



SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GCQ - 17
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

DIMENSIONAMENTO DE UM RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Luiz Carlos de Alcântara Fonseca *

Francisco Neves

CHESF Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

UFPe Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Estudo de afundamento momentâneo de tensão de um subsistema regional alimentado pela CHESF, levou uma comparação econômica entre algumas alternativas de mitigação. Entre estas, tinha a aplicação de um Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT ou DVR Dynamic Voltage Restorer). Este artigo apresenta os resultados deste estudo e o dimensionamento do RDT, com o objetivo de possibilitar o comparativo econômico entre outras alternativas mitigadoras.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da energia, afundamento momentâneo de tensão (sag), restaurador dinâmico de tensão (RDT – DVR).

1.0 - INTRODUÇÃO

O estudo de qualidade da energia apresentado nas referências [1] e [2], apresentou os números de afundamentos por mês para a indústria em análise, para dois anos de estudo, cujo resultado é mostrado na Figura 1.

Pode-se afirmar que a grande parte dos equipamentos condicionadores consegue compensar afundamentos na faixa de 0,8 pu a 0,5 pu da tensão na carga. Isto já seria suficiente, pois como pode ser visto na Figura 1 os afundamentos abaixo de 50% representam 9,3% e 21% do total dos afundamentos com tensão remanescente inferior a 0,8 pu. Este critério leva a escolha de condicionadores de menores dimensões.

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

* Rua Delmiro Gouveia, 333 - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL
Tel.: +55 (081) 3229-2607 - FAX: +55 (081) 3229-2488 - E-mail: lfonseca@chesf.gov.br

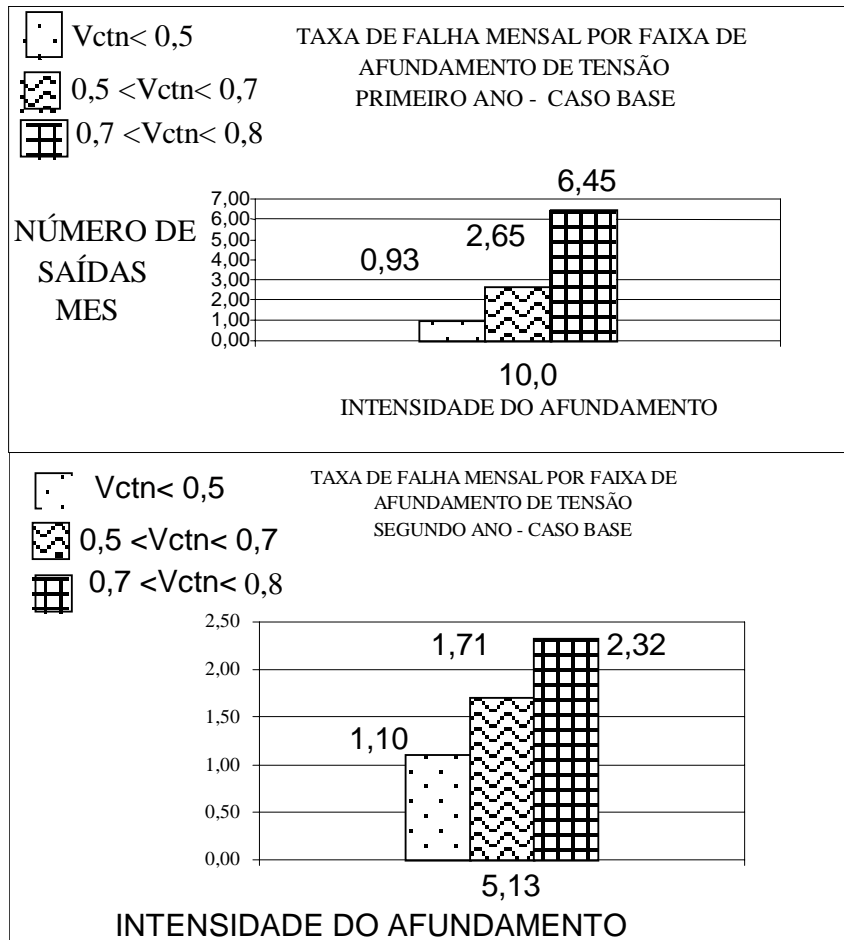


FIGURA 1 Número de Afundamentos na Indústria em Estudo Por Nível de Afundamento

Para uma comparação econômica correta é necessário dimensionar o RDT. O próximo item detalhará este equipamento e apresentará o estudo de dimensionamento para a carga a ser compensada.

