

Capítulo III - Compensação de Afundamentos de Tensão Utilizando Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) em Circuitos de Média Tensão.

Alex Messias⁹

Darci Faria¹⁰

Devanir Lacerda¹¹

Henrique Muller¹²

Patrich Dal Magro¹³

Thiago Furini¹⁴

Fabício Augusto de Souza¹⁵

Prof. MS.c Renato Kazuo Miyamoto¹⁶

Prof. Esp. Wesley Candido da Silva¹⁷

RESUMO

A regulamentação do setor elétrico que ocorreu nas últimas décadas tem exigido das concessionárias de distribuição de energia elétrica maior eficiência no desempenho de seus sistemas. Desta forma, destaca-se a importância de estudos em estratégias para evitar e/ou amenizar problemas de qualidade no fornecimento de energia. A proposta deste trabalho consiste em explorar o conceito de afundamento de tensão e estudar uma forma de compensação desses afundamentos. Nesse sentido, apresenta-se o Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR - *Dynamic Voltage Restorer*) como técnica de mitigação deste tipo de distúrbio. A estratégia de compensação foi implementada a partir de um estudo de caso de um evento real na cidade de Cornélio Procópio – PR, e a viabilidade dessa estratégia para consumidores industriais foi avaliada.

Palavras-chave: Afundamento de Tensão; Restaurador Dinâmico de Tensão; Redes Elétricas; Média Tensão.

⁹ Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; alexmessias@sercomtel.com.br

¹⁰ Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; darci_faria@hotmail.com

¹¹ Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; devamec2005@yahoo.com.br

¹² Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; henrquiemuller79@hotmail.com

¹³ Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; patrich_dm@hotmail.com

¹⁴ Programa de pós-graduação em Eng. De Automação Industrial SENAI Londrina; t.hiagofurini@hotmail.com

¹⁵ Mestre em ciências, Engenheiro Eletricista, fabicioaugustousouza@yahoo.com.br

¹⁶ Docente da Faculdade da Indústria Senai Londrina; renato.kazuo@sistemafiep.org.br

¹⁷ Docente da Faculdade da Indústria Senai Londrina; wesley.candido@sistemafiep.org.br

Compensation of Voltage Sags Using Dynamic Voltage Restorer in Medium Voltage Circuits

ABSTRACT

The regularization of the electrical sector that occurred in the last decades demands the increased efficiency in the performance of the concessionaires. In this way, highlights the strategies the importance of studies to and/or alleviate quality problems to avoid energy supply. The purpose of this work is to explore the concept of sag voltage and study a form of compensation for this sags. In this sense, the Dynamic Voltage Restorer (DVR) is presented as a mitigation technique for this type of disturbance. The compensation strategy was implemented from a case study of a real event in the city of Cornélio Procópio - PR, and the feasibility of this strategy for industrial consumers was evaluated.

Keywords: Voltage Sag; Dynamic Voltage Restorer; Electrical Grids; Medium Voltage.

1. INTRODUÇÃO

No final da década de 90, a implantação de procedimentos para acompanhar os indicadores de continuidade e confiabilidade do sistema através do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, contribuiu para a regulamentação do setor elétrico, com a definição de regras e padrões relacionados ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2015).

Desde então, as preocupações relacionadas à qualidade de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica aumentaram. Adicionalmente, os distúrbios elétricos são mais evidenciados em função do uso de um maior número de equipamentos eletrônicos sensíveis a perturbações, dentre os quais pode-se destacar: contadores, microprocessadores, relés de controle industriais, fontes de alimentação chaveadas e conversores de frequência (PRAVEENA; JAYASHREE, 2014).

Dentre os principais problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, estão os afundamentos de tensão e as interrupções momentâneas causados por curtos-circuitos no sistema elétrico. As consequências estão relacionadas a sensibilidade de dispositivos eletrônicos, além afetar ou interromper diversos processos industriais, acarretando perdas de produção e elevados prejuízos

financeiros (BOLLEN, 2000). Portanto, mitigar esses efeitos é de grande importância para manter o fornecimento de energia elétrica em níveis aceitáveis e evitar constrangimentos com clientes e com o Órgão Regulador do Setor.

Nesse sentido, este artigo propõe a aplicação de um Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR - Dynamic Voltage Restorer) para a compensação de afundamentos de tensão na rede elétrica de distribuição. Esse dispositivo é empregado para a correção dos referidos distúrbios, no entanto, as bibliografias apresentam-se escassas sobre sua viabilidade de aplicação. Desse modo, o restaurador será implementado através do *software* Matlab – Simulink, para apresentar simulações de correção de afundamentos de tensão baseado nos dados de um estudo de caso.

2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Atualmente existem duas definições para o conceito de afundamentos de tensão. A primeira, estabelecida pelo “Institute of Electric and Electronics Engineers” – IEEE (EUA); e a segunda, pela “International Electrotechnical Commission” – IEC (Europa).

De acordo o IEEE (2002), os afundamentos de tensão são fenômenos de curta duração, na ordem de 0,5 ciclo a 1 minuto, nos quais a tensão sofre uma alteração em sua amplitude eficaz para valores entre 0,1 e 0,9 pu. Os afundamentos também são classificados de acordo com sua duração, como segue:

- Instantâneos: entre 0,5 ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Já para o IEC (1996), considera-se a intensidade do afundamento de tensão pelo conceito da queda de tensão eficaz. Assim, um afundamento é classificado para uma queda compreendida entre 0,1 e 0,99 pu com duração entre 0,5 ciclo e três segundos.

Os curtos-circuitos que ocorrem ao longo do sistema elétrico de potência são as principais causas de afundamentos de tensão nas redes elétricas de distribuição. Eles são sentidos pelos diversos clientes das concessionárias, tanto residências quanto industriais, porém os consumidores industriais são os que mais sofrem com

estes distúrbios. Os curtos-circuitos são causados em sua maioria por: i) falhas em equipamentos; ii) descargas atmosféricas; iii) árvores em contato com a rede; iv) objetos estranhos na rede; v) vendavais; vi) vandalismo; vii) poluição e viii) falhas de operação e/ou manutenção do sistema.

Os afundamentos de tensão também podem ser causados por efeitos consequentes da dinâmica natural do sistema, como por exemplo: partida de grandes motores; entrada de grandes blocos de cargas e saída de grandes blocos de geração.

