

DVR PARA MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Gustavo Lino Morales Espinoza¹, Lucas Samuel de Lima Tiburcio²

¹Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil
(gustavo.morales-espinoza@unesp.br)

²Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Brasil

Resumo: Um afundamento de tensão é uma diminuição momentânea na magnitude da tensão RMS (Root Mean Square, em inglês), geralmente causada por uma falha remota em algum lugar do sistema de energia. Tornou-se o principal problema na indústria afetando o desempenho de equipamentos elétricos. Dessa forma, este artigo descreve as causas dos afundamentos de tensão em plantas industriais, seus impactos na operação de equipamentos, e apresenta o Restaurador de Tensão Dinâmico (DVR) como uma possível solução.

Palavras-chave: Restaurador de tensão dinâmico; Afundamento de tensão; Qualidade de energia; Motor de indução, Carga não Linear

INTRODUÇÃO

Na atualidade, os principais problemas de qualidade da energia enfrentados pelos consumidores indústrias são as variações de tensão de curta duração (VTCD) (Moreno-Munoz et al, 2010). No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define as VTCD como um desvio significativo da magnitude da tensão por um curto intervalo de tempo (ANEEL, 2021). Sendo assim, as VTCD podem ser classificadas como afundamentos de tensão (voltage sags, em inglês) e elevações de tensão (voltage swell, em inglês). Os afundamentos de tensão estão associados com falhas de operação nos equipamentos usados pelos consumidores. As elevações de tensão, por sua vez, estão associadas com queimas de equipamentos.

Em relação aos afundamentos de tensão, as causas que levam a este tipo de distúrbios podem ser diversas, por exemplo, energização de transformadores, desequilíbrios na fonte de tensão, perdas de potência na geração, energização de grandes cargas (ou blocos de carga) no sistema de rede, partidas de motores com cargas elevadas, e curtos-circuitos na rede (Kuncoro, Garniwa, 2018). Nesse sentido, os afundamentos de tensão podem causar falhas e/ou operações inadequadas em cargas sensíveis. No caso dos consumidores industriais com cargas sensíveis a afundamentos de tensão, eles podem sofrer paradas de produção que resultam em perdas econômicas (Ward, 2001; Firouzi et al 2010).

O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) surge como uma solução economicamente viável para atenuar quedas, picos e interrupções de tensão, estabelecendo o nível adequado de qualidade exigido por cargas sensíveis (Ramasamy, Thangavel, 2012). Nesse contexto, este artigo propõe a implementação

de um DVR para compensar os afundamentos de tensão decorrentes de distúrbios elétricos na rede de distribuição. Para alcançar esse objetivo, são simulados distúrbios elétricos em uma rede de teste composta por uma carga sensível ligada a um motor de indução, uma carga linear e uma carga não linear.

MATERIAL E MÉTODOS

O DVR tradicional inicia seu funcionamento detectando o afundamento de tensão na rede elétrica, após é gerando um sinal de tensão de mesma magnitude e frequência como o sinal original. Este sinal é injetado na rede elétrica para compensar a queda de tensão e restaurar a tensão nominal da carga (Al-Mathnani et al 2007). Além de ter várias topologias de circuito e esquemas de controle, ele também pode executar outras tarefas, como compensação de harmônicos de tensão de linha, redução de transientes de tensão e limitação de corrente de falha. A configuração geral do DVR consiste em um transformador de injeção/reforço, um filtro harmônico, um conversor de fonte de tensão (VSC), um circuito de carga CC e um sistema de controle e proteção.

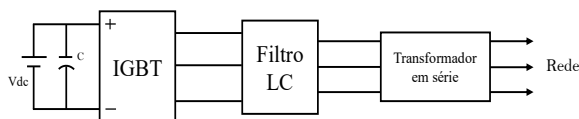
Estrutura

O DVR proposto é composto por 5 componentes principais, são eles: transformador de injeção em série, filtro harmônico LC, dispositivo inversor, sistema de armazenamento de energia e circuito de controle.

