de funcionamento**

O seu princípio de funcionamento é baseado na injeção de potência proporcional à diferença entre a tensão desejada para a carga e a tensão remanescente do sistema durante a ocorrência de um distúrbio, restabelecendo, assim, a amplitude da tensão. Na sua configuração mais simples, o DVR possui um inversor do tipo fonte de tensão que é controlado por largura de pulso (VSI-PWM) associado a um circuito de controle, um capacitor conectado ao lado CC do inversor e um transformador de acoplamento conectando o inversor em série com o sistema CA, conforme mostrado na Figura 4.11. Durante a ocorrência do distúrbio, o capacitor simula uma fonte de tensão em corrente contínua. Para realizar a compensação, o inversor VSI-PWM absorve a energia armazenada no capacitor para sintetizar uma tensão a ser injetada no sistema através do transformador de acoplamento.

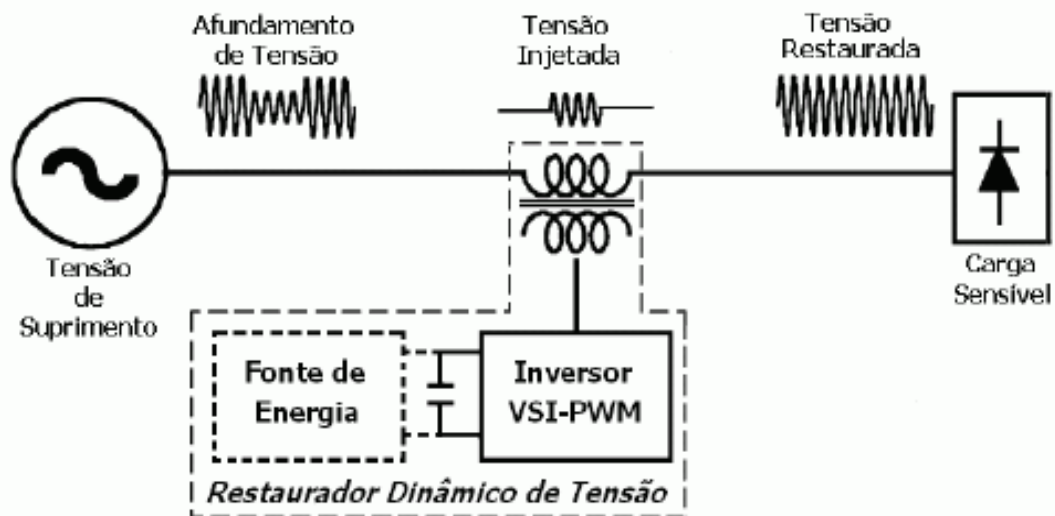


Figura 4.11 – Princípio de funcionamento e elementos básicos que compõem o DVR (JESUS e SAMESIMA, 2007).

Dependendo da topologia do DVR, pode ou não existir uma fonte de energia suprindo o capacitor para melhorar seu desempenho durante os distúrbios e para recarregá-lo ao término do mesmo, conforme é ilustrado na Figura 4.11. Essa fonte de energia pode ser o próprio sistema, outro sistema independente, através da conexão de um conversor CA-CC ou até uma fonte de armazenamento de energia. Apesar de existirem poucos estudos publicados, é perceptível que a topologia de suprimento de energia influi significativamente no desempenho do DVR para a compensação de AMTs, bem como na complexidade do sistema e no custo de aquisição e operação.

#### 4.4.2. Diferentes topologias

As principais topologias encontradas na literatura são:

##### i) Suprimento de energia através da própria rede, à montante ou à jusante do transformador de acoplamento

As topologias com suprimento de energia através da própria rede baseiam-se no fato de que durante o AMT, a rede ainda tenha um valor razoável de tensão remanescente e que suporte uma elevação de corrente provocada por um conversor paralelo responsável por alimentar o DVR para realizar a compensação. O suprimento de energia ao capacitor do barramento CC é feito através da própria rede na qual o DVR está conectado e necessita de um conversor paralelo (retificador

CA/CC), conectado à montante do transformador de acoplamento, ou à jusante do mesmo.

Com o retificador à montante do transformador, como apresentado na Figura 4.12, e admitindo que não exista um transformador na conexão entre a rede e o conversor, é possível carregar o capacitor do barramento CC com, no máximo, o pico da tensão fase-fase da rede. Na ocorrência de um AMT, a tensão do barramento CC decairá de forma proporcional à da rede. Isso acontece porque a energia armazenada no capacitor é menor que a energia retirada da rede pelo conversor paralelo, assim faz-se necessário que o sistema de controle seja adequado para que se evite o aparecimento de correntes distorcidas e assimétricas durante o distúrbio.

A potência extraída pelo retificador é proporcional ao afundamento de tensão e se, por exemplo, o valor da tensão remanescente do sistema de alimentação for de apenas 30%, para que seja possível manter a tensão de alimentação da carga a ser protegida em 100%, a corrente que circula pelo retificador será de 233% e no inversor será de 100% (NIELSEN e BLAABJERG, 2001).

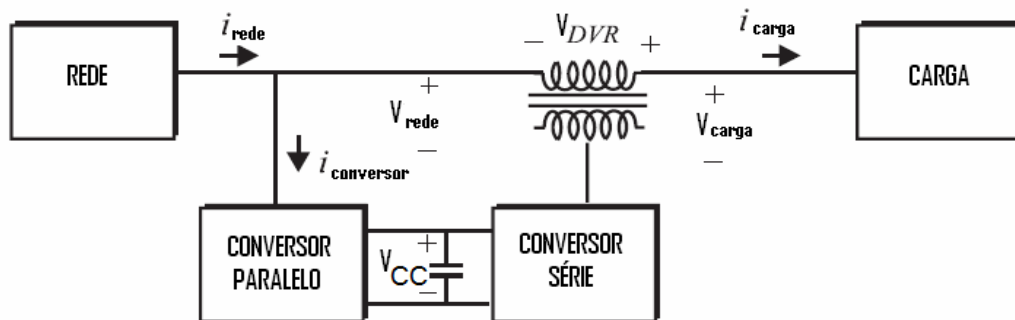


Figura 4.12 – DVR com energia extraída do lado da rede (GALASSI, 2006).

Com o retificador ligado à jusante do transformador, como apresentado na Figura 4.13, e admitindo que não exista um transformador na conexão entre a rede e o conversor, é possível carregar o capacitor do barramento CC com tensão constante. Na ocorrência de um AMT, a tensão do barramento CC decairá de forma proporcional à da rede. Isso também acontece porque a energia armazenada no capacitor é menor que a energia retirada da rede pelo conversor paralelo, assim



faz-se necessário que o sistema de controle seja adequado para que se evite o aparecimento de correntes distorcidas e assimétricas durante o distúrbio.

Utilizando o mesmo exemplo anteriormente apresentado, no qual a tensão remanescente no sistema de alimentação era de 30% e propunha-se manter a tensão de alimentação da carga em 100%, é possível evidenciar que a principal desvantagem desta topologia está na elevada corrente que flui pelo inversor, da ordem de 333%, enquanto a corrente que circula pelo retificador se mantém em 233% (NIELSEN e BLAABJERG, 2001).

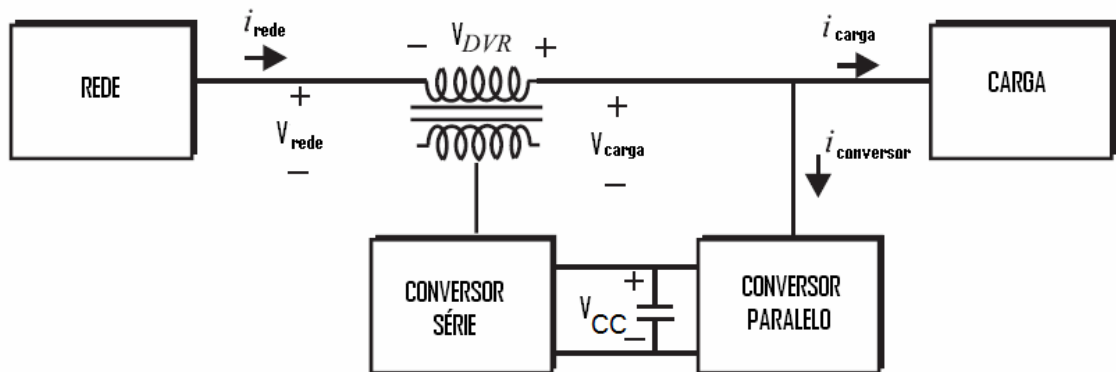


Figura 4.13 – DVR com energia extraída do lado da carga (GALASSI, 2006).

Quando o suprimento de energia é feito através de outro sistema elétrico, é preferível que o mesmo seja independente da rede onde se encontra o DVR. Caso contrário, dependendo da origem do afundamento de tensão, o suprimento de energia poderá sofrer os mesmos efeitos do sistema com DVR. No entanto, é bastante incomum a existência de duas redes elétricas vizinhas completamente independentes entre si.

## ii) Suprimento de energia através de sistemas de armazenamento de energia

As topologias que possuem sistemas de armazenamento de energia requerem elevados investimentos, no entanto em situações específicas podem melhorar sensivelmente o desempenho do DVR, através da utilização de dois métodos.

O primeiro, método do Barramento CC com Tensão Variável, apresentado na Figura 4.14, consiste na utilização de um banco de capacitores no elo CC de

forma que a energia armazenada neste capacitor é descrita pela Equação 4.1, bem como a Equação 4.2 descreve o decaimento da tensão neste capacitor ao longo do tempo.

$$E = \frac{1}{2} \times C_{cc} \times V^2 \quad 4.1$$

Onde,

$E$  → Energia armazenada no capacitor do elo CC

$C_{cc}$  → Capacitância do capacitor do elo CC

$V$  → Tensão aplicada nos terminais do capacitor do elo CC

$$V_{cc}(t) = \sqrt{V_0^2 - \frac{2 \times P_{DVR} \times t}{C_{cc}}} \quad 4.2$$

Onde,

$V_{cc}(t)$  → Tensão instantânea nos terminais do capacitor do elo CC

$V_0$  → Tensão inicial nos terminais do capacitor do elo CC

$P_{DVR}$  → Potência Ativa fornecida pelo DVR

$C_{cc}$  → Capacitância do capacitor do elo CC

$t$  → tempo de descarga do capacitor

Cabe destacar que, à medida que o capacitor vai se descarregando, sua capacidade de restauração de afundamentos mais profundos diminui. Outro fato importante é que o tempo de descarga do capacitor está associado ao tempo de suportabilidade da solução.

Sua principal vantagem é a construção simplificada e a possibilidade de ser recarregado pelo próprio inversor ou pelo retificador em paralelo. Já sua desvantagem mais significativa é a impossibilidade de utilizar de forma eficiente toda energia armazenada no banco de capacitores, pois durante os AMTs mais severos a tensão máxima injetável pelo inversor reduz-se proporcionalmente à tensão do banco de capacitores.

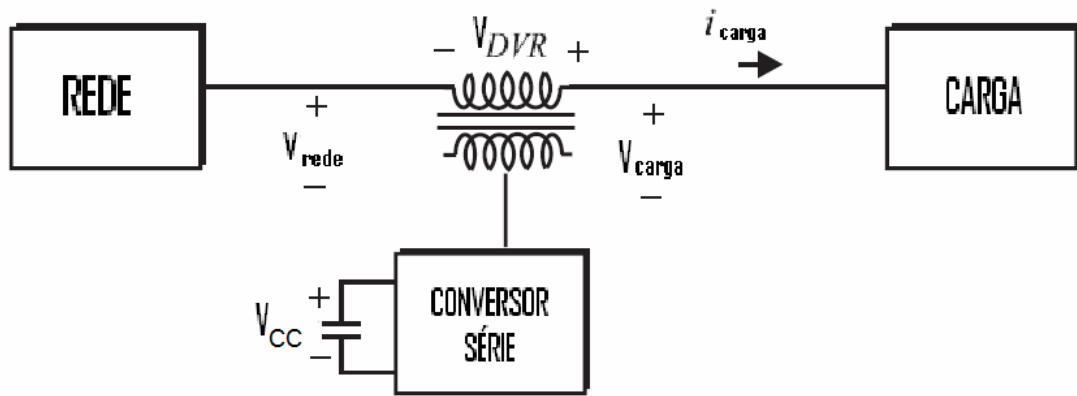


Figura 4.14 – Barramento CC com tensão variável (GALASSI, 2006).

O segundo, método do Barramento CC com Tensão Constante, apresentado na Figura 4.15, consiste na utilização de dois armazenadores de energia, sendo um primário e o outro secundário. No armazenador primário tem-se a maior parcela do suprimento de energia e a tensão de seu barramento é variável. Já o armazenador secundário tem seu barramento utilizado como elo CC pelo inversor e sua tensão é mantida constante. Um conversor elevador/abaixador (boost/buck) faz a interface entre os dois sistemas de armazenamento de energia. Na ocorrência de um AMT, a tensão do barramento do elo CC é mantida constante devido à transferência de energia do armazenador primário que, ao final, passa a ser carregado através deste mesmo conversor elevador/abaixador (boost/buck) (VIKTORIN, DRIESEN e BELMANS, 2003).

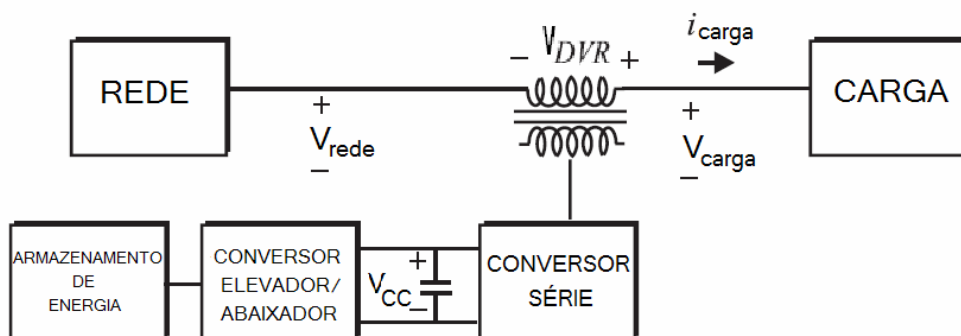


Figura 4.15 – DVR com barramento CC com tensão constante (GALASSI, 2006).

Os sistemas de armazenamento de energia disponíveis para suprir o capacitor do barramento CC são as baterias, os volantes de inércia (flywheel) e os supercapacitores. Essa topologia apresenta-se bastante eficiente na mitigação de afundamentos de tensão mais severos. No entanto, apresenta como desvantagem os

elevados custos associados à aquisição e à manutenção do sistema de armazenamento de energia.

#### 4.4.3. Aspectos técnicos

O sistema de controle do restaurador dinâmico de tensão baseia-se na medição da grandeza controlada, que, quando comparada com o respectivo valor de referência, produz um sinal de erro. Através de uma estratégia de compensação específica, esse erro é reduzido até a sua completa extinção, sendo o tempo necessário para a extinção desse erro, ou para a completa mitigação do distúrbio, o fator que determina a eficiência não só do sistema de controle, mas como da solução como um todo. Existem várias filosofias de compensação, sendo que as que mais atendem o escopo deste trabalho utilizam o controle vetorial associado a um Phase Locked Loop - PLL (JESUS e SAMESIMA, 2007).

A potência necessária para o dimensionamento do transformador de acoplamento e do DVR é obtida através da equação 4.3.

$$P_{\text{DVR}} = (1 - V) \times P_{\text{carga}} \quad 4.3$$

Onde,

$P_{\text{DVR}}$  → Potência Ativa fornecida pelo DVR

$V$  → Tensão remanescente durante o AMT

$P_{\text{carga}}$  → Potência Ativa solicitada pela carga

O projeto de um DVR capaz de proteger a carga contra afundamentos de até 50% da tensão nominal deve possuir um transformador de acoplamento com pelo menos metade da potência da carga, ou seja, para uma carga de 2 MVA deve-se ter um transformador de 1 MVA, aproximadamente. A faixa de alcance da tensão do DVR determina a máxima tensão que pode ser injetada e, consequentemente, o máximo afundamento para o qual a carga encontra-se protegida. Para determiná-la, deve-se levar em conta que a frequência de ocorrência de afundamento diminui com o aumento da severidade, assim como o custo do DVR aumenta quando se amplia a faixa de tensão. Por isso, é aconselhável não escolher um equipamento que cubra toda a faixa, mas sim apenas a região mais crítica.

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (SILVA e MOURA) para este tipo de solução.

Vantagens:

- Custo inferior para mitigação de pequenos afundamentos quando comparado com sistemas UPS de mesma faixa de potência;
- Funciona como um filtro, protegendo a carga contra os harmônicos da rede;
- Maior confiabilidade quando comparado com o sistema UPS.

Desvantagens:

- Não possibilita correção para interrupções momentâneas de tensão;
- Necessita de um caminho de baixa impedância à montante do DVR, de forma a permitir a circulação de corrente;
- Necessidade de espaço físico considerável para o transformador de acoplamento.

#### **4.5. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO – DYSC**

O restaurador dinâmico de tensão DySC (Dynamic Sag Corrector) é uma topologia patenteada (DIVAN, GARCIA e NAVES, 2005) de restaurador de tensão que consiste em um dispositivo serie/shunt híbrido que protege as cargas sensíveis de afundamentos de tensão e de interrupções momentâneas. Sua ampla faixa de potência, entre 250VA e 3000kVA, permite que seja instalado no ponto de suprimento da carga sensível dentro de uma planta, ou até mesmo dentro do próprio equipamento e sua popularização deve-se ao cumprimento das exigências da norma SEMI F47.

Quando comparado às demais topologias de restauradores de tensão, o DySC apresenta desempenho semelhante e possui vantagens relativas ao seu tamanho e custo reduzidos devido à sua configuração otimizada.

### 4.5.1. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do DySC, por exemplo, monofásico e sem transformador de injeção apresentado na Figura 4.16, assim como as demais topologias de DVR, baseia-se na compensação série dos distúrbios de tensão através da injeção do sinal de compensação gerado por meio de um inversor de potência.

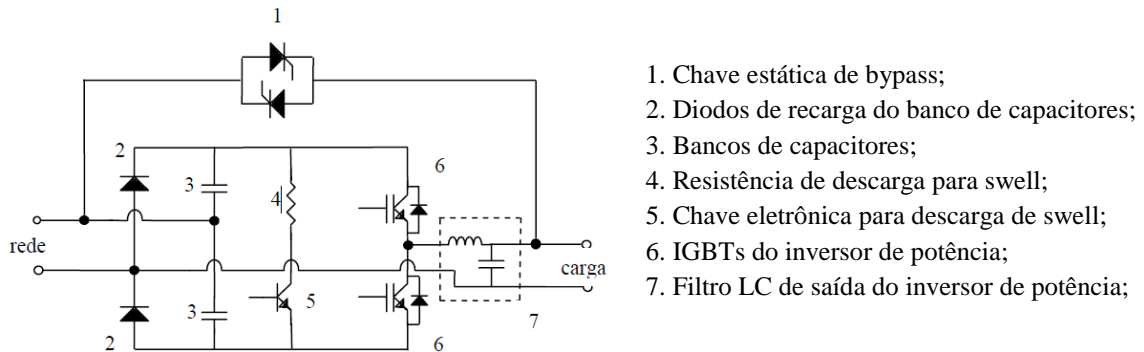


Figura 4.16 – Diagrama monofásico do DySC (GALASSI, 2006).

A alimentação da carga é feita diretamente pela fonte principal e quando ocorre algum distúrbio, a chave estática transfere a alimentação para o inversor que injeta a energia armazenada nos capacitores de forma a reestabelecer a tensão normal de operação do sistema.

A atuação do DySC através do fluxo de corrente no circuito de potência, pode ser observada na Figura 4.17, somando tensão à da rede para corrigir o afundamento de tensão, conforme destacado em vermelho, e o processo de carregamento de um dos capacitores, conforme destacado em verde.

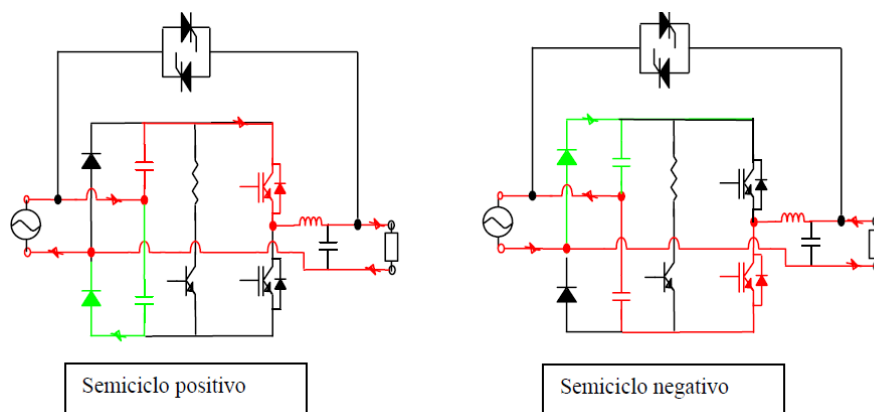


Figura 4.17 – Injeção de tensão com mesmo sinal que a rede (GALASSI, 2006).

A atuação do DySC subtraindo tensão da rede, apresentada na Figura 4.18, para corrigir a elevação da tensão, conforme destacado em vermelho e o processo de carregamento de um dos capacitores, conforme destacado em verde.

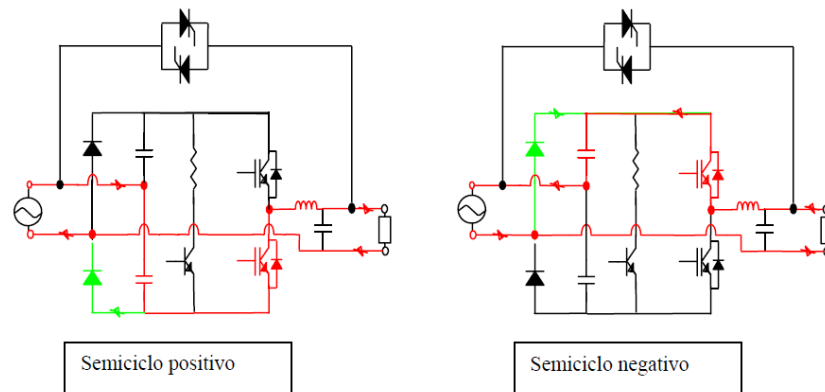


Figura 4.18 – Injeção de tensão com sinal oposto da rede (GALASSI, 2006).

Em suma, o princípio de funcionamento do DVR e DySC são muito parecidos e eficientes, fato este que os colocam como as soluções mais desenvolvidas hoje existentes no mercado. As Figura 4.19 e Figura 4.20 apresentam os diagramas das duas soluções, a partir das quais é possível perceber suas diferenças básicas.

