FRANCISCO DA COSTA SARAIVA FILHO

**PROPOSTA DE RECUPERADOR
DINÂMICO PARA CORREÇÃO DE AFUNDAMENTOS
DE TENSÃO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Elétrica

São Paulo
2002

FRANCISCO DA COSTA SARAIVA FILHO

Engenheiro Eletricista, EPUSP, 1977

**PROPOSTA DE RECUPERADOR
DINÂMICO PARA CORREÇÃO DE AFUNDAMENTOS
DE TENSÃO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração :
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo César Senger

São Paulo
2002

Saraiva Filho, Francisco da Costa

Proposta de Recuperador Dinâmico para Correção de
Afundamentos de Tensão / Francisco da Costa

Saraiva Filho. -- São Paulo, 2002.

65 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas.

1. Energia elétrica (Qualidade). 2. Eletrônica de Potência.

I. Universidade de São Paulo

Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas II.t.

**Aos meus pais, Francisco e Felicina e à minha
esposa Walkyria e filhas, Julia e Carolina**

Agradecimentos

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por mais uma vez ter me proporcionado a oportunidade de evoluir profissional e academicamente;

Ao professor, orientador e amigo Dr. Eduardo César Senger pelo incentivo , apoio e orientação;

Ao professor Dr. Walter Kaiser pelas sugestões e colaborações;

Ao professor Dr. Carlos Shiniti Muranaka pela inestimável ajuda e sugestões no uso do software de simulação *PSpice*;

Aos colegas Giovanni Manassero Jr e Eduardo Lorenzetti Pellini, pela ajuda na edição desta tese;

À minha esposa e filhas pelo estímulo e compreensão, e

À todos que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração deste trabalho.

Índice

Resumo

Abstract

1. Introdução.....	1
2. Conceituação de <i>Sag</i> no Âmbito da Qualidade de Energia.....	4
2.1 Definição dos Principais Conceitos Utilizados em Qualidade de Energia	4
2.2 Origem e Estimativa dos Valores dos <i>Sags</i> de Tensão.....	5
2.3 Suportabilidade das Cargas Sensíveis aos <i>Sags</i>	12
3. Estado da Arte nas Técnicas de Correção dos Afundamentos de Tensão ...	15
3.1 Soluções Sem Nenhuma Forma de Armazenamento Interno de Energia.....	17
3.1.1 Reguladores de Tensão.....	17
3.1.1.1 Reguladores de Tensão Através de Taps em Transformador (<i>TapChanger</i>).....	17
3.1.1.2 Reguladores de Tensão Através de Taps em Transformador Incremental (Soma-Subtrai).....	18
3.1.1.3 Reguladores de Tensão do Tipo CVT (<i>Constant Voltage Transformer</i>).....	19
3.2 Soluções Com Armazenamento Interno de Energia.....	20
3.2.1 Fontes Ininterruptas de Energia Convencionais.....	20
3.2.1.1 Fontes Ininterruptas Eletromecânicas.....	21
3.2.1.2 Fontes Ininterruptas Estáticas (<i>UPS</i>).....	21
3.2.1.2.1 <i>Standby UPS (Short_break)</i> com Tempo de Transferência Intrínseco.....	21
3.2.1.2.2 <i>Online UPS (Nobreak)</i> com Dupla Conversão de Energia e Sem Tempo de Transferência.....	23
3.2.1.2.3 <i>Line Interactive UPS (Nobreak</i> Interativo com a Rede).....	24

3.2.2 Outras Fontes Ininterruptas de Energia Com Tecnologias em Consolidação.....	25
4. Projeto do Recuperador para Afundamentos de Tensão.....	28
4.1 Roteiro para Cálculo dos Componentes de Potência do Recuperador.....	36
4.1.1 Chaves Estáticas.....	36
4.1.2 Anteprojeto do Transformador Soma-Subtrai	36
5. Simulação do Desempenho do Recuperador de Tensão.....	42
5.1 Análise da Regulação Dinâmica do Recuperador de Tensão.....	42
5.2 Análise da Regulação Estática do Recuperador de Tensão.....	46
5.3 Simulação Dinâmica do Circuito de Potência do Recuperador de Tensão.....	49
5.3.1 Análise da Sobrecorrente na Transferência da chave <i>Bypass</i> SW1 para a Chave SW4	49
5.3.2 Análise da Sobrecorrente na Transferência entre Chaves do Primário do Transformador Soma-Subtrai - da SW3 para a Chave SW6.....	51
5.3.3 Verificação do Pico de Tensão nos Extremos do Primário do Transformador Soma-Subtrai.....	52
5.4 Simulação do Recuperador Com Carga Não Linear.....	54
5.5 Simulação para Observar o Pico de Tensão do Fim do <i>Sag</i>	56
6. Conclusão.....	58
Referencias bibliográficas.....	60
Anexo A – Circuito Eletrônico de Detecção de Zero de Corrente na Chave Estática.....	63
Anexo B – Especificação Típica de Fonte Chaveada Utilizada em Informática.....	65

Lista de Figuras

Figura 1	Sequência de Religamentos da Rede.....	6
Figura 2	Divisor de Tensão para Determinar Magnitude do <i>Sag</i>	7
Figura 3	Diagrama Unifilar de Impedâncias e <i>Sag</i> de Tensão.....	8
Figura 4	Perfil do Afundamento da Tensão em Sistemas de Transmissão.....	9
Figura 5	Sequência de Religamentos da Proteção.....	9
Figura 6	Fonte - Estudo EPRI DPQ - Estatística de <i>Sags</i> e Interrupções por Local de Monitoração por Ano[28].....	11
Figura 7	Curva ITI CBEMA Revisada 2000.....	13
Figura 8	Regulador de Tensão do Tipo <i>TapChanger</i>	18
Figura 9	Regulador de Tensão “Soma/Subtrai”.....	19
Figura 10	Regulador de Tensão Ferroressonante CVT.....	19
Figura 11	Fonte Ininterrupta Eletromecânica – Retificador Com Motor CC.....	21
Figura 12	Fonte Ininterrupta Com Tempo de Transferência.....	22
Figura 13	Fonte Ininterrupta – Retificador/Carregador.....	23
Figura 14	Fonte Ininterrupta Interativa Com a Rede.....	24
Figura 15	Formato Típico de um <i>Sag</i>	29
Figura 16	Esquema Elétrico Simplificado do Recuperador.....	30
Figura 17	Esquema Elétrico do Recuperador Dinâmico de Tensão.....	31
Figura 18	Gráfico da Relação entre Tensão de Entrada e Saída do Recuperador.....	39
Figura 19	Relação de Espiras do Transformador “Soma-Subtrai”.....	40
Figura 20	Regulação Dinâmica do Recuperador para <i>Sag</i> de 50%.....	42
Figura 21	Detalhe da Volta de SW3 para o <i>Bypass</i>	43
Figura 22	Esquema Elétrico Simulado no PSpice 9.1.....	44

Figura 23 Modelo para a Chave Estática PSpice 9.1.....	45
Figura 24 Circuito Utilizado para Determinar a Regulação Estática do Recuperador.....	47
Figura 25 Tensão de Saída (V_o) e Tensão de Entrada (V_i) Com Carga 100% Resistiva.....	48
Figura 26 Tensão de Saída (V_o) e Tensão de Entrada (V_i) Com Carga 50% Indutiva + 50% Resistiva.....	48
Figura 27 Transferencia da Chave <i>Bypass</i> para a SW4 e vice-versa.....	50
Figura 28 Pico de Corrente na Transferência da Chave SW4 para a de <i>Bypass</i>	50
Figura 29 Detalhe de Acionamento do <i>Bypass</i> Logo Após Passagem pelo Zero de I_{sw4}	51
Figura 30 Sobrecorrente de Comutação do Tap SW3 para o SW6.....	52
Figura 31 Pico de Tensão na Chave SW2.....	53
Figura 32 Detalhe do Pico de Tensão na Chave SW2.....	54
Figura 33 Tensão de Saída do Recuperador Submetido à Carga Não Linear.....	55
Figura 34 Carga Não Linear Equivalente à 50 PCs em 20V.....	55
Figura 35 Tensão de Saída Sem Transferir para o <i>Bypass</i> no Fim do <i>Sag</i>	56
Figura 36 Tensão de Saída Com Transferência para o <i>Bypass</i> no Fim do <i>Sag</i>	57
Figura 37 Topologia Alternativa para Reduzir Sobretensão.....	58
Figura 38 Detetor de Zero de Corrente.....	64

Lista de Tabelas

Tabela 1	Tempos Típicos de Atuação da Proteção.....	10
Tabela 2	Resumo do Desempenho da Vários Tipos de Tecnologia em Função do Problema de Qualidade de Energia Indicado [6].....	27
Tabela 3	Cálculo dos Valores de K_n	38
Tabela 4	Número de Espiras do Transformador Soma-Subtrai.....	40
Tabela 5	Queda de Tensão na Impedância Série.....	46

Resumo

A qualidade da energia está fortemente relacionada à qualidade da forma de onda da tensão de rede. A ocorrência de distúrbios na rede que provocam afundamentos de tensão (*Sags*) são atualmente os grandes causadores do mau funcionamento de cargas alimentadas pelo sistema elétrico.

Condicionadores/Estabilizadores de tensão projetados e/ou fabricados atualmente no Brasil, em sua grande maioria, não atendem e nem asseguram a devida correção da tensão para grande parte dos *Sags* mais intensos observados freqüentemente na rede elétrica. A nova curva ITI CBEMA-2000 fixa desempenho e suportabilidade mínimos que as cargas sensíveis atuais devem atender .

Neste trabalho propõe-se um equipamento recuperador de tensão constituído por um transformador Soma-Subtrai e chaves estáticas utilizando dois tiristores em anti-paralelo. Essa topologia foi escolhida devido à sua simplicidade de implementação possibilitando, dessa forma, o desenvolvimento de um equipamento bastante atraente em termos econômicos. Apresenta-se um anteprojeto de um equipamento de 135kVA/220V e avalia-se o seu desempenho através de simulações estáticas e dinâmicas utilizando-se para isso o programa ORCAD PSpice versão 9.1.

Abstract

Power quality is strongly related to the mains voltage waveform quality . Decrease of the mains voltage RMS value (Sag) are nowadays the most important cause of electric loads malfunction .