Um inversor controlado é colocado após a fonte de alimentação que é composta por uma fonte DC e um capacitor de carga. Os interruptores do inversor são basicamente acionados usando uma técnica de modulação por largura de pulso senoidal (PWM). As características não lineares dos dispositivos

semicondutores presentes no inversor resultam em formas de onda distorcidas associadas a harmônicos no lado de saída do inversor, para o qual o circuito possui filtros LC para atenuar os harmônicos que podem ser apresentados. A localização do DVR é instalada entre a carga sensível e o barramento 2, para atuar na carga sensível.

Demonstrado na Figura°1, está o diagrama esquemático equivalente do DVR. Ao aumentar ou diminuir a tensão da fonte, o DVR injeta uma tensão em série através do transformador de reforço/injeção para manter a tensão de carga desejada.



Figura°1. Estrutura do DVR

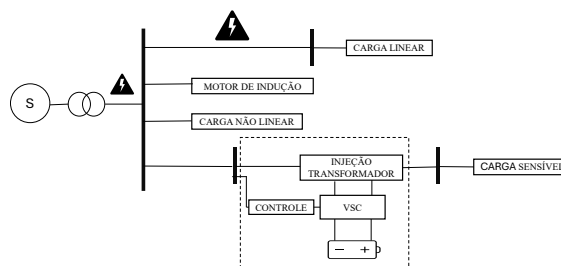
Transformadores de injeção em série: Os transformadores de injeção série são conectados em delta que são projetados para poder injetar a tensão de compensação gerada pelo DVR, tendo duas funções principais. injetar tensão, que é gerada como compensação dada pelo dispositivo inversor junto à carga, e funciona como um acoplamento de proteção, conectando o transformador do DVR através da rede de distribuição, reduz o ruído que pode ser gerado pela transição de energia do primário para o secundário.

Filtro harmônico LC: Um filtro harmônico RL e RC foi colocado em série para poder utilizá-lo de forma que a tensão harmônica gerada pelo dispositivo inversor não ultrapasse o limite permitido, conseguindo eliminar a alta frequência durante a comutação.

Inversor: O inversor é um dispositivo eletrônico de potência que pode converter a forma de onda CC para CA na magnitude e fase desejadas. Neste estudo, convertendo tensão CC em tensão CA usando ponte completa trifásica com comutação de 6 pulsos de IGBT com a técnica de PWM. A tensão senoidal produzida pelo inversor é a compensação de tensão que é então transferida para o filtro harmônico LC e transformador para injetar o lado da carga sensível.

Sistema de armazenamento de energia: O sistema de armazenamento de energia é a unidade que se encarrega do armazenamento do sistema em forma de CC, tendo vários dispositivos de armazenamento de energia utilizados, optou-se pela utilização de um capacitor, que se encarregará de suprir as necessidades

fundamentais do sistema, para poder usar o DVR como compensador de tensão.



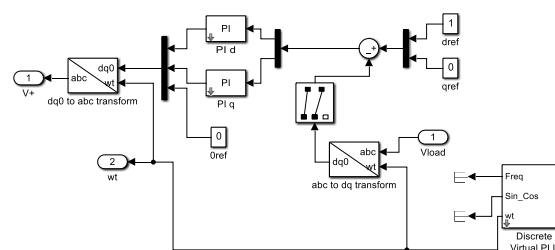
Figura° 2. Diagrama do Modelo Simulink.

Controle do circuito: O sistema de controle de um DVR desempenha um papel importante, com os requisitos de resposta rápida diante de quedas de tensão e variações na carga conectada. As funções básicas do controle do DVR são: Detectar a queda de tensão que ocorre no sistema com base no quadro de referência síncrono (SRF); Converter a queda de tensão para a referência dq0 com base na transformação de quadratura direta zero; Calcular o nível de tensão de compensação; Gerar sinal de disparo para o inversor PWM; Injeção de tensão senoidal para compensar a queda de tensão.