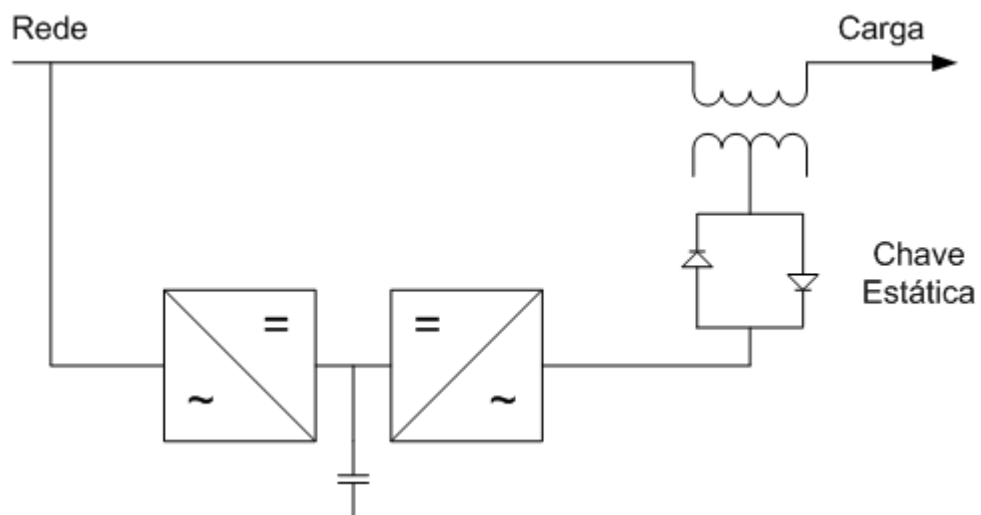


Figura 4.19 – Diagrama unifilar do DVR

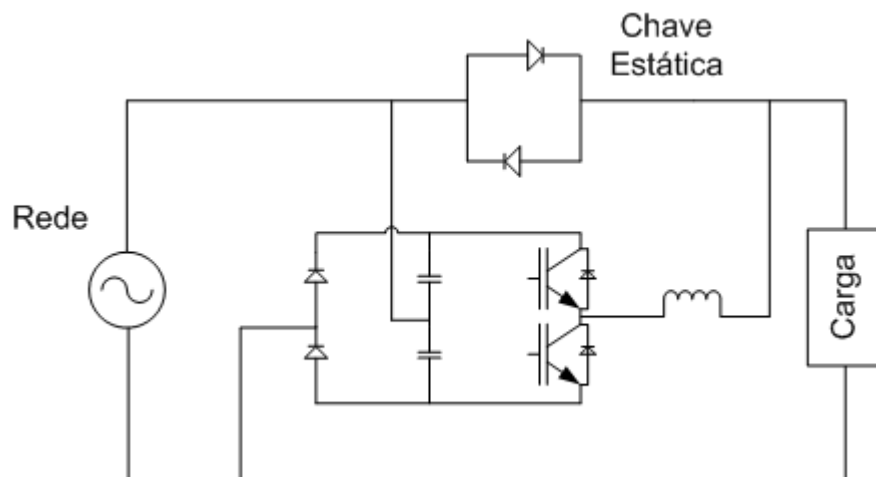


Figura 4.20 – Diagrama unifilar do DySC

#### 4.5.2. Aspectos técnicos

O restaurador dinâmico de tensão DySC frente a um afundamento de tensão de até 50% da tensão nominal, em princípio, pode prover 100% da tensão de alimentação, indefinidamente, sem qualquer sistema de armazenamento de energia significativo e sem o transformador série do DVR. Já quando ocorre uma interrupção é possível sustentar os valores nominais de tensão por 3 ciclos até 12 ciclos dependendo da capacidade dos capacitores instalados. Assim, a solução deve ser projetada para prover até 2 segundos de capacidade de correção de AMTS, o que é mais que suficiente para mitigar cerca de 92% dos eventos de qualidade de energia encontrados nas redes de distribuição de energia elétrica (BRUMSICKLE, SCHNEIDER, *et al.*, 1999).

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (SILVA e MOURA) para este tipo de solução.

Vantagens:

- O custo de um DySC está abaixo das alternativas tecnológicas existentes;
- Não é necessário o uso de transformador; e
- Não é necessária a utilização de grandes armazenadores de energia.



Desvantagens:

- Não é projetado para suportar interrupções momentâneas de tensão.

#### **4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentadas as principais formas de mitigação de afundamentos de tensão através de soluções com armazenamento de energia, sendo elas: UPS Rotativo, UPS Estático, DVR e DySC. Também foram apresentadas as topologias mais utilizadas em aplicações para mitigação de AMTs.

As soluções que utilizam armazenamento de energia são utilizadas em aplicações que envolvem a segurança humana, segurança nacional, perda de informações, dados irrecuperáveis e perdas financeiras elevadas. Em geral, as soluções apresentadas atendem o objetivo que se propõe, sendo diferenciadas entre si por pequenas nuances técnicas e financeiras.

De forma generalista, apresentam-se os UPS (estáticos e dinâmicos) como soluções capazes de mitigar interrupções permanentes e podem dependendo da configuração mitigar VTCDs, em especial AMTs e o DVR/DySC mitigar VTCDs em geral exceto as interrupções momentâneas e permanentes.

Em um primeiro momento, a comparação entre o UPS Rotativo e UPS Estático parece inevitável por fazer uso da mesma filosofia de mitigação, porém, o emprego de um ou de outro, deve ser uma opção de concepção de projeto e não de produto em si. Esta afirmação é razoável, pois um projeto concebido para UPS estático é diferente daquele que venha a ser concebido para UPS rotativo.

O UPS estático normalmente faz uso do sistema de baterias como elemento armazenador de energia e dessa forma é mais recomendado para aplicações que necessitem de alta confiabilidade no chaveamento entre fontes de energia e que necessitem de fornecimento de baixa/média potência em intervalos de tempo maiores, como por exemplo, Centros de Processamentos de dados. Os UPS rotativos são indicados para aplicações mais robustas que exijam grande transferência de potência em pequenos intervalos de tempos, como por exemplo, sistemas de refrigeração. Cabe destacar que o UPS estático tem como trunfo sua versatilidade,

pois sua expansão de capacidade pode ser modular e, apesar do custo de manutenção mais elevado, o espaço físico destinado a sua instalação é consideravelmente menor. Quanto ao UPS Rotativo, destaca-se que por conta do grupo motor/gerador associado a sua concepção garantem uma elevada autonomia, pois a mesma estará condicionada somente a reserva de óleo combustível na planta onde for instalada.

Em análise geral quanto ao UPS estático, destacam-se duas aplicações utilizando as topologias apresentadas que melhoram os aspectos relacionados à eficiência e a confiabilidade, sendo elas: UPS Dupla Conversão com configuração paralelo redundante e UPS Dupla Conversão em modo de operação eco-mode.

O desenvolvimento de soluções mais específicas, como por exemplo, DVR e DySC consolidaram uma nova era de soluções para mitigação de AMTs, entretanto, o custo associado a sua implementação ainda é elevado.

Dentre as topologias de DVR baseadas no suprimento de energia através da própria rede, à montante ou à jusante do transformador de acoplamento, tem-se para o método que utiliza como interface com a rede de suprimento conversores totalmente controlados uma estrutura versátil que, além da função DVR, também permite operar como filtro ativo série, filtro ativo paralelo, filtro ativo série-paralelo ou como Unified Power Flow Controller – UPFC (SILVA, 1999). Apesar de ser um sistema mais complexo e caro em relação à utilização de uma ponte retificadora e transformador como interface com a rede, destaca-se a possibilidade de controlar a tensão no barramento CC a partir de tensões residuais bem pequenas e sem a necessidade de utilizar valores elevados de capacitância.

Dentre as topologias de DVR baseadas no suprimento de energia através de sistemas de armazenamento de energia, tem-se para o método do Barramento CC com Tensão Variável como principal destaque sua configuração simples e com poucos componentes eletrônicos, no entanto, a capacitância necessária para alimentar a carga no momento do distúrbio é significativamente superior em relação às demais metodologias. Já para o método do Barramento CC com Tensão Constante, destaca-se por ser capaz de mitigar qualquer tipo de AMT, pois está condicionado apenas a autonomia do sistema de armazenamento de energia. Entretanto,

duas considerações se fazem necessárias: i) A utilização de rede independente e isolada como sistema de armazenamento de energia inviabiliza por si só a aplicação desta topologia; ii) A utilização de banco de baterias não possui grande aceitação, pois eleva o custo do projeto e também da manutenção operativa.

Por fim, destaca-se que o DVR mostra-se vantajoso para cargas de média /grande potência por apresentar maior versatilidade, podendo, funcionar também como filtro ativo e incorporar outras habilidades com pequenas variações na sua configuração.

## 5. MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO ATRAVÉS DE SOLUÇÕES SEM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As soluções sem armazenamento de energia são aquelas que possibilitam a operação contínua da carga durante a ocorrência de AMTs sem o uso de sistemas de armazenamento de energia. Para isto, este tipo de solução lança mão dos recursos oferecidos pela eletrônica de potência.

Os reguladores de tensão mais antigos eram eletromecânicos, operados através de motores acionando contatos deslizantes sobre tapes de transformador, sendo adequados apenas para mitigar variações de tensão de longa duração, porém inadequados para corrigir afundamentos momentâneos de tensão.

Com a evolução da eletrônica de potência, deu-se início a uma nova geração de reguladores de tensão cuja mudança de tape passou a ser feita de forma eletrônica, diminuindo assim o tempo de resposta e viabilizando sua utilização para mitigação de AMTs. Em geral, os reguladores de tensão não são a solução mais adequada para mitigar AMTs severos, pois sua resposta à detecção do distúrbio é mais demorada e, dificilmente, são capazes de recuperar tensões remanescentes inferiores a 0,80 p.u., como descrito em (SARAIVA FILHO, 2002).

Hoje, a grande maioria dos reguladores de tensão existentes no mercado brasileiro é do tipo eletrônico e como descrito em (SARAIVA FILHO, 2002) e (MAULE, 2001), as principais topologias são: regulador de tensão com mudança eletrônica de tapes em transformador (TapChanger), regulador de tensão com mudança de tapes em transformador incremental (buck/boost) e regulador de tensão constante (CVT – Trafo ferro-ressonante). As principais topologias associadas a estas duas classes serão abordadas com mais detalhes na sequência.

Outra maneira de aumentar confiabilidade e a disponibilidade no fornecimento de energia para cargas críticas é através da transferência automática de

fontes de energia. A transferência feita por meio de chave estática de transferência (Static Transfer Switch - STS) ou de chave de transferência automática (Automatic Transfer Switch - ATS) são exemplos desta solução.

## 5.2. REGULADORES DE TENSÃO

### 5.2.1. Regulador de tensão com mudança eletrônica de tapes em transformador (*TapChanger*)

O Regulador de tensão *TapChanger*, apresentado na Figura 5.1, tem seu princípio de funcionamento baseado na mudança eletrônica dos tapes do transformador, que são selecionados de forma que a relação de transformação não possibilite que a tensão de saída viole os limites permitidos. Para executar essas mudanças de derivação pode se utilizar relés ou tiristores, no entanto os relés têm se mostrado mais eficientes, pois só operam quando ocorre uma mudança de derivação, enquanto os tiristores realizam na ordem de 60 operações por segundo, ou seja, liga e desliga a cada ciclo para uma alimentação em 60Hz. A faixa de tensão na qual o regulador pode atuar, bem como a amplitude do passo da tensão de saída é determinada pelo número tapes existentes. Normalmente utiliza-se pelo menos 6 tapes com degraus de 5 a 10% da tensão nominal.

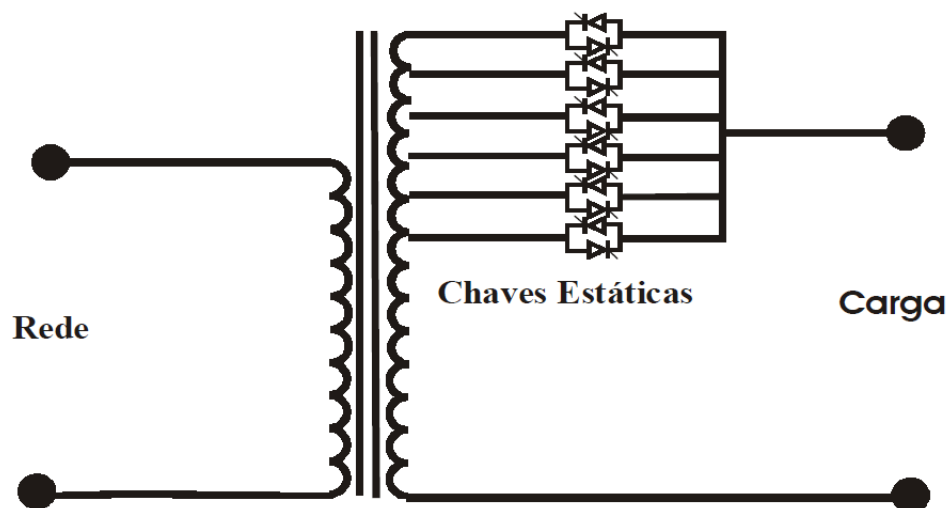


Figura 5.1 – Regulador de tensão do tipo *TapChanger* (SARAIVA FILHO, 2002)

As variações na tensão de entrada são monitoradas por um sensor eletrônico que, se necessário, seleciona automaticamente a derivação apropriada no transformador usando um relé mantendo assim a tensão de saída requerida.

O instante da comutação de derivação acontece em fase e muito próximo da tensão zero assegurando assim que qualquer ruído ou transitório de chaveamento sejam reduzidos ao mínimo. Como a tensão de saída, apresentada na Figura 5.2, muda em degraus, este tipo de solução não deve ser utilizado em sistemas de iluminação ou cargas que não permitam variações bruscas de tensão.

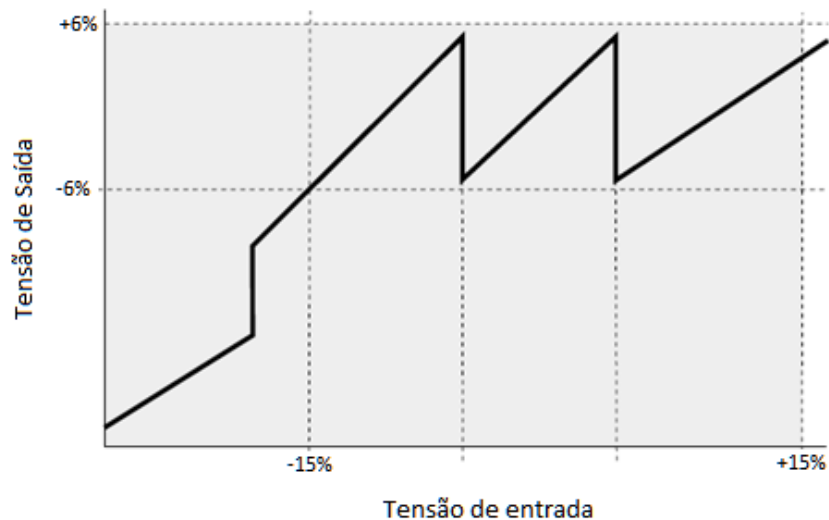


Figura 5.2 – Características de entrada/saída de um regulador por degraus (MAULE, 2001)

Os reguladores *TapChanger* são caracterizados pelo baixo valor de impedância do transformador, alta capacidade de sobrecarga em períodos curtos o que permite valores elevados de corrente de energização, além de introduzir pouca distorção harmônica na tensão de alimentação da carga.

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (MAULE, 2001) para este tipo de solução.

Vantagens:

- Eficiência muito alta;
- Insensível às mudanças de frequência;
- Tamanho e peso pequenos;
- Insensível ao fator de potência da carga;
- Insensível às mudanças de carga;
- Resposta rápida, tipicamente de 1 a 1,5 ciclos (20 a 30 ms); e

- Custo relativamente baixo.

Desvantagens:

- A regulação de tensão (estabilização) é realizada em degraus;
- A tolerância da tensão de saída normalmente não é inferior a  $\pm 3\%$ ; e
- A confiabilidade pode ficar limitada quando são usados dispositivos semicondutores para comutar a corrente de carga.

### 5.2.2. Regulador de tensão com mudança de tapes em transformador incremental (*buck/boost*)

O Regulador de tensão buck/boost, apresentado na Figura 5.3, utiliza um transformador incremental e seu princípio de funcionamento se baseia no controle da tensão no primário do transformador por meio de chaves estáticas de forma a incrementar (boost) ou decrementar (buck) a tensão de entrada de um valor conveniente para manter a saída dentro da faixa especificada. Isto é feito comparando a tensão de saída a um valor pré-fixado e utilizando-se uma malha de realimentação para ajustar a quantidade de tensão a ser somada ou subtraída da rede de entrada. A faixa típica de tensão de entrada é de  $\pm 15\%$  com regulação estática da tensão de saída de  $\pm 1\%$  a  $\pm 3\%$  (SARAIVA FILHO, 2002).

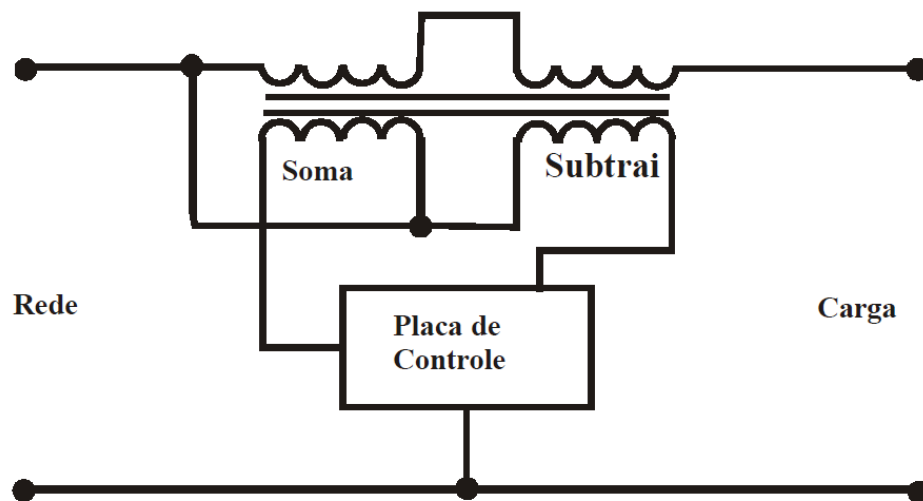


Figura 5.3 – Regulador de tensão buck/boost (SARAIVA FILHO, 2002)

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (MAULE, 2001) para este tipo de solução.

Vantagens:

- Alta precisão de estabilização;
- Baixo tempo de resposta, tipicamente de 0,5 ciclos (10ms);
- Ampla faixa de variação para a tensão de entrada e sem a necessidade de comutação de derivações;
- Insensibilidade às variações de frequência de entrada; e
- Tamanho e peso reduzidos.

Desvantagens:

- O custo é mais elevado quando comparado às demais topologias apresentadas.

### 5.2.3. Regulador de tensão constante (CVT – Trafo ferro-ressonante)

O regulador ferro-ressonante ou de tensão constante (Constant Voltage Transformer - CVT), como apresentado na Figura 5.4, consiste em um transformador com núcleo saturado e um circuito ressonante entre a indutância de magnetização do transformador e um capacitor paralelo. Esta topologia é capaz de manter a saída constante para uma faixa de tensão de entrada de aproximadamente 20% acima ou abaixo da tensão nominal (SARAIVA FILHO, 2002).

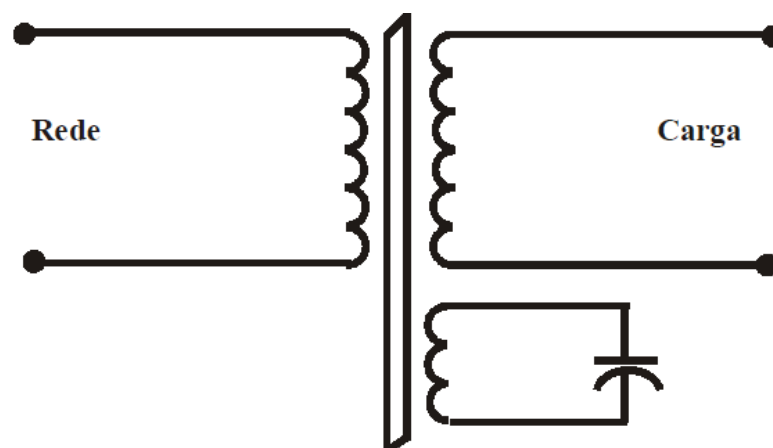


Figura 5.4 – Circuito básico de um CVT (SARAIVA FILHO, 2002)

Os enrolamentos estão separados por shunts magnéticos que possuem uma relutância magnética muito elevada comparada à relutância da parte central do núcleo do transformador. A indutância de fuga produzida por estes gaps junto com



o capacitor formam um circuito ressonante que pode fornecer uma alta tensão de saída mesmo sob uma baixa tensão de entrada.

O fluxo magnético na parte central do núcleo do transformador se eleva à medida que a tensão de entrada aumenta, até que a reatância indutiva do enrolamento secundário se iguale à reatância do capacitor.

Neste instante, a tensão de entrada se eleva devido à ressonância do circuito, embora a tensão de entrada esteja bastante baixa como apresentado na Figura 5.5.

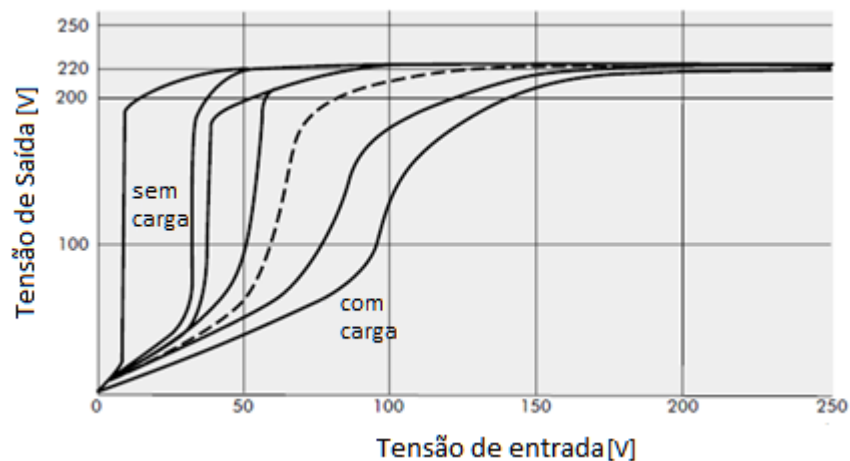


Figura 5.5 – Características de entrada/saída de um CVT (MAULE, 2001)

O circuito secundário é ressonante apenas na terceira harmônica, eliminando a maior parte das harmônicas geradas pela saturação do núcleo e produz uma onda senoidal razoavelmente limpa.

Por fim, cita-se as principais vantagens e desvantagens apresentadas por (MAULE, 2001) para este tipo de solução.

Vantagens:

- A capacidade de possuir uma faixa de entrada excepcionalmente larga com cargas baixas. Com 25% da carga, a saída é mantida em  $\pm 5\%$ , até mesmo quando a tensão de entrada é apenas 35 % da tensão nominal;
- Tempo de resposta tipicamente inferior a 15 ciclos e varia de acordo com a carga; e

- A saída do CVT limitará automaticamente a corrente em uma situação de sobrecarga.

Desvantagens:

- A característica de limitar automaticamente a corrente de saída pode impedir a operação correta de cargas que requerem correntes de partida elevadas, a menos que o CVT seja projetado especificamente para a aplicação. Exemplos típicos incluem as cargas de motores e as fontes de alimentação do modo chaveado;
- O transformador depende da ressonância e, portanto a tensão de saída irá variar em 1,5% para cada 1% de variação na frequência de entrada;
- O CVT tem uma precisão de estabilização modesta, tipicamente  $\pm 3\%$ ;
- O núcleo do transformador depende da saturação para alcançar a tensão de saída constante. Isto também produz campos magnéticos muito altos em torno do transformador que podem causar problemas nos equipamentos sensíveis localizados próximo ao CVT; e
- O tamanho e peso para uma determinada potência nominal em kVA, podem ser muitas vezes maiores que de um estabilizador de tensão eletromagnético automático com a mesma capacidade nominal.

