



Desenvolvimento de Restauradores Dinâmicos de Tensão de Baixa Potência

S.U.Ahn
CPFL Piratininga
seun@cpfl.com.br

**J.A.Jardini, L.Matakas Jr,
W.Komatsu, F.O.Martinz,
M.Galassi e M.A.Oliveira**
– USP / PEA

**J. Camargo, W. Borges e T.
Monteiro**
Expertise Engenharia

RESUMO

A crescente utilização de cargas sensíveis em sistemas elétricos de potência, especialmente em aplicações industriais, faz com que os custos associados a *voltage sags* aumente vertiginosamente [1], exigindo soluções baseadas em eletrônica de potência para mitigar os efeitos destes fenômenos. Esse artigo mostra uma solução denominada Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT ou DVR-*Dynamic Voltage Restorer*) para a compensação de *voltage sags*. As características de projeto para três protótipos de Restaurador Dinâmico de Tensão são detalhadas e três estratégias de geração de referência são comparadas. Finalmente, resultados experimentais do protótipo de 5kVA são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Conversor PWM, Restaurador Dinâmico de Tensão, Qualidade de Energia, Voltage Sags,

1. INTRODUÇÃO

Perturbações presentes no sistema de potência podem afetar cargas sensíveis na maior parte das linhas de produção. De acordo com [2], um Voltage Sag é definido como um decréscimo na amplitude da tensão eficaz entre 0,1–0,9 pu na frequência fundamental, com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto. Voltage sags são geralmente causados por faltas em linhas adjacentes do sistema de potência ou por partidas de grandes motores, podendo ocasionar má operação ou falhas. Da mesma forma, um Voltage Swell é definido como um aumento na amplitude da tensão eficaz na frequência fundamental, com duração de 0,5 ciclo – 1 minuto, podendo resultar em danos permanentes à carga. Valores típicos de magnitude estão entre 1,1 e 1,8 p.u.

Uma das soluções comumente adotadas é o Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT), o qual é conectado em série com a carga por meio de um transformador de injeção, restaurando a amplitude da ten-

são de carga na ocorrência de voltage sags. Esse tipo de compensador soma à tensão da rede uma tensão pré-calculada sintetizada por um inversor de potência, de modo a manter a tensão da carga dentro de valores aceitáveis. A principal vantagem de um RDT é que, como o dispositivo injeta a diferença entre a tensão remanescente de rede e a tensão de referência apenas durante voltage sags ou swells, não há necessidade de armazenar a energia para suprir plena carga, como é o caso das Fontes Ininterruptas de Energia (UPS-Uninterruptable Power Supplies). Porém, os RDTs não trabalham durante interrupções de energia, o que é sua principal desvantagem.

Este artigo descreve o dimensionamento de um RDT que compensa voltage sags, swells e distorção harmônica de tensão. Discute-se o histórico do projeto de pesquisa, detalhando-se as características básicas de projeto de dois protótipos de Restaurador Dinâmico de Tensão. Três estratégias para a malha de Geração de referência da tensão do inversor são comparadas e uma delas é escolhida para a implementação em um Processador Digital de Sinais (DSP) do protótipo de 5-kVA/220V e sua validade é analisada para a compensação de afundamentos de tensão por meio de resultados experimentais.

2. TOPOLOGIA

O desenvolvimento de dois protótipos de RDT é resultado de um projeto de pesquisa e desenvolvimento da Companhia Piratininga de Força e Luz (CPFL) em conjunto com a Escola Politécnica da USP e com a Expertise Engenharia. O projeto consiste nas seguintes etapas:

- Mini-DVR-01: RDT com funções de compensação de afundamentos e elevações de tensão e filtro ativo de harmônicas de tensão, Carga trifásica nominal 10kVA/220V;
- Mini-DVR-02: RDT com funções de compensação de afundamentos e elevações de tensão e filtro ativo série de harmônicas de tensão, Carga trifásica nominal 75kVA/380-440V;
- Mini-DVR-03: RDT com funções de compensação de afundamentos e elevações de tensão, filtro série de harmônicas de tensão e compensação de reativos de carga, Carga trifásica nominal 10kVA/220V. Extensão de hardware do Mini-DVR-01.