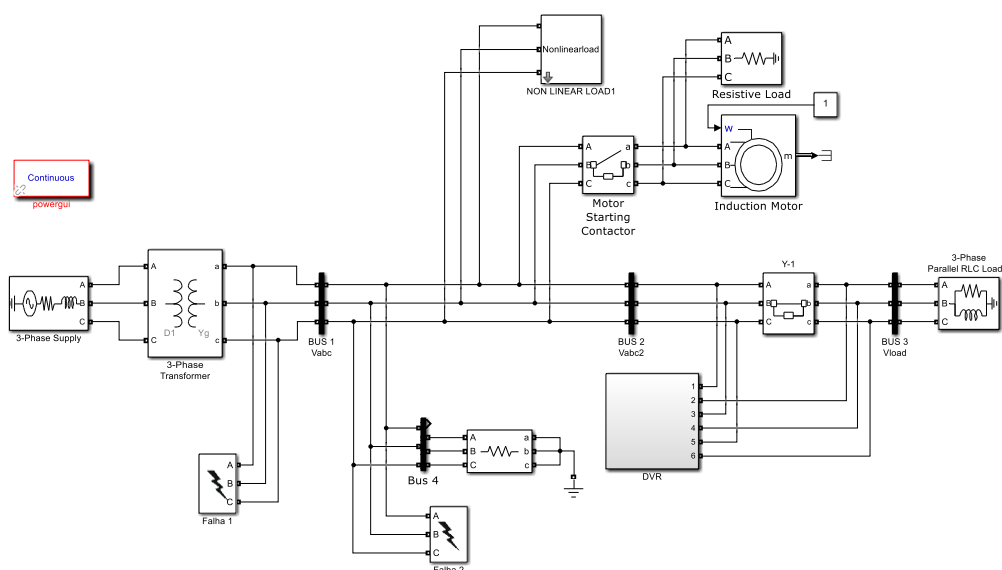
Operação e Controle do DVR

Para isso, um controlador proporcional-integral (PI) opera o sistema ou planta a ser controlada por uma soma ponderada do erro, que é a diferença entre a saída real detectada e o ponto de ajuste desejado e a integral desse valor. A saída do bloco do controlador tem a forma de um ângulo θ , que introduz atraso/avanço adicional nas tensões trifásicas. A saída do controlador, quando comparada com o gerador de sinal PWM, resulta na sequência de disparo desejada.

Neste estudo, um controle de alimentação com PLL e controlador de tensão PI é usado para controle de DVR para manter a magnitude e a fase da tensão, como mostrado nas figuras Figura° 3 e Figura° 5.



Figura° 3. Controlador PI do DVR

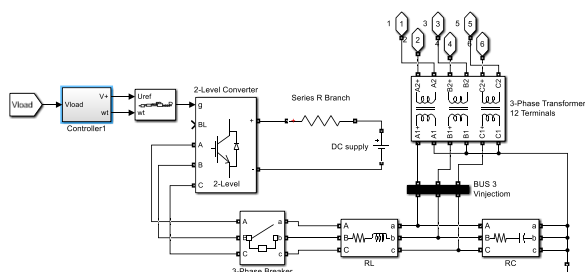


Figura° 4.Modelo Diagrama do DVR.

Para testar o desempenho do DVR na mitigação da VTCD devido aos impactos da partida do motor de indução e da falha trifásica foi gerado um modelo Simulink incluindo uma falha na linha de distribuição, indução partida do motor, energização do transformador e modelos de carga não linear para simular os eventos de qualidade de energia desejados. O nível de tensão de distribuição usado no modelo mostrado na Figura° 4.

sistema de energia e na configuração da rede, podendo levar a vários estágios de queda de tensão antes de se recuperar totalmente ao seu nível nominal. A queda de tensão em vários estágios é definida como falhas múltiplas ocorrendo consecutivamente em um curto intervalo de tempo e capturadas em um único registro como um único evento.

A partida de motores de indução é utilizada para simular afundamentos de tensão com características influenciadas pela carga industrial típica. O modelo de partida do motor de indução e o modelo de carga do motor de indução desenvolvido no Simulink são mostrados na Figura° 4. O modelo de partida do motor de indução também pode ser usado para demonstrar quedas de tensão causadas pela partida do motor de indução, quedas de tensão influenciadas pela carga da máquina de indução, bem como multiestágios falta. O modelo consiste em um bloco alimentador de fonte trifásica de 11kV, 60Hz alimentando por meio de transformadores delta/estrela de 11kV/400V, um contator de partida do motor, um motor de indução trifásico e carga resistiva de 10kW para se assemelhar à combinação típica de carga da indústria.