### 5.3. CHAVE DE TRANSFERÊNCIA

A chave de transferência garante o fornecimento de energia elétrica às cargas críticas do sistema, gerenciando automaticamente duas redes de alimentação conectadas na entrada. Em função do estado de cada uma delas, o sistema de controle da chave define qual rede deverá assumir o papel de alimentar a carga. Os esquemáticos de chave de transferência apresentados na Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 tem como objetivo introduzir redundância de fontes ou redes de distribuição para uma carga específica.

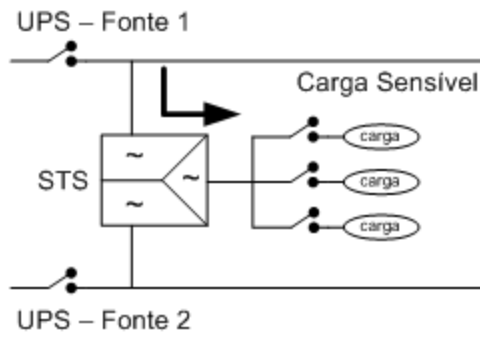


Figura 5.6 – Chave-estática de transferência STS.

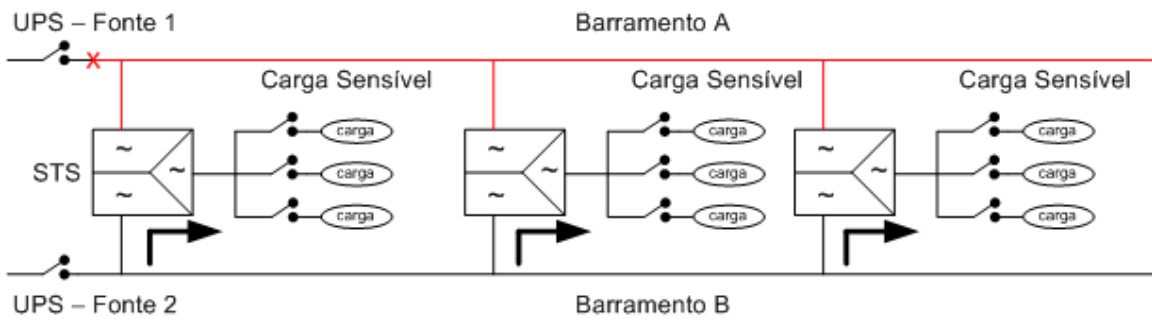


Figura 5.7 – Fontes redundantes.

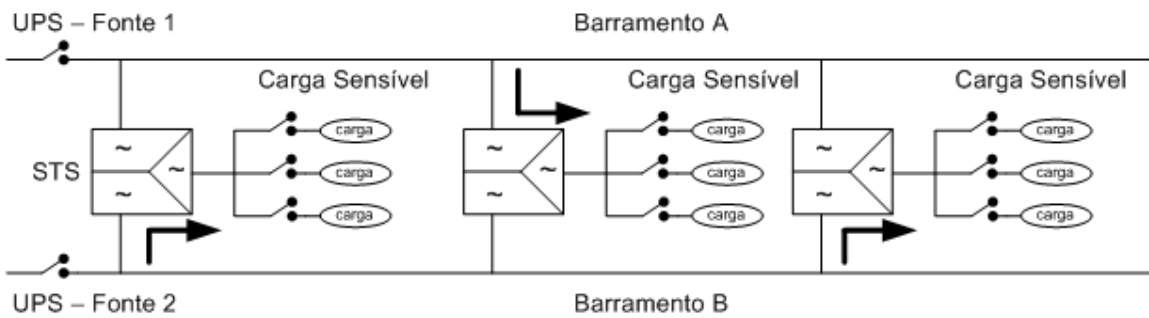


Figura 5.8 – Distribuição redundante.

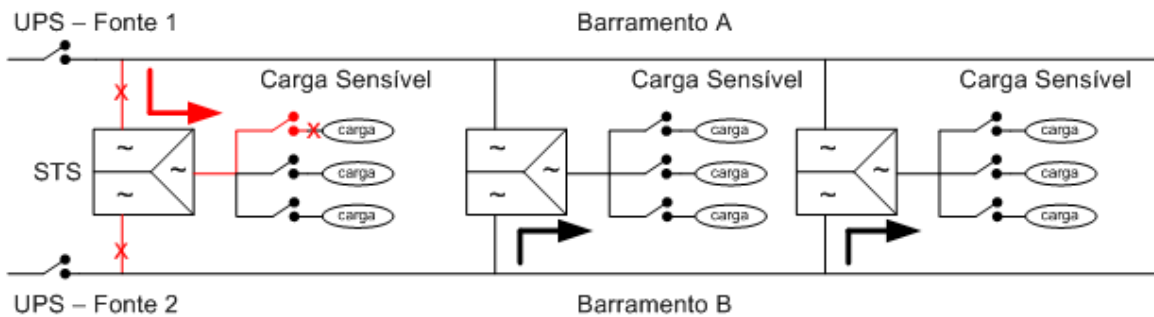


Figura 5.9 – Distribuição redundante (comportamento em falha).

Para evitar o curto circuito entre as fontes de energia no momento da transferência é importante conhecer o conceito de Break Before Make - BBM, Make Before Break - MBB e Transferência Síncrona e Assíncrona.

O BBM ocorre quando se abre a fonte em que se estava operando antes de acionar a fonte para a qual passará a alimentação da carga. E o MBB ocorre quando se fecha a fonte de destino antes de abrir a fonte em que se estava operando.

Na transferência síncrona, ambas as fontes estão em fase ou com uma diferença angular menor que  $30^\circ$ . Nesta condição, a transferência é feita diretamente com um tempo de comutação, geralmente, em torno de 4 ms, conforme indicado na Figura 5.10.

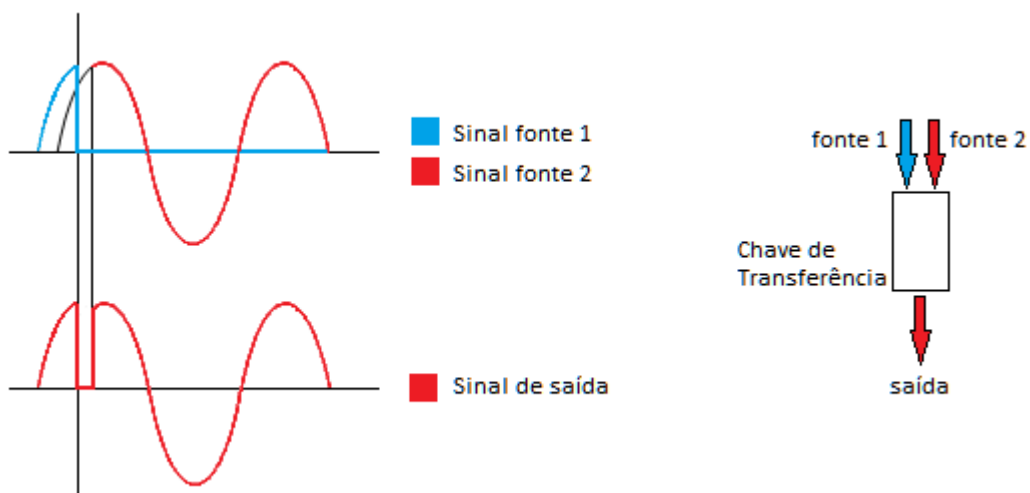


Figura 5.10 – Transferência síncrona (TOSSI e BRAGA, 2011)

Quando a defasagem angular é maior que  $30^\circ$ , deixa de ser possível fazer a transferência de forma direta devido ao aparecimento de componente CC. Este fato, ilustrado na Figura 5.11, poderia levar a queima dos equipamentos conectados, em especial as cargas predominantemente indutivas. A transferência assíncrona acontece, pois neste caso deve-se inserir um atraso superior a meio ciclo, em geral de 10 ms, para garantir que o fechamento da nova fonte de tensão não gere esta componente CC. Tal condição não é preocupante para a maioria das cargas, pois conforme a curva ITIC e/ou CBEMA, que define em quais limites de tolerância de tensão o equipamento tem de continuar funcionando normalmente sem falhas ou interrupção de operação. Tais curvas indicam que 1 ciclo é o limite

de tempo de interrupção que uma carga suporta, o que valida a condição de transferência assíncrona.

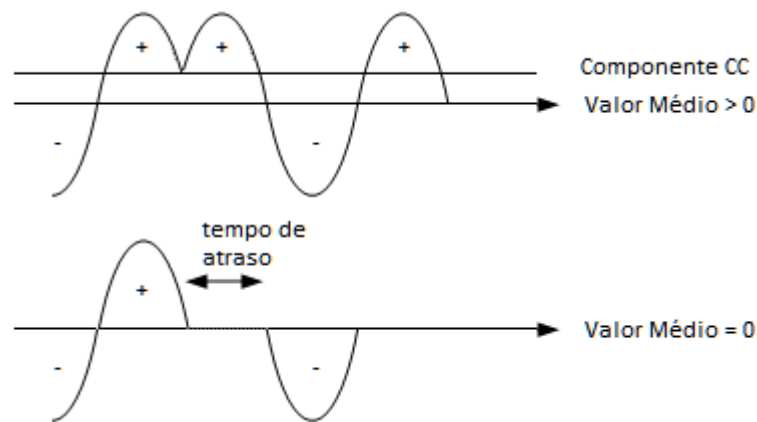


Figura 5.11 – Transferência assíncrona.

Existem, basicamente, dois modos de funcionamento: modo de rede prioritária e modo sem redes prioritárias. No modo com rede prioritária, a saída será alimentada pela rede prioritária sempre que ela estiver dentro das condições normais de funcionamento. Durante uma falha desta rede haverá transferência para a rede alternativa e retorno para a prioritária quando houver normalização de seus parâmetros. No modo sem rede prioritária, ambas são tratadas com mesma prioridade. Isto é, somente ocorrerão transferências de uma rede para a outra quando a rede que estiver alimentando a carga crítica sofrer anomalias, ou seja, não estiver dentro dos parâmetros aceitáveis pela carga.

A transferência de fontes de energia pode ser feita por meio da chave estática de transferência (Static Transfer Switch - STS) ou da chave de transferência automática (Automatic Transfer Switch - ATS). A STS é baseada em componentes eletrônicos estáticos (Silicon Controlled Rectifier - SCR), os quais garantem o controle rápido preciso de chaveamento, permitindo para esta solução obter o perfeito BBM, com um tempo de comutação geralmente de 4 ms ( $\leq 5$  ms). Já a ATS é baseada em componentes eletromecânicos que, apesar de mais lentos, conseguem, ainda assim, obter transferências síncronas e assíncronas em modo BBM. Possui um tempo médio entre falhas (Mean Time Between Failures – MTBF) mais elevado.

Portanto, a aplicação de STS é ideal para sistemas mais críticos e sensíveis a afundamentos de tensão em BBM, enquanto a ATS se mostra mais adequando para aumentar a confiabilidade de qualquer sistema com um custo bem mais atrativo. A Tabela 5.1, apresenta um resumo comparativo entre as tecnologias apresentadas (TOSSI e BRAGA, 2011).

Tabela 5.1 – Comparativo entre STS e ATS

	STS	ATS
<b>Características do BBM</b>	Garantido por sensores ON/OFF nos SCRs para o verdadeiro BBM	Garantido pelos mesmos sensores, mas para relés
<b>Transferência síncrona</b>	Geralmente 4 ms ( $\leq 5$ ms)	Geralmente $\leq 6$ ms
<b>Transferência assíncrona</b>	0 – 20 ms adicionados ao atraso acima	0 – 20 ms adicionados ao atraso acima
<b>Preço</b>	Qualidade e preços mais altos	Ótima relação custo/benefício

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas formas de mitigação de afundamentos de tensão através de soluções sem armazenamento de energia, sendo elas: regulador de tensão com mudança eletrônica de tapes (*tapchanger*), regulador de tensão com mudança de tapes em transformador incremental (buck/boost), regulador de tensão constante (CVT – Trafo ferro-ressonante) e chaves de transferência.

Em geral, estas soluções são projetadas para que o tempo de resposta seja rápido o suficiente para permitir a mitigação dos AMTs. Entretanto, a sua aplicação deve ser parte de uma avaliação sobre as necessidades operativas da carga. Neste contexto, torna-se necessário conhecer os benefícios e as limitações de cada uma delas de forma a identificar para quais aplicações são recomendadas.

Destaca-se que o regulador de tensão com mudança de tapes em transformador incremental (buck/boost) é o método mais efetivo de regular a tensão de entrada quando da alimentação de uma carga sensível a variação de tensão.

Por outro lado, deve-se ter em mente que a relação custo-benefício das soluções apresentadas está intimamente ligada ao custo de aquisição e a sensibilidade da carga a ser alimentada e, eventuais distúrbios introduzidos na rede por esta solução. Dessa forma, é viável considerar as demais topologias de Reguladores de Tensão para aplicações mais simplificadas e que as necessidades operati-

vas da carga permitam pequenas variações na tensão de entrada.

A utilização de chaves de transferência tem um objetivo mais específico, sendo ele introduzir a redundância de fontes para cargas consideradas muito críticas. Com tempo de transferência entre fontes independentes da ordem de até 6 ms, garantem um aumento significativo na confiabilidade do fornecimento de energia para este tipo de carga.

Por fim, destaca-se que, embora o regulador de tensão com mudança de taps em transformador incremental (buck/boost) tenha um elevado custo, os avanços no desenvolvimento e disponibilidade dos elementos associados a eletrônica de potência utilizados em sua composição, por exemplo IGBTs de alta potência, sinalizam um bom futuro para a utilização deste tipo de solução tendo em vista que a solução eletromecânica já era considerada uma referência no ambiente industrial.

## 6. SOLUÇÕES RIDE THROUGH SYSTEM - RTS

### 6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os acionamentos a velocidade variável (Adjustable Speed Drivers – ASDs) são equipamentos eletrônicos capazes de controlar de maneira precisa a velocidade de operação do motor através da variação da magnitude e da frequência da tensão. Os principais benefícios do uso desta tecnologia são: controle da corrente de partida, da aceleração e da velocidade de rotação do motor, ajuste do ponto de torque máximo, controle de parada de processo, redução do consumo de energia elétrica e melhoria da qualidade da energia fornecida ao motor.

A Figura 6.1 apresenta o modelo de um ASD e seu funcionamento se resume basicamente na retificação da tensão de entrada, normalmente realizada por uma ponte a diodo de seis pulsos que depois é invertida por uma ponte completa, com chaves semicondutoras controladas a alta frequência. No elo CC, a tensão retificada é mantida constante e o *ripple* depende da capacitância  $C$ . A melhoria da qualidade da energia entregue ao motor deve-se à presença da indutância  $L$ , que reduz as distorções harmônicas e evita variações bruscas de corrente.

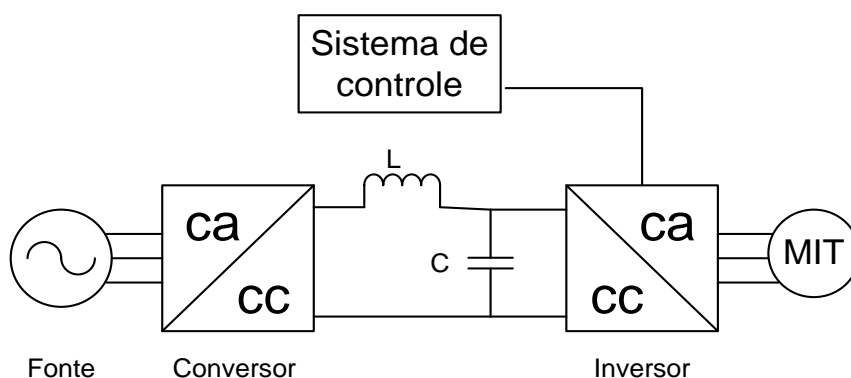


Figura 6.1 – Modelo simplificado do ASD.

O crescimento da utilização dos ASDs deu-se a partir da necessidade de buscar alternativas para melhorar a eficiência, o gasto energético e o controle dos processos industriais. No entanto, vale ressaltar sua sensibilidade frente a AMTs. Na ocorrência de um AMT, inicialmente, as correntes se anulam devido à inversão da polaridade dos capacitores, posto que a tensão de entrada torna-se menor que



a tensão do capacitor e, portanto, impede a circulação das correntes. Esta interrupção permanece até o capacitor atingir o novo nível de tensão de entrada e estabelecer um novo equilíbrio permitindo que seja retomado o processo de condução. Nesta nova etapa, os valores de pico e eficazes das correntes são elevados de forma a compensar a diminuição do valor da tensão no elo CC e a potência solicitada pela carga. Quando a tensão de entrada retorna ao valor nominal ocorre uma rápida variação da tensão do capacitor, elevando a solicitação de corrente causando picos na corrente de entrada que podem comprometer os componentes eletrônicos e/ou sensibilizar a proteção de forma que, para garantir uma parada segura, irá desligar o motor antes de perder a alimentação do sistema de controle (BELCHIOR e OLIVEIRA, 2003).

A severidade de um AMT sobre o acionamento está diretamente ligada ao tipo da falta, à impedância do alimentador, conexões dos transformadores entre o ponto de falta na concessionária e o ramal de alimentação da planta industrial, à topologia do ASD e também às condições de operação da carga (MELO, BASCOPÉ, *et al.*, 2007). Estudos utilizando sete diferentes tipos de afundamentos de tensão (A, B, C, D, E, F e G), definidos por (BOLLEN, 2000) e apresentados em sua forma vetorial na Figura 6.2, mostraram que o afundamento do tipo A, causado por curto circuito trifásico, é o mais severo levando a tensão remanescente do elo CC ao seu menor valor. Este valor deve ser utilizado como referência para projetar uma solução capaz de aumentar a suportabilidade do ASD e também definir o ajuste da proteção de subtensão. O afundamento do tipo B, causado pelo curto-circuito monofásico é o menos severo, no entanto atinge o maior valor de corrente e por isso deve ser levado em conta para ajustar a proteção de sobrecorrente.

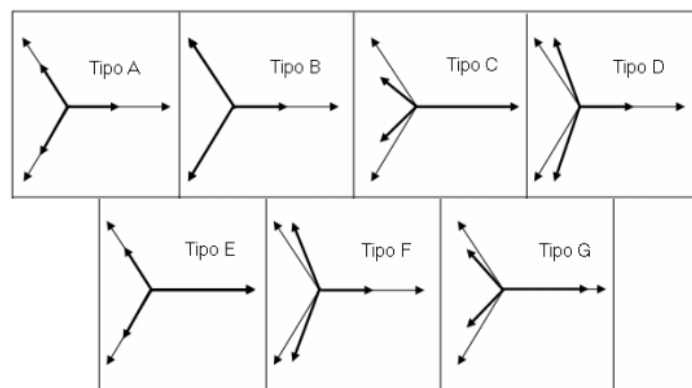


Figura 6.2 – Forma vetorial dos AMTs.

A literatura contempla alguns trabalhos nos quais a sensibilidade dos ASDs foi testada. À primeira vista percebe-se que não é possível determinar o desempenho destes equipamentos frente a um AMT a partir dos dados de placa e que estes eventos podem influenciá-los das formas mais diversas possíveis (EPRI, 1993). Em um estudo conduzido pelo EPRI-PEAC (Eletronic Power Research Institute – Power Eletronic Applications Center) foram testados 17 ASDs comerciais e 90% deles foi desligado com tensão remanescente inferior a 0.5 p.u. (EPRI, 1996). Em outro estudo, realizado em (KEUS, ABRAHAMS, *et al.*, 1999), demonstrou-se a partir de testes com carregamento do motor em 25% e 75% que a sua influência no desempenho dos ASDs é mínima. Outra contribuição foi que a possibilidade de ajustar a tensão de entrada em 1,05 p.u. ajuda a aumentar a suportabilidade do ASD frente ao AMT. Outro trabalho de destaque realizado pelo EPRI-PEAC ressaltou a importância do religamento síncrono para processos críticos que requerem velocidade e torque praticamente constantes (EPRI, 1995).

Uma forma adequada para avaliar a suportabilidade dos ASD é traçar sua curva de tolerância e comparar com as curvas de sensibilidade dos equipamentos eletrônicos, como a SEMI F47. Em (CUNHA e LEÃO, 2005), realizou-se ensaios em laboratório para levantar as curvas de tolerância de um determinado ASD para afundamentos do tipo A, B e E. Os resultados foram comparados com a curva SEMI F47 e apresentados na Figura 6.3. Conforme já citado, nota-se que o AMT do tipo A é o mais severo e, neste caso, o único capaz de sensibilizar a proteção do ASD.

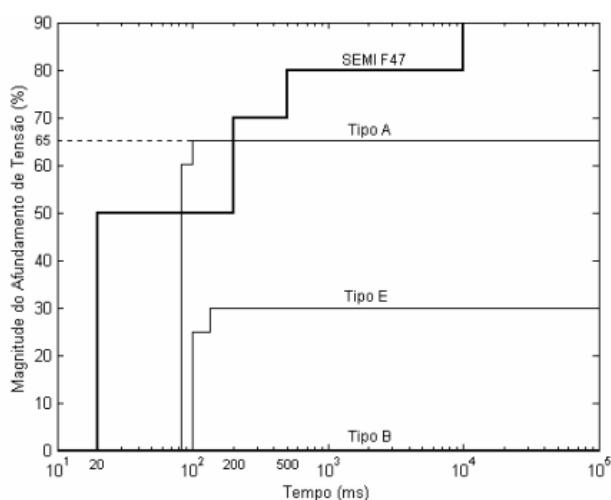


Figura 6.3 – Curvas de tolerância do ASD (CUNHA e LEÃO, 2005).

A maior preocupação quanto ao comportamento do ASD não é em relação aos parâmetros dos AMTs e sim à condição de subtensão e/ou sobrecorrente que, normalmente, sucede estes eventos e que pode levar à atuação da proteção ocasionando o desligamento do equipamento e a parada do processo. Outra consequência é o mau funcionamento do ASD levando à flutuação do torque e da velocidade do motor e, por consequência, diminuindo a vida útil e a confiabilidade do mesmo, bem como compromete a qualidade do produto final.

Os custos associados aos AMTs estão diretamente relacionados ao tempo de parada de produção e aos esforços para reestabelecer seu ritmo normal. Por exemplo, em processos contínuos como a fabricação de tecidos, vidro, papel e laminação o produto final é diretamente afetado devido a variações de velocidade e na ocorrência de uma parada, o tempo de retomada da produção pode chegar a dias. Nos Estados Unidos estima-se que as perdas devido a problemas com a qualidade da energia esteja entre 20 e 100 bilhões de dólares por ano e as indústrias tem informado perdas da ordem de 10 mil a 1 milhão de dólares por parada de processo (JOUANNE, ENJETI e BANERJEE, 1999). Já no Brasil, estima-se que estas perdas cheguem a 2 bilhões de dólares por ano (CUNHA e SILVA, 2003). Esses prejuízos podem ser significativamente reduzidos com a aplicação de alguns conceitos simples na alteração da topologia dos ASDs que já estão instalados ou com a instalação de novos ASDs com maior capacidade de suportar os AMTs. As principais pesquisas internacionais conduzidas no Canadá, Estados Unidos e Europa sugerem que a configuração que apresenta o melhor custo benefício deve ser capaz de suportar uma tensão remanescente de pelo menos 0,5 p.u. por um intervalo de tempo de 0,5 ciclos até 5 segundos e fornecer uma potência de 300 kVA (JOUANNE, ENJETI e BANERJEE, 1999).