As consequências dos afundamentos de tensão na qualidade de energia fornecida aos consumidores dependem da sensibilidade dos equipamentos utilizados. No entanto, é crescente o uso de equipamentos cada vez mais modernos e sensíveis a qualquer distúrbio e/ou variação de tensão, principalmente no setor industrial com a automatização dos processos produtivos, e a inserção de inúmeros dispositivos eletrônicos. Sendo assim, os prejuízos decorrentes de perturbações no sistema são cada dia mais evidentes. Os principais custos industriais gerados por afundamentos de tensão são (GALASSI, 2006):

- Comprometimento da qualidade do produto;
- Atrasos em entregas gerando multas e perda de clientes e competitividade;
- Danos a equipamentos elevando os custos com manutenção;
- Perda de matéria prima;
- Custos devido ao uso de geração auxiliar;

Através de uma pesquisa de mercado, a pesquisa de WATANABE (2010) relatou uma estimativa dos custos de uma interrupção por seguimento, do ponto de vista do consumidor e não o da perda de faturamento da concessionária. No seguimento industrial, uma interrupção de até três minutos gera um custo médio entre 2,73 e 2,87 US\$/kWh.

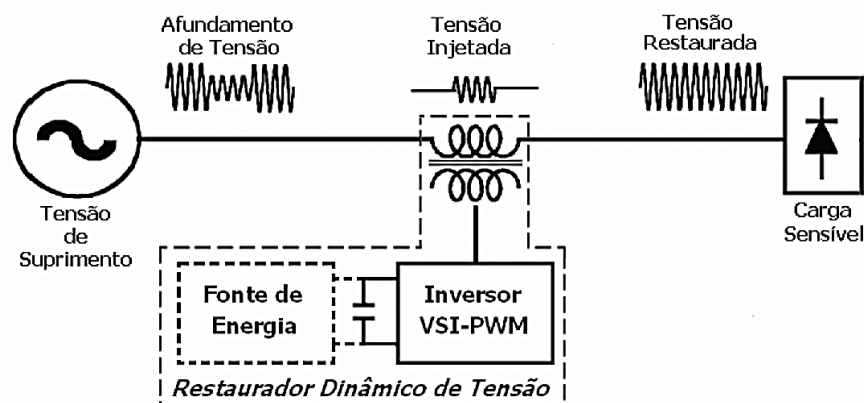
Desse modo, considerando o elevado consumo industrial de energia elétrica em kWh, os custos de um afundamento de tensão tornam-se consideráveis e requerem atenção por parte da administração da indústria. Diante desse cenário, algumas estratégias de compensação de afundamentos de tensão podem contribuir para a melhoria da qualidade de energia, dentre elas, destaca-se o regulador dinâmico de tensão.

3. RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR- *Dynamic Voltage Restorer*) é um conversor eletrônico que tem como principal objetivo, eliminar ou reduzir afundamentos de tensão e sobretensões, também outros distúrbios de curta duração que venham ocorrer na fonte de alimentação, protegendo cargas sensíveis a jusante.

A Figura 1 ilustra o diagrama simplificado do referido restaurador de tensão. O funcionamento de um DVR utiliza a seguinte estratégia: na ocorrência de algum distúrbio de tensão na rede elétrica, o equipamento injeta tensões de módulo e ângulo controlados, através de um transformador série conectado com uma carga, que compensam esses distúrbios oferecendo a carga sensível uma tensão de qualidade (SILVA, 1999).

Figura 1 - Esquemático simplificado sobre o funcionamento de um DVR



Fonte: JESUS (2006).

Ainda, na Figura 1, essas tensões são geradas a partir da energia armazenada em banco de capacitores ou uma fonte externa, utilizando a técnica de modulação por largura de pulso (PWM).

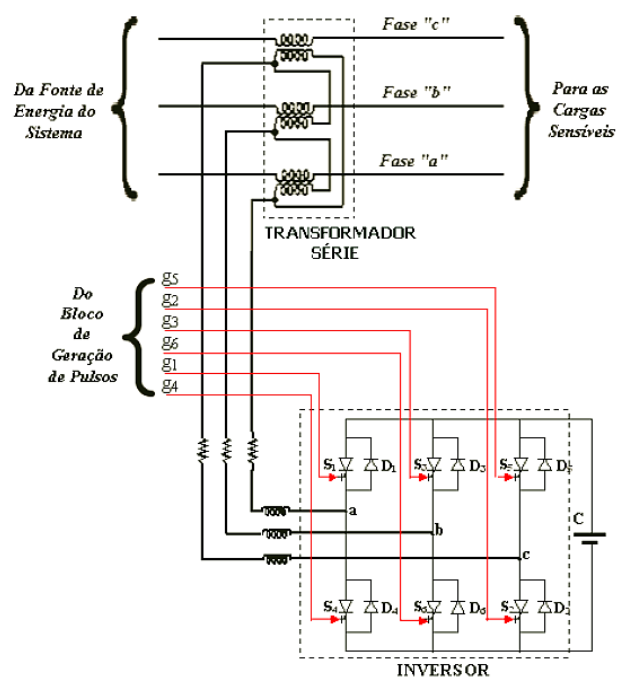
3.1. Componentes Básicos de um DVR

Os componentes que são essenciais para um correto funcionamento de um DVR independente da topologia adotada são: o transformador série, o inversor de frequência e o banco de capacitores (ou fonte de energia). A Figura 2 ilustra as

ligações elétricas entre os componentes básicos de um DVR. O transformador série é o elo entre a fonte e a carga, por ele passa toda corrente que alimenta a carga. Adicionalmente, quando sua ligação é em delta, pode ser utilizado para eliminação de harmônicas de sequência zero.

O inversor de frequência é responsável por sintetizar uma tensão alternada a partir da tensão contínua oriunda do banco de capacitores ou fonte externa. Para isso através de um circuito de controle é realizado o chaveamento de um conjunto de chaves eletrônicas controladas com capacidade de condução e corte. No DVR as tensões de compensação que necessitam ser injetadas nos sistemas de potência são sintetizadas por um inversor.