Line conditioners/stabilizers designed and manufactured today in Brazil do not attend the needs of voltage corrections of stronger Sags that frequently occur in the utility grid. New ITI CBEMA-2000 curve defines minimum performance and supportability that loads must have in these events.

This paper proposes a voltage restorer equipment composed by a Buck-Boost transformer and static switches with back-to-back connected thyristors. This topology was chosen due to its simple implementation that allows a development of a low cost equipment. The preliminary sketch of a 135kVA/220V equipment is presented and its performance evaluated through statics and dynamics simulations using ORCAD PSpice 9.1 software.

1. Introdução

A redução momentânea no valor eficaz da tensão das redes elétricas, fenômeno denominado na literatura internacional como *Sag*, é provavelmente o problema de qualidade de energia que mais afeta atualmente consumidores industriais e comerciais. O termo qualidade da energia está fortemente relacionado com a qualidade da forma de onda da tensão de rede, por isso existe a afirmativa “Power Quality = Voltage Quality ” [1]. Esses distúrbios de afundamento da tensão estão normalmente associados a uma falha (curto-circuito) em algum ponto da rede de distribuição ou transmissão da concessionária de energia elétrica.

Nos dias de hoje, as cargas tem se tornado de uma maneira crescente mais sensíveis à estes breves distúrbios na tensão de alimentação, e como consequência, o impacto negativo destes eventos é muito mais significativo hoje, do que era alguns anos atrás. Condicionadores de tensão, ou como são mais conhecidos no Brasil, *estabilizadores de tensão*, dentro das especificações tradicionais do nosso mercado, são completamente ineficientes na resolução deste tipo de problema de qualidade de energia .

Um conceito mais moderno de estabilização de tensão, que atua de forma mais rápida e que, principalmente, corrija afundamentos da tensão da ordem de até 50% do valor nominal, é fundamental para resolver este tipo de degradação da qualidade de energia. O conceito tradicional de correção da tensão de alimentação de +/- 15% na entrada, entregando de +/- 1% a +/- 3% na saída, especificação típica dos estabilizadores eletrônicos no mercado brasileiro, é absolutamente sem sentido e ineficaz na solução dos *Sags* que afetam o funcionamento das cargas atuais, tornando este último tipo de equipamento obsoleto, desnecessário e inconveniente para as cargas mais comuns de hoje.

As cargas modernas típicas, em sua grande maioria, possuem muita eletrônica e sua fonte de alimentação é do tipo chaveada, aceitando uma ampla faixa de tensão de alimentação, normalmente de - 22% a +14% (vide Anexo B Especificação Típica de Fonte Chaveada Utilizada em Informática), o que confirma mais uma vez o obsoletismo da especificação dos estabilizadores de tensão convencionais, como ainda são fabricados hoje no Brasil.

Existem no mercado diferentes tipos de solução para resolver o problema dos *Sags* de tensão, variando desde dispositivos com armazenamento interno de energia (*nobreaks* com baterias internas por exemplo), até outros que não possuem internamente nenhuma forma de energia armazenada, denominados comumente condicionadores/estabilizadores de tensão. Os primeiros, usualmente utilizados para alimentar cargas críticas, tem o inconveniente de serem caros e com custos de manutenção elevados, mas mesmo assim tem sido uma solução muito aplicada, no Brasil, na alimentação de equipamentos de informática e de controle/automação. A segunda alternativa, sem nenhuma armazenagem interna de energia e utilizando a tensão residual para corrigir o valor eficaz da tensão de rede a um nível aceitável pela carga, apesar de não corrigir 100% dos *Sags* que ocorrem na rede, consegue eficácia em boa parte dos casos [2], [4], [11], [15] o que torna esta solução atraente do ponto do vista econômico, dado os baixos custos de implantação e manutenção.

Existem ainda uma série de outras soluções intermediárias, tais como as eletromecânicas (grupo motor-gerador com volantes de inércia) e as eletromagnéticas (CVTs e indutores construídos com supercondutores e etc). No capítulo 3 será detalhado o princípio de funcionamento de cada solução e quais suas respectivas vantagens e desvantagens.

Este trabalho visa fazer um estudo do fenômeno *Sag* e apresentar uma proposta de equipamento de baixo custo, robusto, de fácil fabricação por indústrias eletrônicas brasileiras e que solucione boa parte dos distúrbios causados por ele, justificando sua utilização em substituição aos *Nobreaks*, que são custosos e de manutenção cara. Além disso, objetiva também esclarecer e orientar eventuais usuários aculturados com o uso indevido dos estabilizadores de tensão convencionais que estes últimos são um conceito ultrapassado de correção dos distúrbios que ocorrem na tensão de rede.

O trabalho organiza-se em seis capítulos, no capítulo 2 são apresentadas as definições dos principais conceitos e termos mais comuns usados em qualidade de energia, a origem mais comum dos *Sags* e a suportabilidade de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede. No capítulo 3 são apresentadas as soluções mais usuais para correção dos distúrbios *Sags/Swells* na rede de

alimentação. No capítulo 4 é proposta uma solução simples de equipamento para recuperar os distúrbios *Sags/Swells*, trazendo a tensão de rede para a faixa de magnitude e tempo especificados na curva ITI CBEMA. No capítulo 5 são feitas várias simulações estáticas e dinâmicas para verificar o comportamento do recuperador em situações críticas de operação do equipamento proposto no capítulo 4. No capítulo 6 são analisados os resultados obtidos nas simulações e propostas soluções alternativas para minimizar alguns problemas encontrados.

2. Conceituação de *Sag* no Âmbito da Qualidade de Energia

2.1 Definição dos Principais Conceitos Utilizados em Qualidade de Energia

Existem muitas imprecisões nos termos usados neste assunto, ainda recente, chamado genericamente de “Qualidade de Energia”. De acordo com publicações internacionais, como IEEE/ANSI e IEC, define-se :

- ***Sag*** (ou algumas vezes chamado de ***dip***) : decremento do valor RMS da tensão de 0.1 a 0.9 pu com duração de 0.5 ciclo a 1 minuto.
- ***Swell*** : incremento do valor RMS da tensão de 1.1 a 1.8 pu com duração de 0.5 ciclo a 1 minuto
- **Interrupção**: decremento do valor RMS da tensão abaixo de 0.1 pu com duração que não excede 1 minuto
- **Interrupção Sustentada** : decremento do valor RMS da tensão abaixo de 0.1 pu com duração maior que 1 minuto
- **Subtensão**: decremento do valor eficaz da tensão a valores menores que 0.9 pu por mais de 1 minuto
- **Sobretensão** :incremento do valor RMS da tensão a valores maiores que 1.1 pu por mais de 1 minuto
- **Notching** : distúrbio periódico na tensão causado pela operação de equipamentos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

Inúmeros outros termos são utilizados nesta área de “Qualidade de Energia” cujas definições muitas vezes são imprecisas e ambíguas, e a razão principal para que isto aconteça é que este assunto é relativamente novo e tem muitos grupos de trabalho e de estudos envolvidos com ele em diferentes países .

2.2 Origem e Estimativa dos Valores dos *Sags* de Tensão

Falhas em linhas de transmissão e a subsequente abertura pelos dispositivos de proteção na maioria dos casos não causam a total interrupção no fornecimento de energia para as cargas nelas ligadas, devido à natureza interconectada das redes de transmissão de energia elétrica. Por outro lado, causam afundamentos na tensão (*Sags*) que podem levar ao mau funcionamento de algumas cargas conectadas à rede, resultando em perdas financeiras substanciais. O primeiro passo para analisar o impacto destes afundamentos de tensão é quantificar a capacidade da carga sensível em suportar esses distúrbios sem operar incorretamente.

Alguns estudos mostram que a grande maioria dos *Sags* são causados pela queda de tensão devido à circulação da corrente de curto-circuito através das impedâncias de linha, transformadores e do sistema, até a atuação dos equipamentos responsáveis pela proteção do trecho defeituoso.

Para compreender-se como uma falta gera um *Sag*, será utilizado, a título de exemplo, a rede de distribuição mostrada na Figura 1 e constituída por uma subestação de 20 MVA com três alimentadores de média tensão. Cada alimentador tem seu disjuntor com relês de proteção para detectar e eliminar a falta. No ponto C é alimentada uma carga industrial através de um transformador de distribuição com tensão secundária de 380V.

Figura 1 Sequência de Religamentos da Rede

A mesma Figura 1 mostra o que acontece ao longo do tempo com as tensões dos pontos B e C quando ocorre um curto trifásico no ponto A, do alimentador F2. O eixo horizontal de tempos mostra a sequência de eventos que ocorre durante a atuação da proteção de sobrecorrente admitindo-se que o disjuntor em F2 possui religamento automático. Verifica-se, portanto, que o processo de religamento pode causar vários afundamentos (*Sags*) na tensão do sistema no caso de uma falta permanente[5].

Todas as cargas no alimentador F2, incluindo o ponto B, sofrem completa interrupção quando o disjuntor F2 abre definitivamente a falta. Já as cargas alimentadas por F1 e F3 são submetidas a dois *Sags*. O primeiro *Sag* começa no início da falta e o segundo quando F2 religa automaticamente. Os *Sags* acontecem sempre que a corrente de curto através das impedâncias de linha, transformadores e barramentos flui até o ponto de curto-circuito. A tensão retorna ao normal nos alimentadores F1 e F3 no instante em que F2 abre a corrente de curto. As cargas sensíveis conectadas aos alimentadores F1 e F3 apresentarão parada de produção caso a magnitude e duração dos *Sags* sejam mais severos que suas respectivas suportabilidades.

A estimativa da magnitude do *Sag* pode ser feita calculando-se a queda de tensão desde o local do curto-circuito até o ponto de alimentação da carga crítica. Para avaliar a duração do *Sag* é preciso conhecer o tempo de atuação e extinção da falta do dispositivo de proteção. Desta forma as características do *Sag* são calculadas a partir da topologia e dos parâmetros da rede (impedância da rede, impedância de curto-circuito dos transformadores e etc...) e dos ajustes dos relês de proteção.