Neste contexto, este capítulo apresenta as principais soluções Ride Through utilizadas em aplicações industriais, sendo elas:

- Alimentação CC do sistema de controle;
- Mudança da relação V/Hz com ajuste de tape do transformador;
- Mitigação regenerativa;
- Redução da velocidade e/ou da carga;

- Utilização de motor com tensão reduzida;
- Adição de capacitores no elo CC;
- Adição de neutro;
- Conversor Boost;
- Conversores Ativos; e
- Retificador Híbrido Trifásico (RHT).

## **6.2. ALIMENTAÇÃO CC DO SISTEMA DE CONTROLE**

A resposta do acionamento de um motor CA a distúrbios de tensão é fortemente dependente do algoritmo de controle e das variáveis elétricas e mecânicas monitoradas, tanto do acionamento, quanto do motor (COLLINS e MANSOOR, 1997).

Os ASDs com tecnologia ultrapassada, porém ainda em utilização em grande parte dos processos industriais, têm seu sistema de controle alimentado a partir da rede CA, fato que os torna muito mais sensíveis aos distúrbios externos. Assim, de forma a evitar a perda do controle sobre o motor e garantir uma parada segura do processo, a proteção irá atuar e desligará o motor antes que o sistema de controle perca sua alimentação.

Hoje, existem topologias que não monitoram a tensão de entrada CA, mas sim a tensão do elo CC. Estes utilizam a energia armazenada no capacitor do elo CC para alimentar o sistema de controle, fato que os torna bem menos sensíveis aos distúrbios externos, pois a energia armazenada será suficiente para ajudar o sistema suportar a redução da tensão de entrada por certo intervalo de tempo até que as condições normais sejam reestabelecidas.

## **6.3. MUDANÇA DA RELAÇÃO V/Hz COM AJUSTE DE TAPE DO TRANSFORMADOR**

Durante um AMT, apenas 25% da energia armazenada no capacitor do elo CC é utilizada (BELCHIOR e OLIVEIRA, 2003). Para algumas topologias de ASDs esta energia adicional pode ser utilizada para compensar a perda de velocidade ou

até mesmo o desligamento durante o distúrbio. Em condições normais, quando mantida constante a relação V/Hz a tensão RMS de saída do conversor é igual 1 p.u.. No entanto, com modificações sistemáticas e apropriadas desta relação pode-se aumentá-la temporariamente, durante o AMT, de forma a garantir uma menor variação da tensão de saída do conversor e, por consequência, uma menor variação da velocidade do motor.

Estudos computacionais mostraram que a aplicação destes conceitos aliado a elevação do tape do transformador de suprimento do conversor, garantindo que a tensão pré-distúrbio seja maior que na condição nominal de operação, pode garantir imunidade total do acionamento frente a um AMT, no qual a tensão remanescente foi 0,80 p.u. durante 30 ciclos (BELCHIOR e OLIVEIRA, 2003). Destaca-se que esta elevação do tape do transformador de suprimento do conversor é devidamente compensada pela modulação PWM do inversor de forma a evitar sobretensão em condição normal de operação.

Apesar de ainda ser uma solução em fase experimental e, que necessita de mais pesquisas e testes laboratoriais, se mostrou bastante eficiente, principalmente, por sua simplicidade, baixo custo associado à sua implementação e o seu tempo de resposta é da ordem de milissegundos.

#### **6.4. MITIGAÇÃO REGENERATIVA**

A mitigação regenerativa consiste em aproveitar a inércia da carga para transformar o motor de indução em um gerador, ou seja, converter a energia cinética em energia elétrica para ser armazenada no capacitor do elo CC. Analisando as curvas de torque e velocidade apresentadas na Figura 6.4 é possível demonstrar o princípio de funcionamento deste método.

Em regime permanente, ponto 'a', o motor opera com 1 p.u. de tensão e torque eletromagnético ( $T_e$ ), 60 Hz de frequência, velocidade de aproximadamente 1700 rpm. Na ocorrência do AMT, o sistema de controle do acionamento faz com que o motor passe a operar com uma frequência um pouco menor invertendo o torque eletromagnético e como a inércia da carga não permite que a velocidade varie instantaneamente o motor passa a operar no ponto 'b'. Neste ponto aparece

um torque negativo o qual reduz a velocidade bruscamente até atingir o ponto 'd' e o motor voltar a operar com torque eletromagnético unitário. A energia cinética armazenada no motor é convertida em energia elétrica e transferida para o capacitor do elo CC no deslocamento do ponto 'b' para o ponto 'c' (WILDI, 1997).

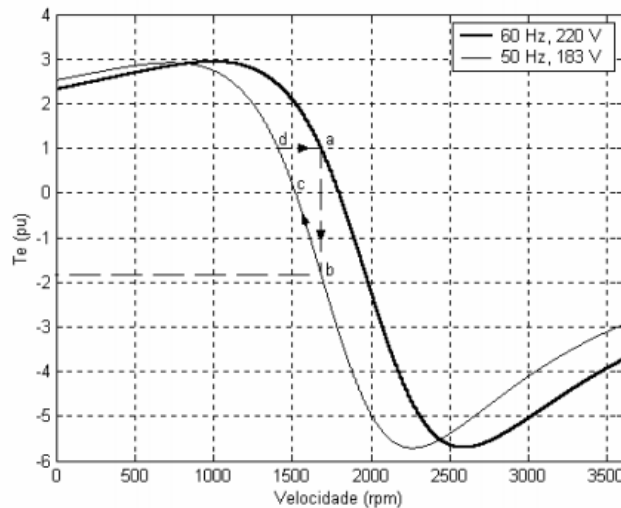


Figura 6.4 – Curvas de torque e velocidade do MIT com variação de frequência e tensão de alimentação para manter o fluxo magnético constante (CUNHA e LEÃO, 2005).

Um estudo complementar realizado por (CUNHA e LEÃO, 2005) analisou quatro possibilidades de redução de frequência, de forma a verificar o comportamento do ASD submetido a um AMT do tipo A com tensão remanescente de 0,65 p.u. durante 12 ciclos. Os valores de frequência escolhidos foram 50, 52, 54 e 60 Hz e os resultados podem ser observados na Figura 6.5. A elevação de tensão no elo CC foi maior para 50 e 52 Hz, sustentando seu valor acima do mínimo permitido durante todo o distúrbio.

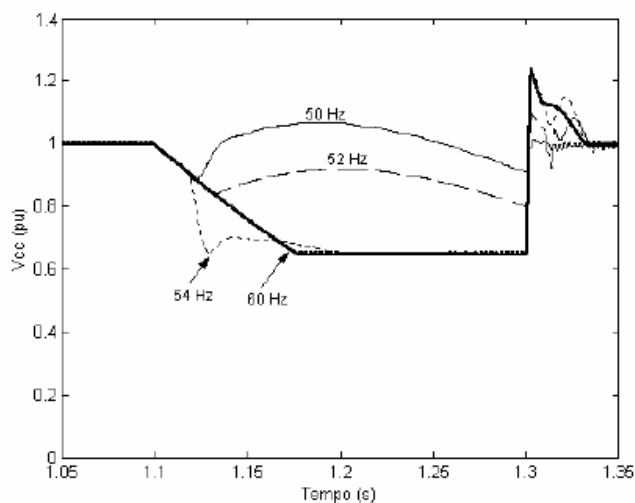


Figura 6.5 – Tensão no elo CC com conversor controlado para diferentes frequências (CUNHA e LEÃO, 2005).

Esta solução é amplamente empregada em processos não contínuos e que possibilitem a variação da velocidade do motor sem comprometer o desempenho do processo produtivo. Deve-se ter em mente que durante o processo de modificação da frequência de alimentação do motor ocorre a inversão do torque, fato que além de reduzir a velocidade do motor ainda causa esforços mecânicos indesejados no rotor, podendo levá-lo a fadigar.

### 6.5. REDUÇÃO DA VELOCIDADE E/OU DA CARGA

A corrente solicitada ao elo CC é diretamente proporcional à variação da frequência, ou seja, para cargas que trabalham com variação de velocidade e de torque, a corrente solicitada ao elo CC também irá variar. Ventiladores e bombas são cargas que permitem a variação de velocidade. Quando operando em frequências menores, a corrente solicitada será menor, podendo assim continuar trabalhando mesmo sob a ocorrência de um distúrbio (HOADLEY, 1997).

Em suma, esta proposta de solução consiste em diminuir a solicitação de corrente com o intuito de prolongar a capacidade de alimentação da energia armazenada no capacitor. De fato, o efeito produzido se assemelha ao conseguido com a adição de capacitores ou de armazenadores de energia no elo CC. A mesma ideia permeia a redução da carga para aumentar a capacidade de suportar um AMT.

### 6.6. UTILIZAÇÃO DE MOTOR COM TENSÃO REDUZIDA

Este método consiste em dimensionar o motor com tensão de alimentação menor que a tensão de saída do ASD. Dessa forma, quando o sistema de alimentação principal estiver sob um AMT o valor de tensão entregue ao motor ainda será suficiente para manter seu correto funcionamento. A Tabela 6.1 apresenta os dados do motor e do seu acionamento utilizados para dimensionar a solução.

Tabela 6.1 – Exemplo de aplicação

Equipamento	$V_{ac}$	$V_{cc}$
ASD	460 V	620 V
Motor de Indução	230 V	-

De acordo com (HOADLEY, 1997) a máxima tensão de saída do conversor é dada pela Equação 6.1.

$$V_{out-ac} = 0,82 \times V_{cc} \quad 6.1$$

Portanto, a mínima tensão no elo CC para que o motor mantenha seu correto funcionamento é obtida pela Equação 6.2

$$V_{cc-min} = \frac{V_{out-ac}}{0,82} = \frac{230}{0,82} = 280,5 \text{ V} \quad 6.2$$

Dessa forma, a tensão no elo CC pode reduzir até 0,45 p.u. que o acionamento ainda conseguirá prover a tensão de alimentação necessária para o motor

### 6.7. ADIÇÃO DE CAPACITORES NO ELO CC

A capacitância dimensionada pelo fabricante tem apenas a função de filtrar a tensão retificada. No entanto, a adição de mais unidades capacitivas possibilita uma melhora na suportabilidade do ASD, pois implica em uma maior quantidade de energia armazenada para suprir o acionamento durante o distúrbio. Outro aspecto positivo é que quanto maior o valor da capacitância menor será o *ripple* e por consequência maior será a tensão remanescente no elo CC na ocorrência de um AMT. Deve-se ter sempre em mente que este método acarreta elevação dos picos de corrente durante um AMT e sobretensão no restabelecimento da tensão normal de alimentação. Estes eventos podem sensibilizar a proteção ou até mesmo danificar os componentes eletrônicos.

Como este método trata-se de mitigação de distúrbios de pequena duração e intensidade, para dimensionar os capacitores é necessário estabelecer o menor valor de tensão que o elo CC deve ser capaz de suportar e por quanto tempo. A título de exemplo de aplicação será adotado o valor de 0,9 p.u. por um período de 0,5 segundos. A Tabela 6.2 apresenta os demais dados do ASD utilizado para dimensionar a solução.

Tabela 6.2 – Exemplo de aplicação

Equipamento	V <sub>ac</sub>	V <sub>cc</sub>	P <sub>0</sub>	C	V <sub>cc,trip</sub>	t <sub>r</sub>
ASD	460 V	620 V	7460 kW	5000 µF	0.9xV <sub>cc</sub>	0,5 s



Primeiramente deve-se calcular a corrente solicitada ao elo CC de acordo com a Equação 6.3.

$$I_{cc} = \frac{P_0}{V_{cc}} = 12 \text{ A} \quad 6.3$$

Em seguida, calcula-se o valor da capacitância que deve ser adicionada, de acordo com 6.4.

$$C = I \times \frac{dt}{dV} = \frac{I_{cc} \times t_r}{V_{cc} - V_{cc-trip}} = 0,097 \text{ F} \quad 6.4$$

Para atingir o objetivo proposto deve-se instalar 20 unidades de 5000  $\mu\text{F}$  em paralelo. Vale ressaltar que para estimar o custo desta solução deve-se levar em conta os encapsulamentos, fusíveis, circuitos de pré-carga e os barramentos adicionais.

## 6.8. ADIÇÃO DE NEUTRO

A mitigação por adição de neutro consiste em transformar um retificador de seis pulsos em dois retificadores trifásicos de meia onda conectados em série, através da conexão de uma chave controladora entre o neutro da fonte de alimentação em estrela (Y) e o ponto comum entre os capacitores. Esta modificação está representada na Figura 6.6 pelo ramo com os dois tiristores em antiparalelo (CUNHA e LEÃO, 2005).

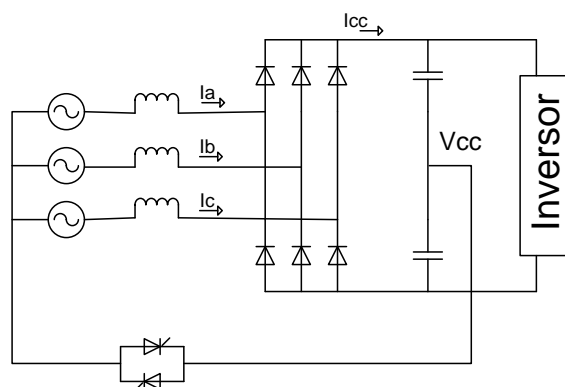


Figura 6.6 – ASD com método de adição de neutro (CUNHA e LEÃO, 2005).

A tensão média no elo CC do circuito original do retificador de seis pulsos é definida pela Equação 6.5, sendo  $V$  a tensão fase-neutro de alimentação do conversor e a queda de tensão nos indutores desprezada.

$$V_{cc} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times V \quad 6.5$$

A tensão média no elo CC do circuito modificado pela adição de neutro é definida pela Equação 6.6, sendo  $V$  a tensão fase-neutro de alimentação do conversor:

$$V_{cc} = 2 \times \sqrt{2} \times V \quad 6.6$$

Comparando as equações é possível perceber que esta modificação na topologia do ASD permite um aumento de 15% na tensão do elo CC.

### 6.9. CONVERSOR BOOST

O conversor boost (elevador de tensão), apresentado na Figura 6.7, possui dois estágios de operação: retificação e inversão. No primeiro, ocorre a conversão da tensão alternada da rede de alimentação em tensão contínua, a qual irá alimentar o estágio conversor. No segundo, ocorre a conversão de tensão contínua não controlada em controlada por corrente com modulação PWM (LARICO, 2007). A aplicação desta tecnologia em ASD tem como finalidade manter a tensão no elo CC muito próxima ao seu valor de regime permanente, mesmo frente à afundamentos severos, nos quais a tensão remanescente chega a 0,50 p.u. durante aproximadamente um minuto. A Figura 6.7 apresenta a conexão do conversor boost entre a alimentação principal e o elo CC. O conversor é sensibilizado pela queda da tensão do elo CC para valores inferiores a um limite pré-estabelecido, normalmente 0,9 p.u., sendo sua razão cíclica ajustada conforme a severidade do afundamento (CUNHA e LEÃO, 2005).

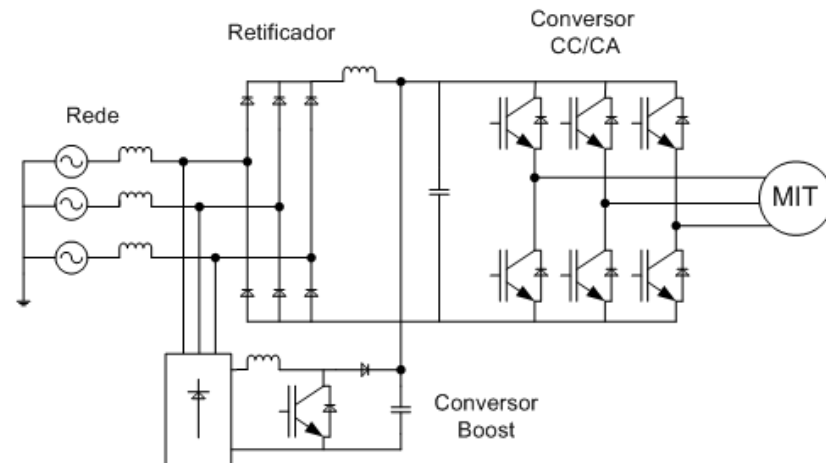


Figura 6.7 – Esquema de ligação do conversor boost.

Este método pode ser adquirido acoplado ao inversor na compra de uma nova unidade ou desenvolvido um projeto para conexão em paralelo ao elo CC a partir da especificação da potência do motor e da tensão de regime permanente do elo CC.

Um estudo realizado por (CUNHA e LEÃO, 2005) mostra que a utilização de um conversor boost foi capaz de suportar um AMT simétrico, no qual a tensão remanescente foi de 0,5 p.u. durante 12 ciclos.

### 6.10. CONVERSORES ATIVOS

A mitigação pelo uso de conversores ativos constitui na substituição da ponte retificadora a diodo por um retificador PWM. O novo esquema de ligação é apresentado na Figura 6.8. Alguns fabricantes disponibilizam esta solução para potência de até 500kW. A sua capacidade de suportar os AMTs está diretamente ligada à corrente que circula no retificador e na condição de operação da carga. No entanto, sua capacidade pode ser elevada dessensibilizando a proteção ou adicionando um sistema de armazenamento de energia. Em condição de plena carga é possível suportar eventos com tensão remanescente de até 0,9 p.u., mas dessensibilizando o ajuste da proteção no fator de 1,5 o acionamento passa a suportar tensão remanescente de 0,6 p.u. (JOUANNE, ENJETI e BANERJEE, 1999).

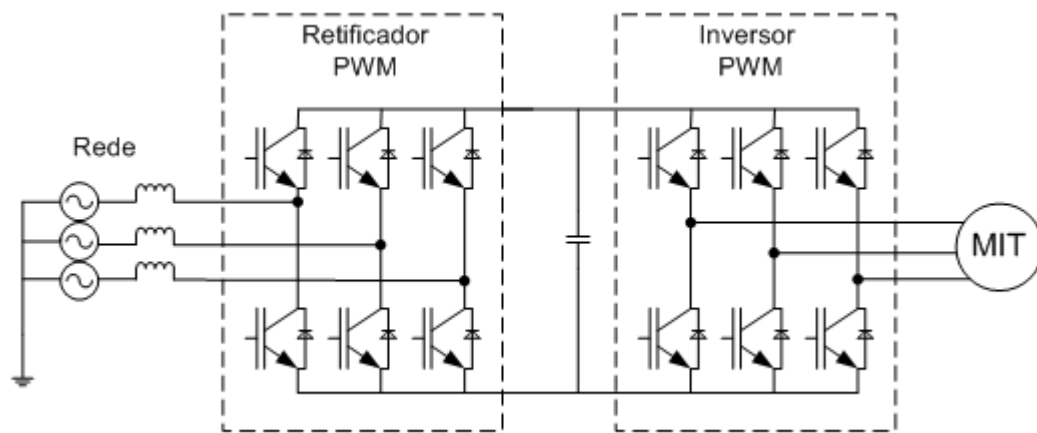


Figura 6.8 – ASD com retificador PWM.

### 6.11. RETIFICADOR HÍBRIDO TRIFÁSICO (RHT)

A Mitigação por Retificador Híbrido Trifásico, consiste na utilização de uma estrutura composta por um retificador trifásico de 6 pulsos não-controlado (Ponte de Graetz), associado com conversores Single Ended Primary Inductor Converter - SEPIC conectados em paralelo em cada braço do retificador não-controlado, conforme ilustrado na Figura 6.9.

Esta topologia vem sendo trabalhada pelo Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) conforme apresentado em (COSTA, COELHO, *et al.*, 2012), (COSTA, RODRIGUES, *et al.*, 2011), (COSTA, FREITAS, *et al.*, 2011) e (COSTA, VIEIRA, *et al.*, 2011).

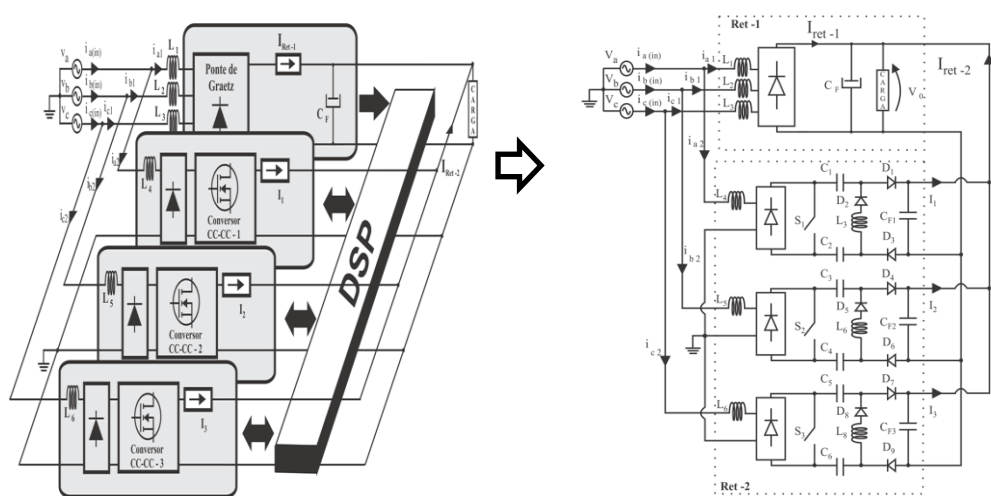


Figura 6.9 – ASD com retificador híbrido trifásico (RHT) (COSTA, VIEIRA, *et al.*, 2011).

Tal estrutura é capaz de aumentar a suportabilidade do acionamento a todos os tipos afundamentos, assegurando a continuidade da operação mesmo sob condições severas de afundamento do tipo A, ou seja, com intensidade de 50%. Uma importante característica a ser destacada nessa estrutura é que, sob condições normais de operação (sem afundamento de tensão), 60% da potência de saída é processada pelo retificador de 6-pulsos a diodos e 40 % é processada por três conversores chaveados. Esta característica operacional proporciona flexibilidade, alta confiabilidade e robustez, tornando o conversor bastante atrativo do ponto de vista técnico e comercial para aplicações em elevadas potências. Outro aspecto que torna esse método bastante atraente é a possibilidade de se fazer retrofitting em acionamentos já instalados, dispensando elevados custos de substituição desses equipamentos.

## 6.12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas das soluções citadas neste capítulo podem ser facilmente implementadas, como trocar a alimentação do sistema de controle para corrente contínua, operar com velocidade ou carga reduzida e dimensionar o acionamento com tensão superior à do motor. A adição de capacitores ao elo CC é uma boa alternativa para corrigir distúrbios em pequenas cargas, cuja duração seja da ordem de milissegundos.

Alguns processos não suportam variação de velocidade superior a 5% por mais de 500 ms. Para estes casos, recomenda-se evitar o uso de mitigação regenerativa e a operação com velocidade e/ou carga reduzida. No entanto, a alteração da característica V/Hz com ajuste de tape do transformador pode ser uma alternativa interessante, pois a variação de velocidade é muito pequena.

Para processos críticos, o conversor boost representa uma boa opção, já que consegue prover energia suficiente para que a tensão no elo CC seja mantida acima do valor ajustado e a proteção não atue. Já para aplicações que necessitam que o fluxo de energia seja nos dois sentidos do conversor, por exemplo, para o uso da frenagem regenerativa, o uso de conversores ativos PWM se mostra bastante interessante.

Ademais, buscou-se apresentar a nova solução que vem sendo trabalhada pelo Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e que se propõe a mitigar AMTs do tipo A mesmo sob condições severas.

Por fim, destaca-se que além das soluções discutidas neste capítulo existe a possibilidade de utilizar um sistema de armazenamento de energia para estabilizar a tensão de controle do ASD durante o AMT de forma a evitar que a proteção deste equipamento atue e desligue o processo. Dentre os sistemas de armazenamentos, observa-se que o sistema de baterias por meio de um sistema UPS pode garantir uma opção simples e bastante interessante para ser avaliada.