Figura 2 - Esquemático do transformador série e do inversor de frequência



Fonte: JESUS (2006)

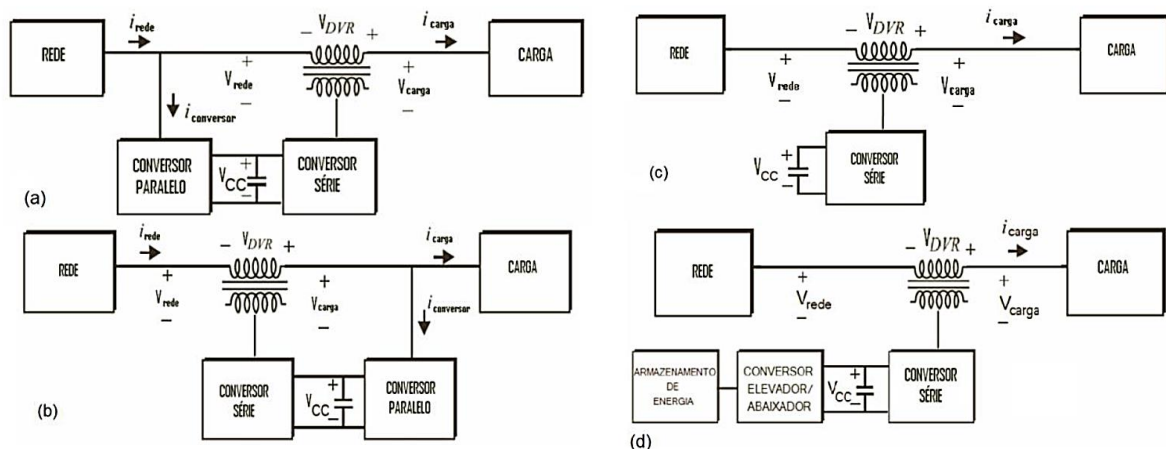
O banco de capacitores tem a função de armazenar energia que será utilizada como suprimento de CC ao inversor quando de um distúrbio na fonte de alimentação. Ainda, dependendo da topologia adotada, o banco de capacitores pode auxiliar na estabilidade de tensão, como é o caso de DVR com fonte independente.

3.2. Topologias dos restauradores dinâmicos de tensão

Para a realização do suprimento de energia, quando da ocorrência de um distúrbio na rede, o DVR necessita de uma fonte de energia. Há algumas maneiras de se obter esta fonte de energia. A Figura 3 ilustra as principais topologias de suprimento de energia que podem ser utilizadas em um DVR.

Apesar da topologia DVR com fonte extraída do lado da carga ser o circuito que apresenta melhor desempenho e custo/benefício ser superior às outras topologias (JESUS, 2006). A topologia apresentada nas simulações utiliza um barramento CC com tensão constante para melhor compreensibilidade do circuito, facilitando na montagem nas simulações.

Figura 3 - Topologias de suprimento de energia ao DVR: (a) com fonte extraída do lado da rede, (b) com energia extraída do lado carga, (c) com barramento CC com tensão variável e (d) com barramento CC com tensão constante.

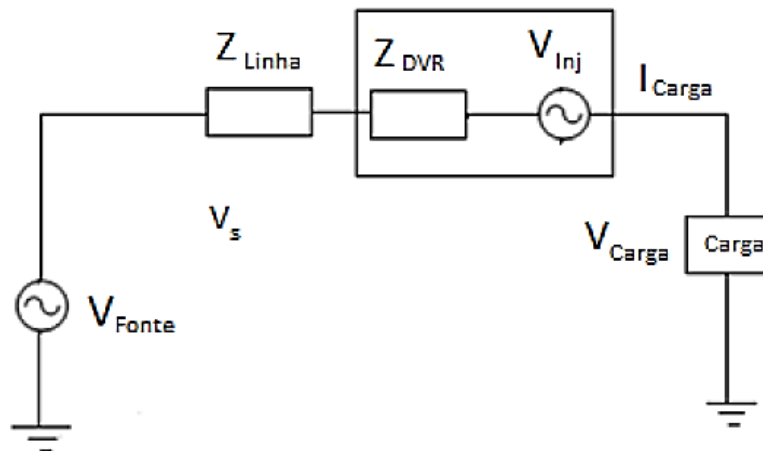


Fonte: GALASSI (2006)

3.3. Equações de Funcionamento do DVR

O circuito DVR equivalente é ilustrado na Figura 4. Quando ocorre um afundamento ou uma sobretensão, o circuito de controle detecta esta tensão de perturbação, e gera uma tensão de referência com amplitude e fase da tensão da rede, que é injetada por meio do transformador série ao sistema. Assim, a tensão na carga é mantida.

Figura 4 - Circuito equivalente de um circuito DVR.



Fonte: BANGAR (2011)

A tensão injetada pelo DVR pode ser descrita como:

$$V_{DVR} = V_L + Z_{TH}I_L - V_{TH} \quad (1)$$

onde:

V_L é a tensão de carga desejada;

Z_{TH} é a impedância do sistema;

I_L é a corrente da carga;

V_{TH} é a tensão do sistema durante uma falta.

A corrente de carga pode ser calculada de acordo com a equação (2):

$$I_L = \frac{P_L + jQ_L}{V} \quad (2)$$

E considerando a equação tendo V_L como referência, tem-se:

$$V_{DVR} \angle \alpha = V_L \angle 0 + Z_{TH} \angle (\beta - \theta) - V_{TH} \angle \delta \quad (3)$$

onde:

α, β, δ são as fases de V_{DVR}, Z_{TH}, V_{TH} .

O ângulo da potência de carga é calculado de acordo com a equação (4):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\theta_L}{P_L} \right) \quad (4)$$

A injeção de energia no DVR pode ser descrita como:

$$S_{DVR} = V_{DVR} I_L \quad (5)$$

3.4. Estratégia de Controle

O objetivo deste sistema de controle é manter constante magnitude da tensão no ponto onde há uma carga sensível, mesmo diante de um afundamento de tensão no sistema. Quando isso ocorre, a tensão de carga é detectada por um analisador de sequência, a magnitude desta tensão é comparada com a tensão de referência (V_{ref}).

O analisador de frequência utiliza do método de Fortescue para que, através das componentes simétricas, se extraia a componente de sequência positiva, de acordo com as equações (6) à (8):

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (7)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (8)$$

onde:

$$a = 1 \angle 120^\circ;$$

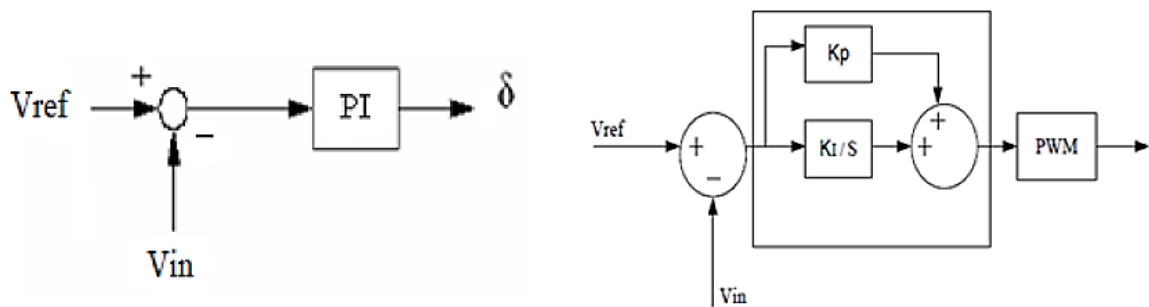
V_1 é a tensão de sequência positiva;

V_2 é a tensão de sequência negativa;

V_0 é a tensão de sequência zero;

A entrada do controlador é um sinal de erro obtido pela comparação da tensão de referência com a tensão eficaz medido no ponto de carga (não é medido potência reativa). Tal erro é processado por um controlador do tipo PI, em que a saída é o δ ângulo que é fornecido para o PWM gerador de sinal conforme observa-se na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama da diferença entre a tensão de referência e a tensão medida.