Figura 2 Divisor de Tensão para Determinar Magnitude do *Sag*

A Figura 2 mostra o circuito equivalente para cálculo da magnitude do *Sag* de tensão, no ponto de interesse, devido à uma falta trifásica no ponto X. A estimativa da magnitude do *Sag* é dada pela equação (1) :

$$V_{\text{sag}} = \frac{(Z_2 + Z_{\text{curto}})}{(Z_1 + Z_2 + Z_{\text{curto}})} \times 1.0\text{pu} \quad (1)$$

A Figura 3 mostra uma aplicação numérica da equação (1) para uma falta sólida no ponto A ($Z_f = 0$), utilizando as reatâncias de sequência positiva do alimentador F2. O uso somente das reatâncias é utilizado para simplificar o cálculo para efeitos de demonstração.

Figura 3 Diagrama Unifilar de Impedâncias e *Sag* de Tensão

Esta é uma forma simples de mostrar (utilizando o princípio do divisor de tensão) como a falta em um alimentador pode perturbar toda a vizinhança. Estes mesmos conceitos se aplicam às linhas de transmissão, entretanto, os cálculos são mais complexos devido à topologia não radial destas redes, exigindo softwares elaborados que garantam precisão dos resultados.

Para as redes de transmissão interconectadas uma forma de se visualizar a influência de um curto-circuito em sua vizinhança é mostrado na Figura 4. Na região mais interna (proximidades do curto) o *Sag* é mais intenso e à medida que se afasta do ponto de curto-circuito a magnitude do *Sag* se reduz, tendo intensidade mínima em lugares bem afastados do evento.

Figura 4 Perfil do Afundamento da Tensão em Sistemas de Transmissão

A Figura 5 ilustra um sinal típico de corrente de curto ao longo do tempo, mostrando a sequência de religamentos do disjuntor de proteção visando eliminar a falta.

Figura 5 Sequência de Religamentos da Proteção

A largura de cada *Sag* corresponde ao intervalo de tempo que o dispositivo de proteção permite a circulação da corrente de curto-circuito pelo ponto

de falta. Existem muitos tipos de equipamentos de proteção e cada um tem um tempo mínimo de atuação, além disto existe um atraso intencional na atuação da proteção para garantir uma coordenação entre os vários dispositivos de proteção instalados no sistema. Religamentos automáticos da proteção são utilizados com intuito de restabelecer o fornecimento de energia sendo que o tempo de religamento pode variar desde alguns ciclos de rede até dezenas de segundos em redes de distribuição. Os tempos de atuação típicos de alguns equipamentos de proteção são apresentados na Tabela 1 juntamente com o possível número de tentativas de religamento.

Tipo de equipamento de Proteção	Tempo de atuação em ciclos da rede		
	Mínimo típico	Atraso típico	Número de tentativas
Fusível	0.5	De 0.5 a 60	Nenhuma
Fusível limitador de corrente	Menor que 0.25	De 0.25 a 6	Nenhuma
Religamento Eletrônico	3	De 1 a 30	De 0 a 4
Disjuntor à óleo	5	De 1 a 60	De 0 a 4
Disjuntor à vácuo ou SF ₆	De 3 a 5	De 1 a 60	De 0 a 4

Tabela 1 Tempos Típicos de Atuação da Proteção

O Instituto de Pesquisa norte-americano EPRI *Electric Power Research Institute* fez um estudo das ocorrências de Qualidade de Energia nos EUA, intitulado DPQ *Distribution Power Quality Study* [27], [28], entre os anos de 1993 e 1995 (durante 27 meses), onde foram monitorados 300 pontos e gravados 6.000.000 de eventos. O resumo dos resultados estatísticos deste estudo é apresentado na Figura 6, onde nota-se que a grande maioria dos *Sags* ,cerca de 90%, apresenta magnitude superior a 40% da tensão nominal e duração inferior a 2 segundos [4], [28].

Figura 6 Fonte - Estudo EPRI DPQ - Estatística de *Sags* e Interrupções por Local de Monitoração por Ano[28]

2.3 Suportabilidade das Cargas Sensíveis aos *Sags*

Normas internacionais [6], [7], [8], [9], [10] definem a tolerância frente aos *Sags* e *Swells* que os equipamentos sensíveis devem atender. Um dos mais tradicionais gráficos utilizados para definir a suportabilidade das cargas é a chamada curva ITI CBEMA (ITI= *Information Technology Institute Council*, CBEMA= *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*). Esta curva foi originalmente criada para descrever a tolerância das fontes de alimentação de computadores *mainframes* com relação à magnitude e duração das variações da tensão do sistema de alimentação. Hoje em dia as fontes dos computadores tem suportabilidade maior que a determinada pela CBEMA original (1977), mas, de qualquer modo, ela se tornou um padrão bastante utilizado no projeto das redes de alimentação para cargas sensíveis (críticas) e é também um formato bastante comum de se apresentar dados referentes às variações da qualidade de tensão. A Figura 7 mostra a curva ITI CBEMA revisada em 2000, cuja referência aparece nas normas [6], [8], [9].

Os eixos da curva ITI CBEMA representam a magnitude (eixo vertical) e a duração (eixo horizontal) dos eventos de *Sags* e *Swells*. Os pontos que caírem abaixo da curva inferior podem causar o desligamento ou mau funcionamento da carga sensível. Os pontos acima da curva superior poderão causar um mau funcionamento devido à falha de isolamento, desligamento por sobretensão, etc...

Os pontos importantes da nova curva ITI CBEMA 2000 são :

- Ocorrência de uma interrupção da energia (0 pu de tensão) pode ter duração de até um ciclo de 50Hz, isto é, 20ms de duração, sem danos ao funcionamento carga,
- Tensão de rede em 70% do valor nominal por um tempo até 500ms,
- De 500mseg a 10 segundos em 80% do valor nominal,
- Poderá ficar entre 90% e 110% da tensão nominal por tempo indeterminado.

Figura 7 Curva ITI CBEMA Revisada 2000

Em geral os equipamentos eletrônicos que tem tolerância à *Sag* de acordo com a norma IEEE 1100 [6] (Curva ITI CBEMA), devem ser testados para determinar se este pode suportar uma interrupção de 20ms sem nenhum problema de funcionamento . Para isso a energia é removida da unidade sob teste por 20ms e sua saída monitorada, verificando se permanece dentro dos limites de funcionamento. Da mesma maneira aplica-se alimentação com 70% da tensão nominal por 0.5

segundos e após isto retorna-se para a faixa nominal. Procede-se da mesma forma para a faixa de 80% da nominal por 10 segundos. Se em todos os casos a saída permanecer dentro dos limites de funcionamento, o equipamento pode ser considerado de acordo com a curva ITI CBEMA.

3. Estado da Arte nas Técnicas de Correção dos Afundamentos de Tensão

Inúmeras soluções tem sido propostas, na literatura internacional, para redução ou eliminação dos efeitos nocivos dos *Sags*. A escolha da opção mais conveniente depende, sem dúvida nenhuma, do caso específico da aplicação estudada e também de uma análise completa do problema. Algumas vezes a solução nem requer a utilização de um equipamento de correção do *Sag*, bastando simplesmente algumas recalibrações das proteções existentes na alimentação da própria carga sensível. A melhor alternativa, portanto, deve partir de um estudo detalhado da qualidade de energia no ponto de conexão da carga na rede, o que permitirá a escolha da solução mais apropriada para melhorar a imunidade à ocorrência do *Sag*.

Atualmente existem no mundo fabricantes de equipamentos para correção de *Sags* de grande magnitude (>50%) e para altas potências (alguns MVA). Nomes como **GE Industrial Systems** (www.geindustrial.com) com o equipamento PQVR *Power Quality Voltage Regulator* e também a **ABB Power Electronics** (www.abb.ch) com a linha de equipamentos *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), são alguns exemplos típicos para altas potências. Existem também inúmeros outros fabricantes de equipamentos de potências menores (desde 1kVA até algumas centenas de kVA), tais como **Softswitching Technologies Inc.** (www.softswitch.com) com a linha de equipamentos *Dynamic Sag Correctors* (DySC), a empresa **SatCom Power Systems** (www.inverpower.com) com a linha SVB *Static Voltage Booster*, e a empresa **Dip-proofing Technologies Inc.** (www.dipproof.com) com o equipamento *Voltage Dip-Proofing Inverter*. Eles utilizam topologias similares entre si e sempre aproveitam, de alguma maneira, a tensão residual existente na entrada, durante a ocorrência de distúrbios, para trazer a tensão de saída para a faixa normal de trabalho.

Pode-se separar o conjunto das soluções possíveis em dois grandes grupos :

1. As soluções **sem** nenhuma forma de armazenamento interno de energia, aproveitando somente a tensão residual da rede durante o evento,
2. As soluções **com** armazenamento interno de energia, que dão condições de operação contínua da carga durante a ocorrência dos distúrbios.

3.1 Soluções Sem Nenhuma Forma de Armazenamento Interno de Energia

3.1.1 Reguladores de Tensão

Alguns dos distúrbios na tensão de rede, excetuando-se *Sags* que geram tensões abaixo de 0.8 pu (reguladores de mercado normalmente são ineficazes/inadequados para esta situação), podem ser corrigidos através da aplicação dos reguladores de tensão. Praticamente todos os reguladores existentes atualmente no mercado brasileiro são do tipo eletrônico. Os reguladores de tensão mais antigos eram eletromecânicos, operados através de motores acionando contatos deslizantes sobre taps de transformador, sendo adequados apenas para as variações lentas da tensão de rede durante o dia, mas inadequados para corrigir variações rápidas da tensão. Os reguladores eletrônicos de tensão são divididos genericamente em duas classes, os de transformadores com taps (*tapchangers*) e os com transformadores incrementais (*Buck-Boost*) [6], os quais são discutidos a seguir :

3.1.1.1 Reguladores de Tensão Através de Taps em Transformador (*TapChanger*)

O tipo *tapchanger* é mostrado na Figura 8 e seu funcionamento está baseado na comutação dos taps do transformador, selecionados de tal maneira a manter a tensão de saída dentro da faixa permitida. O número de taps determina a amplitude do passo de tensão de saída e a faixa de regulação de tensão de entrada, e normalmente utiliza-se um número de taps superior a 6. Os taps são usualmente de 5 a 10% da tensão nominal e a resposta dinâmica do regulador de 1 a 5 ciclos de rede. Uma das características deste tipo de regulador é sua baixa impedância série (impedância do transformador ou auto-transformador), além da pouca introdução de distorção harmônica na tensão de alimentação da carga mesmo quando alimentando cargas fortemente não lineares . Apresenta também alta capacidade de sobrecarga de curta duração, permitindo altas correntes de *inrush* de partida.