Os RDTs descritos podem compensar voltage sags monofásicos máximos para $V_{sag1\phi} = 0,5pu$, voltage sags trifásicos máximos para $v_{sag3\phi} = 0,65pu$ e voltage swells máximos para $V_{swell} = 1,2pu$ com máxima duração de $\Delta t = 500ms$.

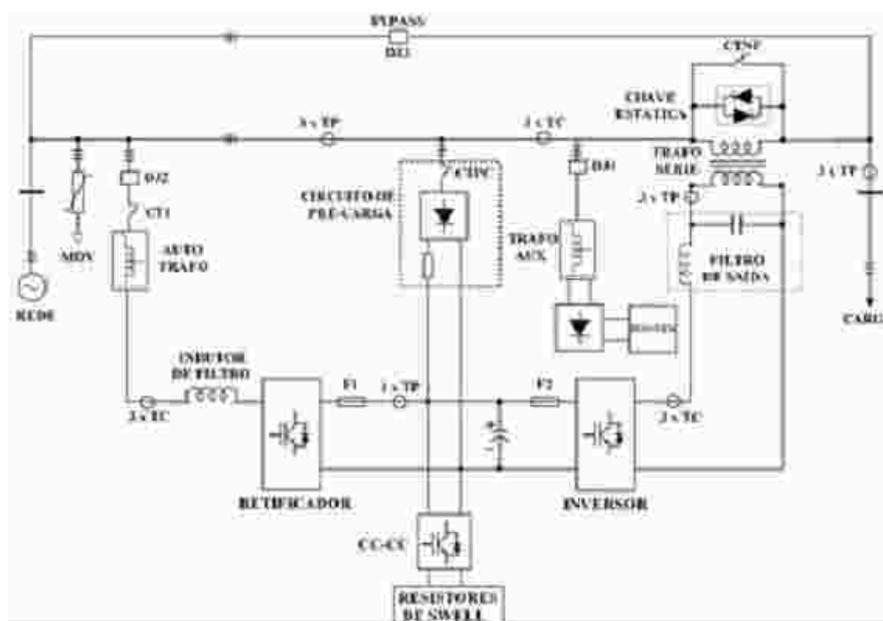


Figura 1. Diagrama unifilar Mini-DVR-01.

O diagrama unifilar do Mini-DVR-01 é mostrado na Fig. 1. Um inversor monofásico em ponte com-

pleta chaveado por Modulação em Largura de Pulso (PWM) é conectado a um filtro LC e a um transformador série monofásico. Três arranjos monofásicos iguais são montados, de modo a possibilitar a injeção de seqüência zero. É importante notar que a energia necessária para carregar os capacitores de barramento CC vem da própria rede CA na qual o RDT está conectado, por meio de um retificador trifásico não controlado em ponte e um transformador delta-estrela. Como consequência, para evitar o colapso de tensão da rede CA durante voltage sags, uma limitação de corrente de carga do banco é introduzida por meio de resistores no lado CC. Durante voltage swells, um conversor CC/CC controlado a PWM e resistores de descarga são acionados de modo a evitar sobretensão no barramento CC. Já que RDTs não devem interferir na coordenação de proteção da carga, quando um curto-circuito ocorre no ramal de alimentação da carga o RDT deve ser isolado do circuito sob falta. Além disso, no intuito de proteger os dispositivos de eletrônica de potência e demais componentes internos ao equipamento, o RDT não deve operar nestes casos. Portanto, chaves rápidas de estado sólido (chaves estáticas) e contatores são colocados em paralelo com o enrolamento primário do transformador de injeção. Utilizam-se contatores normalmente fechados (NF) de modo a garantir a continuidade à carga em casos de perda de alimentação das placas de controle. Na figura 1 podem-se notar ainda transdutores de efeito Hall de corrente e de tensão (TC e TP, respectivamente) para controle e monitoramento.