Fonte: BANGAR (2011)

A saída do bloco do controlador PI tem a forma de um ângulo δ , que introduz a tensão vantagem adicional nas tensões trifásicas. A saída do detector de erro é $V_{ref} - V_{in}$. Uma vantagem de um controlador proporcional mais integral é que o seu termo integral faz com que o erro de estado estacionário passe ser igual a zero para uma entrada em degrau.

O ângulo δ modulante é aplicada aos geradores de PWM na fase A, enquanto os ângulos de fase B e C são deslocados em 240° e 120° , respectivamente, e para gerar sequência de disparo para o inversor de acordo com as equações (9) à (11):

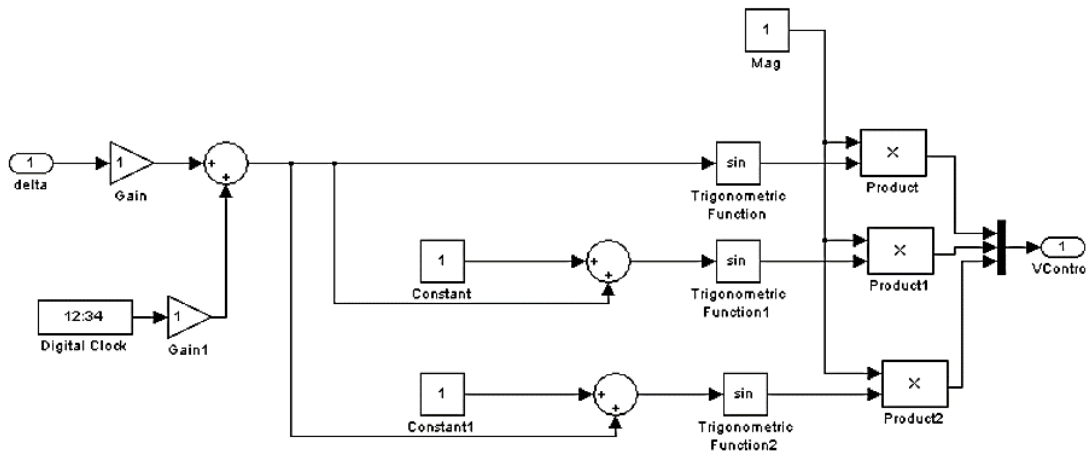
$$V_a = \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (9)$$

$$V_b = \text{sen}\left(\omega t + \delta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (10)$$

$$V_c = \text{sen}\left(\omega t + \delta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (11)$$

A Figura 6 ilustra o subsistema responsável pela geração de sinais de referência para o PWM.

Figura 6 – Geração de sinais de referência PWM.



Fonte: BANGAR (2011)

3.5. Teoria de Controle

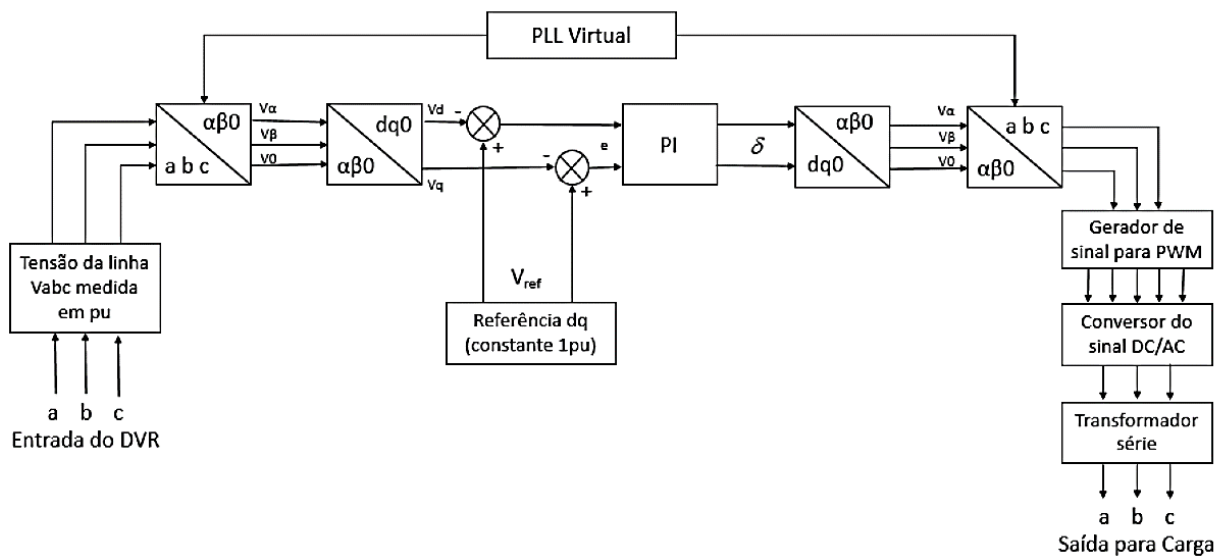
O método de controle utilizado neste DVR é o método de transformação ortogonal dq0 (VERMA; AGRAWAL; SINGH, 2015). É através desta teoria que se é obtido a amplitude da tensão, deslocamento de fase e os tempos de início e término do evento. A tensão na carga é medida/convertida na base pu no analisador de sequência, onde é transformada do sistema trifásico (abc) para o sistema ortogonal (dq0). A transformação é realizada em cascata a partir dos métodos de Clarke e de Park (DEMONTI; BIANCHIN, 2010), apresentadas nas equações (12) e (13). Para simplificar as equações, as componentes de sequência zero neste caso podem ser ignoradas.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 1 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

O diagrama de blocos do controle do DVR está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de blocos do controle do DVR.