---

## 7. ESTUDO DE CASO

### 7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A parceria entre o DME Distribuição S.A - DMED e o Grupo de Estudos da Qualidade da Energia - GQEE/UNIFEI através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D viabilizou uma pesquisa com o objetivo de caracterizar a sensibilidade dos processos de uma planta industrial responsável pela produção de condutores de alumínio e cabos elétricos de baixa e média tensão. Esta pesquisa deu origem a dissertação defendida por Roberto Chouhy Leborgne (LEBORGNE, 2003) e seus principais resultados serão apresentados sucintamente no subcapítulo 7.2 de forma a fornecer subsídio às análises que serão realizadas no subcapítulo 7.3.

A indústria em questão se encontra conectada à rede primária de distribuição do DMED e representa uma das principais cargas da concessionária local. No entanto, de acordo com a equipe técnica do consumidor, o sistema apresentava problemas de parada do processo produtivo por conta de distúrbios no fornecimento de energia.

Para determinar a sensibilidade do processo fez-se necessário monitorar a ocorrência de AMTs, tratar os registros, caracterizar os distúrbios, avaliar o impacto dos AMTs, testar a aderência dos diferentes métodos de caracterização e por fim representar a sensibilidade.

De posse da sensibilidade do processo apresentam-se neste capítulo algumas propostas para mitigar os efeitos nocivos dos AMTs, suas principais vantagens e desvantagens e realiza-se uma análise técnica e econômica em relação a cada uma das soluções apresentadas.

## 7.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

### 7.2.1. Caracterização do sistema elétrico

Conforme já citado, o sistema elétrico escolhido para o estudo é uma planta industrial responsável pela produção de condutores de alumínio e cabos elétricos de baixa e média tensão.

Como apresentado no diagrama unifilar da Figura 7.1, o fornecimento de energia elétrica desta indústria é realizado através do alimentador de tensão nominal 13,8 kV que sai da SE Poços de Caldas II, que por sua vez é alimentada pela linha de transmissão de 138 kV proveniente da SE Poços de Caldas I.

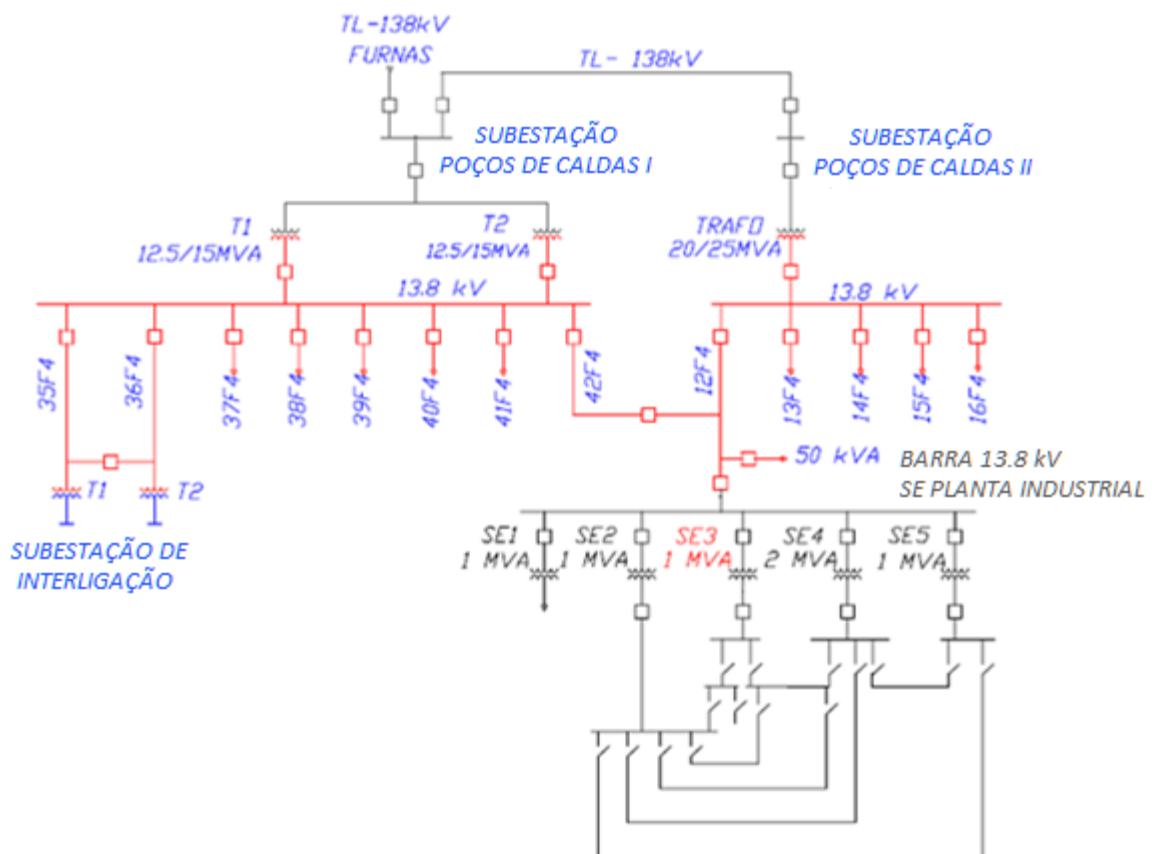


Figura 7.1 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição

### 7.2.2. Escolha dos processos monitorados

A indústria em questão representa uma das principais cargas da concessionária local, e a época apresentava problemas de parada do processo produtivo por conta de distúrbios no fornecimento de energia elétrica.



Estas ocorrências levaram o DMED a propor um projeto de P&D cujo objetivo foi caracterizar a sensibilidade dos processos desta indústria frente a AMTs, e assim, possibilitar a proposição de soluções para reduzir ou eliminar as ocorrências que pudessem vir a causar paradas no processo produtivo.

A primeira etapa para caracterizar a sensibilidade de um processo é determinar os seus pontos críticos e assim auxiliar na definição dos locais onde deverão ser instalados os monitores de QEE. Neste caso, estes pontos se referem aos equipamentos afetados quando da ocorrência de AMTs e que podem vir a interromper o processo produtivo e/ou atrapalhar o correto funcionamento da linha de produção.

Para selecionar os processos monitorados foram realizadas reuniões técnicas com a Gerência de Produção e Manutenção da fábrica, nas quais foram definidos os seguintes critérios:

- Importância dessas áreas dentro do processo de fabricação;
- Frequência de paradas de produção supostamente devidas a distúrbios na rede elétrica; e
- Custos associados às paradas de produção não programadas: perda de matéria prima, tempo de retomada de produção, reparo e substituição de equipamentos, etc.

Para auxiliar a análise de sensibilidade destes processos elaborou-se um formulário, conforme Tabela 7.1, para que fossem registradas todas as ocorrências que levassem ao desligamento ou mau funcionamento dos processos monitorados.

Tabela 7.1 – Planilha de registro de ocorrências de paradas de produção (LEBORGNE, 2003)

<b>Registro de Parada de Produção</b>				
<b>Data</b>	<b>Horário</b>		<b>Local</b>	
	<b>Início</b>	<b>Final</b>	<b>Processo</b>	<b>Motivo da Falha</b>

A produção de cabos de média tensão envolve processos como lingotamento, laminação, trefilação, encordoamento com compactação, extrusão da isolação e camadas semicondutoras sobre o condutor, vulcanização contínua em catenária, blindagem metálica e extrusão da cobertura.

O processo escolhido foi a linha de Vulcanização Contínua em Catenária (Catenary Continuous Vulcanization - CCV) conhecida como Catenária 44. A linha CCV consiste na aplicação, por meio de extrusão da isolação e das camadas de blindagem não-metálica em um condutor metálico e, também, a vulcanização do material que compõe a isolação, de forma contínua através do controle da pressão e temperatura. Portanto, trata-se de um processo contínuo de velocidade controlada, pois a espessura do isolante depende da pressão dos bicos injetores e da velocidade do cabo na extrusora.

As principais cargas que formam este processo são motores de corrente contínua e um motor de indução. Na Tabela 7.2, apresentam-se os principais equipamentos e uma descrição sucinta de sua função no processo.

Tabela 7.2 – Principais equipamentos que compõem o processo Catenária 44

<b>Etapas do processo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Equipamento Principal</b>
Metering	Alimenta a linha de produção com velocidade e tensionamento controlados e é provido com câmbio para selecionar as marchas em função da velocidade prevista para a linha de acordo com o peso do cabo a ser produzido	Motor CC 5 hp
Extrusora 2,5"	Aplicação da camada semicondutora interna	Motor CC 40 hp
Extrusora 3,5"	Aplicação da isolação	Motor CC 65 hp
Extrusora 6"	Aplicação da camada semicondutora externa	Motor CA 250 hp
Pull out	Puxa o cabo e, em sincronia com o metering, promove o tensionamento evitando que o cabo encoste na superfície interna do tubo de vulcanização aquecido	Motor CC 7,5 hp
Helper	Em sincronia com o metering e o pull-out, puxa e tensiona o cabo para ser bobinado	Motor CC 5 hp
Bobinadeira	Bobina o cabo isolado	Motor CC 7,5 hp

Para fins de análise, admitiu-se que os motores de corrente contínua são controlados por conversores do tipo Fonte de Corrente Imposta – CSI e o motor de corrente alternada controlado por um conversor do tipo Fonte de Tensão Imposta – VSI.

### 7.2.3. Definição do sistema de medição

O sistema de monitoramento concebido foi composto por três medidores de QEE, sendo um instalado no sistema da concessionária e dois instalados na unidade industrial. A Figura 7.2 apresenta a identificação dos medidores M1, M2 e M3 no diagrama unifilar.

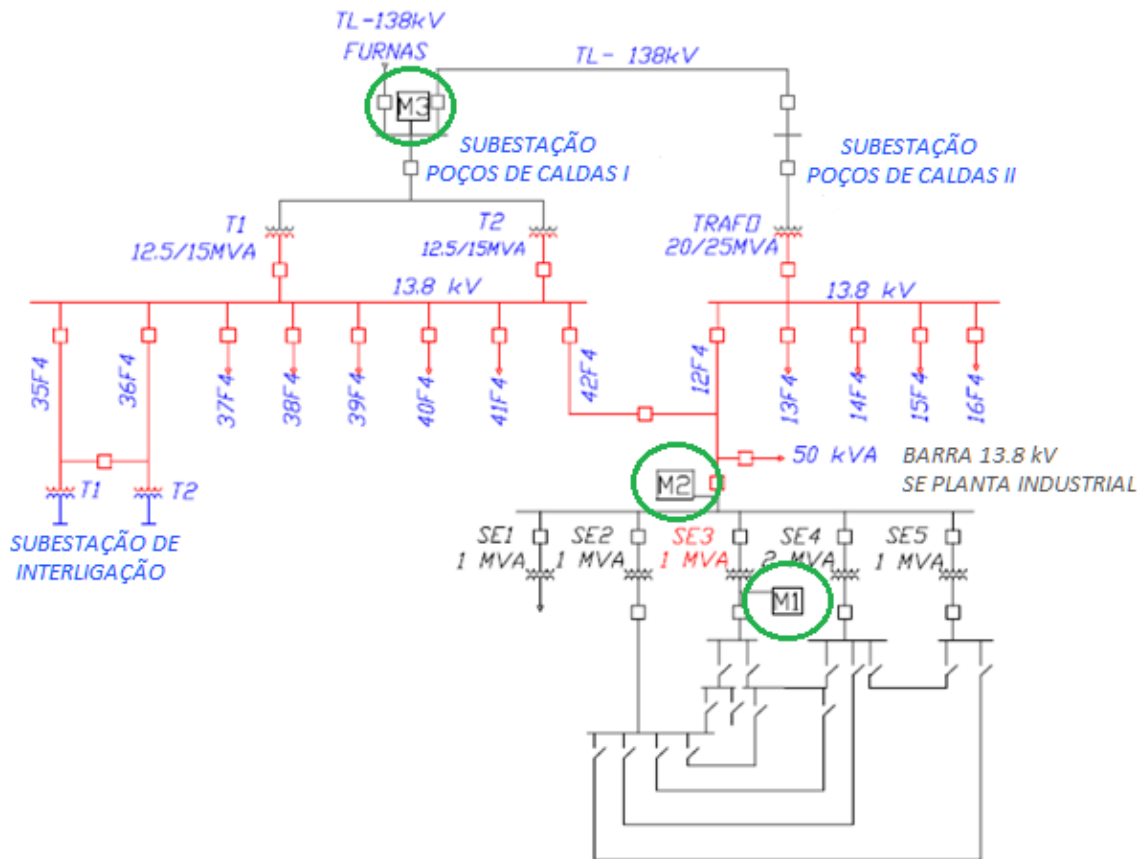


Figura 7.2 – Localização dos medidores no sistema de distribuição

Os pontos de medição foram escolhidos levando em consideração diferentes níveis da tensão de fornecimento. Devido à proximidade elétrica em relação ao processo a ser analisado, o primeiro ponto de monitoração (M1) corresponde ao secundário do transformador do alimentador SE3 da indústria em questão. A tensão da rede neste ponto é 440 V, assim a medição foi realizada na barra do secundário do transformador sem a utilização de TPs. O segundo ponto de monitoração (M2) corresponde a cabine de entrada em 13,8 kV, onde as tensões foram obtidas a partir dos TPs de medição do DMED. O terceiro ponto de monitoração (M3) corresponde a barra de 138 kV da SE Poços I de propriedade do DMED.

A Figura 7.3 apresenta o diagrama unifilar de parte do sistema do consumidor, explicitando os processos escolhidos para serem monitorados.

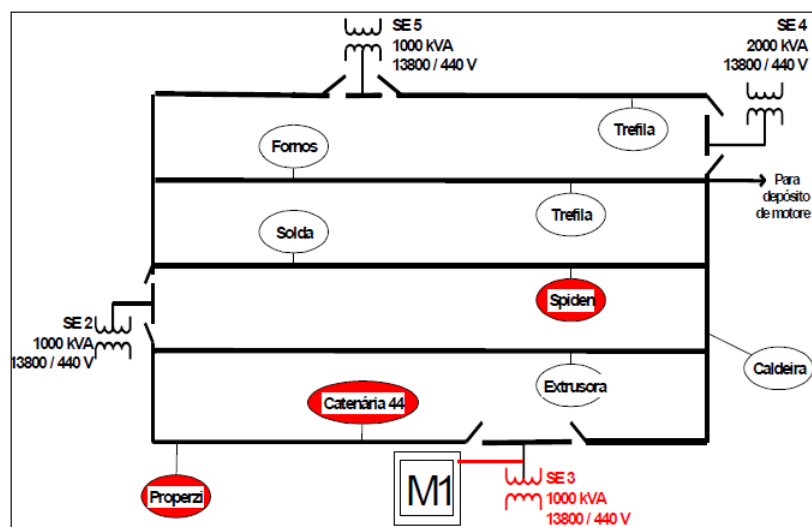


Figura 7.3 – Diagrama do processo produtivo (LEBORGNE, 2003)

O medidor escolhido foi o ION 7600 da Power Measurements Ltd. devido a sua confiabilidade e mobilidade.

Basicamente, o ION 7600 é um medidor trifásico composto de quatro entradas de tensão e cinco entradas de corrente que, além das entradas analógicas, possui oito entradas digitais. As leituras e registros que podem ser disponibilizados em tempo real e gravados em intervalos de tempo definidos incluem: valores RMS de tensões e correntes, família de grandezas de potência, frequência, energia, demanda, harmônicos e componentes simétricas. O equipamento detecta e registra a ocorrência de eventos em valores RMS calculados e também as formas de onda a cada meio ciclo. A memória do ION 7600 pode ser gerenciada para cada tipo de registro, de modo a alocar recursos de acordo com as necessidades e periodicidade da leitura dos dados, assegurando que dados importantes não sejam perdidos por sobreposição de registros ou esgotamento de memória.

Por fim, destaca-se que os medidores de QEE foram parametrizados conforme o procedimento adequado para medições de AMTs, ou seja, registrando tensões fase-neutro e os TPs com conexão estrela aterrada no primário e no secundário.

### 7.2.4. Determinação da sensibilidade do processo

Conforme já citado, para determinar a sensibilidade do processo faz-se necessário monitorar a ocorrência de AMTs no ponto de medição M1, por estar junto à carga, avaliar o impacto dos AMTs, realizar tratamento dos registros, caracterizar os distúrbios, testar a aderência dos diferentes métodos de caracterização e por fim representar a sensibilidade.

A etapa de monitoramento da ocorrência de AMTs no sistema foi realizada entre os meses de abril de 2002 e março de 2003, totalizando doze meses, e as ocorrências que geraram parada de produção estão apresentadas na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Registros de parada de produção (LEBORGNE, 2003)

Registro de Parada de Produção				
Data	Horário		Local	
	Início	Final	Processo	Motivo da Falha
29/07/02	14:00	?	Catenária 44	Afundamento de tensão
29/10/02	8:45	9:45	Properzi	Afundamento de tensão
29/10/02	8:45	9:20	Spiden	Afundamento de tensão
29/10/02	8:45	14:00	Catenária 44	Afundamento de tensão
29/10/02	23:30	05:00	Catenária 44	Afundamento de tensão
29/10/02	23:30	24:30	Properzi	Afundamento de tensão
06/02/03	17:00	?	Catenária 44	Afundamento de tensão
06/02/03	17:00	?	Properzi	Afundamento de tensão
06/02/03	17:00	?	Spiden	Afundamento de tensão
22/02/03	12:14	12:34	Catenária 44	Afundamento de tensão
22/02/03	12:14	12:34	Properzi	Afundamento de tensão
22/02/03	12:14	12:34	Spiden	Afundamento de tensão

Para avaliar o impacto dos AMTs cada ocorrência registrada teve a sua análise segregada em dois momentos distintos, sendo o primeiro o instante que antecedeu o evento e o segundo o instante que sucedeu o evento, pois para caracterizar a sensibilidade de um processo é importante saber se o mesmo estava operante ou não no instante que antecedeu o evento. Por razões óbvias, isso se deve ao fato de não ser possível levar em conta, para caracterização da sensibilidade do processo, aqueles eventos registrados no momento em que o processo estava inoperante.

Assim, para cada evento, existem três classificações possíveis: severo, não severo e sem classificação. Evento severo é aquele que produz parada do processo analisado, evento não severo é aquele que não sensibiliza o processo, e sem

classificação significa que o evento não pode ser classificado, pois o processo estava parado no período pré-evento. Infelizmente, não foi possível caracterizar o instante que antecedeu o evento para todos os distúrbios registrados, pois alguns registros não foram corretamente identificados pela equipe de produção da indústria.

Os dados obtidos do sistema de monitoração contemplam a menor tensão remanescente e duração dos AMTs de cada fase e a oscilografia da forma de onda da tensão com duração de 54 ciclos (900ms) contendo 32 pontos por ciclo.

Este tratamento foi realizado da seguinte forma:

- Cálculo das tensões de linha a partir dos registros da forma de onda da tensão fase-neutro, dado que o equipamento do processo está ligado entre fases;
- Cálculo das características do AMT de acordo com as metodologias: Intensidade e duração, Tipo do Afundamento e Parâmetro único; e
- Gráfico da evolução do valor RMS do afundamento de tensão.

Quando se caracteriza um evento através da intensidade e duração se faz necessário realizar os procedimentos de agregação de fase e agregação temporal. Lembrando que no procedimento de agregação de fases a intensidade e a duração do AMT são definidas pelas características da fase que apresentar menor tensão remanescente. Já a agregação temporal, adota-se uma janela de agregação de 1 minuto. Assim, o evento agregado é representado pelo afundamento de menor intensidade, registrado neste intervalo.

No trabalho realizado em (LEBORGNE, 2003) foram analisadas algumas metodologias a um parâmetro, e constatou-se que as metodologias que davam ênfase a intensidade em relação a duração são mais aderentes para representação da sensibilidade do processo em questão. Assim, apresenta-se na Figura 7.4 a sensibilidade do processo levando em consideração a intensidade do AMT, do qual se pode concluir que o processo é imune a qualquer evento cuja a tensão remanescente seja superior a 0,71 p.u. e sensível a qualquer evento cuja tensão remanescente seja inferior a 0,69 p.u..

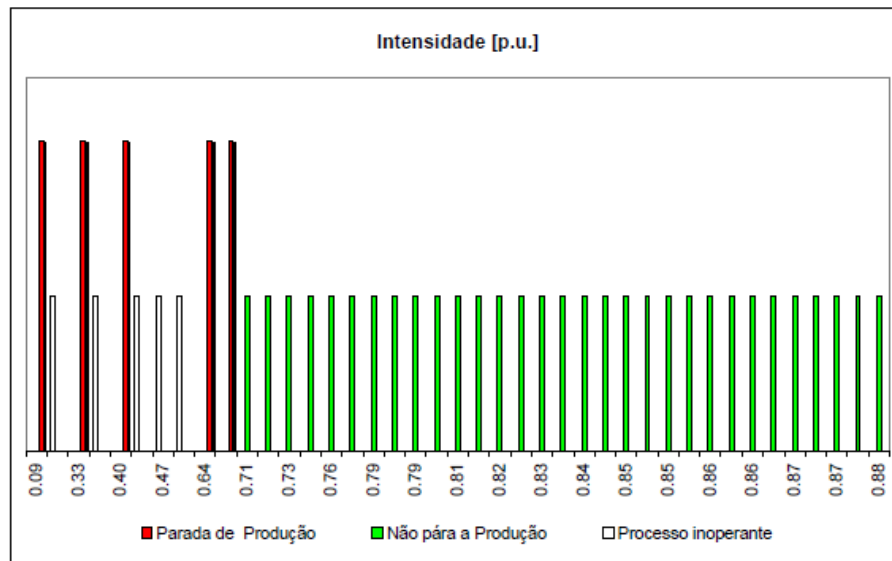


Figura 7.4 – Sensibilidade do processo Catenária 44 – Caracterizada pela intensidade do AMT (LEBORGNE, 2003)

No entanto, para que seja possível dimensionar soluções para mitigar e/ou minimizar os efeitos nocivos dos AMTs, deve-se caracterizar os eventos levando em consideração a duração dos mesmos. Infelizmente, o pequeno número de registros obtidos durante o período de medição não permitiu uma análise mais completa da sensibilidade do processo quanto ao tipo do AMT.

Assim, na Figura 7.5 apresenta-se a caracterização da sensibilidade através do gráfico *intensidade versus duração*.

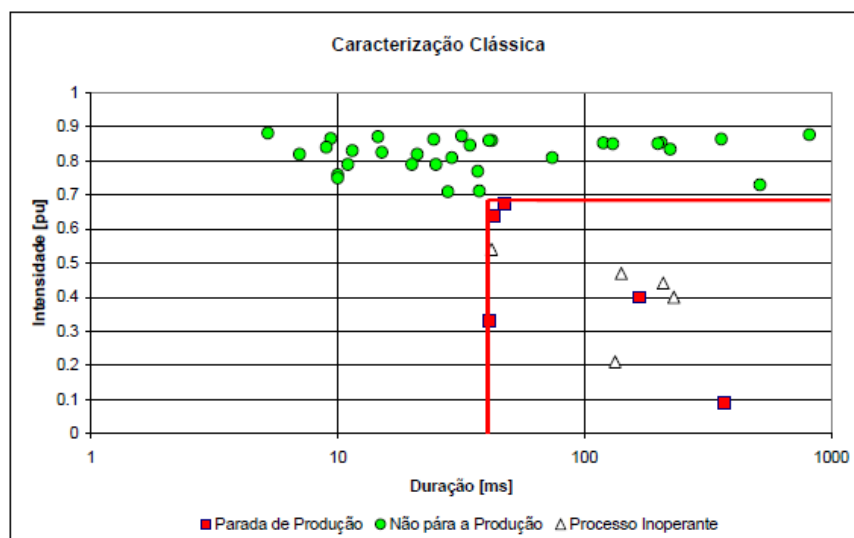


Figura 7.5 – Sensibilidade do processo Catenária 44 – Caracterizada pelo Método Clássico Intensidade x Duração (LEBORGNE, 2003)

No gráfico da Figura 7.5 foram representados na cor vermelha os eventos que provocaram parada do processo, na cor branca os eventos que não puderam ser classificados, na cor verde os eventos que não sensibilizaram o processo e a linha vermelha delimita as regiões de sensibilidade e de imunidade do processo.