2.0 - O RDT

O Restaurador Dinâmico de Tensão, é um equipamento que conectado em série com cargas sensíveis compensa afundamentos ou elevações momentâneas de tensão. Durante a ocorrência de um destes eventos um inversor CC AC usando a tecnologia de Modulação em Largura de Pulso (MLP) sintetiza uma forma de onda de tensão de frequência, amplitude e fase controladas. Um transformador série soma esta forma de onda criada e a superimpõe à tensão de rede. Além da compensação dos afundamentos momentâneos de tensão e das elevações momentâneas de tensão, o DVR é capaz de injetar formas de onda complexas para a compensação de transitórios de chaveamentos e outros distúrbios presentes nas tensões de alimentação [3].

Um restaurador Dinâmico de Tensão é projetado para mitigar variações momentâneas de tensão em alimentadores que suprem cargas sensíveis. É uma alternativa economicamente mais viável, caso se considere o tipo que usa fonte externa através de conversor AC/CC, que o sistema de energia ininterrupta (SEI ou UPS - uninterruptable power source) visto que esta solução requer uma potência similar ao da carga a ser compensada, ou outra solução para o problema do afundamento momentâneo de tensão. É especialmente projetado para grandes cargas (acima de 2MVA) supridas por sistemas de distribuição. Um RDT tipicamente requer menos de um terço do nominal de um UPS. Um RDT, além de poder compensar afundamentos, elevações e desequilíbrios de tensão, pode também ser usado para compensar tensões harmônicas no sistema de suprimento da carga sensível [4].

O RDT é um equipamento que se enquadra no rol dos equipamentos eletrônicos de potência. Pode-se dizer que pertence à terceira família dos equipamentos por ser de tecnologia de comutação forçada. Por usar a tecnologia de comutação forçada pode ter tempo de resposta compatível, da ordem de 2 a 3 milissegundos [4], com as demandadas no caso de um curto-circuito na rede e seu conseqüente afundamento momentâneo de tensão.

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

A potência reativa trocada entre o RDT e a rede é internamente gerada pelo RDT sem nenhum componente reativo passivo AC, como reator ou capacitor. Para grandes variações (afundamentos profundos na tensão da rede) o RDT pode, dependendo do tipo, suprir parte da potência da carga a partir de uma fonte de energia recarregável conectada no terminal DC do RDT. Se for o caso de se ter energia armazenada, esta quantidade determina o máximo intervalo de tempo que o RDT pode suprir a máxima tensão injetada num pior cenário.

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

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

Essas duas características estão associadas ao fato de o restaurador aproveitar as tensões sob distúrbio, injetando apenas o necessário para a compensação. Há disponíveis atualmente, diversas topologias para o RDT, cada uma com características e capacidades de compensação específicas. Uma delas é baseada na utilização de ponte retificadora para o suprimento de energia ao barramento de corrente contínua, conciliando a simplicidade e o baixo custo com a capacidade de injeção de potência ativa e reativa, além da compensação de variações momentâneas de tensão com até 0,5 pu., em regime permanente. A Figura 2 ilustra esta topologia.

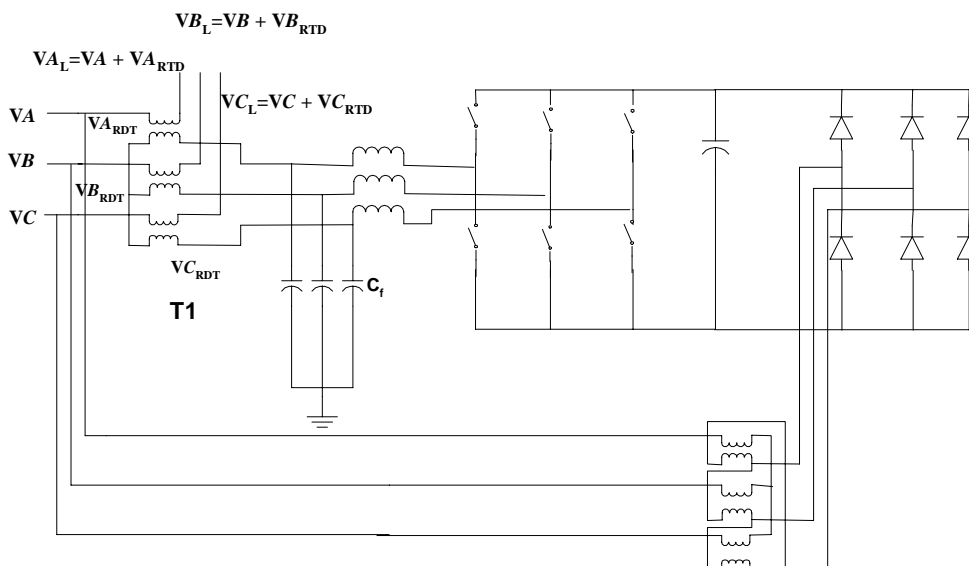


FIGURA 2 Diagrama Trifilar de um RDT com o Barramento DC Alimentado por Diodos

3.0 - FILOSOFIAS DE PROJETO

Praticamente podem-se classificar os RDT em dois tipos, quanto ao fornecimento de energia ao barramento CC [6]:

- **Com fonte externa**

- Via sistema independente

O barramento CC, desde que alimentado por um sistema independente de capacidade suficiente, permite a compensação de qualquer afundamento seja qual for a duração e o valor remanescente. Isto pode se fazer de dois modos:

Rede de alimentação independente e diferente do sistema a ser compensado;

Sistema de acumulação de energia.

Estes sistemas apresentam custos elevados por necessitar, o primeiro de uma rede alternativa e o segundo os custos de manutenção.

- o Via conversor CA/CC

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

Este esquema foi visto Figura 2

- **Sem fonte externa**

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

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

A idéia básica do RDT é injetar tensão dinamicamente controlada VRDT, gerada por um conversor de comutação forçada, em série com a tensão do sistema de suprimento por meio de um transformador elevador. As amplitudes instantâneas das três tensões da fase injetadas são controladas de tal forma que elimine qualquer efeito nocivo de uma flutuação na tensão VL. Isto significa que qualquer diferença de tensão causada por um distúrbio no alimentador será compensado por uma tensão equivalente gerada pelo conversor e injetada na rede pelo transformador elevador T1

Este princípio trabalha independentemente do tipo da falta da rede, desde que o alimentador compensado não seja desconectado da rede. Para a maioria dos casos práticos um projeto mais econômico pode ser alcançado por só se compensar as componentes de seqüências positiva e negativa da tensão de distúrbio vista pelo RDT. Esta consideração é razoável pois para uma configuração de distribuição típica a componente de seqüência zero não passa pelos transformadores abaixadores por causa de sua ligação em delta [7].

No caso específico da Figura 2, o capacitor CC entre a unidade de armazenamento de energia e o inversor serve como um amortecedor de energia, e tem que ter a capacidade de absorver ou fornecer instantaneamente potência durante uma elevação ou um afundamento de forma a manter a tensão CC constante.

Na maior parte do tempo o RDT não faz nada a não ser monitorar a tensão do barramento, o que significa que não injeta qualquer tensão (VRDT = 0) independente da corrente de carga. Portanto deve-se ter em conta as perdas do RDT durante este regime de operação.

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

A Figura 2 mostra um sistema deste tipo sendo que por ser o sistema de retificação a diodo não poderia funcionar com elevações momentâneas de tensão, pois apesar de se poder retirar potência ativa da rede, não se poderia absorver da carga, injetando para a rede (a não ser que o capacitor do barramento CC seja dimensionado para uma tensão superior). Este é o caso visualizado nesta dissertação, pois se está interessado em controlar apenas as condições mais prejudiciais que são os afundamentos momentâneos de tensão. Caso se desejasse a possibilidade de também fornecer potência ativa para a rede seria necessário um retificador controlado e conseqüentemente um projeto mais oneroso.

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

Neste artigo, o que se deseja compensar são os afundamentos momentâneos de tensão, por serem os mais comuns. Outra alternativa seria um sistema UPS que seria mais caro, mas que poderia viabilizaria um suprimento, inclusive, para interrupções. Portanto, ocasiões de interrupção momentânea de tensão, fenômeno de pequena probabilidade, não serão contempladas. Daí a escolha do RDT com fonte externa via conversor AC / DC ao invés do sistema de energia ininterrupta (UPS).

Considerou-se como carga sensível toda a potência da indústria, ou seja, 19MVA. Escolheu-se também, a princípio o equipamento com suprimento de energia via conversor CA/CC, como o mostrado na Figura 2

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

Tipo de Carga

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

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

- Corrente constante – característica dos retificadores.

O dimensionamento do RDT foi feito considerando uma carga (19MVA) totalmente impedância constante, potência constante ou corrente constante. Tomando-se uma indústria têxtil, como há predominância de motores, foi considerado o dimensionamento obtido para cargas tipo potência constante.

4.0 - FILOSOFIA DE PROJETO DO RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Existem três filosofias de projeto do restaurador dinâmico de tensão que são [6]:

- Compensação total da carga

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

- Minimização da potência ativa injetada.

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

- Minimização da potência aparente injetada.

Esta filosofia se consegue através de se obter a tensão injetada pelo restaurador dinâmico de tensão em fase com a tensão da rede.