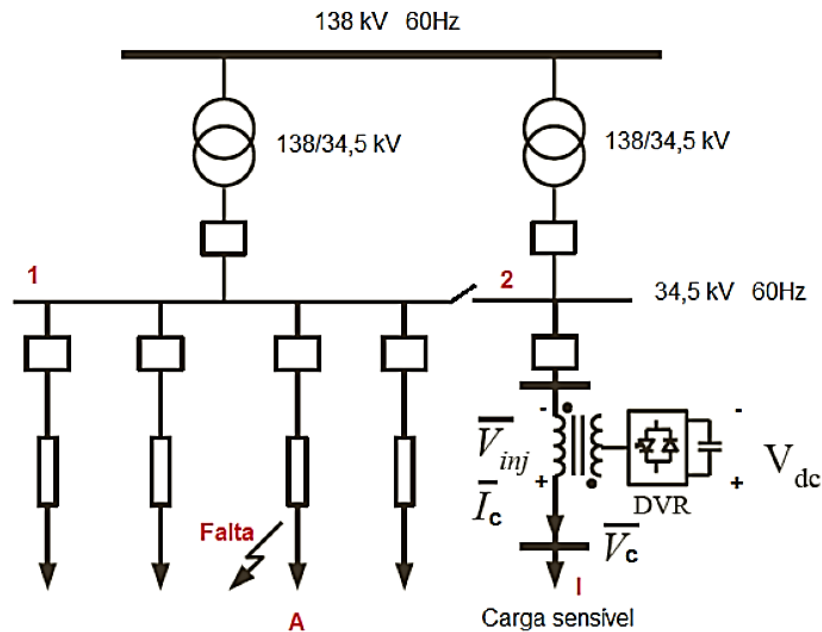
Fonte: MISHRA; BISWAL; ROSELYN (2013)

4. ESTUDO DE CASO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UM DVR

Nesta sessão foi realizado o estudo de um evento real de afundamento de tensão na rede de distribuição de energia elétrica de Cornélio Procópio onde quem detém a concessão é a COPEL - Companhia Paranaense de Energia. O objetivo principal é apresentar os resultados das avaliações da qualidade de energia em um consumidor industrial (2,5MW – 34,5kV) pertencente ao sistema de distribuição de energia elétrica da cidade, e através de simulações computacionais descrever o resultado da implantação de um DVR para a supressão dos distúrbios elétricos sofridos por este cliente.

O sistema elétrico observado possui dois alimentadores que são originários da subestação de energia elétrica de Cornélio Procópio, em que um deles (denominado alimentador A) atende uma outra subestação suprindo o fornecimento de energia de uma cidade vizinha, e o outro alimentador (denominado alimentador I) atende uma indústria de grande porte. Ambos os alimentadores possuem a tensão de 34,5kV, como observado no diagrama unifilar do sistema ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema elétrico observado.



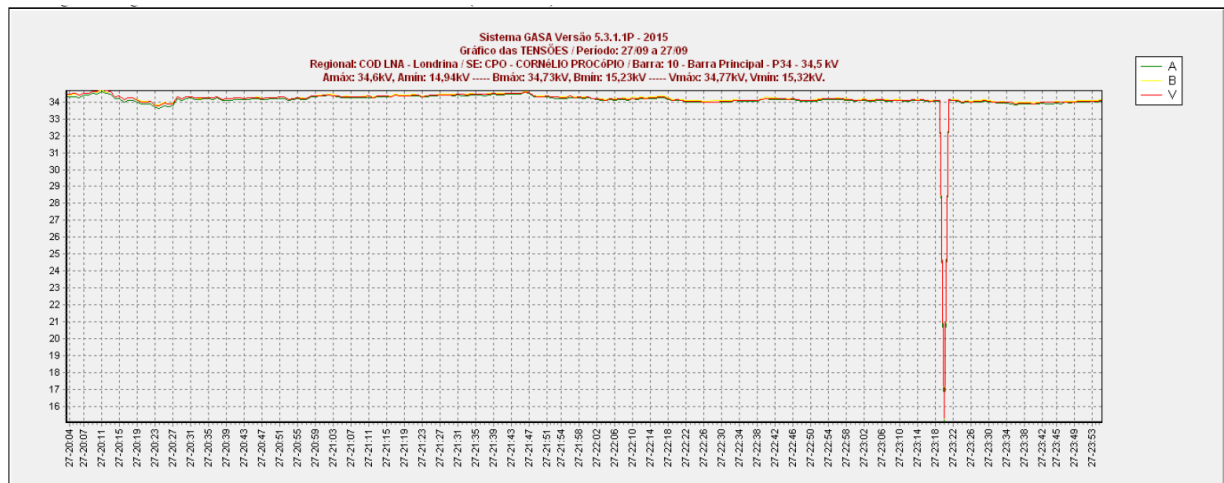
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. O Evento

Foi observado um evento ocorrido no dia 29 de setembro de 2015 aproximadamente às 20:30h, em que, devido a um vendaval que atingiu a região, o alimentador A foi atingido por uma árvore que caiu sobre a rede quebrando alguns postes e isoladores à aproximadamente 8km da subestação de Cornélio Procópio sentido carga, ou seja, a 55% do comprimento total da linha.

Quando das manobras para a localização da falha em um dos testes por volta das 23:20h o alimentador A não aceitou o comando religamento devido ao defeito que não havia sido encontrado, como consequência disto houve um afundamento de tensão na barra 1 de 34,5kV para a ordem de 15kV (0,43 pu), como é observado nos dados oscilográficos na Figura 9.

Figura 9 – Oscilografia do afundamento na barra 1 devido à falta no alimentador A.

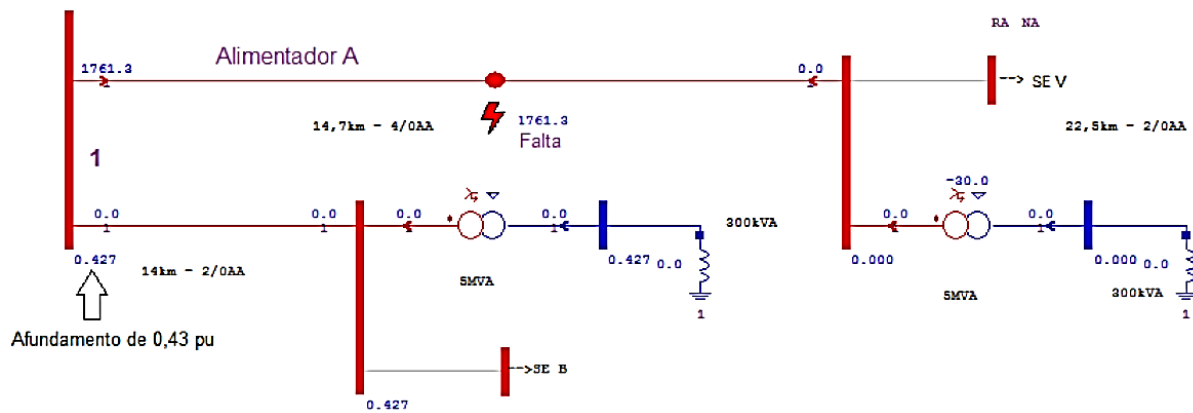


Fonte: (Sistema GASA – Copel).