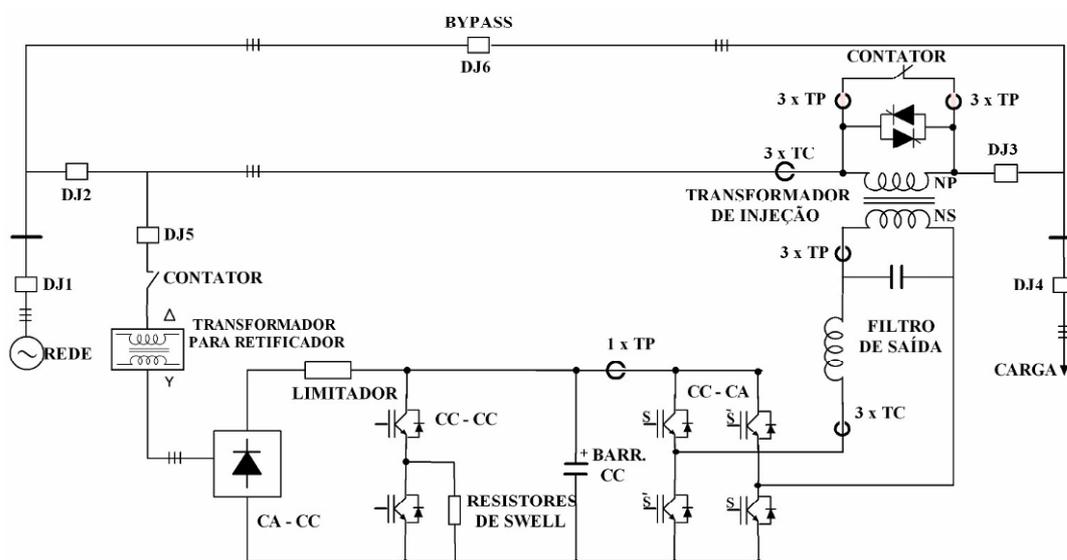


Figura 2. Diagrama unifilar Mini-DVR-02.

A figura 2 mostra o diagrama unifilar que representa os protótipos dos Mini-DVRs 02 e 03. Optou-se pela mesma configuração com três montagens monofásicas para o conjunto inversor e transformador do Mini-DVR-01 e circuitos de proteção de bypass, contatores NF e chaves estáticas. Como forma de garantir a alimentação das placas de controle e aquisição em casos de falta de fase, as fontes chaveadas são alimentadas em corrente contínua por meio de um retificador trifásico conectado a um transformador auxiliar. Além disso, para proteção do RDT contra surtos de tensão, um conjunto varistor + centelhador é instalado na entrada do equipamento. Para limitar a corrente de carga dos capacitores do barramento CC e garantir o funcionamento correto do inversor na região de tensão CC nominal, um circuito de pré-carga do barramento CC é acionado antes do RDT entrar em operação.

TABELA I
Parâmetros MDVR-01 e 03

Parâmetro	Valor
Transformador Série	
Relação de transformação	63,5/127-160-190V
Potência	1,67kVA - 1 ϕ
Transformador para retificador MDVR-01 (retirado)	
Relação de transformação	220/143-150-160V
Potência	1kVA - 3 ϕ
Autotransformador para retificador MDVR-03	
Relação de transformação	127-112-77V
Potência	4kVA - 3 ϕ
Filtro de saída	
Indutor de filtro	4mH
Capacitor de filtro	6 μ F
Indutor para retificador	2.6mH
Tensão barramento CC	350V
Capacitor barramento CC	12 x 4700 μ F
Resistores de swell	12 x 4,7 Ω
Resistores de pré-carga	6 x 6,8 Ω