Figura 8 Regulador de Tensão do Tipo *TapChanger*

3.1.1.2 Reguladores de Tensão Através de Taps em Transformador Incremental (Soma-Subtrai)

Outro tipo de regulador eletrônico comum é o que utiliza um transformador incremental, como ilustrado na Figura 9. Seu funcionamento baseia-se no controle da tensão no primário do transformador, através de chaves estáticas, cujo secundário encontra-se inserido entre a rede e a carga (ligação série). A tensão da rede é aplicada na entrada do regulador que incrementa (*boost*) ou decrementa (*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 à 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 $\pm 3\%$.

Figura 9 Regulador de Tensão “Soma/Subtrai”

3.1.1.3 Reguladores de Tensão do Tipo CVT (*Constant Voltage Transformer*)

Esta classe de regulador usa transformador com núcleo saturado, contendo internamente um circuito ressonante do tipo tanque constituído pela própria indutância de magnetização do transformador e um capacitor [25] , [26] .

Figura 10 Regulador de Tensão Ferroressonante CVT

A Figura 10 representa uma topologia simplificada do tipo de regulador ferroressonante. O regulador mantém a saída aproximadamente constante para uma faixa típica de entrada de $\pm 20\%$. Uma das características destes

reguladores é a sua alta impedância série que não permite sobrecarga maiores que 200% da corrente nominal, fazendo com que, nesta situação, a tensão de saída abaixe a ponto de gerar subtensão na carga, o que pode causar seu mau funcionamento. Por esta razão estes equipamentos devem ser sobredimensionados caso tenham que alimentar carga com forte corrente de partida ou *inrush*.

Os CVTs consomem corrente o tempo todo mesmo estando em vazio. Esta corrente é devido ao circuito ressonante interno e faz com que sua eficiência caia e o fator de potência fique baixo (tanto indutivo como capacitivo) à medida que a tensão de entrada se afasta da nominal . Além disso, devido à presença de entreferros no transformador, estes equipamentos costumam ser ruidosos se mal impregnados .

3.2 Soluções Com Armazenamento Interno de Energia

3.2.1 Fontes Ininterruptas de Energia Convencionais

Fontes Ininterruptas de Energia (*UPS – Uninterruptible Power Supply*), também conhecidas no Brasil como *Nobreaks*, caracterizam-se por manter a tensão na carga crítica independente da condição da tensão de rede, mesmo em condição de falta total na alimentação da rede. As fontes ininterruptas apresentam grande variedade de configurações e tecnologias, dividindo-se em duas grandes categorias: as eletromecânicas (rotativas) e as estáticas (eletrônicas) .

3.2.1.1 Fontes Ininterruptas Eletromecânicas

As fontes ininterruptas eletromecânicas, também chamadas de fontes ininterruptas Motor-Gerador, com sua topologia mais comum mostrada na Figura 11, que consiste de um motor de corrente contínua (CC) acionando gerador de corrente alternada (CA), o qual alimenta a carga crítica. Quando a rede está presente e dentro da faixa normal de trabalho, o retificador alimenta o motor CC e mantém as baterias carregadas. Quando a tensão se encontra fora das condições de trabalho, o motor CC é automaticamente alimentado pelas baterias mantendo a carga sempre alimentada. Este tipo de solução é muito eficaz em caso de *Sags* ou interrupções de curta duração que normalmente são absorvidas pela própria inércia mecânica do sistema.

Figura 11 Fonte Ininterrupta Eletromecânica – Retificador com motor CC

3.2.1.2 Fontes Ininterruptas Estáticas (UPS)

3.2.1.2.1 Standby UPS (*Short_break*) com Tempo de Transferência Intrínseco

Este tipo de fonte ininterrupta apresenta uma topologia interativa com a rede, de tal forma que a carga, a maior parte do tempo, é alimentada diretamente

pela rede que é corrigida por um estabilizador do tipo *tapchanger* mantendo a tensão na sua saída dentro da faixa admissível pela carga ($\pm 10\%$ ITI CBEMA) . A Figura 12 mostra a configuração típica deste tipo de equipamento. Quando da ocorrência de falha da rede, seja um *Sag* ou uma interrupção de alimentação, a carga é transferida para o inversor que gera tensão de amplitude e forma satisfatórias (não obrigatoriamente senoidal) para alimentar a carga a partir das baterias que são mantidas carregadas durante o período em que a rede se encontra presente e normal.

Figura 12 Fonte Ininterrupta Com Tempo de Transferência

Esta topologia permite uma série de economias e simplificações de projeto. Primeiramente o inversor não precisa ser dimensionado para alimentar a carga continuamente, ele deve operar somente durante o período de falha na rede, o que representa na prática um período de aproximadamente 15 minutos ou menos. Em segundo lugar o bloco do retificador tem que ser dimensionado somente para carregar as baterias, não precisando suportar a carga plena. O rendimento global deste tipo de equipamento é alto ($> 90\%$) visto que a carga é, na maior parte do tempo, alimentada diretamente pela rede, tendo somente as perdas associadas ao estabilizador e ao carregador de baterias. Cuidado maior, neste tipo de topologia, deve ser tomado com relação ao tempo de detecção de falha de rede mais o tempo de

transferência para o inversor, uma vez que, para perda de alimentação muito longa ($> 20\text{ms}$ ITI CBEMA), estes poderão ser inaceitáveis pela carga crítica. A aplicação bastante comum para este tipo de equipamento é na alimentação de sistemas eletrônicos que possuam fontes chaveadas em sua entrada de alimentação (computadores pessoais por exemplo), fontes estas que toleram pequenas interrupções de energia, e além de suportarem degradação de alimentação de acordo com a curva ITI CBEMA, aceitam tensões de entrada bem fora da faixa normal de trabalho da maioria dos equipamentos elétricos (-22% a $+14\%$ típico) [13], [14]. Vide especificação típica de fonte chaveada no anexo B.

3.2.1.2.2 Online UPS (Nobreak) Com Dupla Conversão de Energia e Sem Tempo de Transferência

As fontes ininterruptas sem tempo de transferência (*online UPS*) se enquadram em 2 grandes grupos, as de dupla conversão (Figura 13) e as interativas com a rede (Figura 14). Nas fontes ininterruptas de dupla conversão (retificador/inversor) a energia primeiramente é convertida em CC e aplicada a um barramento . Este barramento é usado para carregar as baterias e alimentar a entrada do inversor cuja saída alimenta a carga crítica, desta forma a carga permanecerá sempre alimentada dentro da faixa nominal mesmo na ocorrência de *Sags* ou interrupções da rede de alimentação do sistema.

Figura 13 Fonte Ininterrupta – Retificador/Carregador

3.2.1.2.3 Line Interactive UPS (Nobreak Interativo com a Rede)

Nas fontes ininterruptas interativas com a rede ou de simples conversão, a tensão de rede não é retificada e alimenta a carga crítica diretamente através de um transformador de três enrolamentos (transformador *Triport*). A alimentação da carga é feita diretamente pela rede através do primário do transformador (1) como mostrado na Figura 14, quando a rede está normal e dentro da faixa de operação (carga é conectada secundário (2) do transformador *Triport*). Quando da ocorrência de falha da rede devido a um *Sag* ou uma interrupção, o inversor que alimenta o terciário do transformador (3) assume a carga fazendo-se a transferência da fonte de energia (rede → baterias) via fluxo magnético do núcleo do transformador. Este tipo de topologia é toda centrada e dependente do sincronismo entre inversor e rede .

Figura 14 Fonte Ininterrupta Interativa Com a Rede

3.2.2 Outras Fontes Ininterruptas de Energia Com Tecnologia em Consolidação

A forma de armazenamento de energia mais utilizada nos dias de hoje em fontes ininterruptas é, sem nenhuma dúvida, através de baterias que, apesar de seus inconvenientes para o meio ambiente, ainda apresenta a melhor relação custo/energia armazenada. Estudos para aprimoramento de novas formas de armazenamento estão sendo feitos por inúmeros grupos de pesquisas em vários países, e se concentram basicamente nas seguintes tecnologias de armazenamento :

- Armazenamento de energia em Volantes de Inércia (*Flywheels*) : utiliza a energia mecânica armazenada em volantes de inércia em altas rotações, que é convertida em energia elétrica para alimentar o barramento CC da fonte ininterrupta durante a ocorrência do distúrbio na rede. A empresa *Active Power Inc.* (www.activepower.com), com a família de equipamentos *CleanSource flywheel energy storage*, disponibiliza comercialmente equipamentos que utilizam esta forma de armazenamento de energia.
- Armazenamento de energia em indutores construídos com supercondutores: aproveitam a característica dos supercondutores não apresentarem perdas resistivas em temperaturas próximas do zero absoluto, podendo armazenar centenas de kiloAmpères com perda Joule desprezível e disponibilizar esta energia armazenada no instante da ocorrência do distúrbio na rede. A empresa *American Superconductor* (www.amsup.com) em conjunto com a *GE Industrial Systems* (www.geindustrial.com) oferecem comercialmente os equipamentos da família PQVR, de alguns MVAs, que utilizam o armazenamento de energia em supercondutores.
- Célula Combustível (*Fuel Cell*) : produz energia elétrica, através de processo químico, a partir do hidrogênio e oxigênio (do ar). Dependendo da fonte de origem do hidrogênio elas podem ser consideradas limpas do ponto

de vista do meio ambiente. Pelo investimento pesado que os países avançados vem fazendo no desenvolvimento desta tecnologia, ela poderá, em futuro próximo, se tornar uma opção bastante interessante de armazenamento de energia para fontes ininterruptas.