Na Figura 8, observa-se uma peculiaridade da subestação de Cornélio Procópio, especificamente do barramento de 34,5kV. Como a subestação é atendida por dois transformadores 138/34,5/13,8kV, para amenizar aspectos referentes a qualidade de energia optou-se por fazer o seccionamento da barra 34,5kV em duas (1 e 2).

Sendo assim, o afundamento sentido pelo cliente ligado no alimentador I não é o mesmo que ocorreu na barra 1. Como originalmente a barra de 34,5kV era uma única barra, os TC's e TP's que realizam as medições observadas na Figura 9 estão somente na barra 1. Portanto, para estimar a intensidade do afundamento de tensão na barra 2 ocorrido neste evento utiliza-se de um artifício, a simulação do curto-circuito através do software ANAFAS, que calcula os níveis de curtos-circuitos e suas as contribuições com base em dados de subestações, transformadores e linhas do sistema de distribuição brasileiro, ilustrado na Figura 10.

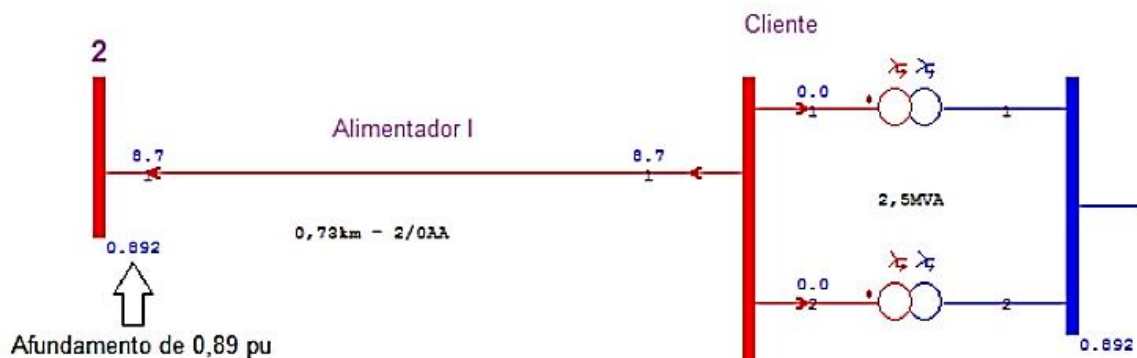
Figura 10 – Simulação do valor do afundamento de tensão na barra 1 devido ao curto-circuito trifásico no alimentador A.



Fonte: ANAFAS.

Na Figura 10, observa-se que a similaridade entre a simulação e o evento real, ou seja, na barra 1 houve um afundamento na qual a magnitude do valor eficaz da tensão fornecida atingiu aproximadamente 0,43pu. Já na barra 2, conforme a Figura 11, esta tensão no cliente alimentado pelo alimentador I, atingiu o valor de 0,89pu.

Figura 11 – Simulação do valor do afundamento de tensão na barra 2 devido ao curto-circuito trifásico no alimentador A.



Fonte: ANAFAS.

4.2. Análise dos resultados computacionais

De acordo com Brumsickle et al. (2001), aproximadamente 92% dos afundamentos de tensão apresentam intensidades superiores a 0,4pu nas amplitudes de tensão, com duração inferior a 2 segundos.

No intuito de mitigar os afundamentos de tensão na ordem mencionada, foi proposto a implantação de um DVR na entrada em média tensão do cliente industrial estudado. Com os dados já levantados, foi realizado a implementação computacional deste equipamento, que possui as características apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados utilizados nas simulações

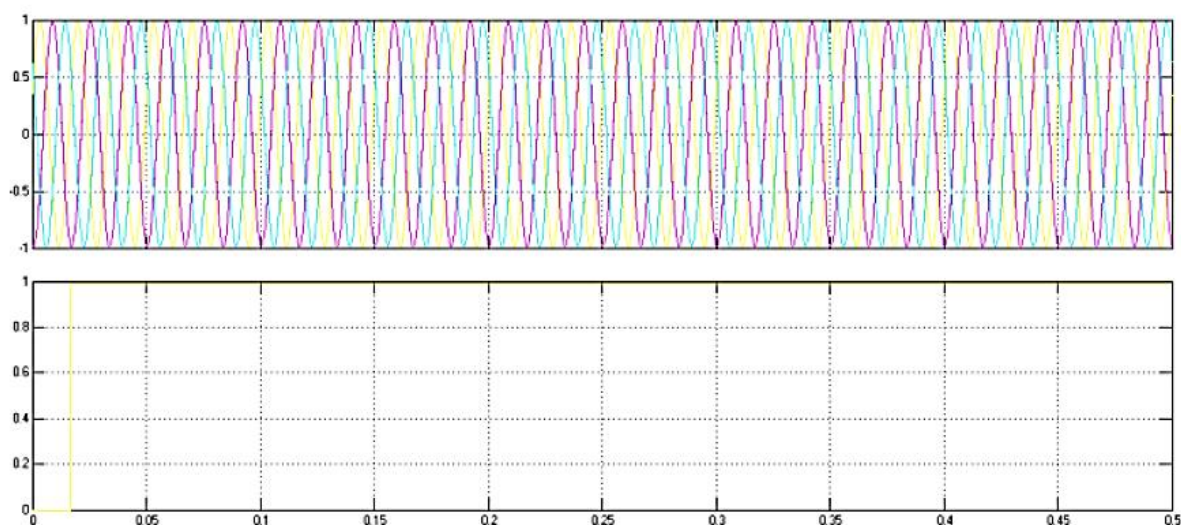
Item	Componente	Parâmetros
1	Fonte trifásica	138kv;60Hz;40MVA
2	Transformador trifásico	Estrela aterrado; estrela aterrado 138/34,5kV
3	Linha de distribuição	R=0,05 Ohms e L=0,4806H
4	Carga trifásica	10kW, estrela aterrado e 34,5kV
5	Inversor de frequência	Ponte IGBT; 1080Hz; 5us
6	Controlador PI	Kp=0,5; Ki=50 e tempo=50us
7	Fonte de corrente contínua	11,5KV
8	Capacitor	750uF
9	Resistor	10 Ohms
10	Transformador isolador	19,9/19,9kV

Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com os dados do Quadro 1, foram simuladas três situações (em momentos diferentes) e analisadas suas formas de onda: i) o circuito sem falha; ii) o circuito com uma falta trifásica-terra de 350 Ω entre as fases e 0,001 Ω entre fase-terra; e iii) o circuito com uma falta trifásica-terra de 100 Ω entre as fases e 0,001 Ω entre fase-terra. Para os casos ii e iii o afundamento de tensão ocorre entre 0,15 e 0,35 segundos.