Figura° 5.Sistema Controlador do DVR

A falha é usada para simular a queda de tensão causada por falta de linha, consistindo em um bloco de fonte trifásica de 11 kV, 60 Hz alimentando um transformador delta/estrela de 11 kV/400 V, 1 MVA para uma carga de 500 kVA. Há um bloco de falha localizado na linha do alimentador da fonte para simular vários tipos de falha de linha e um bloco de falha de vários estágios para simular uma falha de vários estágios. Este modelo de falta de linha é capaz de simular vários tipos de faltas de linha, incluindo faltas de linha única para terra, linha dupla para terra, linha para linha, trifásica e de múltiplos estágios. A queda de tensão de vários estágios é devida ao problema de sincronização de vários mecanismos de eliminação de falhas (Styvaktakis, Bollen, 2003). Isso resulta em mudanças temporárias na impedância do

Por fim, dois blocos de falha, cada um localizado na linha do alimentador de 11kV, são usados para simular falhas de linha associadas à carga do motor de indução. Este modelo de partida do motor de indução é capaz de simular a queda de tensão causada pela partida do motor de indução e falhas de linha influenciadas pela carga do motor de indução.

Na Figura° 4 o diagrama do circuito é realizado a representação de cada um dos componentes citados e suas distribuições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação foi projetada usando MATLAB/Simulink e seus resultados mostram que o DVR proposto é um dispositivo eletrônico de grande potência para mitigar o nível profundo de queda de tensão, fazendo com que a carga sensível funcione adequadamente injetando tensão no nível de tensão nominal.

Parâmetros de Simulação

A partir do diagrama de simulação, a fonte de tensão trifásica 400 V RMS está conectada às duas cargas (carga sensível e carga resistiva) e ao motor de indução. O circuito posto a teste, é um circuito de alimentação de 11 kV e 30 MVA, com um transformador de 11 kV a 0.4 kV para poder alimentar as cargas, três tipos de carga linear, não linear e sensível, das faltas uma bifásica, uma monofásica, um motor de indução, 4 barramentos, dos contadores um normalmente aberto e outro normalmente fechado.

A configuração do diagrama de simulação é mostrada na Tabela 1

Tabela 1. Parâmetros de simulação do circuito.

Componentes	Valores			
Barra de Tensão	11kV	30MVA	60 Hz	
Transformador	Delta-Estrela	11 kV/ 400V	60 Hz	
Falha 1	Bifásica. Duração de 0.1s até 0.2s			
Falha2	Trifásica. Duração de 0.8s até 0.9s			
Carga Linear	100 Ohms			
Carga Resistiva	10000W	60Hz		
Motor de Indução	215HP	400V	60HZ	1478 RPM
Armazenamento de Energia	500 V			
Inversor PWM	Ponte Completa Trifásica	IGBT de 6 Pulsos		

A simulação de afundamento de tensão em carga sensível devido às falhas trifásicas e partida do motor de indução. Esta perturbação é aplicada sequencialmente no intervalo de tempo 1 segundo. Para testar o DVR será analisada a tensão de saída do DVR e os níveis de qualidade na carga sensível.

Os dados relevantes referentes ao motor de indução podem ser visualizados na Tabela 2, sendo este um motor de indução que corresponde com as características desejadas para realização da simulação.

Tabela 2. Parâmetros de simulação do motor de indução.

Componentes	Valores
Potência Nominal	160 kW (125 HP)
Frequência	60 Hz
Vi	400 V
RPM	1487
Resistencia Estator	0.01379 p.u
Indutância Estator	0.04775 p.u
Resistencia Rotor	0.007728 p.u
Indutância Rotor	0.04775 p.u
Indutância Mutua	2.416 p.u
Polos Pares	2