Diante do exposto, conclui-se pelas medições realizadas, que o processo produtivo aqui denominado de Catenária 44 será sensibilizado e poderá ocorrer parada de produção quando a tensão apresentar magnitude inferior a 0,67 p.u. durante um período superior a 41 ms. As soluções a serem apresentadas no capítulo seguinte serão dimensionadas visando imunizar o processo pressupondo esta sensibilidade.

### **7.3. ESTUDO DE VIABILIDADE DE ALGUMAS POSSÍVEIS SOLUÇÕES**

#### **7.3.1. UPS estático**

Um sistema UPS estático opera como fonte de reserva de energia para as cargas críticas, nas quais o tempo de transferência tem que ser muito pequeno ou zero para minimizar, ou até mesmo eliminar, os efeitos dos afundamentos de tensão e breves interrupções do fornecimento de energia.

Como abordado em (TOSSI e MACEDO JR, 2011), o projeto de um sistema UPS envolve diferentes aspectos, tais como a análise das diferentes topologias, os critérios de dimensionamento, as proteções auxiliares para o sistema e os cuidados com o ambiente de instalação dos equipamentos.

De forma generalista, o sistema UPS pode ser representado pelos seguintes blocos: fonte principal, fonte alternativa, condicionador de energia e barramento seguro. A fonte principal consiste na alimentação pela concessionária, a fonte alternativa consiste na alimentação pelos sistemas de armazenamento de energia e/ou grupo de geradores auxiliares, o condicionador de energia refere-se ao UPS propriamente dito e o barramento seguro diz respeito ao painel de alimentação da carga crítica.

Para dar início ao dimensionamento do sistema UPS deve-se realizar uma reflexão sobre algumas questões básicas visando compreender as especificidades



da carga a ser imunizada. Dessa forma, as respostas a alguns questionamentos que levam a definição do diagrama unifilar do sistema, que por sua vez estabelece a configuração, a filosofia operacional e os níveis de segurança do sistema UPS.

Em resumo, a definição do diagrama unifilar do sistema deve ser orientada pelos requisitos da carga crítica e a filosofia de operação. No subcapítulo anterior foram abordados alguns aspectos sobre as necessidades da carga a ser alimentada, como destaque cita-se o fato de que a Catenária 44 é um processo contínuo de velocidade controlada, pois a espessura do isolante depende da pressão dos bicos injetores e da velocidade do cabo na extrusora. Dessa forma, a topologia de UPS recomendada para esta aplicação, que necessita de velocidade constante para garantir o tensionamento correto do cabo e não permitir que a carga seja sensibilizada pelo chaveamento entre a fonte principal e a fonte alternativa de energia, é a VFI, ou mais comumente conhecida como UPS de Conversão Dupla.

Para o dimensionamento do UPS propriamente dito deve-se levar em consideração a Equação 7.1.

$$S = \frac{P_c}{FP \times \eta \times FCM} \quad 7.1$$

Onde,

$S$  → Potência do UPS;

$P_c$  → Potência ativa solicitada pela carga;

$FP$  → Fator de potência da saída do UPS;

$\eta$  → Rendimento do inversor do UPS; e

$FCM$  → Carregamento máximo admitido para o operação do UPS.

A potência ativa da carga refere-se à máxima demanda prevista para alimentação da carga adicionada à previsão de expansão. Assim, determinou-se a potência ativa solicitada pelo processo adotando um rendimento típico de 88% para o motor CA e 90% para os motores CC. Vale ressaltar que a expansão da carga não precisa ser considerada caso seja utilizado um sistema UPS modular.

A definição da potência de saída do UPS está atrelada a potência do inversor, por isso o rendimento ( $\eta$ ) e o fator de potência ( $FP$ ), aqui considerados foram

95% e 0,90, respectivamente, para os conversores do tipo CSI e 95% e 0,70 respectivamente para o conversor do tipo VSI.

Finalmente, o fator de carregamento máximo (FCM) define qual o percentual de carregamento é admissível ao UPS para que o mesmo consiga alimentar 100% da carga. Assim para um carregamento máximo de 90%, o FCM deve ser 0,90.

Apresenta-se no Anexo 1 a tabela utilizada para o dimensionamento da potência necessária para o sistema UPS.

Esgotada a reflexão sobre as questões básicas para compreender as especificidades da carga a ser alimentada, foram conceituados os diferentes aspectos relacionados ao projeto de um sistema UPS, sobretudo a filosofia do diagrama unifilar do sistema e os critérios de dimensionamento. Apresenta-se na Tabela 7.4 um resumo dos projetos contendo a especificação do sistema UPS, bem como outras particularidades. Para composição do custo desta solução, utilizou-se o valor estimado e fornecido pelo fabricante Leistung. Ressalta-se que este valor se assemelha ao custo médio de 400 €/KVA apresentado no trabalho de (DIDDEN, BELMANS e D'HAESELEER, 2003).

Tabela 7.4 – Resumo da Especificação do Sistema UPS

<b>Projeto</b>	<b>Característica</b>	<b>Valor/Descrição</b>
P1	Sistema	UPS Dupla Conversão (VFI)
	Potência Total	500 kVA
	Fator de Potência de Deslocamento	0,9999
	Abrangência	Todo o processo
	Autonomia	3 minutos
	Fator de Carregamento Máximo	90%
	Custo Aproximado	R\$ 381.000,00
P2	Sistema	UPS Dupla Conversão (VFI)
	Potência Total	500 kVA
	Fator de Potência de Deslocamento	0,9999
	Abrangência	Todo o processo
	Autonomia	10 minutos
	Fator de Carregamento Máximo	90%
	Custo Aproximado	R\$ 459.000,00

\* Cotação dia 28/06/2012: € 1,00 = R\$ 2,59

### 7.3.2. DVR

Dentre as topologias para solução do tipo DVR que foram abordadas no subcapítulo 4.4, destaca-se o suprimento através da própria rede por ser uma topologia simplificada, de baixo custo e grande capacidade de compensação. Esta topologia baseia-se em uma estratégia de controle na qual o DVR é capaz de fornecer a mínima potência ativa e que durante o AMT a rede ainda dispõe de tensão remanescente.

Dessa forma, deseja-se dimensionar um DVR capaz de proteger todo o processo Catenária 44 que representa 350 kVA e fator de potência 0,90, cuja menor tensão capaz de manter a carga em operação é 0,67 p.u. por um período superior a 41 ms.

Apresenta-se no Anexo 2 a tabela utilizada para o dimensionamento da potência da carga que o sistema DVR irá alimentar.

De acordo com (SILVA, 1999) pode-se fazer uso de três filosofias de projeto de um restaurador dinâmico de tensão, sendo elas a minimização da potência ativa, a minimização da potência aparente e a compensação total.

**Compensação total da carga:** O restaurador dinâmico de tensão injeta P e Q de tal forma que haja o retorno do módulo 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 DVR conforme Equação 7.2.

$$\text{REAL} \sum_{I=a,b,c} V_{\text{DVR}(i)} \times I_{Li} \rightarrow 0 \quad 7.2$$

A Figura 7.6 apresenta o diagrama unifilar de um sistema de alimentação com um DVR.

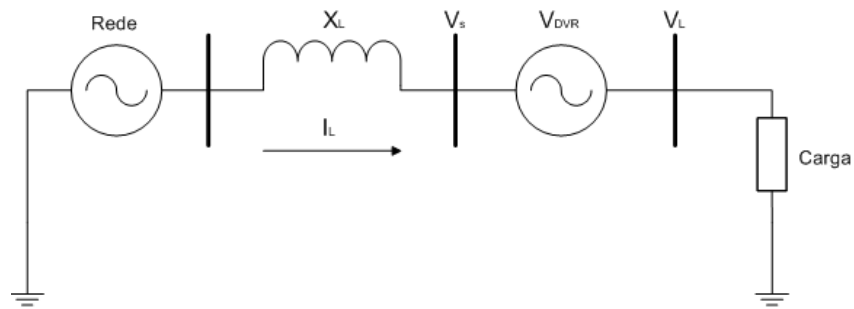


Figura 7.6 – Circuito unifilar apresentando o sistema de alimentação com um DVR.

Do circuito apresentado, obtém-se o diagrama fasorial do sistema apresentado na Figura 7.7.

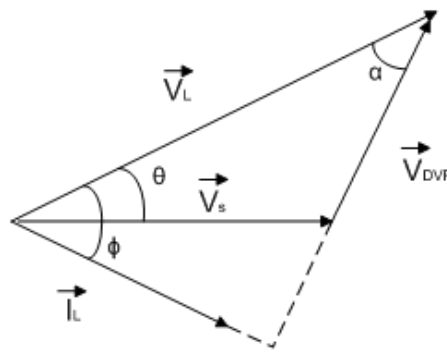


Figura 7.7 – Diagrama fasorial do sistema.

Do diagrama, obtém-se a Equação 7.3.

$$\vec{V}_L = \vec{V}_S + \vec{V}_{DVR} \tag{7.3}$$

Onde,

$V_L$  → Tensão nos terminais da carga;

$V_S$  → Tensão remanescente durante o AMT;

$V_{DVR}$  → Tensão injetada pelo DVR.

Pressupondo a potência ativa nula, a tensão  $V_{DVR}$  e a corrente  $I_{DVR}$  devem estar defasadas em  $90^\circ$ .

$$\alpha = 90^\circ - \phi \tag{7.4}$$

Onde,

$\phi$  → Fator de potência da carga

Decompondo a Equação 7.3 em suas componentes ortogonais, tem as Equações 7.5 e 7.6.

$$\begin{cases} V_S \times \cos \theta + V_{DVR} \times \cos(90^\circ - \phi) = V_L & 7.5 \\ V_S \times \sin \theta + V_{DVR} \times \sin(90^\circ - \phi) = 0 & 7.6 \end{cases}$$

Resolvendo as equações apresentadas anteriormente, tem-se as Equações 7.7 e 7.8 que permitem o cálculo do módulo e ângulo do vetor tensão a ser injetado pelo DVR para correção da tensão da rede segundo a filosofia da injeção nula de potência ativa.

$$V_{DVR} = \frac{V_s \times \sin \theta}{\cos \phi} \quad 7.7$$

$$\cos(\theta + \phi) = \frac{V_l \times \sin \theta}{V_s} \quad 7.8$$

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 7.8.

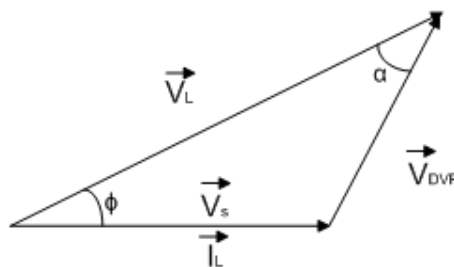


Figura 7.8 – Diagrama fasorial minimização da potência ativa injetada pelo DVR.

**Minimização da potência aparente injetada:** Esta filosofia é obtida quando a tensão injetada pelo DVR está em fase com a tensão da rede, como pode ser vista na Figura 7.9.

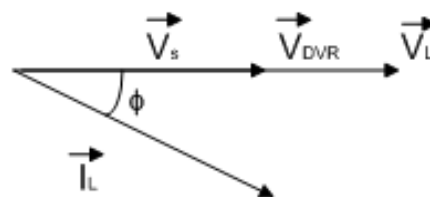


Figura 7.9 - Diagrama vetorial onde é minimizada a potência reativa injetada pelo DVR.

As cargas podem ser modeladas de três formas distintas: impedância constante, potência constante ou corrente constante.

Para o cálculo da potência nominal do DVR necessário para a compensação do processo em estudo utilizou-se o algoritmo apresentado por (FONSECA, 2003). Lembrando que a potência nominal é definida pela corrente da carga, multiplicada pelo máximo desvio relativo da tensão necessária para a condição normal de funcionamento da carga (BURG e ALLMELING, 1998).

Apresenta-se no Anexo 3 o código fonte adaptado de (FONSECA, 2003) e que foi utilizado para as simulações que definiram a potência necessária para o sistema DVR.

Foram consideradas as seguintes premissas para a realização dos cálculos apresentados na Tabela 7.5:

- Dado que a menor tensão remanescente para operação do processo é de 0,67 p.u., foram realizadas simulações para compensar AMTs de 0,5 p.u. e 0,40 p.u., projeto 3 e 4 respectivamente;
- Por conta da predominância de motores no processo Catenária 44 a carga foi modelada para um comportamento do tipo potência constante (Tipo da Carga - 2);
- Foram utilizadas as três filosofias de projeto: minimização da potência ativa (Critério de Projeto - 1), minimização da potência aparente (Critério de Projeto - 2) e a compensação total (Critério de Projeto - 3);
- Para compensação total (Critério de Projeto - 3), considerou-se como 10 graus a defasagem angular entre as tensões anteriores ao AMT e as tensões com a compensação;
- O valor de potência aparente obtido refere-se ao valor de uma fase, por isso calculou-se a potência trifásica já considerando a potência do filtro de saída do conversor da ordem de 20% da potência nominal obtida, conforme observado em (SILVA, 1999); e

- Por fim, da análise do resultado final das simulações das três filosofias de projeto obtêm-se a potência máxima requerida para o DVR para cada intensidade de afundamento de tensão.

Tabela 7.5 – Resultados das simulações para determinar a potência nominal do DVR

Simulação	Afundamento de Tensão (p.u.)	Tipo de Carga	Critério de Projeto	P (kW)	Q (kVAr)	S (f) (kVA)	S'(3f) (kVA)	S (3f) (kVA)	S (3f) Projeto (kVA)
1	0,50	2	1	17,94	50,85	53,92	161,77	194	200
2		2	2	26,64	12,90	29,60	88,81		
3		2	3	34,41	-0,13	34,41	103,23		
1	0,40	2	1	35,35	50,85	61,93	185,80	223	230
2		2	2	42,31	20,49	47,01	141,04		
3		2	3	48,54	10,07	49,57	148,71		

A partir dos resultados apresentados para os dois projetos considerados, pode-se avaliar o percentual de eventos mitigados em cada solução conforme resultados apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Estudo de Imunização para os diferentes projetos de DVR

Projeto	Afundamento de Tensão (p.u.)	S (3f) Projeto (kVA)	Número de Eventos Protegidos	Percentual de Eventos Protegidos
P3	0,50	200	3	30%
P4	0,40	230	7	70%

De acordo com (SILVA, 1999) e (FONSECA, 2003) para o projeto P3 pode-se considerar a interface com a rede considerando uma ponte retificadora associada a um transformador com relação de transformação 1:1 tendo em vista sua limitação técnica para uma tensão remanescente de 0,5 p.u. e para o projeto P4 devido à intensidade do AMT considerado, deve-se utilizar um conversor CA/CC controlado.

Como apresentado em (DIDDEN, BELMANS e D'HAESELEER, 2003), o custo médio para instalação de um DVR é aproximadamente 300 €/kVA, dessa forma apresenta-se na Tabela 7.7 o custo para cada um dos projetos descritos neste capítulo.

Tabela 7.7 – Custo de instalação dos projetos

Projeto	Afundamento de Tensão (p.u.)	S (3f) Projeto (kVA)	Custo de Instalação (R\$)
P3	0,50	200	155.640,00
P4	0,40	230	178.986,00

\* Cotação dia 28/06/2012: € 1,00 = R\$ 2,59

### 7.3.3. Solução combinada

A aplicação de uma solução combinada visa dividir as cargas de características semelhantes para que sejam atendidas em conjunto por uma solução capaz de satisfazer suas particularidades.

Para este caso, a solução combinada que será avaliada envolve a utilização de um sistema UPS para atender a carga proveniente dos motores de corrente contínua e um Ride Through System (RTS) para atender ao motor de corrente alternada.

Utilizando as mesmas premissas apresentadas no subcapítulo 7.3.1, na qual foi dimensionado um sistema UPS para atender toda a carga do processo Catenária 44, dimensionou-se um Sistema UPS capaz de suportar apenas a carga dos motores de corrente contínua, cuja especificação básica encontra-se na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Resumo da Especificação do Sistema UPS

Projeto	Característica	Valor/Descrição
P5	Sistema	UPS Dupla Conversão (VFI)
	Potência Total	150 kVA
	Fator de Potência de Deslocamento	0,9999
	Abrangência	Motores de CC
	Autonomia	3 minutos
	Fator de Carregamento Máximo	90%
	Custo Aproximado	R\$ 128.900,00
P6	Sistema	UPS Dupla Conversão (VFI)
	Potência Total	150 kVA
	Fator de Potência de Deslocamento	0,9999
	Abrangência	Motores de CC
	Autonomia	10 minutos
	Fator de Carregamento Máximo	90%
	Custo Aproximado	R\$ 148.700,00

\* Cotação dia 28/06/2012: € 1,00 = R\$ 2,59



A solução Ride Through System - RTS a ser utilizada corresponde a adição de capacitores ao elo CC do Acionamento de Velocidade Variável (Adjustable Speed Drive - ASD) dado a sua simplicidade de aplicação. Lembrando que a capacitância dimensionada pelo fabricante do ASD tem apenas a função de filtrar a tensão retificada e a adição de mais unidades capacitivas aumenta a quantidade de energia armazenada para suprir o acionamento durante o AMT, sendo este método adequado para mitigar distúrbios de pequena duração e que não sejam tão severos.

Para dimensionar os capacitores é necessário estabelecer o menor valor de tensão que o elo CC deve ser capaz de suportar e por quanto tempo. Da análise da sensibilidade do processo realizada no subcapítulo 7.2.4 se conclui que a menor tensão remanescente capaz de não sensibilizar as proteções é de 0,67 p.u. por um tempo superior a 41 ms. Com base nos resultados de medição sintetizados na Figura 7.5, observa-se que dentre os eventos, o de maior duração e severo o suficiente para desligar o processo corresponde a uma duração de 369 ms. Portanto, para imunizar o processo em 100%, as células capacitivas dimensionadas devem suportar uma tensão remanescente mínima de 0,67 p.u. por um período de 0,5 segundos, adotando uma margem de segurança de 131 ms na duração.

A Tabela 7.9 apresenta os dados do ASD utilizado para dimensionar a solução.

Tabela 7.9 – Exemplo de aplicação

Equipamento	$V_{ca}$	$V_{cc}$	$P_0$	C	$V_{cc,trip}$	$t_r$
ASD	440 V	$1,35 \times V_{ca}$	204 kW	5000 $\mu$ F	$0,67 \times V_{cc}$	0,5 s

Primeiramente, deve-se calcular a corrente solicitada pelo elo CC conforme Equação 7.9.

$$I_{cc} = \frac{P_0}{V_{cc}} = 343,43 \text{ A} \quad 7.9$$

Em seguida, calcula-se o valor da capacitância que deve ser adicionada, conforme Equação 7.10.

$$C = I \times \frac{dt}{dV} = \frac{I_{cc} \times t_r}{V_{cc} - V_{cc-trip}} = 876 \text{ mF} \quad 7.10$$

Comercialmente, o valor de capacitância mais próximo é da ordem de 910 mF. Neste caso, o tempo de descarga seria de 0,52 segundos.

Vale ressaltar que para estimar o custo desta solução deve-se levar em conta os encapsulamentos, fusíveis, circuitos de pré-carga e os barramentos adicionais, por isso adotou-se o valor sugerido em (JOUANNE, ENJETI e BANERJEE, 1999) de 600 U\$/kW. Dessa forma, o custo para instalação do banco de capacitores adicionais ao elo CC é de aproximadamente R\$ 254.347,20 (Cotação dia 28/06/2012: U\$ 1,00 = R\$ 2,08).

Finalmente, o custo total desta solução é definido pela soma do custo do Sistema UPS e do banco de capacitores a ser adicionado ao elo CC, conforme resultados apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Custo da solução combinada

Projeto	Descrição	Custo (R\$)
P5	Solução Combinada (UPS 3 min + Adição de capacitores ao elo CC)	383.247,20
P6	Solução Combinada (UPS 10 min + Adição de capacitores ao elo CC)	403.047,20

#### 7.3.4. Análise comparativa

Neste subcapítulo será realizada uma análise comparativa entre os projetos anteriormente discutidos de forma a considerar o percentual de imunização, o custo de parada do processo, o custo aproximado das soluções, avaliação da viabilidade econômica, bem como a viabilidade técnica enfatizando as principais vantagens e desvantagens de cada solução apresentada.

Os projetos apresentados no subcapítulo 7.3.1 a 7.3.3 estão listados na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Lista dos projetos a serem comparados e analisados

Projeto	Descrição	Eventos Protegidos	Custo Aproximado
P1	UPS 500kVA - 3 min	100%	R\$ 381.000,00
P2	UPS 500kVA - 10 min	100%	R\$ 459.000,00
P3	DVR (Menor tensão remanescente 0,50 p.u.)	30%	R\$ 155.640,00
P4	DVR (Menor tensão remanescente 0,40 p.u.)	70%	R\$ 178.986,00
P5	Solução Combinada (UPS 150kVA - 3 min + Adição de capacitores ao elo CC)	100%	R\$ 383.247,20
P6	Solução Combinada (UPS 150kVA - 10 min + Adição de capacitores ao elo CC)	100%	R\$ 403.047,20

A partir do custo estimado para implementação de cada uma das soluções propostas e também do custo médio associado a parada do processo de produção, pode-se fazer uma análise econômica quanto ao benefício financeiro advindo de cada uma das soluções avaliadas.

Para definir a viabilidade econômica das soluções apresentadas serão utilizados dois métodos de análise, sendo eles: Custo Social da Energia Não Suprida - CSENS e Valor Presente Líquido - VPL.

A primeira metodologia foi proposta por (FONSECA, 2003) e leva em consideração o Custo Social da Energia Não Suprida – CSENS, que corresponde ao custo percebido pela indústria dado um AMT capaz de sensibilizar e parar o processo produtivo. O CSENS pode ser calculado de acordo com a Equação 7.11.

$$CSENS = N_{\%} \times N_T \times E_{med} \times t \times C_{amt} \quad 7.11$$

Onde,

$N_{\%}$  → Percentual de eventos protegidos;

$N_T$  → Número total de paradas de processo;

$E_{med}$  → Consumo médio;

$t$  → Tempo de interrupção; e

$C_{amt}$  → Custo associado a cada parada de produção.

O número total de eventos protegidos reflete o benefício percentual de cada alternativa mitigadora podendo ser contabilizados para cada ano, em termos de redução do número médio esperado de ocorrências de AMTs por ano em relação

---

ao caso base. Neste caso, será contabilizado um horizonte de 15 anos para o estudo, uma vez que tanto a duração de uma linha de produção de uma indústria quanto a vida útil dos equipamentos é correspondente a este tempo.

O número total de eventos refere-se aos eventos capazes de sensibilizar e parar o processo. Vale ressaltar que para esta análise foram considerados apenas os eventos que podem vir a causar interrupções de processo.

Assumindo que o processo da indústria em análise é complexo para ser reinicializado, pode-se estimar para cada AMT uma interrupção média de uma hora.