- Super-capacitores no barramento CC de conversores : A disponibilidade recente de super-capacitores no mercado de componentes a um preço competitivo tornou possível o projeto de inversores alimentados do lado CC com capacitores de valores de alguns milhares de Farads. Este valor elevado de capacitância possibilita o armazenamento de energia nestes dispositivos em quantidade compatíveis com cargas reais. Com dimensionamento adequado, dependendo é claro da potência da carga sensível, pode-se conseguir manter a tensão na carga dentro da faixa admitida pela curva ITI CBEMA durante alguns segundos em que a rede sofre um *Sag* ou uma interrupção de curta duração. Uma aplicação de super-capacitores que vem sendo pesquisada e utilizada na prática é em inversores para acionamento e controle de velocidade de motores de indução *ASD Adjustable Speed Drives* [10], reduzindo-se a susceptibilidade destes equipamentos aos *Sags* e interrupções rápidas de energia. As empresas *Maxwell Technologies Inc.* (www.maxwell.com) e a *Evans Capacitors Company* (www.evanscap.com) apresentam linhas de super-capacitores que vão desde 10F/2.5V até 3.9kF/80V.

A Tabela 2 fornece uma idéia geral do desempenho dos vários tipos de solução para os problemas de qualidade de energia, mostrando para cada tipo de distúrbio a aplicabilidade ou não de cada equipamento [6] .

Condição da Qualidade de Energia		Tecnologia de Condicionamento de Energia								
		Supressor de Surto	Filtro EMI/RFI	Transformador Isolador	Regulador de Tensão Eletrônico	Regulador de Tensão Ferroressonante	Motor Gerador	Fonte Ininterrupta Standby	Fonte Ininterrupta On Line	Grupo Motor/Gerador Diesel
Surto de Tensão	Modo Comum	●		■	●	■	■	●	●	
	Modo Diferencial	●			●	■	■	●	■
Ruído	Modo Comum		●	■	●	■	■	●	●	
	Modo Diferencial		●	●	●	■	■	●	■
Notches				●		■	■		■
Distorsão da Tensão						●	■		●
Sag					●	●	●	●	■
Swell					●	■	■	●	■
Subtensão					■	■	■	●	●
Sobretensão					■	■	■	●	●
Interrupção Momentanea							●	■	■
Interrupção Longa										■
Variação de Frequencia								●	■	●

- É razoável supor que a condição indicada de qualidade de energia seja corrigida plenamente com a tecnologia de condicionamento de energia sugerida
- A tecnologia sugerida pode ou não resolver plenamente a condição de qualidade de energia indicada, dependendo do desempenho do equipamento aplicado na solução

Tabela 2 Resumo do Desempenho da Vários Tipos de Tecnologia em Função do Problema de Qualidade de Energia Indicado [6]

4. Projeto de Recuperador para Afundamentos de Tensão

A maioria dos *Sags*, em torno de 92% das ocorrências de distúrbios de qualidade de energia, apresentam magnitude superior a 0.4 pu de tensão e com duração menor que 2 segundos [4],[27],[28] (Figura 6). Os Reguladores de Tensão convencionais (Estabilizadores de Tensão) descritos no item 3, que normalmente operam corretamente apenas para tensão de entrada na faixa de +/-15% não atendem à necessidade de correção da tensão durante grande parte dos distúrbios, pois falham na ocorrência dos *Sags* mais profundos.

A solução proposta neste trabalho não utiliza nenhuma forma de armazenamento interno de energia. A recuperação da tensão de rede é feita aproveitando-se somente a tensão residual durante a ocorrência do *Sag*, trazendo-a, na saída do equipamento, em no máximo 20ms, para a faixa de 70% a 110% da tensão nominal, podendo mantê-la após isso por no máximo 500ms (curva ITI CBEMA) e daí então para a faixa de +/- 10% da nominal. Com a utilização desta estratégia de recuperação da tensão proposta, certamente a carga sensível não deverá apresentar mau funcionamento, já que será mantida a tensão dentro dos limites especificados pela curva ITI CBEMA.

O *Sag* típico tem o formato da Figura 15, com afundamento do valor eficaz por alguns ciclos de rede e logo após a volta deste valor à faixa normal de trabalho ($\pm 10\%$ da tensão nominal). O recuperador proposto deverá corrigir o afundamento do sinal de tensão trazendo-o para dentro dos limites do envelope especificado pela curva ITI CBEMA, de tal forma que a carga não apresente nenhum mau funcionamento durante a ocorrência do distúrbio .

Figura 15 Formato Típico de um *Sag*

O projeto proposto neste trabalho é o de um equipamento de baixo custo relativo, robusto e de atuação rápida, sendo constituído de um transformador Soma-Subtrai com vários taps em seu primário, alimentado pela tensão residual da rede e cujo secundário está conectado em série entre a alimentação e a carga, como mostrado no esquema elétrico simplificado da Figura 16. A tensão secundária se soma ou subtrai à da rede, recuperando a tensão de alimentação da carga, trazendo-a para os níveis, tanto de amplitude quanto de duração, requeridos pela curva ITI CBEMA. A regulação da tensão de saída é realizada por taps (degraus de tensão), através de chaves estáticas (SW2...SW6) implementadas com 2 tiristores em anti-paralelo conectadas uma em cada tap do primário do transformador Soma-Subtrai, controladas por uma eletrônica rápida com resposta ≤ 1 ciclo (16.67 ms.) . No lado do secundário do transformador Soma-Subtrai também existe uma chave estática (SW1) conectada diretamente nos seus terminais que funciona como *Bypass*, curto-circuitando ou não este enrolamento . A Figura 17 mostra o esquema elétrico do equipamento mais detalhado do recuperador dinâmico de tensão utilizando a topologia Soma-Subtrai (item 3.1.1.2).

Figura 16 Esquema Elétrico Simplificado do Recuperador

Existe a opção de se usar a topologia do regulador do tipo *tapchanger*, descrito em linhas gerais no item 3.1.1.1, obtendo-se um resultado equivalente ao da topologia adotada, Soma-Subtrai. A vantagem desta última é que em condições normais de rede, isto é, $0.9\text{pu} < V_i < 1.1\text{pu}$, o magnético (transformador Soma-Subtrai) está completamente desligado não gerando nenhum reativo ou perda magnética para o sistema. Do ponto de vista de sobretensões nas chaves estáticas conectadas nos taps extremos dos magnéticos das duas topologias e de sobrecorrentes na mudança do *Bypass* para alguma chave estática e vice-versa, os comportamentos destas duas montagens são equivalentes.

Figura 17 Esquema Elétrico do Recuperador Dinâmico de Tensão

O funcionamento do Recuperador Dinâmico de Tensão é simples. Quando a tensão de rede na entrada está dentro da faixa normal de trabalho ($\pm 10\%$ de acordo com a curva ITI CBEMA) a chave estática SW1 *Bypass* permanece ligada transferindo a tensão de rede diretamente à carga. No instante que ocorre um afundamento na tensão de rede ($V_i < 0.9\text{pu}$), a placa de controle do equipamento aciona a chave SW4 do primário do transformador Soma-Subtrai e desliga simultaneamente a SW1 *Bypass*, permitindo que o secundário do transformador insira, entre a rede e a carga, uma tensão em fase com a da rede, de tal forma que a tensão de saída (dada pela soma fasorial da tensão de rede e a tensão do secundário do transformador Soma-Subtrai) caia dentro da faixa de 0.7 pu à 1.2 pu da nominal, região esta que é tolerada pela curva ITI CBEMA durante 500ms. Depois de estabilizada a tensão do evento, a placa de controle decide qual o tap mais conveniente que deve ser acionado para manter a tensão de saída dentro da faixa de $\pm 10\%$. Após o término do *Sag*, detectado pela elevação da tensão de saída ($> 400\text{V}$ por tempo maior que 1ms), a chave SW1 *Bypass* é acionada instantaneamente fazendo com que a tensão de saída se iguale novamente à tensão de entrada. Quando ocorrer um evento de aumento da tensão de rede (*Swell*), acima da faixa de $+ 10\%$ da nominal, o *Bypass* SW1 é desligado e acionada a chave SW2 que insere uma tensão secundária em contra fase (180°) à da rede (*Subtrai*) buscando manter a tensão de saída dentro da faixa de $\pm 10\%$ da nominal.

Como pode ser observado na Figura 17 o equipamento proposto é constituído pelos seguintes componentes:

- a) Transformador Soma-Subtrai : com o enrolamento secundário inserido entre a alimentação e a carga, e o enrolamento primário com um center-tap ligado ao comum da entrada de alimentação e mais cinco taps onde estão conectadas as chaves estáticas.
- b) Chaves Estáticas : constituídas por 2 tiristores em anti-paralelo entre cada tap do enrolamento primário e o terminal comum da fonte. Uma chave adicional é utilizada como *Bypass* no enrolamento secundário.

- c) Driver sem zero de corrente: com transformadores de pulso para acionar os tiristores da chave estática de *Bypass* (SW1).
- d) Driver com detetor de zero de corrente : além dos transformadores de pulso, possui eletrônica de detecção do *zerocrossing* da corrente através dos tiristores em anti-paralelo correspondentes às chaves SW2 à SW6 (vide anexo A).
- e) Placa de controle MicroProcessada : Executa o software responsável por todo controle do equipamento. A partir do sinal de tensão medido na entrada e na carga, a rotina do software gera os sinais de controle de todas as chaves estáticas.

A operação e estratégia de controle do equipamento proposto basicamente é :

1. Faz-se o sensoramento da tensão de entrada através de um transformador de sinal que simultaneamente isola galvanicamente e alimenta a placa eletrônica. A tensão de saída também será monitorada através de outro transformador de sinal específico para este fim.
2. Como os tiristores somente cortam efetivamente na passagem do zero da corrente (*zerocrossing*), a placa de controle do equipamento somente disparará as chaves estáticas colocadas nos taps do primário do transformador Soma-Subtrai após este instante, o que pode levar até $\frac{1}{2}$ ciclo de rede. O driver das chaves estáticas conectadas nos taps do primário do transformador deve conter um detetor de zero de corrente monitorado através da tensão entre anodo e catodo dos dois tiristores em anti-paralelo. O circuito eletrônico para esse driver é apresentado no anexo A. Esta estratégia de detecção de zero de corrente permite que não haja curto de transferência entre uma chave e outra quando da mudança de tap no primário do transformador.
3. No término do *Sag* , a tensão de rede volta ao seu nível normal de operação ($\pm 10\%$ da tensão nominal). O transformador Soma-Subtrai que estava em algum tap selecionado pela placa de controle, continuará somando a tensão do

secundário e, dessa forma, provocando momentaneamente a elevação de tensão na saída do recuperador . Este efeito será detectado pelo controle que, caso a tensão de saída ultrapasse 400Vp por mais de 1ms, acionará instantaneamente a chave estática SW1 *Bypass*, sem esperar a passagem pelo zero da corrente, forçando desta maneira a tensão de saída a acompanhar a tensão de entrada. Ocorrerá nesta situação uma sobrecorrente com duração menor que $\frac{1}{2}$ ciclo, limitada pela impedância de curto-circuito do transformador Soma-Subtrai mais a impedância série do sistema de alimentação. Os tiristores do recuperador devem obrigatoriamente suportar esta sobrecorrente gerada ao término do *Sag* , devendo sua corrente direta de surto (*ITSM*) ser maior que este nível de corrente de curto .