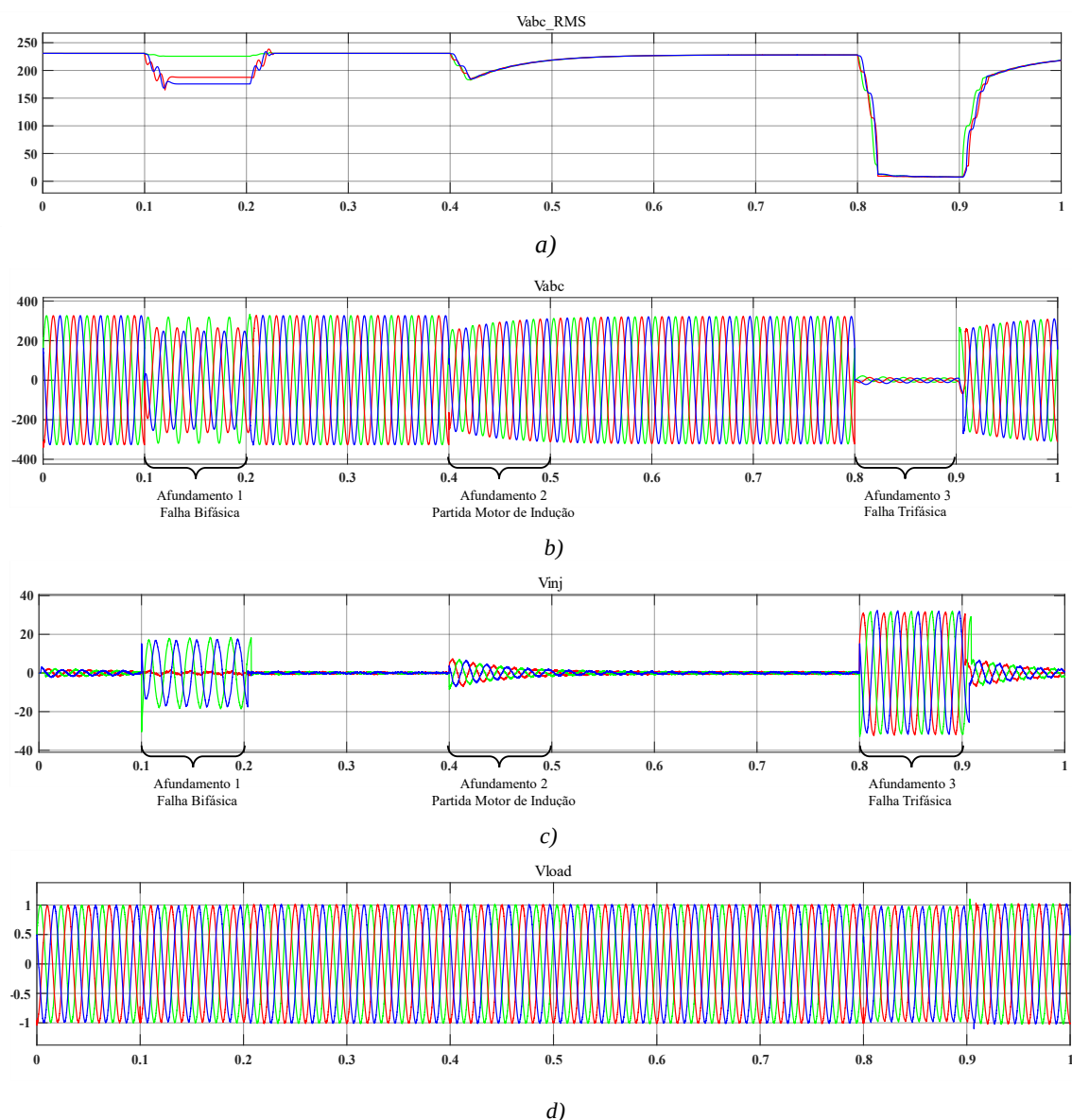
Afundamento de Tensão na Carga Sensível

A simulação de queda de tensão em carga sensível devido às falhas trifásicas e partida do motor de indução, de modo que as quedas de tensão causadas por as falhas e partida do motor não afetou apenas o perfil de tensão da carga.