Existem algumas dificuldades que envolvem a obtenção dos custos devidos a um AMT. Cita-se, por exemplo, a dificuldade de realizar pesquisas juntos aos consumidores e a falta de ferramentas matemáticas para que as indústrias consigam dimensionar com confiabilidade os custos associados a parada de seus processos, principalmente, os custos indiretos como a redução da vida útil aos equipamentos.

Conforme já citado, o processo a ser imunizado trata-se de um processo de extrusão de cabo de média tensão, contínuo e basicamente movido por motores controlados por equipamentos eletrônicos sensíveis a variações de tensão. Para definir o custo associado ao AMT, utilizou-se os dados da pesquisa realizada no ano de 2002 nos Estados Unidos (MCNULTY e HOWE, 2002), na qual se estimou o custo por hora sem energia para vários setores da economia. A utilização dos dados de outras pesquisas exige alguns cuidados, por exemplo, a correção dos valores para o ano do estudo por meio do Índice de Preços ao Consumidor – IPC, como citado (WATANABE, OLIVEIRA, *et al.*, 2008), de forma a corrigir a inflação. Dessa forma, o valor utilizado para definir o custo de uma parada de processo por uma hora para o setor industrial será de R\$ 40.000,00 reais.

Vale ressaltar que o valor estimado para o custo de parada de produção está dentro da faixa apresentada em (CANGUÇU, 2006), na qual se observa que os valores de perdas giram na ordem de R\$ 15.000,00 a R\$ 1.00.000,00 por parada nos processos em *Indústrias Especiais*. Dessa forma, a adoção deste valor permite um ponto de partida para o estudo de viabilidade econômica a ser realizado. Quando da ocorrência de eventos que venham resultar em paradas superiores a

uma hora, conclui-se que os prejuízos tendem a aumentar e, por consequência, elevar os benefícios advindos da imunização do processo.

A Tabela 7.12 apresenta o CSENS, o custo de implementação e por fim determina-se o custo benefício de cada projeto considerado.

Tabela 7.12 – Valor calculado da VPL para os projetos analisados

Projeto	Descrição	CSENS (R\$)	Custo (R\$)	Custo/Benefício
P1	UPS 500kVA - 3 min	2.400.000,00	381.000,00	0,16
P2	UPS 500kVA - 10 min	2.400.000,00	459.000,00	0,19
P3	DVR (Menor tensão remanescente 0,50 p.u.)	720.000,00	155.640,00	0,22
P4	DVR (Menor tensão remanescente 0,40 p.u.)	1.680.000,00	178.986,00	0,11
P5	Solução Combinada (UPS 150kVA - 3 min + Adição de capacitores ao elo CC)	2.400.000,00	383.247,20	0,16
P6	Solução Combinada (UPS 150kVA - 10 min + Adição de capacitores ao elo CC)	2.400.000,00	403.047,20	0,17

A segunda metodologia, proposta por (DIDDEN, BELMANS e D'HAESELEER, 2003), utiliza o método do Valor Presente Líquido - VPL, ou seja, o investimento em uma solução para mitigar as paradas de processo pode ser justificado se o fluxo de caixa, com o VPL total descontado, for positivo.

O Valor Presente Líquido - VPL, também é conhecido como Valor Atual Líquido - VAL ou método do Valor Atual – VA é a fórmula matemático-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Basicamente, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos somados a um custo inicial estariam valendo atualmente.

Para a utilização deste método deve-se considerar o investimento inicial, o custo de manutenção, o custo associado a cada parada de produção, taxa de desconto e o período em anos estimado para o estudo conforme equação 7.12.

$$VPL = (f \cdot C_{sag} - C_{mnt}) \times \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \times i} - C_{inv} \quad 7.12$$

Onde,

$C_{inv}$  → Investimento inicial;

$f$  → Número de paradas de processo por ano;

$C_{sag}$  → Custo associado a cada parada de produção;

$C_{mnt}$  → Custo de manutenção do condicionador por ano;

$i$  → Taxa de desconto; e

$n$  → Tempo projetado em anos.

O valor utilizado para definir o custo de uma parada de processo por uma hora para o setor industrial será de R\$ 40.000,00 reais. Como apresentado em (DIDDEN, BELMANS e D'HAESELEER, 2003), o custo de manutenção para as soluções analisadas encontram-se na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Custo de Investimento e manutenção

Descrição	Custo Manutenção (%)
UPS	10
DVR	5
Capacitor	5

\* Cotação dia 28/06/2012: US\$ 1,00 = R\$ 2,08 // € 1,00 = R\$ 2,59

O tempo estimado para o estudo será de 15 anos, uma vez que tanto a duração de uma linha de produção de uma indústria quanto a vida útil dos equipamentos é correspondente a este tempo. A taxa de desconto a ser utilizada será de 7%, devido ao custo de oportunidade em alocar o recurso na aquisição destas soluções e por não ser preciso estimar os benefícios decorrentes da melhoria da continuidade do processo.

Dessa forma, apresenta-se na Tabela 7.14 o valor calculado da VPL para os projetos analisados.

Tabela 7.14 – Valor calculado da VPL para os projetos analisados

Projeto	Descrição	$f$	$C_{inv}$ (R\$)	$C_{sag}$ (R\$)	$C_{mnt}$ (R\$)	$i$ (%)	$N$ (anos)	VPL (R\$)
P1	UPS 500kVA - 3 min	10	381.000,00	40.000,00	38.100,00	7	15	318.887,84
P2	UPS 500kVA - 10 min	10	459.000,00	40.000,00	45.900,00	7	15	-2.632.335,93
P3	DVR (Menor tensão remanescente 0,50 p.u.)	3	155.640,00	40.000,00	7.782,00	7	15	-1.468.482,24

Projeto	Descrição	f	Cinv (R\$)	Csag (R\$)	Cmnt (R\$)	I (%)	N (anos)	VPL (R\$)
P4	DVR (Menor tensão remanescente 0,40 p.u.)	7	178.986,00	40.000,00	8.949,30	7	15	3.541.986,12
P5	Solução Combinada (UPS 150kVA - 3 min + Adição de capacitores ao elo CC)	10	383.247,20	40.000,00	25.607,36	7	15	233.862,33
P6	Solução Combinada (UPS 150kVA - 10 min + Adição de capacitores ao elo CC)	10	403.047,20	40.000,00	27.587,36	7	15	-515.294,48

A Figura 7.10 apresenta o gráfico de *intensidade x tempo* contendo a nova curva de sensibilidade para cada um dos projetos contemplados.

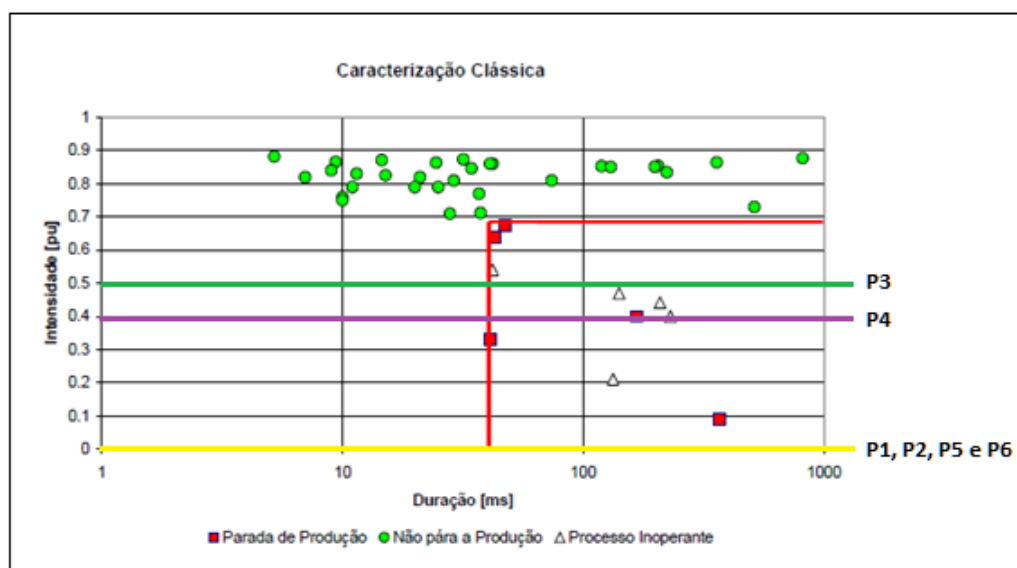


Figura 7.10 – Nova curva de sensibilidade para cada um dos projetos contemplados

A Tabela 7.15 apresenta as alternativas mais atrativas, ou seja, aquelas que possuem o valor calculado de VPL positivo.

Tabela 7.15 – Lista dos projetos com VPL positiva

Projeto	Descrição	VPL (R\$)
P1	UPS 500kVA - 3 min	318.887,84
P4	DVR (Menor tensão remanescente 0,40 p.u.)	3.541.986,12
P5	Solução Combinada (UPS 150kVA - 3 min + Adição de capacitores ao elo CC)	233.862,33

Observa-se que os projetos listados acima são economicamente viáveis por conta do custo associado a parada de produção, por isso é de suma importância conhecer este valor para garantir a qualidade da análise de viabilidade.

Para as soluções apresentadas se destaca na sequência as principais vantagens e desvantagens, bem como a Figura 7.11, Figura 7.12 e Figura 7.13 apresentam o diagrama unifilar destas soluções:

- Projeto 1 e 2 – UPS: A utilização de um sistema UPS permitirá a imunização, por um período de 3 minutos (Projeto 1) e 10 minutos (Projeto 2), de 100% dos eventos possíveis de parar o processo produtivo. Vale ressaltar que este tempo está associado a autonomia do sistema de bateria. O sistema UPS de Conversão Dupla (VFI) garante que o tempo de transferência entre a fonte principal e a fonte reserva de energia seja igual a zero de forma a não ser percebida qualquer interrupção pela carga. Esta configuração permite filtrar praticamente todos os fenômenos da Qualidade da Energia provenientes da fonte supridora, garantindo assim um melhor funcionamento do sistema a jusante. Suas principais desvantagens são o custo elevado, complexidade do sistema, necessidade de manutenção do sistema de bateria, a necessidade de instalação de transformador no sistema de *by-pass* quando a tensão do sistema não é igual a tensão da carga, fato que refletiria em um custo adicional a solução;
- Projeto 3 e 4 – DVR: Os projetos analisados possuem capacidade de imunização diferentes entre si. No entanto, a diferença entre os projetos é basicamente a interface com o sistema de alimentação principal. A topologia utilizada no Projeto 3, retificador a ponte de diodos e transformador, garante um sistema mais simples, eficiente e de baixo custo, no entanto, sua aplicação está limitada a AMTs até 0,5 p.u.. Já a topologia utilizada no Projeto 4, retificador CA/CC controlado, permite a mitigação de AMTs com tensão remanescente inferiores a 0,5 p.u.. Entretanto, o sistema se torna mais complexo e caro. Destaca-se que a real diferença no custo das topologias não pode ser percebida neste trabalho, pois utilizou um preço médio por kVA disponível na literatura para a realização do estudo ora apresentado. A utilização do sistema DVR também permite a imunização de outros fenômenos



da Qualidade de Energia, como por exemplo, os harmônicos da rede quando utilizado o Projeto 4, também possui maior confiabilidade em relação ao sistema UPS por não depender de um sistema reserva de energia e sim apenas da tensão remanescente da rede. No entanto, caso o AMT prolongue-se por muito tempo pode ocorrer um colapso de tensão levando a parada do processo. Outra desvantagem deste sistema é a necessidade de espaço físico por conta do transformador série para o acoplamento; e

- Projeto 5 e 6 – Solução Combinada: Este projeto levou em consideração a combinação de duas diferentes soluções, a adição de capacitores ao elo CC do acionamento em corrente alternada e a instalação de um sistema UPS para alimentar os motores CC. Quanto a adição de capacitores, deve se ponderar que sua utilização será capaz de imunizar 100% do processo pelo tempo de descarga dos capacitores, neste caso 0,5 segundos. Este tempo foi definido de acordo com o afundamento mais severo detectado no processo de monitoração da instalação. Em resumo, a solução combinada apresenta como principal vantagem a possibilidade de reduzir o custo para imunizar 100% do processo. Entretanto, neste caso não foi possível reduzir este valor devido à elevada capacitância necessária para que seja possível armazenar energia suficiente para alimentar o motor CA em questão.

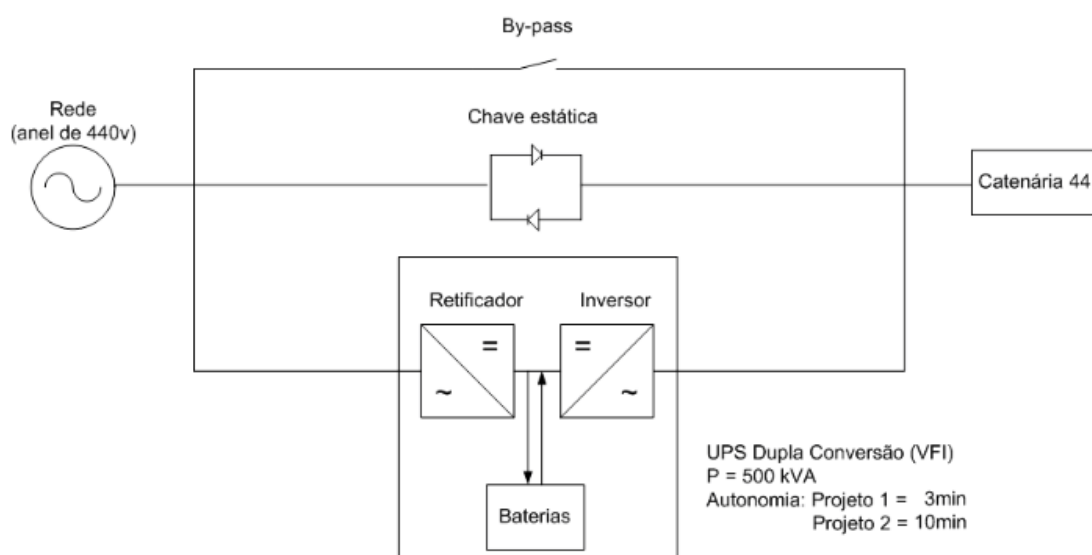


Figura 7.11 – Diagrama unifilar para os Projetos 1 e 2

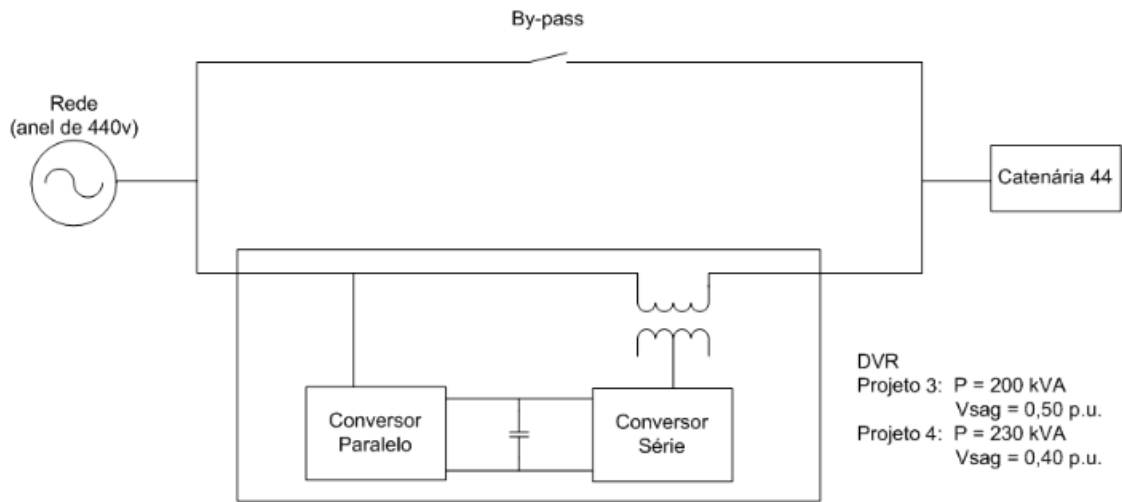


Figura 7.12 – Diagrama unifilar para os Projetos 3 e 4

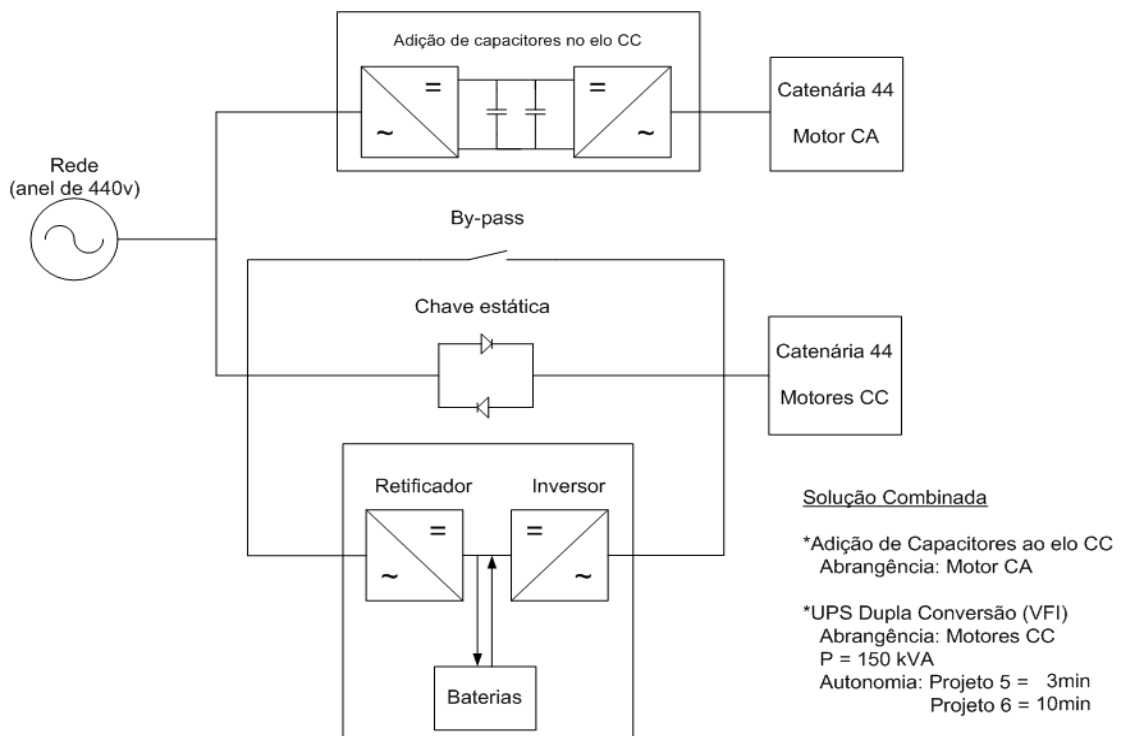


Figura 7.13 – Diagrama unifilar para os Projetos 5 e 6

Por fim, ressalta-se que os aspectos apresentados neste capítulo mostram a viabilidade técnica e 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, contemplando de forma mais cuidadosa a avaliação de suas instalações.

#### 7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo, foram apresentados os principais conceitos associados ao procedimento para determinação da sensibilidade dos equipamentos associados a um processo industrial, dos quais se destaca a complexidade inerente.

Entretanto, através da apresentação do estudo realizado por (LEBORGNE, 2003) obteve-se os dados suficientes a respeito da sensibilidade de um processo industrial responsável pela produção de cabos de média tensão para que fosse possível executar o exercício de propor soluções para reduzir a sensibilidade deste processo frente AMTs.

Dessa forma, apresentou-se algumas soluções tecnicamente capazes de mitigar AMTs e simultaneamente satisfazer as particularidades operativas da carga em questão, sendo elas: Sistema UPS estático para atender todo o processo com autonomia de 3 minutos e 10 minutos, Sistema DVR com menor tensão remanescente de 0,50 p.u. e 0,40 p.u. e, por fim, apresentou-se uma combinação de soluções entre um Sistema UPS para os motores CC com autonomia de 3 minutos e 10 minutos associados a um Ride Through System para o motor CA.

Após a análise técnica obteve-se custos reais e custos estimados com o intuito de realizar um estudo de viabilidade econômica destas soluções frente à quantidade de eventos que seriam capazes de mitigar. Buscou-se apresentar duas metodologias para a realização deste estudo de forma a fornecer mais subsídios para a escolha da solução mais adequada.

Na sequência, destacam-se algumas conclusões importantes sobre a referida análise:

- A escolha das soluções respeitou as condições operativas da carga e a disponibilidade de informações técnicas para realizar as análises, como por exemplo, custo de implementação, capacidade de mitigação de AMTs e maturidade da solução;
- A autonomia do UPS está intimamente ligada ao custo da solução, ou seja, quanto maior for o tempo estimado para suportar determinado evento maior será o custo associado;
- As soluções DVR dimensionadas não contemplam sistema de armazena-

mento auxiliar de energia, fato este que justifica sua relativa vantagem em relação às outras soluções analisadas;

- Ao dimensionar uma solução DVR com sistema de armazenamento de energia, o seu custo final tende a se equiparar ao custo da solução UPS;
- O uso de RTS para mitigar AMTs em motores CA de elevada potência não se mostrou adequado, pois além do custo ser bastante elevado, o tempo de descarga do capacitor pode não atender a necessidade da carga e não funcionar da maneira esperada para a mitigação de AMTs mais severos; e
- Outra forma de realizar a análise econômica pelo método do VPL é calcular para os cenários simulados a condição para a qual o custo da parada de processo provocada pelo AMT ( $C_{sag}$ ) leva a condição de VPL igual a 0 (zero). Este valor calculado indica o custo mínimo de parada do processo de produção a partir do qual a implementação da solução se torna viável.

Em suma, neste capítulo objetivou-se despertar a necessidade e a viabilidade de realizar estudos semelhantes em situações reais.

## 8. CONCLUSÕES

### 8.1. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

De todo o exposto, conclui-se de antemão que a mitigação dos efeitos nocivos dos AMTs se encontra em nível elevado de desenvolvimento. Entretanto, a escolha de um método de mitigação em detrimento de outros se tornou um processo complexo e que leva a uma exaustiva busca por bibliografias para subsidiar a escolha da melhor solução.

Neste contexto, a principal contribuição desta dissertação constitui na organização e estruturação dos principais conceitos e soluções envolvidos no processo de mitigação dos afundamentos de tensão.

Em linhas gerais, no que diz respeito às soluções abordadas nesta dissertação conclui-se o que segue:

- O sistema de armazenamento de energia mais viável continua sendo as Baterias Chumbo-ácidas, mesmo com toda a evolução tecnológica e redução de custos das Baterias Níquel-Cádmio. Por ser uma tecnologia consolidada e possuir características interessantes para aplicações de alta potência, os volantes de inércia continuam a ser utilizados mesmo que em pequena escala. Devido ao elevado custo, os supercapacitores e supercondutores ainda são pouco utilizados;
- Os sistemas com armazenamento de energia se configuram como uma alternativa adequada para aplicações críticas nas quais não se permite o desligamento da carga. Os sistemas UPS são largamente utilizados em aplicações industriais, sendo os conjuntos de baterias seu principal sistema de armazenamento de energia. Já os sistemas DVR, mesmo com sua capacidade de promover a recuperação da tensão fornecida à carga por meio da utilização da própria tensão da rede sob o efeito de um AMT, seu custo elevado de instalação ainda é um limitante para aplicação de pequeno porte;
- Para os sistemas sem armazenamento de energia, destaca-se a aplicação de reguladores de tensão tendo em vista que estas soluções são

projetadas para que o tempo de resposta seja rápido o suficiente para permitir a mitigação dos AMTs. Entretanto, a sua aplicação deve ser parte de uma avaliação sobre as necessidades operativas da carga. Já a utilização de chaves de transferência tem um objetivo mais específico, sendo ele introduzir a redundância de fontes para cargas consideradas críticas; e

- A utilização de sistemas RTS se mostra bastante apropriada, uma vez que a utilização de ASDs na indústria é cada vez mais elevada. Assim como as demais soluções, conhecer as condições e restrições operativas da carga é de fundamental importância para a escolha de um método específico para reduzir a sensibilidade de um determinado processo frente aos AMTs. Neste contexto, destaca-se a utilização de conversores Boost e Ativos como as soluções mais completas.