4. A envoltória da curva ITI CBEMA (vide Figura 7), em sua parte superior, admite uma sobretensão de 40% por um período de tempo de 3ms. Isto resulta em uma tensão instantânea máxima de 435Vp para a rede de 220 Vrms ($1.4 \times 220 \text{Vrms} \times 1.41 = 435 \text{Vp}$). Por esta razão fixou-se o valor conservativo de 400Vp da tensão de saída do recuperador durante 1ms para disparo da chave *Bypass* e retorno à condição normal de operação em rede.

5. A estratégia de detecção do *Sag* deve ser feita a partir da aquisição de 2 picos de senóide de rede consecutivos, isto para evitar o acionamento da correção da tensão indevidamente, o que provocaria um transitório indesejado na tensão da carga. A liberdade que a curva ITI CBEMA tolera, aceitando zero de tensão por 20ms, permite ao controle do recuperador certificar-se com segurança do efetivo afundamento da tensão de rede pela confirmação do pico de senóide subsequente ao início do evento.

6. Uma vez decidido pelo controle do recuperador que deve transferir do *Bypass* para alguma chave estática do primário do transformador Soma-Subtrai , isto é, ocorreu efetivamente um *Sag*, num primeiro instante o recuperador aciona a chave SW4 (reta 5 da Figura 18), pois nesta posição a tensão de saída deverá estar aproximadamente dentro da faixa de 70% à 120% da tensão nominal, independente

da magnitude do *Sag*. Esta estratégia de acionar a SW4 no início de operação do recuperador tem como vantagem o intervalo de tempo de até 500ms para decidir qual tap realmente deve ser acionado para corrigir o evento em curso, evitando mais eventuais transitórios na tensão de saída.

4.1 Roteiro para Cálculo dos Componentes de Potência do Recuperador

Para ilustrar o procedimento de cálculo será esboçado um anteprojeto de recuperador de 135kVA (3 x 45kVA) em 220V.

4.1.1 Chaves Estáticas

Será admitido o uso de blocos de tiristores do tipo ADD - *power modules* duplos (www.irf.com), constituídos por 2 tiristores , isolados da base permitindo montagem de vários blocos sobre o mesmo dissipador de calor. Estes blocos de tiristores são muito utilizados atualmente e devido a isso apresentam custo bastante competitivo. Um bloco típico de 95A AV (valor médio) quando usado como *AC switch* admite até 210 A RMS, que em 220V atinge potência por fase de 45kVA, dando potência trifásica total de 135kVA, máximo suportável por este bloco típico.

4.1.2 Anteprojeto do Transformador Soma-Subtrai

a) Determinação da Relação de Tensões Primário/Secundário

O método de cálculo das tensões dos taps do transformador Soma-Subtrai do recuperador utiliza o gráfico da Figura 18, onde o eixo vertical representa a tensão de saída V_o e o eixo horizontal a tensão de entrada V_i , antes do secundário do referido transformador. Nessa figura a região mais interna, delimitada pelas 2 linhas horizontais vermelhas, representa a tensão de regime permanente admissível de $\pm 10\%$ em torno da nominal. Já a região mais externa, delimitada pelas linhas horizontais pretas, de -30% a $+20\%$ em torno da nominal, é aceita, segundo a curva ITI CBEMA (Figura 7), até um período de 500ms.

A tensão de saída do recuperador é igual à tensão de entrada mais ou menos a tensão do secundário do transformador Soma-Subtrai, isto fornece uma relação linear entre estas duas tensões, como indicado pela Equação (2) :

$$V_o = V_i \pm k_n \times V_i = V_i \times (1 \pm k_n) \quad (2)$$

onde : k_n é a relação de espiras primário/secundário do tap n do transformador

V_o é a tensão de saída do equipamento,

V_i é a tensão de entrada de rede

Se V_o for o eixo vertical e V_i o eixo horizontal o gráfico será uma reta passando pela origem, cuja inclinação dependerá do valor de $(1 \pm k_n)$, como mostrado na Figura 18. A determinação dos valores dos k_n , bem como a localização dos pontos de operação onde uma comutação de tap deve ocorrer, podem ser obtidas a partir da restrição de $\pm 10\%$ (em regime permanente) para a tensão de saída (linhas horizontais vermelhas da Figura 18). Enquanto a tensão de entrada estiver na faixa $0.9 \text{ pu} < V_i < 1.1 \text{ pu}$ o recuperador deve operar sobre a reta 1 mostrada na Figura 18 , que corresponde à $k_1 = 0$ (tensão de saída igual à tensão de entrada). Caso a tensão de entrada vá sendo reduzida, ao atingir 0.9 pu (ponto A da Figura 18) o recuperador deve comutar o tap de forma a passar a operar no ponto C, sobre a reta 3. Essa reta apresenta inclinação de 1.22 ($1.1/0.9$), o que implica em $k_3 = 0.22$. Pode-se continuar esse processo obtendo-se os demais taps como indicado na Tabela 3.

Quando a tensão de entrada estiver dentro da faixa de $\pm 10\%$, a chave estática de *Bypass* estará ligada e a tensão de saída será igual à de entrada a menos da queda nos tiristores resultando $(1 + K_1) = 1$.

Reta n	Ponto	Vi	Vo	(1+Kn)	Kn	Operação do Transformador
1	A	1.1	1.1	1	0	Nem Soma e nem Subtrai
2	B	1.1	0.9	0.82	0.18	Subtrai
3	C	0.9	1.1	1.22	0.22	Soma
3	D	0.736	0.9	1.22	0.22	Soma
4	E	0.736	1.1	1.49	0.49	Soma
4	F	0.6	0.9	1.49	0.49	Soma
5	G	0.6	1.1	1.83	0.83	Soma
5	H	0.49	0.9	1.83	0.83	Soma
6	I	0.49	1.1	2.24	1.24	Soma
6	Linf	0.4	0.9	2.224	1.24	Soma
2	Lsup	1.34	1.1	0.82	0.18	Subtrai

Tabela 3 Cálculo dos Valores de Kn

Os pontos Linf e Lsup determinam os limites de tensão de rede nos quais o Recuperador de Tensão opera corretamente, para baixo é de -60% da tensão nominal de rede e para cima é de +34% l.

Os valores calculados não consideram a condição de carga, mas sua influência é a de deslocar a faixa de operação para cima de um valor equivalente ao da queda de tensão na impedância em série com o transformador mais a queda na impedância de curto do sistema de alimentação no ponto onde o equipamento se situa.

Figura 18 Gráfico da Relação entre Tensão de Entrada e Saída do Recuperador

b) Cálculo dos Taps do Transformador Soma-Subtrai

Os valores de K_n apresentados na Tabela 3 permitem determinar a relação de espiras de cada tap do transformador Soma-Subtrai da Figura 19. Considerando, por facilidade, o número de espiras do secundário igual à 100 espiras, obtém-se a Tabela 4 a seguir:

Enrolamento	Reta n	K_n	Nº de Espiras
entre tap1 e 2	6	1.23	81
entre tap1 e 3	5	0.83	121
entre tap 1 e 4	4	0.49	204
entre tap 1 e 5	3	0.22	455
entre tap 0 e 1	2	0.18	556

Tabela 4 Número de Espiras do Transformador Soma-Subtrai

Figura 19 Relação de Espiras do Transformador “Soma-Subtrai”

c) Impedância Série Total

A impedância total série (L_{trafo} , R_{trafo}) utilizada no modelo de simulação Figura 22, com valor de 15% da impedância de base ($S_{base}=45kVA$ e $V_{base}=220V$), foi ajustada de tal forma que as maiores sobrecorrentes observadas durante a comutação do *Bypass* para alguma chave estática do primário do transformador Soma-Subtrai e vice-versa, não ultrapassassem 1.7 kAp, valor este limite dos módulos de tiristores típicos (ADD - *power modules*) a serem usados no recuperador proposto.

5. Simulação do Desempenho do Recuperador de Tensão

5.1 Análise da Regulação Dinâmica do Recuperador de Tensão

O circuito de potência do equipamento proposto foi simulado, de acordo com o esquema elétrico da Figura 22, utilizando o programa de simulação **PSPICE** incorporado dentro do ambiente do aplicativo **ORCAD versão 9.1**. A Figura 20 mostra o funcionamento do recuperador de tensão quando da ocorrência de um afundamento da tensão de rede (V_i) de 50% no instante 20ms e seu retorno à condição normal em 100ms. Antes da ocorrência do evento, a saída do recuperador (V_o) acompanha o sinal de entrada (V_i). Quando o *Sag* ocorre, logo após o segundo pico da tensão com valor de 0.5 pu, o recuperador atua desligando a chave SW1 *Bypass* e acionando a chave SW3, fazendo a correção máxima e trazendo a tensão de saída para a faixa de $\pm 10\%$ da nominal. A situação de carga simulada é de 0.5 pu, 50% indutiva e 50% resistiva.

Figura 20 Regulação Dinâmica do Recuperador para *Sag* de 50%

O transitório que ocorre na tensão de saída devido ao fechamento da chave *Bypass* quando a tensão de saída ultrapassa aproximadamente 400Vp tem um formato típico ao da Figura 21 .