TABELA II
Parâmetros Mini-DVR-02

Parâmetro	Valor
Transformador Série	
Relação de transformação	180/110-127V
Potência	12,5kVA - 1 ϕ
Autotransformador para retificador	
Relação de transformação	440/ $\sqrt{3}$; 380/ $\sqrt{3}$; 220/ $\sqrt{3}$; 160/ $\sqrt{3}$;
Potência	29,1kVA - 3 ϕ
Transformador auxiliar	
Relação de transformação	440- 380V/220/ $\sqrt{3}$
Potência	1,4kVA - 3 ϕ
Filtro de saída	
Indutor de filtro	2 x 350 μ H
Capacitor de filtro	102,8 μ F
Indutor para retificador	441 μ H
Tensão barramento CC	400V
Capacitor barramento CC	35 x 4700 μ F
Resistores de swell	10 x 250 Ω
Resistores de pré-carga	9 x 2,2 Ω

De modo a minimizar o tamanho do banco de capacitores para o Mini-DVR-02 para o caso mais crítico de voltage sag, no qual haverá a maior solicitação de potência ativa do dispositivo, metade da potência ativa necessária à compensação é retirada da própria rede por meio do retificador controlado do ramo paralelo. Isto pode ser feito se for levado em conta que metade da potência de injeção é um percentual pequeno se comparado à potência da barra à qual a instalação é conectada. Deste modo, evita-se o colapso de tensão e tem-se como vantagem a diminuição de tamanho do banco de capacitores do barramento CC.

O ramo paralelo exerce ainda a função de controle de tensão do barramento CC para os MDVR-02 e 03. Em específico, para o MDVR-03, o ramo paralelo também é responsável pelo controle da injeção de reativos e harmônicas de corrente para a carga, funcionando como filtro ativo paralelo.

O procedimento de dimensionamento dos MDVR-01e 03 é descrito em [3],[4],[5]. As tabelas 1 e 2 mostram os principais parâmetros para cada um dos protótipos construídos.

3. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle do DVR é representado pelos blocos de Geração de Referência, Phase-Locked-Loop (PLL) e Controle de Tensão da figura 3. O bloco de geração de referência tem por objetivo fornecer ao controlador de tensão a referência de tensão a ser injetada pelo RDT. O controlador de tensão rastreia a tensão de referência, garantindo a injeção correta de tensão. Informações sobre ângulo de fase e frequência da tensão CA utilizada, fornecidas pelo bloco de PLL, são críticas para o funciona-

mento de RDTs. Algumas estratégias de controle de tensão e do PLL são apresentadas em [6]. A seguir são discutidas estratégias para o bloco de geração de referência.

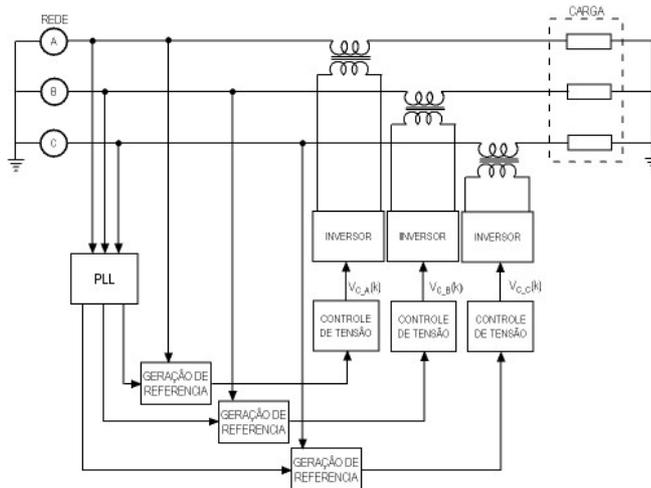


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de controle

4. GERAÇÃO DE REFERÊNCIA

4.1 REFERÊNCIA FIXA SENOIDAL

Neste caso, a amplitude e ângulo de fase da tensão de referência são gerados por uma referência senoidal interna normalizada obtida de uma tabela de senos (Figura 4). A frequência da tensão de referência é dada pelo PLL. O algoritmo de geração de referência e do PLL são aplicados apenas para a fase A (fase de referência). As referências de tensão para as demais fases (B,C) são calculadas deslocando-se um número definido de pontos na tabela de modo a obter um sistema trifásico equilibrado. Ou seja, pode-se também efetuar compensação de desequilíbrios de tensão. A compensação de distorções harmônicas de tensão é implícita ao algoritmo, já que a referência é senoidal.