Foram consideradas estas três filosofias de projeto, ou seja:

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

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

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

Foi elaborado o programa DVR, para o cálculo da potência nominal do restaurador dinâmico de tensão necessário para a compensação da indústria têxtil em estudo, o que é dado pela corrente da carga, multiplicada pelo máximo desvio relativo da tensão necessária para a condição normal de funcionamento da carga [8]. A janela para entrada de dados do programa pode ser visto na Figura 3

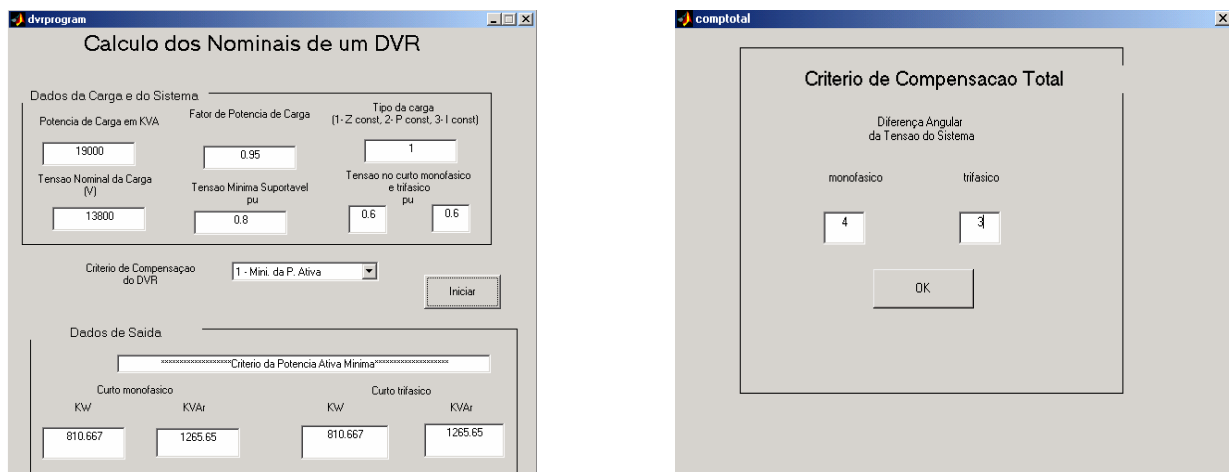


FIGURA 3 Janelas das Entradas de Dados do Programa DVR

Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 1, a seguir:

TABELA 1 Projeto do RDT Para a Indústria em Análise

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

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

5.0 - CONCLUSÕES

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

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

Estudos de viabilidade econômica, onde se considere as perdas nas próprias indústrias causadas pela perda da produção, devem ser realizadas para justificar a aquisição destes equipamentos.

Por outro lado, as concessionárias devem fazer análises comparativas entre esta solução local ou outros investimentos no sistema, sendo que uma solução local sempre apresenta baixa relação custo / benefício, por ser uma solução próxima da carga.

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

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) L. C. de A Fonseca, A. Navarro, P. Nobre e F. Ayres, "A Qualidade De Energia Em Uma Indústria Suprida Por Um Longo Sistema Radial. Uma Metodologia De Avaliação Do Sag" III SBQEE Agosto 1999, Brasília.
- (2) A. C. Machado, L. C. de A. Fonseca, V. de S. Almeida, "A Qualidade De Energia Em Uma Indústria Suprida Por Um Longo Sistema Radial. Uma Metodologia De Avaliação Do Afundamento Momentâneo De Tensão Usando O Anaquali (Cepel)". VIII SEPOPE, Maio 2002, Brasília
- (3) DAEHLER, P., AFFOLTER, R., Requirements and Solutions for Dynamic Voltage Restorer, A Case Study. Power Winter Meeting, Sigapura, 2000.
- (4) SIEMENS, Power Quality Active Compensation. Power Engineering Guide. Transmission and Distribution.,4th Edition, 2002.
- (5) WESTINGHOUSE POWER GENERATION, Dynamic Voltage Restorer, 1996 segundo o site da University of Missouri-Rolla. http://www.ece.UMR.edu/links/power/Energy_Course/energy/facts/dvr.htm.
- (6) SILVA S. M., Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão Tese de Mestrado. UFMg, 1999.
- (7) ZHAN, G. L. D., BOLLEN, M. H. J., A Method For Characterizing Unbalanced Voltage Dips (Sags) With Symmetrical Components, IEEE Power Engineering Letters, 1998.
- (8) BURG P., ALLMELING, J., Flywheel Based Power Quality Improvement In A Medium Voltage Grid. Electrical Energy Storage System Applications & Technologies, International Conference, Chester, 1998.