Da Figura° 6 se pode observar a presença de 3 afundamentos de tensão presentes causados pelas quedas trifásicas e o acionamento de um motor de indução, aplicado nos instantes de 0.1 a 0.2 (para a queda bifásica presente no ponto de acoplamento comum), 0.4 (para a partida do motor de indução de 215 HP (160 kW), 400 V, 60 Hz, 1487 RPM (conectado antes da carga sensível); 0.7 a 0.8 (para a falha trifásica presente antes da carga linear), dando um total de simulação de 1s para poder rodar todos estes acontecimentos.

É evidenciado uma queda de tensão considerável que vai de 240V a 175V nas duas fases onde é produzido o afundamento de tensão ocorrido desde o instante 0.1 e 0.2, depois de se registrar ver uma queda de tensão de 240 V até 185V que ocorre no instante de 0.4, e finalmente se logra observar uma queda de tensão de 240 a 10 V para os instantes de 0.7 a 0.8. Da mesma forma, o perfil de tensão em RMS sem a presença do DVR pode ser vista na Figura° 6.

A Figura° 6 mostra a injeção de tensão fornecida pelo DVR proposto neste trabalho, onde se pode apreciar a recuperação do DVR ante os diferentes tipos de falhas ocorridas, para o instante de 0.1 a 0.2 onde se apresenta uma queda de tensão em duas fases devido a falha bifásica gerada no PAC, foi entregue uma voltagem de 65 V outorgado pelo DVR apresentado nas fases onde ocorreu a falha, Para o instante 0.4 onde se apresentou uma queda de tensão nas três fases desencadeada pela partida de um motor de indução se entregou uma tensão inicial de 55 V produzida pelo DVR para poder compensar gradativamente o afundamento provocado pelo motor.



Figura° 6. Perfis de Tensão a) Valores em Tensão RMS sem o DVR. b) Valores em Tensão sem o DVR c) Perfil de Tensão Gerado pelo DVR. d) Perfil de Tensão com o DVR em p.u.

Finalmente, para o instante 0.7 e 0.8 onde foi presenciada uma queda de tensão ocorrida pela falha trifásica se entregou 230 V produzida pelo DVR para poder compensar o afundamento gerado pela falha trifásica.

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram simulados afundamentos de tensão decorrentes de falhas bifásicas, falhas trifásicas e partidas de motores de indução. Os resultados das simulações revelaram que as quedas de tensão atingiram níveis significativos no lado da carga, com valores de 0.3 p.u. para falhas bifásicas, 0.9 p.u. para falhas trifásicas e 0.23 p.u. para partidas de motores. No entanto, ao empregar o DVR, foi possível superar essas quedas de tensão e corrigir o perfil de tensão da

carga para um valor de referência de 1.0 p.u., garantindo, assim, a estabilidade da tensão de carga. Os resultados finais evidenciam o funcionamento eficaz do DVR, demonstrando sua capacidade de corrigir afundamentos de tensão causados por falhas na rede e partidas de motores, o que ressalta sua importância como uma solução viável para melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

REFERÊNCIAS

- Al-Mathnani, A. O., et al. Photovoltaic Based Dynamic Voltage Restorer For Voltage Sag Mitigation. 5th Student Conference on Research and Development, Selangor, pp. 1-6, 2007, doi: 10.1109/SCORED.2007.4451393.



ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - qualidade de Energia Elétrica, 2021.

Firouzi, M., et al. Proposed New Structure for Fault Current Limiting and Power Quality Improving Functions. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada, 2010.

Kuncoro, M, Garniwa I. DVR to Voltage Sag Mitigation Due to Induction Motor Starting and 3 Phase Fault. 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 2018, pp. 73-78, doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576924.

Moreno-Munoz, A., et al. Improvement of power quality using distributed generation. Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 32, n. 10, pp. 1069–1076, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.06.002.

Ramasamy, M, Thangavel, S. Photovoltaic based dynamic voltage restorer with power saver capability using PI controller. Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 36, n. 1, pp. 51–59, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.023.

Styvaktakis, E, Bollen, M. H. J. Signatures of Voltage Dips:Transformer Saturation and Multistage Dips. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, n. 1, pp. 265-270, 2003.

Ward, D. J. Power quality and the security of electricity supply. Proceedings of the IEEE, Vol. 89, n. 12, pp: 1830 –1836, 2001.