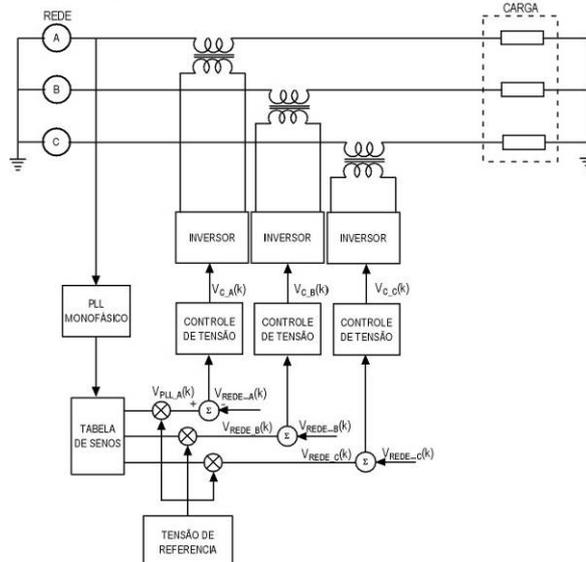


Figura 4. Geração de Referência fixa senoidal

Apesar de ser um algoritmo extremamente simples, a grande desvantagem desse método é que o dispositivo irá injetar ou absorver energia continuamente, já que a amplitude da tensão de alimentação 60Hz varia ao longo do dia.

4.2 SEQÜÊNCIA POSITIVA COM BANDA MORTA

Este algoritmo é baseado na extração da amplitude da seqüência positiva da rede CA a partir dos valores instantâneos das tensões de rede e do PLL. Na figura 5, as saídas do PLL $v_{RPLL}(t)$, $v_{SPLL}(t)$ e $v_{TPLL}(t)$ são multiplicadas uma a uma com os sinais correspondentes medidos da rede $v_R(t)$, $v_S(t)$ e $v_T(t)$. Os três valores são então somados e o resultado é passado por um filtro passa-baixas (FPB). A saída do filtro a menos de uma constante V_{REDE+} é o valor de pico da seqüência positiva extraída da rede. É admitida uma banda morta de $\pm 5\%$ em relação ao valor nominal da rede, na qual o RDT não efetua compensação de tensão. A saída do bloco de banda morta multiplicada pelas saídas do PLL geram as três tensões a serem injetadas pelo DVR $v_{RDVR}(t)$, $v_{SDVR}(t)$ e $v_{TDVR}(t)$.

A vantagem deste método é que o RDT compensa sempre um valor atualizado de tensão de referência. Para que isso seja realizável, a dinâmica do filtro passa-baixas da fig. 5 deve ser rápida, da ordem de poucos ciclos de 60Hz. Além disso, para pequenos desvios da tensão nominal que não afetem o desempenho da carga, o RDT não efetua compensação de amplitude, proporcionando assim um melhor aproveitamento do hardware. A desvantagem do método é que ele não permite que sejam filtradas harmônicas de tensão.