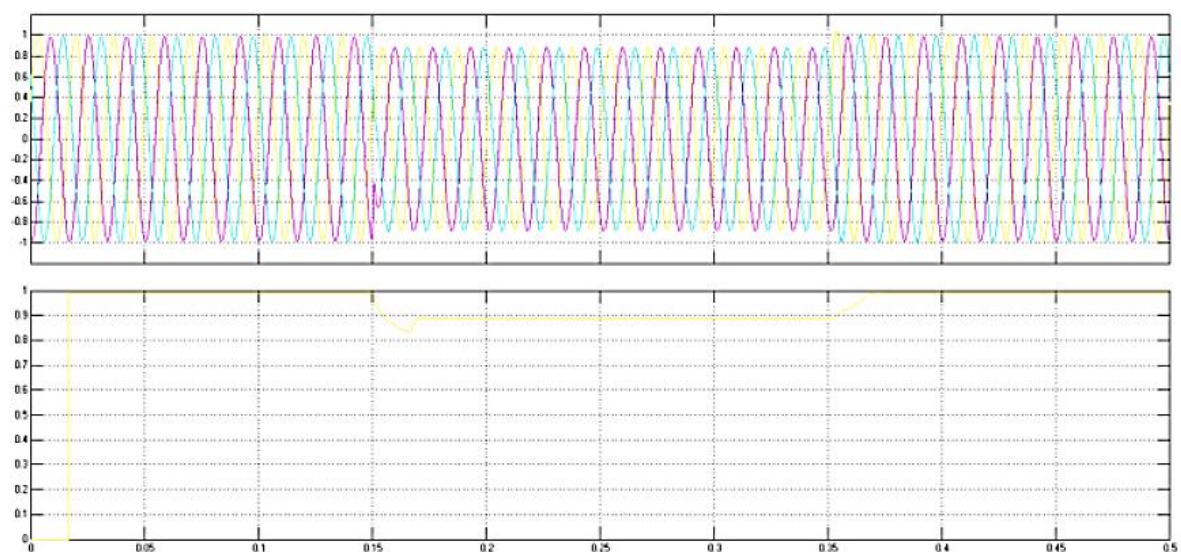
Na primeira situação a tensão trifásica do circuito possui a forma de onda ilustrada na Figura 12, com valor 48,79kV de pico (1pu). Na segunda situação, o circuito sofre uma falta trifásica-terra que causa no alimentador I um o afundamento de tensão que faz ela atingir um valor de aproximadamente 0,89pu. A Figura 13 ilustra esse distúrbio.

Figura 12 – Tensão fase-fase de pico medida na linha após a barra 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – (a) Tensão fase-fase de pico do afundamento com a tensão atingindo o valor de 0,89pu. (b) A sequência positiva de tensão representando a magnitude do afundamento de tensão.

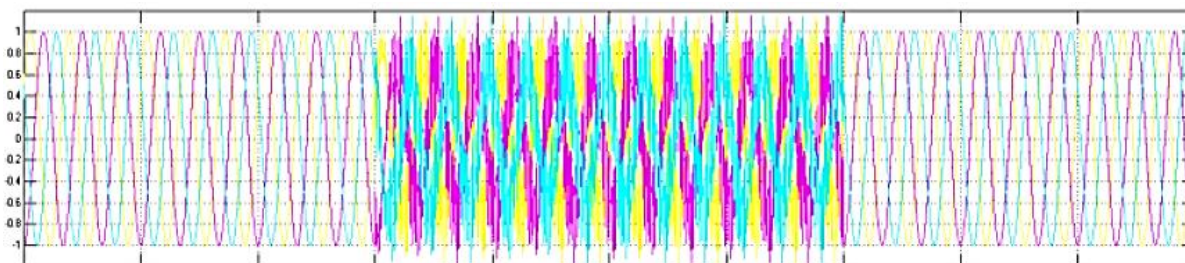


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o uso do DVR para a correção do distúrbio obtém-se a forma de onda ilustrada na Figura 14. Nota-se que o circuito DVR realizou a compensação do afundamento de tensão decorrente da falta trifásica-terra na rede. Porém em virtude dos chaveamentos realizados pelo conversor CC/CA, a tensão corrigida está

distorcida em relação a tensão original, o que faz com que tenha uma aparência mais “volumosa” no momento do afundamento de tensão.

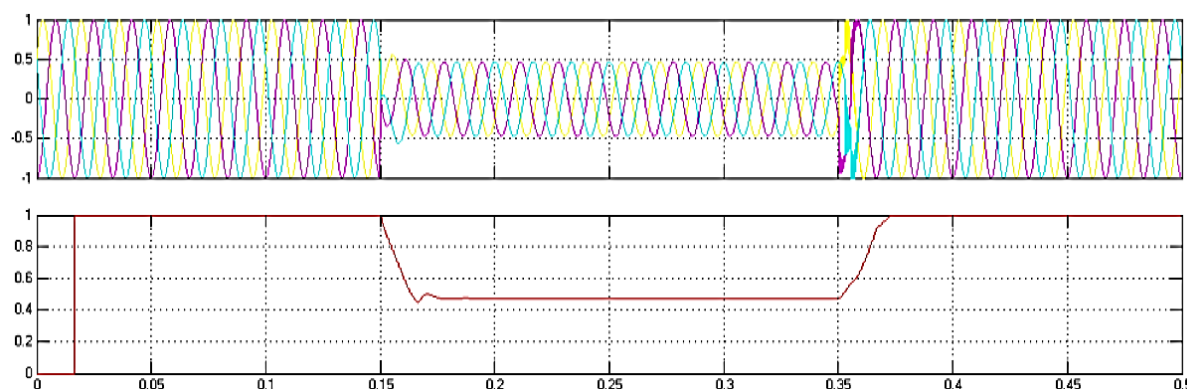
Figura 14 – Afundamento de tensão corrigido pelo DVR na segunda situação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o último caso, na hipótese da barra 1 e 2 não estarem seccionadas na subestação de Cornélio Procópio, então em um afundamento em que a tensão atinge 0,43pu na barra 1 o afundamento sentido no alimentador I também será o mesmo, conforme observado na Figura 15.