Ademais, ressalta-se que os conceitos apresentados ao longo desta dissertação mostram a viabilidade técnica e 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 de forma mais cuidadosa a avaliação de suas instalações.

Portanto, este trabalho também teve como objetivo, através de um estudo de caso, sensibilizar sobre a necessidade e a viabilidade de realizar estudos semelhantes de forma a imunizar processos críticos frente aos AMTs.

## **8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Visando dar continuidade a este trabalho, apresentam-se na sequência algumas linhas de pesquisa que podem contribuir na maturação do conhecimento associado aos efeitos e as soluções dos AMTs.

- Análise comparativa de desempenho, através de testes laboratoriais, dos diversos tipos de UPS disponíveis no mercado, a saber: reserva passiva (off-line), interativo de linha e dupla conversão (on-line); e também de algumas configurações utilizando UPS dupla conversão, a saber: eco-mode paralelo redundante;
- Levantar, através de testes laboratoriais, a curva de sensibilidade frente aos

AMTs, dos diversos equipamentos utilizados em ambientes industriais, como por exemplo, os acionamentos de velocidade variável, motores de indução, e outros dispositivos;

- Monitoração de AMTs em outros sites e por um período mais prolongado visando constituir uma massa de dados mais precisa e com menos efeitos oriundos da aleatoriedade do fenômeno. Dessa forma, também seria possível obter outros perfis de ocorrências de distúrbio e explorar outra gama de soluções para mitigá-los; e
- Estudos complementares visando à otimização no dimensionado de projetos de DVR utilizando a proposta de dimensionamento estatístico já abordado em (GARCIA e ALVES, 2011) e que pode trazer bons resultados a este processo.

### **8.3. PUBLICAÇÕES**

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação foi possível publicar um artigo em conferência nacional, conforme apresentando na sequência, no qual se pode aferir junto aos pares a relevância do tema escolhido. A apresentação deste trabalho também permitiu colher referências para a continuidade do processo de maturação desta dissertação.

- Oliveira, R. R.; Nunes Júnior, M. A. S.; Carvalho Filho, J. M. e Oliveira, T. C.; “Soluções Ride-Through para Acionamentos a Velocidade Variável”, IX Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE. Cuiabá – MT, 31 de julho a 03 de agosto de 2011.

## 9. REFERÊNCIAS

(ABNT, 2003) ABNT. "Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada (nobreak) – Terminologia". Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003.

(ABNT, 2005) ABNT. "Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta com saída em corrente alternada (nobreak) - Segurança e desempenho". Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005.

(ABREU, OLIVEIRA, *et al.*, 1997) ABREU, J. P. G. D. et al. "Uma proposta de termos e definições associados à qualidade da energia elétrica". II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, São Lourenço, novembro 1997.

(ANEEL, 2009) ANEEL. "Módulo 8 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST". Agência Nacional de Energia Elétrica. 2009.

(ANEEL, 2012) ANEEL. "Agenda Regulatória Indicativa Biênio 2012-2013. ANEEL, 2012". Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/HTML/agenda-regulatoria-2012-2013.html>>. Acesso em: 06 out. 2012.

(ANEEL, 2013)<sup>1</sup> ANEEL. "Agenda Regulatória Indicativa Biênio 2013-2014. ANEEL, 2013". Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/HTML/agenda-regulatoria-2013-2014.html>>. Acesso em: 07 fev. 2013.

(ANEEL, 2013)<sup>2</sup> ANEEL. "Projeto Estratégico: Sistema de Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica. ANEEL, 2013". Disponível em: <[www.aneel.com.br](http://www.aneel.com.br)>. Acesso em: 07 fev. 2013.

(BELCHIOR e OLIVEIRA, 2003) BELCHIOR, F. N.; OLIVEIRA, J. C. "Uma nova proposta para a melhoria da suportabilidade de conversores VSI-PWM frente a afundamentos de tensão". V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, Aracajú-SE, Agosto 2003.

(BLACKBURN, 1987) BLACKBURN, J. L. "Protective Relaying. Electrical Engineering and Electronics", New York, n. 37, 1987.



---

(BOLLEN, 1997) BOLLEN, M. H. J. "Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drive". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 12, n. 4, p. 1667-1671, Outubro 1997.

(BOLLEN, 2000) BOLLEN, M. H. J. "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions". New York: IEEE Press, 2000.

(BROOKS, DUGAN, *et al.*, 1998) BROOKS, D. L. *et al.* "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance". IEEE Transacion on Power Delivery, v. 13, p. 254 - 259, January 1998.

(BRUMSICKLE, SCHNEIDER, *et al.*, 1999) BRUMSICKLE, W. E. *et al.* "Dynamic Sag Correctors: Cost-Effective Industrial Power Line Conditioning". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 37, n. 1, January-February 1999.

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

(CANGUÇU, 2006) CANGUÇU, N. A. "Contribuições para Avaliação dos Impactos Econômicos Causados por Mergulho de Tensão nos Sistema Elétrico Industrial". Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP). Ilha Solteira. 2006.

(CARVALHO FILHO, 2000) CARVALHO FILHO, J. M. "Uma Contribuição á Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis - Proposta de Novos Indicadores". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá. 2000.

(CENELEC, 1999) CENELEC. "ENV 50091-3/1999 - Specification for uninterruptible power systems (UPS) - Performance requirements and test methods". Comité Européen de Normalisation Electrotechnique. 1999.

(CHAGAS, 2007) CHAGAS, M. W. P. "Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias". Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia do Paraná - IEP/LACTEC. Curitiba. 2007.

---

(COLLINS e MANSOOR, 1997) COLLINS, E. R.; MANSOOR, A. "Effects of Voltage Sags on AC Motor Drives". Proceedings of the IEEE Annual on Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, June 1997. p. 1 - 7.

(CONRAD e BOLLEN, 1997) CONRAD, L. E.; BOLLEN, M. H. J. "Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 33, n. 6, Novembro/Dezembro 1997.

(COSTA, RODRIGUES, *et al.*, 2011) COSTA, A. V. et al. "Hybrid high-power rectifier with reduced THDI and voltage sag ride-through capability". Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) - IEEE, Orlando, 2011. p. 1 - 6.

(COSTA, FREITAS, *et al.*, 2011) COSTA, A. V. et al. "Hybrid three-phase rectifier with high power factor and voltage sags ride-through capability for utility interface of adjustable speed drives". Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP), Natal, 2011. P.582-588.

(COSTA, VIEIRA, *et al.*, 2011) COSTA, A. V. et al. "Proposta de Técnica para Aumento de Suportabilidade a Afundamentos Temporários de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável". IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (IX CBQEE), Cuiabá, Julho/Agosto 2011. p. 1 - 6.

(COSTA, COELHO, *et al.*, 2012) COSTA, A. V. et al. "Retrofitting Technique to Improve Voltage Sags Ride-Through Capability of ASD Using Sepic Rectifiers". Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) - Twenty-Seventh Annual IEEE, Orlando, 2012. p. 1469-1476.

(COTTULI e CHRISTIN, 2008) COTTULI, C.; CHRISTIN, J. F. "White Paper 92 - Comparison of static and rotary UPS". American Power Conversion – APC. 2008.

(CUNHA e SILVA, 2003) CUNHA, C. C. M.; SILVA, S. R. "Simulações e testes de sensibilidade de acionamentos a velocidade variável (ASD) frente a voltage sags". V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, Aracaju - SE, Agosto 2003.

(CUNHA e LEÃO, 2005) CUNHA, C. M. C.; LEÃO, R. P. S. "Avaliação de técnicas para aumento de suportabilidade de um sistema de acionamento a velocidade va-

riável de um motor de indução trifásico sob afundamentos de tensão”. VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, Belém - PA, Agosto 2005.

(DIDDEN, BELMANS e D'HAESELEER, 2003) DIDDEN, M.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. “Cost-Benefit Analysis of Voltage Sag Mitigations Methods in Fiber Extrusion Plants”. ETEP, v. 13, n. 2, March/April 2003.

(DIVAN, GARCIA e NAVES, 2005) DIVAN, D.; GARCIA, F. R.; NAVES, A. C. “Uma Análise Comparativa entre as Principais Tecnologias existentes e a Nova Tecnologia DySC para correção de Problemas Causados pelos Afundamentos de Tensão em Processos Industriais”. VI Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia, Belém, agosto 2005.

(DIVYA e OSTERGAARD, 2009) DIVYA, K. C.; OSTERGAARD, J. “Battery energy storage technology for power systems - An Overview”. Electric Power Systems Research, 2009. p. 511 - 520.

(DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2002) DUGAN, C. *et al.* “Electrical Power Systems Quality”. Mc Graw Hill. 2002.

(EPRI, 1993) EPRI. “Low-Voltage Ride-Through Performance of 5-HP Adjustable-Speed Drives”. EPRI Power Electronics Applications Center - Brief 9, January 1993.

(EPRI, 1995) EPRI. “Ride-Through Performance of Adjustable-Speed Drives With Flying Restart”. EPRI Power Electronics Applications Center - Brief 30, November 1995.

(EPRI, 1996) EPRI. “Performance of an ASD Ride-Through Device During Voltage Sags”. EPRI Power Electronics Applications Center - Brief 34, May 1996.

(EURO-DIESEL) EURO-DIESEL. “Como Funciona: Descrição da operação”. EURO-DIESEL. Disponível em: <<http://www.euro-diesel.com/portugues/descricao-de-operacao/145/12#.UQP3L-CmSo>>. Acesso em: 26 jan. 2013.

(FARRET e SIMÕES, 2006) FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. “Integration of Alternatives Sources of Energy. Institute of Electrical and Electronic Engineers”. 2006. (ISBN-13: 978-0-471-71232-9).

---

(FONSECA, 2003) FONSECA, L. C. D. A. “Estudo de Qualidade da Energia: Dimensionamento de um Restaurador Dinâmico de Tensão”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). p. 48 - 90. 2003.

(GALASSI, 2006) GALASSI, M. “Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo. 2006.

(GARCIA e ALVES, 2011) GARCIA, C. P.; ALVES, M. F. “Dimensionamento de Compensadores Série Considerando a Frequência de Ocorrência dos Afundamentos”. IX Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, Cuiabá, Julho/Agosto 2011.

(GONÇALVES, 2008) GONÇALVES, F. D. “Resposta de Sistemas Ininterruptos de Energia Frente a Fenômenos de Qualidade da Energia”. Dissertação de Mestrado. Universidade Nacional de Brasília (UNB). Brasília. 2008. (PPGENE.DM – 352A/08).

(GONZÁLEZA, SUMPERA, *et al.*, 2012) GONZÁLEZA, F. D. *et al.* “A review of energy storage technologies for wind power applications”. *Electric Power Systems Research*, 2012. p. 2154 - 2171.

(HOADLEY, 1997) HOADLEY, F. “Motor drive/power systems interactions”. IEE-EIAS Tutorial Course, New York, 1997.

(IEA PVPS TASK 3, 2004) IEA PVPS TASK 3. “Evaluation of energy storage devices in stand-alone PV power systems”. International Energy Agency Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems. 2004. (Report IEA PVPS T3-18: 2004).

(IEC, 1996) IEC. “IEC Standard 61000/1996 - Electromagnetic Compatibility”. International Electrotechnical Commission. 1996.

(IEC, 1999) IEC. “IEC Standard 62040-3/1999 - Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements”. International Electrotechnical Commission. 1999.

(IEEE, 1987) IEEE. “IEEE Standard 446/1987 - IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications”. Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1987.

(IEEE, 1995)<sup>1</sup> IEEE. "IEEE Standard 1159/1995 - Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1995.

(IEEE, 1995)<sup>2</sup> IEEE. "IEEE Standard 446/1995 - IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications". Institute of Electrical and Electronic Engineers. 1995.

(IEEE, 2004) IEEE. "Recommended Practice for the Establishment of Voltage Sag Indices. Draft 6 working document for IEEE P1564". Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2004.

(IEEE, 2006) IEEE. "IEEE Standard 1184/2006 - Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems". Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2006.

(ITIC, 2000) ITIC. "ITI (CBEMA) CURVE APPLICATION NOTE -. Information Technology Industry Council, 2000". Disponível em: <<http://w3.usa.siemens.com/us/internet-dms/btlv/PowerDistributionComm/PowerDistribution/Media/iticurv.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2012.

(JESUS e SAMESIMA, 2007) JESUS, D. M. F.; SAMESIMA, M. I. "Avaliação de Desempenho do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão". VII Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - SBQEE, Santos, 2007.

(JOUANNE, ENJETI e BANERJEE, 1999) JOUANNE, A. V.; ENJETI, P. N.; BANERJEE, B. "Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives". IEEE Transactions on Industry Applications, v. 35, n. 4, p. 908 - 916, July/August 1999.

(KEUS, ABRAHAMS, *et al.*, 1999) KEUS, A. K. *et al.* "Analysis of Voltage Dips (Sag) Testing Results of a 15kW PWM Adjustable Speed Drive (ASD)". Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives - IEMD'99, 1999. p. 213 - 215.

(KING e KINIGHT, 2003) KING, C. A.; KINIGHT, W. "Uninterruptible Power Supplies and Standby Power Systems". McGraw-Hill. USA. 2003.

---

(LARICO, 2007) LARICO, H. R. E. “Conversor boost controlado em corrente aplicado ao retificador monofásico”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis. 2007.

(LEBORGNE, 2003) LEBORGNE, R. C. “Uma contribuição à caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). p. 110 - 127. 2003.

(MARKIEWICZ e KLAJN, 2003) MARKIEWICZ, H.; KLAJN, A. “4.3.1 - Resilience - Improving Reliability with Standby Power Supplies”. Power Quality Application Guide - Leonard Power Quality Initiative (LPQI). 2003.

(MAULE, 2001) MAULE, D. “5.3.2 - Voltage Dip Mitigation”. Power Quality Application Guide - Leonard Power Quality Initiative (LPQI). 2001.

(MCGRANAGHAN, MUELLER e SAMOTYJ, 1993) MCGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. “Voltage Sags in industrial Systems”. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n. 2, Março/Abril 1993.

(MCNULTY e HOWE, 2002) MCNULTY, S.; HOWE, B. “Power Quality Problems and Renewable Energy Solutions: Analysis of the Prospects for Renewable PQ Solutions in Massachusetts”. Massachusetts Renewable Energy Trust. 2002.

(MELO, BASCOPE, *et al.*, 2007) MELO, N. X. *et al.* “A boost converter design to improve ASD Ride-Through to voltage dip”. International Conference on Power and Energy Systems – IASTED – AsiaPES 2007, Phunket - Thailand, April 2007.

(NIELSEN e BLAABJERG, 2001) NIELSEN, J. G.; BLAABJERG, F. “Comparison of system topologies for dynamic voltage restorers”. Applications Conference, 36, Chicago, 2001. p. 2397 - 2403.

(NOVAES, 2007) NOVAES, E. G. C. “Validação de Ferramentas de Simulação de Afundamentos de Tensão através de Medições”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá. 2007.

(OLIVEIRA, 2008) OLIVEIRA, T. C. D. “Afundamentos de Tensão: Avaliação estatística de resultados de medição com base em simulações”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá. 2008.

---

(ONS, 2009) ONS. “Módulo 25.6 - Procedimentos de Rede”. Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2009.

(OMORI e PRADO, 2005) OMORI, J. S.; PRADO, F. A. “Afundamentos de tensão no consumidor AAM do Brasil estudo de um caso de sucesso”. VI Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia, Belém, agosto 2005.

(PRAVEEN, MUNI, *et al.*, 2004) PRAVEEN, J. *et al.* “Review of dynamic voltage restorer for power quality Improvement”. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, Pusan, 2004. p. 749 - 754.

(SANTOS, CAMARGO e LIMA, 2005) SANTOS, J. F.; CAMARGO, J.; LIMA, E. G. “Soluções para evitar parada de processos industriais devido a VTCDs”. VI Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia, Belém, agosto 2005.

(SARAIVA FILHO, 2002) SARAIVA FILHO, F. D. C. “Proposta de Recuperador Dinâmico para Correção de Afundamentos de Tensão”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP). p. 15 -27. 2002.

(SEMI F47-0200, 1999) SEMI F47-0200. “Specification for semiconductor processing equipment”. Power Standards Lab. 1999.

(SEMI F47-0706, 2006) SEMI F47-0706. “Specification for semiconductor processing equipment”. Power Standards Lab. 2006.

(SILVA e MOURA) SILVA, J. L. R. E.; MOURA, L. C. D. “Alternativas Tecnológicas para Mitigação de Afundamento e Interrupção Momentâneas de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema Elétrico de Potência”. Centralmat, desenvolvido pela Eel Engenharia Elétrica Ltda. Disponível em: <<http://www.centralmat.com.br/Artigos/Mais/afundamentoTensao.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

(SILVA, 1999) SILVA, S. M. “Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). p. 39 - 55. 1999.

(TOSSI, 2011) TOSSI, L. “Capítulo II - Topologias de UPS Estático”. Revista: O Setor Elétrico, n. 61, p. 36 - 40, Fevereiro 2011. ISSN 1983-0912.

---

(TOSSI e BRAGA, 2011) TOSSI, L.; BRAGA, H. “Capítulo VII - Chaves-estáticas de Transferência”. Revista: O Setor Elétrico, n. 66, p. 22 - 27, Julho 2011. ISSN 1983-0912.

(TOSSI e MACEDO JR, 2011) TOSSI, L.; MACEDO JR, A. “Capítulo IX - Projeto de instalação de sistemas UPS”. Revista: O Setor Elétrico, n. 68, p. 22 - 29, Setembro 2011. ISSN 1983 -0912.

(TOSSI e MARTINI, 2011) TOSSI, L.; MARTINI, J. L. D. “Capítulo X - UPS dinâmicos em instalações de missão crítica”. Revista: O Setor Elétrico, n. 69, p. 18 - 29, Outubro 2011. ISSN 1983-0912.

(VIKTORIN, DRIESEN e BELMANS, 2003) VIKTORIN, O.; DRIESEN, J.; BELMANS, R. “Comparison of dynamic restorer topologies”. Power Tech, 5, Bologna, 2003.

(WATANABE, OLIVEIRA, *et al.*, 2008) WATANABE, G. T. et al. “Custo Devido a Afundamentos Momentâneos de Tensão - Estado da Arte”. VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais - INDUSCON, Poços de Caldas, 17 a 20 agosto 2008.

(WILDI, 1997) WILDI, T. Electrical Machines, Drives, and Power Systems. 3 ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1997.



# ANEXOS

## ANEXO 1 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO UPS PARA TODO O PROCESSO

PROCESSO	P (KW)	S (KVA)
UPS PARA TODO O PROCESSO	317	489
Magnitude	0,67	p.u.
Duração	41	ms
Potencia Utilizada 500 KVA		
	KW	
	cv	0,7355
	hp	0,7457

UPS PARA TODO O PROCESSO										
Equipamento	Motor	Potência (cv)	Potência (hp)	n	Potência (kW)	fp	n	FCM	Eletrônica de Potência	S
Extrusora 6"	CA	250		0,88	209	0,70	0,95	0,90	Inversor de Frequência	349
Extrusora 2,5"	CC	25	40	0,90	33	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	43
Extrusora 3,5"	CC	40	65	0,90	54	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	70
Pull out	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	8
Bobinadeira	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	8
Helper	CC	3	5	0,90	4	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	5
Metering	CC	3	5	0,90	4	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	5

## ANEXO 2 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DO DVR PARA TODO O PROCESSO

PROCESSO	P (KW)	S (KVA)
DVR PARA TODO O PROCESSO	317	418
Magnitude	0,67	p.u.
Duração	41	ms
<b>Potencia Utilizada</b>	<b>350 KVA</b>	

KW	
cv	0,73550
hp	0,74570

DVR PARA TODO O PROCESSO								
Equipamento	Motor	Potência (cv)	Potência (hp)	n	Potência (kW)	fp	Eletrônica de Potência	S
Extrusora 6"	CA	250		0,88	209	0,70	Inversor de Frequência	298
Extrusora 2,5"	CC	25	40	0,90	33	0,90	Conversor CA/CC	37
Extrusora 3,5"	CC	40	65	0,90	54	0,90	Conversor CA/CC	60
Pull out	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	Conversor CA/CC	7
Bobinadeira	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	Conversor CA/CC	7
Helper	CC	3	5	0,90	4	0,90	Conversor CA/CC	5
Metering	CC	3	5	0,90	4	0,90	Conversor CA/CC	5

### ANEXO 3 - CÓDIGO FONTE UTILIZANDO PARA DETERMINAÇÃO DAS POTÊNCIAS DO DVR

% Calculo da Potência Nominal do DVR

% Código fonte adaptado do código apresentado por Luiz Carlos de Alcantara Fonseca em sua dissertação de mestrado (FONSECA, 2003)

```
clear all
clc
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);
qloadn=-1000*sl*sin(fi);
iloadn=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+1i*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+1i*senfi);
%***** Carga do Tipo 3*****
else tipo==3 % I constante
    iload=(ploadn/(3*(tensao*invraiz3)*cosfi))*(cosfi+1i*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
    iload=vl/zload;
end
%
% Calculo da Potencia do DVR
%
% Filosofia de Minimizacao da Potencia Ativa
%
if crit == 1
    vs(1)=mono*tensao*(cosfi+1i*senfi)*invraiz3;
    vs(2)=tri*tensao*(cosfi+1i*senfi)*invraiz3;
end
%
% Filosofia de Compensacao Total
%
```

```

if crit == 3
    vs(1)=mono*tensao*(cos(teta1f)+1i*sin(teta1f))*invraiz3;
    vs(2)=tri*tensao*(cos(teta3f)+1i*sin(teta3f))*invraiz3;
end

%
%
%
% Filosofia de Minimização 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(iload);
    pdvr(m)=abs(vdvr(m))*abs(iload)*cos(angulodvr);
    qdvr(m)=abs(vdvr(m))*abs(iload)*sin(angulodvr);
end

fprintf('\n')
fprintf('\n')
disp('*****')
disp('***** Saida do Programa DVR*****')
disp('*****')
fprintf('***** Calculo dos Nominiais 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')

```

**ANEXO 4 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO UPS PARA OS MOTORES CC**

<b>PROCESSO</b>	<b>P (KW)</b>	<b>S (KVA)</b>
UPS para o motor CC	108	141
<b>Magnitude</b>	0,67	p.u.
<b>Duração</b>	41	ms
<b>Potência Utilizada</b>		
<b>150 KVA</b>		

<b>KW</b>
<b>cv</b>
<b>hp</b>

UPS para o motor CC										
Equipamento	Motor	Potência (cv)	Potência (hp)	n	Potência (kW)	fp	n	FCM	Eletrônica de Potência	S
Extrusora 2,5"	CC	25	40	0,88	34	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	44
Extrusora 3,5"	CC	40	65	0,90	54	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	70
Pull out	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	8
Bobinadeira	CC	5	7,5	0,90	6	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	8
Helper	CC	3	5	0,90	4	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	5
Metering	CC	3	5	0,90	4	0,90	0,95	0,90	Conversor CA/CC	5