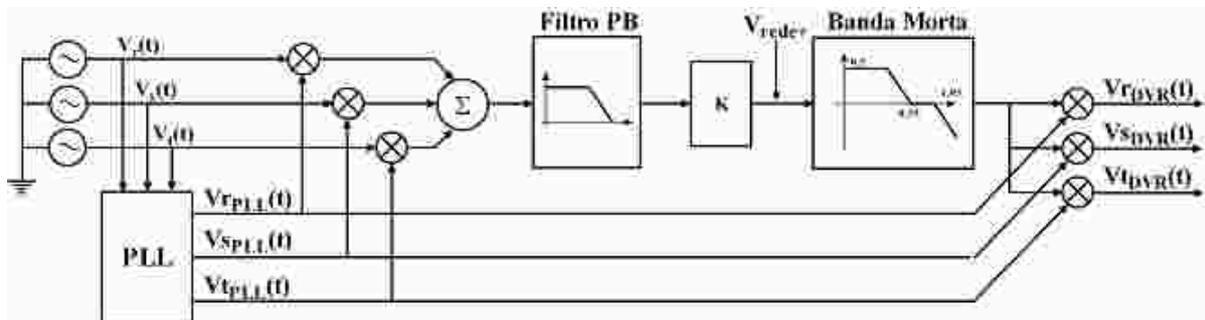


Figura 5 – Geração de referência, seqüência positiva com banda morta

4.3 SEQÜÊNCIA POSITIVA COM CORREÇÃO DE HARMÔNICAS

Este método é semelhante ao anterior com a vantagem de realizar compensação de harmônicas de tensão em regime. Os valores instantâneos da tensão de seqüência positiva $v_{R+}(t)$, $v_{S+}(t)$ e $v_{T+}(t)$ obtidos a partir do PLL e de V_{REDE+} são comparados com as tensões medidas da rede $v_R(t)$, $v_S(t)$ e $v_T(t)$ de modo a obter as tensões de referência para o RDT. A dinâmica do gerador de amplitude da tensão positiva da rede é mais lenta que no caso anterior, já que continuamente ocorre compensação de seqüência positiva e de harmônicas de tensão.

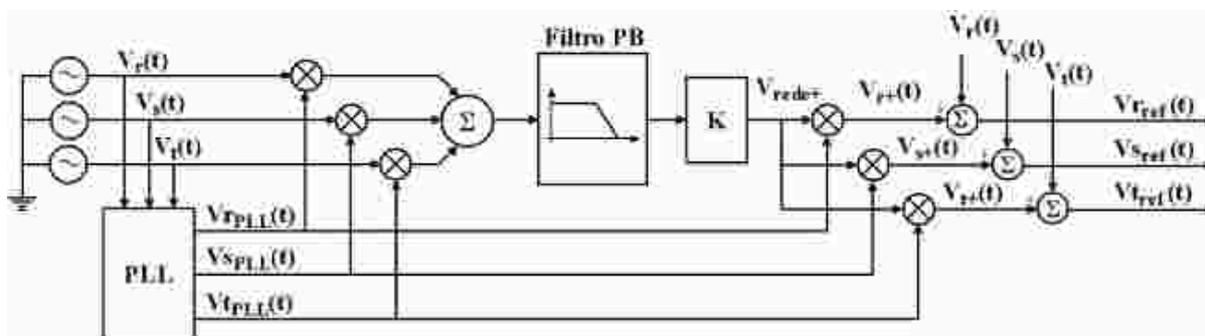


Figura 6 – Geração de referência, seqüência positiva com correção de harmônicas

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras 7 a 10 mostram o hardware desenvolvido para os protótipos dos MDVR-01 a 03.



Figura 7. MDVR-1/3 – Vista frontal
(Inversor, Banco de capacitores, Transformadores de Injeção, Filtro de saída e Proteções)



Figura 8. MDVR-02 – Vista traseira
(Inversor, Retificador, Banco de capacitores, Transformadores de Injeção e Filtro de saída)



Figura 9. MDVR-02 – Vista frontal
(Transformadores de Injeção, Filtro de saída, Placas de interface e Proteções)



Figura 10. MDVR-02 - Placas de interface de sinais e controle

A estratégia de controle de tensão do inversor do tipo deadbeat descrita em [6],[8] com geração de referência fixa senoidal e PLL baseado na detecção de cruzamentos por zero[6],[7] foi implementada em um DSP de ponto fixo de 16-bits da Analog Devices (ADSP21992) e testada no protótipo do Mini-DVR-01 para 17.5% de carga resistiva nominal.