Figura 21 Detalhe da Volta de SW3 para o Bypass

O fato de a impedância de curto-circuito do transformador Soma-Subtrai variar conforme o tap selecionado não deve afetar significativamente os resultados obtidos nas simulações adiante pois a impedância total série utilizada (15%) é muito maior que os (3 +/- 1) % valores típicos da impedância de curto-circuito do transformador Soma-Subtrai sozinho, sendo que L_{trafo} e R_{trafo} representam efetivamente a impedância total série, isto é, a de curto-circuito do transformador Soma-Subtrai mais uma impedância complementar colocada em série com o transformador ideal no modelo simulado.

Figura 22 Esquema Elétrico Simulado no PSpice 9.1

A Figura 23 a seguir mostra o bloco hierárquico usado no simulador *PSpice9.1* para as chaves estáticas do circuito da Figura 22 , já incluindo circuito limitador de surto (*snubber*) dentro do próprio bloco.

Figura 23 Modelo para a Chave Estática PSpice 9.1

5.2 Análise da Regulação Estática do Recuperador de Tensão

Com o objetivo de determinar a variação de tensão devido à aplicação de carga ao Recuperador (Regulação Estática), foi feita uma simulação conforme Figura 24, alimentando-se o circuito com uma fonte de tensão de amplitude 100 Vp e duas cargas acionadas através das chaves, SW1 e SW2, com fechamentos programados para 25 ms e 50 ms respectivamente. Mediram-se os picos das senóides antes do fechamento das duas chaves SW1 e SW2, situação em vazio, logo após o fechamento de SW1, com SW2 aberta, situação de meia carga e finalmente com as duas chaves fechadas, situação de carga plena. Para representar a impedância do transformador considerou-se uma impedância em série com o transformador Soma-Subtrai de 15%, sendo dividida igualmente entre parte resistiva (R_{trafo}) e indutiva (L_{trafo}). Os resultados obtidos nessa simulação são apresentados na Figura 25 , Figura 26 e na Tabela 5, onde pode-se concluir que o desvio de tensão de vazio para plena carga, devido à impedância em série com transformador Soma-Subtrai foi da ordem de 13.9%, para carga totalmente resistiva e de 18% para cargas 50% resistiva e 50% indutiva. Como o recuperador deverá trabalhar com controle de tensão de saída em malha fechada, a variação acima citada somente deslocará a faixa mais baixa da tensão de entrada dos valores medidos, não afetando, devido ao controle realimentado, a tensão de saída.

Condição de Carga	Queda de Tensão na Impedância em série com Transformador	
	100% Resistiva	50% Resist + 50% Ind
½ Carga	7.20%	9.90%
Plena Carga	13.9%	18.0%

Tabela 5 Queda de Tensão na Impedância Série

Figura 24 Circuito Utilizado para Determinar a Regulação Estática do Recuperador

Figura 25 Tensão de Saída (V_o) e Tensão de Entrada (V_i) com Carga 100% Resistiva

Figura 26 Tensão de Saída (V_o) e Tensão de Entrada (V_i) com Carga 50% Indutiva + 50% Resistiva

5.3 Simulação Dinâmica do Circuito de Potência do Recuperador de Tensão

O objetivo das simulações apresentadas a seguir foi o de observar as sobrecorrentes de comutação entre taps do transformador Soma-Subtrai (inicialmente sem a utilização do detetor de passagem por zero de corrente), e as sobrecorrentes de transferência do *Bypass* para um tap do primário do transformador e vice-versa. Procurou-se também quantificar as sobretensões ocorridas na retransferência para a rede, ou seja, a elevação de tensão que ocorre quando a rede volta para a faixa normal e o transformador Soma-Subtrai ainda está inserido entre a rede e a saída. Foi simulado ainda a situação com carga não linear e observou-se o seu efeito no comportamento do recuperador.

5.3.1 Análise de Sobrecorrente na Transferência da Chave *Bypass* SW1 para a Chave SW4

Aplicando-se um afundamento de tensão de 50% na tensão de entrada V_i , no instante de 20ms, simulou-se os chaveamentos que ocorrem nas chaves estáticas do circuito de potência, quais sejam : abertura da chave *Bypass* (SW1) e fechamento da chave SW4 no tap do primário do transformador Soma-Subtrai. De forma inversa foi feita a retransferência da chave SW4 para o *Bypass* quando a tensão de entrada voltou ao normal (1.0pu), isto no instante de tempo 60ms, como mostrado na Figura 27. Pesquisou-se o pior instante para a retransferência após o retorno da tensão de entrada ao normal (64.2ms) observando-se o pico da corrente nas chaves estáticas. O pico mais alto observado (1.41kA) ocorreu quando se dispara o acionamento da chave de *Bypass* logo após a passagem pelo zero da corrente na chave SW4, como visto Figura 28 e Figura 29.

Figura 27 Transferencia da Chave *Bypass* para a SW4 e vice-versa

Figura 28 Pico de Corrente na Transferência da Chave SW4 para a de *Bypass*

Figura 29 Detalhe de Acionamento do Bypass Logo Após Passagem pelo Zero de Isw4

5.3.2 Análise da Sobrecorrente na Transferência entre Chaves do Primário do Transformador Soma-Subtrai - da Chave SW3 para a ChaveSW6

Com objetivo de observar a sobrecorrente que ocorreria na comutação entre chaves do primário do transformador Soma-Subtrai, caso não se utilizasse o detetor de *zerocrossing* de corrente no driver de acionamento das chaves, foi feita a simulação mostrada na Figura 30 e o pior caso conseguido apresentou um pico de 880 A. É importante salientar que a duração do surto de corrente dura no máximo $\frac{1}{2}$ ciclo, uma vez que para extinguir a corrente nos tiristores é necessário esperar a próxima passagem pelo zero da corrente, após ter sido retirado o sinal de gatilho da respectiva chave. O surto de corrente simulado não deverá ocorrer em condições normais de funcionamento pois o equipamento deverá ter, no *driver* de acionamento das chaves do primário do transformador, um detetor de *zerocrossing* de corrente antes de acionar a chave estática seguinte [vide Anexo A].

Figura 30 Sobrecorrente de Comutação do Tap SW3 para o SW6

5.3.3 Verificação do Pico de Tensão nos Extremos do Primário do Transformador Soma-Subtrai

O pior caso de tensão alta, devido à relação do número de espiras, ocorre na chave SW2 (tap0) quando a chave SW3 (tap2) estiver fechada. Neste caso, a tensão em SW2 é aproximadamente sete vezes a tensão de entrada. Este fator está relacionado com a relação entre o número de espiras do trecho tap0-tap1 e o número de espiras do trecho tap1-tap2 . Deve-se observar que a chave SW3 estará fechada se a tensão de entrada for inferior à 0.5 pu (155Vp). Foi simulado um *Sag* na tensão, com amplitude de 0.5 pu, ocorrendo entre os instantes 20 e 100 ms(duração de 80 ms). Antes do evento a chave *Bypass* estava ligada e esperou-se até o instante 33ms para transferir para a chave SW3 (máxima correção), ocorrendo um pico de tensão de 1.16kV em 44.1ms, quando a corrente na chave SW3 passaria por zero (Vide Figura 31e Figura 32).

Figura 31 Pico de Tensão na Chave SW2

Quando o evento termina em 100ms, a chave *Bypass* é acionada em 104ms, instante em que a tensão na saída atinge 400Vp, ocorrendo um pico de tensão de 1.23kV em SW2. Estes valores justificam o uso na chave SW2 de tiristores tensões reversas (V_{rrm}) de 1.4 kV.

Figura 32 Detalhe do Pico de Tensão na Chave SW2

5.4 Simulação do Recuperador Com Carga Não Linear

Além da carga linear, simulou-se o comportamento do recuperador de tensão ao alimentar uma carga não linear equivalente à 50 microcomputadores, aproximadamente 10KW (50x200W). A tensão de saída obtida é mostrada na Figura 33, onde observa-se uma deformação nessa tensão devido à queda de tensão na impedância série de 15%, produzida por uma corrente não senoidal.

Figura 33 Tensão de Saída do Recuperador Submetido à Carga Não Linear

A carga não linear utilizada nesta simulação, equivalente à 50 PCs (Computador Pessoal), é mostrada na Figura 34. A fonte chaveada típica de um PC possui um retificador com filtro capacitivo de 400uF (eletrolítico) quando ligado em 110V e 200uF quando ligado em 220V. A potência típica deste tipo de fonte é de 200W.

Figura 34 Carga Não Linear Equivalente à 50 PCs em 220V

5.5 Simulação para Observar Pico de Tensão do Fim do *Sag*

Com o recuperador alimentando uma carga de 45KVA ($0.76R + 2mH$) foi simulado o **não** disparo da chave *Bypass* no fim do evento *Sag*. A Figura 35 mostra o comportamento da tensão de saída após o fim do *Sag* (no instante 60ms), e pode-se notar uma sobretensão na carga, durante aproximadamente 1,5 ciclos, devido ao atraso no acionamento da chave *Bypass* . Já na Figura 36 simula-se o disparo da chave de *Bypass*, no instante em que a tensão de saída atingiu 450Vp, obrigando o sinal de saída a acompanhar a tensão de entrada , e nota-se que o tempo de duração da sobretensão na carga é bem inferior que a anterior (< 5 ms).

Figura 35 Tensão de Saída Sem Transferir para o *Bypass* no Fim do *Sag*

Figura 36 Tensão de Saída Com Transferência para o Bypass no Fim do Sag

6. Conclusão

Neste trabalho propôs-se um recuperador para afundamentos de tensão baseado em uma topologia simples, sem armazenamento interno de energia, constituído por transformador Soma-Subtrai, blocos de tiristores, drivers para as chaves estáticas e uma placa microprocessada responsável pela geração dos sinais de controle do equipamento. Os resultados obtidos na análise e simulação da topologia proposta permitem estabelecer as seguintes conclusões :

1. O comportamento dinâmico do circuito de potência do recuperador proposto é satisfatório trazendo a tensão de rede, na ocorrência de *Sags* de até 0.4 pu, para a faixa aceitável da curva ITI CBEMA.
2. As sobretensões observadas nos extremos do transformador Soma-Subtrai são altas (aprox. 1.4kV). Uma forma de reduzir essa sobretensão é modificar a topologia original de um único transformador Soma-Subtrai para dois, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 Topologia Alternativa para Reduzir Sobretensão

Esta solução aumenta o “volume magnético” (2 transformadores), além de exigir mais uma chave estática de *Bypass* para o segundo transformador, mas em compensação abaixa a sobretensão mencionada para aproximadamente a metade dos valores observados na topologia de um único transformador.