Figura 15 – (a) Tensão fase-fase de pico do afundamento com a tensão chegando a 0,43pu. (b) A sequência positiva de tensão representando da magnitude do afundamento.

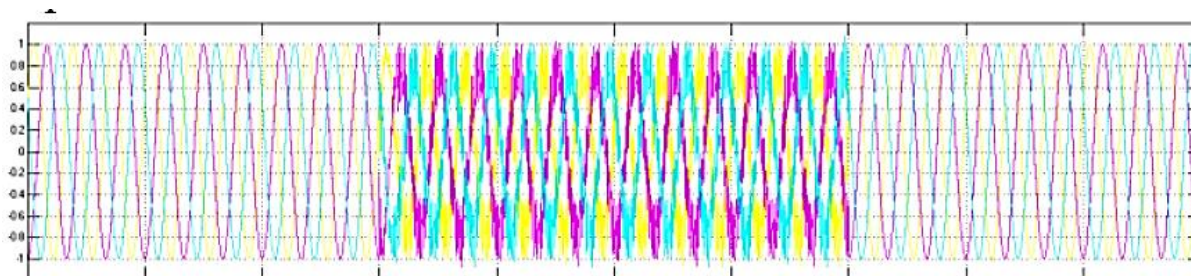


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso ilustrado na Figura 15, a tensão corrigida pelo DVR se comporta conforme apresentado na Figura 16. A forma da onda no período do afundamento de tensão possui a mesma aparência que a da situação anterior. No entanto, observa-se uma sutil queda de tensão em relação a tensão original. Esse fato evidencia a capacidade da injeção de tensão pelo DVR, atingindo aproximadamente 50% da

tensão nominal, ou seja, seu funcionamento será satisfatório quando os afundamentos a serem corrigidos forem menores à 50% e por período de até 0,1 segundos (PRAVEENA; JAYASHREE, 2014).

Figura 16 – Afundamento de tensão corrigido pelo DVR na terceira situação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instalação de DVR no ponto de entrega de energia em um consumidor industrial constitui uma importante ação no sentido de melhorar a qualidade de energia recebida por um cliente que não pode estar sujeito a afundamentos de tensão sob risco de perda da produção e prejuízos econômicos.

Observou-se que durante as correções dos afundamentos foi gerado algumas componentes harmônicas de tensão decorrente do chaveamento do inversor de frequência. No entanto, considerando que estes componentes harmônicos são produzidos eventualmente e por um curto período, não há prejuízos em se adotar o circuito utilizado neste trabalho para a correção de afundamentos de tensão.

Adicionalmente, salienta-se que um consumidor industrial de porte similar ao atendido pelo alimentador I, consome em média 200.000 a 300.000 kWh por mês. Considerando o que foi citado por Watanabe (2010), o custo médio de um distúrbio de afundamento de tensão é de aproximadamente 2,73 a 2,87 US\$/kWh. Nesse sentido, o valor para a compra e instalação de um DVR é inferior ao custo médio provocado pelo distúrbio. Portanto, este trabalho demonstra ser viável o emprego de um circuito DVR para correção de afundamentos de tensão em sistemas de média tensão que atendem consumidores industriais de grande importância e elevado consumo.

REFERÊNCIAS

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em 30 out. 2015.

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

IEEE Std 1159, I. (1995). IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, IEEE Std 1159-1995 p. i.

IEC Std 61000. International Electrotechnical Commission - IEC, "Electromagnetic Compatibility", IEC Standard 61000, 1996.

GALASSI, M. "Projeto e construção de um restaurador dinâmico de tensão", 2006, 116 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2006.

WATANABE, G. T. "Uma Contribuição à Análise de Perdas Ocasionadas por Afundamentos Momentâneos de Tensão", 2010, 148 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

J. L. R. e Silva e L. C. de Moura, "Alternativas Tecnológicas para Mitigação de Afundamento e Interrupção Momentâneas de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema Elétrico de Potência", Centralmat. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/214961482/Disturb-los#scribd>>. Acesso em: 30 out. 2015.

SILVA, S. M. "Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão," 1999, 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

JESUS, D. M. F. de, "Avaliação do desempenho do restaurador dinâmico de tensão frente aos afundamentos e elevações de tensão," 2006, 182 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2006.

Brumsickle, W. E. ; Schneider, R. S. ; Luckjiff, G. A. ; Divan, D. M.; McGranaghram, M. F.: Dynamic Sag Correctors : Cost-effective Industrial Power Line Conditioner . IEEE Transactions on Industry Applications vol. 37 n. 1, 2001.

BANGAR, A, "Power quality improvement of distribution networks using dynamic voltage restorer," 2011, 51 p. Master of Engineering in Power Systems & Electric Drives – Electrical & Instrumentation Engineering Department Thapar University, 2011.

Praveena, A.; Jayashree, M; Mitigation of Voltage SAG using Dynamic Voltage Restorer. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), vol.3., 2014.

SARIGA, V. P., SHIVALKAR, K., K, BHUMARKAR, Y “Modeling & Simulation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR),” 2011, 39 p. B. Tech (Electrical & Electronics Engineering – Department of Electrical Engineering Visvesvaraya National Institute of Technology Nagpur, 2011.

VERMA, S.; AGRAWAL, A.;SINGH, D. k. “Voltage Sag Compensation using SMES Based DVR Technology & Pi Controller”, 2015. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication ,Volume: 3 Issue: 8. 2015.

Mishra, S.P.; Biswal, B., Roselyn, J.P.; Devaraj, D., "Simulation and Analysis of DVR for Mitigating Voltage Sags and Swells," ScienceDirect – International Conference On Design and Manufacturing, IConDM 2013, Procedia Engineering 64 , pp.341-350, 2013.

DEMONTI, R. ; BIANCHIN, C. G. ; Almeida, A. R. ; Tarcísio Loddi . Estudo sobre Métodos de Detecção de Afundamentos de Tensão e Geração de Referências para um Restaurador Dinâmico de Tensão. In: IX INDUSCON - 9th IEEE/IAS International Conference on Industry