TABELA III
PARÂMETROS DE TESTE MINI-DVR-01

Parâmetro	Valor
Transformador Série	
Relação de transformação	63,5/160V
Transformador para retificador, MDVR-01	
Relação de transformação	220/143V
Filtro de saída	
Indutor de filtro	5mH
Capacitor de filtro	7,5 μ F
Frequência de chaveamento e de amostragem	6,6kHz

O protótipo foi testado com os parâmetros da tabela 3 para o caso de um voltage sag bifásico para 58%. Voltage sags foram gerados utilizando resistores de 0,05 p.u. em série no circuito da rede e pela inserção de resistores em paralelo de 0,075 p.u. durante voltage sags, tomando como base a tensão de fase da carga e a corrente de carga. As figuras 11 e 12 mostram as tensões de rede e de carga, respectivamente, obtidas por meio de pontas diferenciais de tensão.

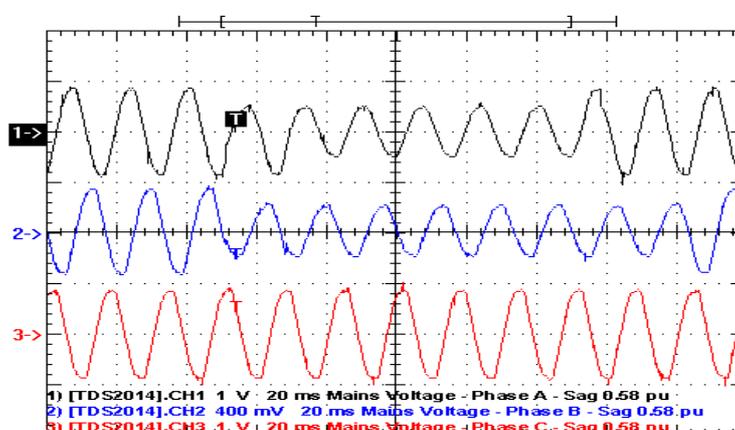


Figura 11. Voltage Sag bifásico para 58%. Tensões de rede. Fase R (A, superior), Fase S (B, centro), Fase T (C,inferior)

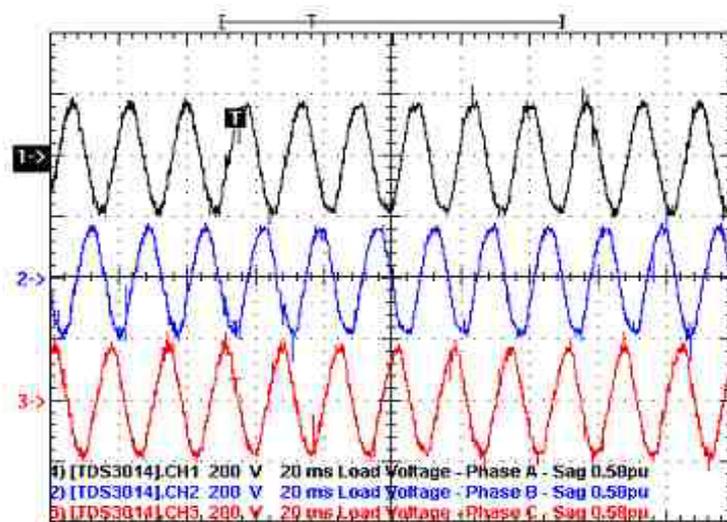


Figura 12. Voltage sag bifásico para 58%. Tensões de carga.
Fase R (A, superior), Fase S (B, centro), Fase T (C, inferior)