3. Para potências de até pouco mais de 100kVA / 220V pode-se usar módulos de tiristores duplos, os quais são encontrados a um menor custo devido à alta escala em que são produzidos. A utilização desses módulos exige, no entanto, que o transformador Soma-Subtrai possua impedância em série da ordem de 15 %, para limitar a corrente de curto durante a transferência do *Bypass* para o primário do transformador Soma-Subtrai e vice-versa. Este procedimento deve manter as sobrecorrentes decorrentes da transferência dentro de valores suportáveis pelos referidos módulos de tiristores.
4. Pode-se incorporar a impedância série no próprio transformador Soma-Subtrai, utilizando sua própria reatância de dispersão entre primário e secundário, afastando ao máximo os dois enrolamentos e incluindo, se necessário, “shunt magnético” para aumentar o fluxo de dispersão.
5. Os equipamentos de condicionamento de energia fabricados atualmente no Brasil seguem especificações que se encontram desatualizadas face às necessidades das cargas sensíveis atuais. Novos estabilizadores/condicionadores de tensão devem ser projetados de acordo com curvas similares à ITI CBEMA, corrigindo a tensão de rede mesmo em situações de *Sags* profundos.
6. A topologia simples e de custo relativamente baixo, proposta neste trabalho, para a construção de um recuperador de *sags* profundos (até 0.4 pu da tensão) é suficiente para corrigir acima de 90% das ocorrências dos afundamentos de tensão na rede. A utilização de blocos de tiristores, em lugar de alternativas mais complexas que incluem inversores (com IGBTs ou MOSFETs ou GTOs etc...) além de retificadores/filtros, tornam o projeto de potência e controle simples, robusto e com baixo custo relativo.

Referencias bibliográficas

- [1] Dugan, R. G. ; McGranaghan , M. F. ; Beaty, H. W. : *Electrical Power Systems Quality* . McGraw-Hill . 1996

- [2] Sidelmo Magalhães .: *Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão*. tese de mestrado do DEE/UFMG. 1999

- [3] Tunaboylu, N. S. ; Collins Jr, E. R.; Chaney, P. R. : *Voltage disturbance evaluation using the missing voltage technique*. Proceedings, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power , pages 577 – 582 ,vol. 1. 1998

- [4] Brumsickle, W. E. ; Schneider, R. S. ; Luckjiff, G. A. ; Divan, D. M.; McGranaghan, M. F.: *Dynamic Sag Correctors : Cost-effective Industrial Power Line Conditioner* . IEEE Transactions on Industry Applications vol. 37 n. I , January/February 2001

- [5]IEEE Std 493 .: *Recommended Practice for Design Reliable Industrial and Commercial Power Systems – Gold Book*. Capítulo 9 –*Voltage Sag Analysis*. .1997

- [6]IEEE Std 1100 .: *Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment = Emerald Book* . 1999

- [7]SEMI F47-0200 .: *Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity* . Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI). 1999,2000

- [8]ANSI/IEEE Std C.84 -1970 and supplement C84.1-1973 .: *Voltage Ratings for Electric Power Systems and Equipment*

- [9]IEEE Std 446 .: *Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for industrial and commercial applications* = *Orange Book*. 1995

- [10]Durán-Gomez, J. L. ; Enjeti, P. N. ; Von Jouanne A.: *An Approach to achieve Ride-Through of ASD with flyback converter modules powered by Super Capacitors*. IEEE Transactions on Industry Applications . March/April 2002
- [11]Bollen, M. H. J.: *Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions* . IEEE Press series on Power Engineering . 2000
- [12]Key, T. S.: *Diagnosing power-quality related computer problems* . IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 15, n.4, July 1979, pp.381-393
- [13] Brief 11 : *Low-voltage ride-through performance of a personal computer power supply* .EPRI Power Quality Database, Elforsk, Stockholm, Sweden 1995
- [14] Brief 7 : *Undervoltage ride-through performance of off-the-shelf personal computer*. EPRI Power Quality Database, Elforsk, Stockholm, Sweden, 1995
- [15]Quaia, S. ; Tosato, F. ; Malaguti, C. ; Pincella, C. ; Zanotti, P.: *Voltage Conditioning Through Fast Voltage-Booster Device*. Third International Conference on Power Quality : End-Use Applications and Perspectives , D-2.03 October 24-27 ,Amsterdam, The Netherlands. 1994
- [16]Chingchi, C. ; Divan, D.M. ; *Simple Topologies for Single Phase AC Line Conditioning*. IEEE Transactions on Industry Applications , vol.30 , n.2, March/April 1994
- [17]Hietpas, S. M. ; Naden, M.: *Automatic Voltage Regulator using AC Voltage-Voltage Converter* . IEEE Transactions on Industry Applications , vol.36, n.1, January/February 2000
- [18]Hietpas, S. M. ; Pecan, R.: *Simulation of a Three-Phase AC-AC Boost Converter to Compensate for Voltage Sags*. Rural Electric Power 42nd Annual Conference , B4-1-7. 1998

- [19]Lamoree, J. ; Mueller, D. ; Vinett, P. ; Jones, W. ; Samotyj, M.: *Voltage Sags Analysis Case Studies*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.30, n.4, July/August 1994
- [20]Aredes, M. ; Heumann, K. ; Watanabe, E. H.: *An Universal Active Power Line Conditioner*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, n.2, April 1998
- [21]Park, H. W. ; Park, S. J. ; Park, J. G. ; Kim, C. U.: *A Novel High-Performance Voltage Regulator for Single-Phase AC Sources*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.48, n.3, June 2001
- [22]Bollen, M. H. J.: *Voltage, Power and Current ratings of Series Voltage Controllers*. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, p.2910-15. 2000
- [23]Rashid, M. H. : *Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. 2^a Edição, MAKRON Books do Brasil Editora Ltda. 1999
- [24]Mohan, N. ; Undeland, T. M. ; Robbins, W.P.: *Power Electronics – Converters, Applications and Design*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, INC. New York. 1995
- [25]Pierazzuoli, M. : *Trasformatori , Reattori, Amplificatori Magnetici, Stabilizzatori, Calcolo e Costruzione*. Editore Ulrico Hoepli –Milano. 1961
- [26]IEEE Std 449 : *IEEE Standard for Ferroresonant Voltage Transformer* .1998
- [27]Little, D. A., Inc. : *Power Quality Market Assessment* . Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA . Final Report EPRI TR-104372. October 1994
- [28]Electrotek Concepts, Inc. : *An Assessment of Distribution System Power Quality*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA. Statistical Summary Rep. , Final Report EPRI TR-106294-V2 , vol. 2. May 1996

Anexo A – Circuito Eletrônico de Detecção de Zero de Corrente na Chave Estática

A detecção de zero de corrente (*zero crossing*) é feita indiretamente pelo sensoriamento da tensão através de cada par de tiristores em anti-paralelo (chave estática). Este sinal passa por um filtro/divisor de tensão (composto por R1, R2 , R3 e C1) e um limitador de +/- 15V (composto por D1 e D2) que o reduz a um nível de sinal de lógica. Logo após é comparado com uma janela de referencia de +/- 3.5 V (CIs U1A e U1B), como mostrado na Figura 38. Se considerarmos a tensão de +/- 7 volts através dos tiristores como sendo um valor bem superior ao seu estado normal de “ligado” pode-se, com garantia, ter certeza de que o par de tiristores nesta situação estará em estado “desligado” , ou melhor, a corrente através da chave já passou pelo zero. Neste caso é seguro ligar a próxima chave estática do equipamento que não acontecerá um curto-circuito de comutação entre taps. No caso de existirem vários blocos de tiristores sendo acionados pelo mesmo *driver*, uma porta NOR, tendo como entradas os sinais de tensão através dos diversos blocos de tiristores (vide Figura 38), sinaliza para a lógica, através do fotoacoplador U3, quando todos os tiristores tiverem passado pelo zero de corrente. Este instante autoriza que seja acionado o próximo par de tiristores, sem ocorrer curto durante a comutação. O circuito detetor mostrado da Figura 38 parte do pressuposto que todos os blocos acionados pelo *driver* com zero de corrente, tenham um único ponto comum no circuito de potência (que é o caso das chaves estáticas conectadas ao primário do transformador Soma-Subtrai do recuperador de tensão proposto neste trabalho) e este ponto deve também ser o comum da própria placa do *driver*.

Figura 38 Detetor de Zero de Corrente

Anexo B Especificação Típica de Fonte Chaveada Utilizada em Informática

Fonte chaveada marca **Etasis Inc.** (www.allproducts.com.tw/ee/etasis/)

Produto: EPR-2303/05 AC to DC

1+1 HOT-Swappable Redundant Switching Power Supply

Specifications:

- **Input**
 - **Normal: 115V AC ; Frequency: 47~63 Hz ; Min.: 90V AC ; Max.: 132V AC ; Input Amp: 6.0A**
 - **Normal: 230V AC ; Frequency: 47~63 Hz ; Min.: 180V AC ; Max.: 264V AC ; Input Amp: 3.5A**
- Dc output characteristics
 - Output Voltage: Max. Load/Min. Load; V1/+5V: 30A/3A; V2/3.3V: 15A/0A; V3/+12V: 12A/1A; V4/-5V: 0.5A/0A; V5/-12A: 0.5A/0A; +5V/Standby: 1A/0A
 - Output Voltage: Max. Power; V1/+5V: Total 150W; V2/3.3V: Total 150W; V3/+12V: 144W; V4/-5V: 2.5W; V5/-12V: 6W; +5V/Standby: 5W
- Efficiency: 65% Min. at full load
- Hold up time: 20ms at full load
- Power good signal: 100 ~ 500 ms
- Over power protection: total outputs 110% Min. to 130% Max.
- Over voltage protection:
 - +5V: 6.25V +/- 0.65V
 - +3.3V: 4.10V +/- 0.4V
 - +12V: 13.6V ~ 15.6V
- Short circuit protection
- Temperature range: 32 to 122° F
- Relative Humidity: operating: 20 ~ 90% non-condensing