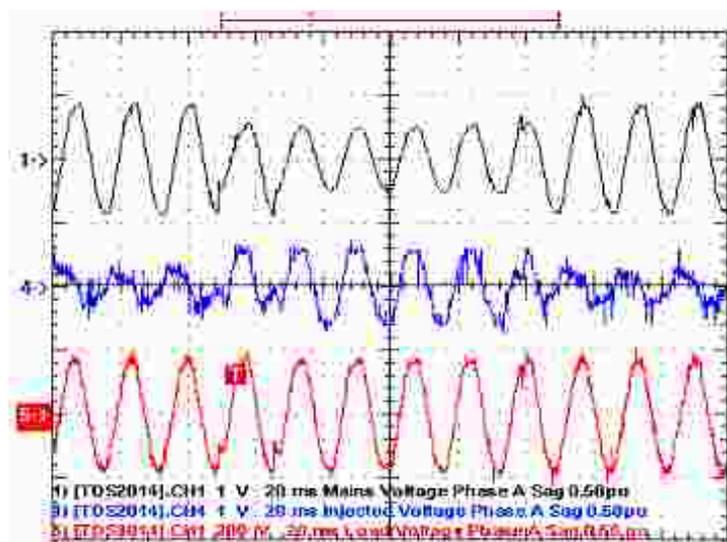


Figura 13 – Voltage sag bifásico para 58%, Fase R (A). Tensão de rede (superior), Tensão injetada pelo DVR (centro), Tensão de carga (inferior)

A figura 13 mostra a tensão de rede, tensão injetada pelo RDT e tensão de carga para uma fase de referência.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o desenvolvimento e as características de projeto de três protótipos de Restauradores Dinâmicos de Tensão de Baixa Potência aplicáveis a sistemas industriais de baixa tensão e a comparação de três estratégias de geração de referência. Resultados experimentais do protótipo do Mini-DVR-01 (5kVA/220V) com uma estratégia preliminar de controle foi apresentada, mostrando bons resultados para carga resistiva. Os demais algoritmos apresentados, os quais representam melhorias no sistema de controle, independentemente do tipo de carga, estão em estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.J. Sullivan, T. Vardell, M. Johnson, “Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, pp.1448-1458, Nov/Dec 1997.

- [2] "IEEE recommended practices for monitoring electric power quality", IEEE Std.1159-1995.
- [3] S. U. Ahn, L. Matakas Jr, J. A. Jardini, W. Komatsu, M. Masuda, F. A. T. Silva, M. Galassi, J. Camargo, E. R. Zanetti, F. O. Martinz, "Dispositivo Restaurador da Tensão com Funções de Compensação de Reativos e Filtro Ativo de Harmônicos", II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL), volume 2, pp.885-890, Brasil, 2003
- [4] S.U. Ahn, J.A. Jardini, M. Masuda, F.A.T. Silva, S. Copeliovitch, L. Matakas Jr., W. Komatsu, M. Galassi, F.O. Martinz, J. Camargo, E.R. Zanetti, "MDVR– Dynamic Voltage Restorer with functions of Reactive Compensation and Active Harmonic Filter", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, November 2004, Brazil.
- [5] L. Matakas Jr., W. Komatsu, J.A. Jardini, M. Masuda, F.A.T. Silva, S. Copeliovitch, M. Galassi, F.O.Martinz, S.U. Ahn, J. Camargo, E.R. Zanetti, "A Low Power Dynamic Voltage Restorer with Voltage Harmonic Compensation", International Power Electronics Conference (IPEC), pp.475-481, May 2005, Japan.
- [6] S. U. Ahn, J. A. Jardini, L. Matakas Jr., W. Komatsu, M. Masuda, F.A.T. Silva, M. Galassi, F. O. Martinz, S. Copeliovitch, M.A. Oliveira, J. Camargo, E.R.Zanetti, E. G. Lima, "Implementação e testes alfa da geração de referencia e controle em um protótipo de Restaurador Dinâmico de Tensão", VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, pp.205-212, Brasil,2005
- [7] A.D. Junqueira, W. Komatsu, L. Matakas Jr., "Digital Implementation of Three-Phase Rectifier with Deadbeat Controller" em Revista de Eletrônica de Potência da Sobreap, vol.7, no.1, Novembro 2002, Brazil.
- [8] Mattavelli, P., and Buso, S., "Uninterruptable Power Supply Multi-Loop Control Employing Digital Predictive Voltage and Current Regulators", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol.37, no.6, pp.1846-1854, Nov-Dec 2001.