

Revisão de Técnicas para Detecção de Afundamento de Tensão

Gabriel Cardoso Salgado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte
gabrielcardososalgado@gmail.com

Igor Amariz Pires

Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte
iap@ufmg.br

Resumo — A qualidade de energia tem sido uma forte demanda nos últimos anos, motivando para a solução de problemas nessa área. O Restaurador Dinâmico de Tensão tem se mostrado eficiente, com custo reduzido. Uma etapa de detecção de afundamento de tensão é requerida a fim de acionar uma compensação ao efeito do distúrbio. Isso tem motivado diversos estudos para propor algoritmos de detecção de afundamentos. Este trabalho faz uma revisão e comparação entre diversas técnicas de detecção encontradas na literatura. As vantagens e desvantagens de cada método são expostos e um exemplo com aplicação dos algoritmos em dados reais de medição de tensão de rede com ocorrência de afundamento de tensão mostra as características de cada método.

Palavras-chaves — Qualidade de energia elétrica, restaurador dinâmico de tensão, afundamentos de tensão, detecção de afundamentos de tensão.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade de energia têm sido alvo de diversos estudos e abordagens desde os anos 1980 para resolução sistêmica de problemas que têm causado grandes prejuízos em indústrias. Equipamentos industriais mais recentes tendem a ser mais sensíveis a problemas na qualidade de energia. E como as diversas cargas estão conectadas em rede de alimentação, uma falha ocorrendo em um ponto pode causar falhas em quaisquer cargas próximas [1].

No Brasil, o regulamento para definições conceituais, normas para medições e procedimentos para atendimento ao consumidor são descritos no PRODIST [2]. A PRODIST tem seu conteúdo baseado no padrão europeu IEC. A norma internacional IEEE std 1159-2009 propõe práticas recomendadas para medições e definições conceituais de problemas de qualidade de energia [3]. Uma das definições que aparece tanto no PRODIST como em IEEE std 1159-2009 é o afundamento de tensão.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar diversas técnicas de detecção de afundamentos de tensão, comparar em suas vantagens, desvantagens e exemplo prático, mostrando várias formas tradicionais de detecção automática rápida e precisa de afundamentos de tensão para acionar a atuação de um restaurador dinâmico de tensão.

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os fenômenos de afundamentos de tensão e interrupções são os mais comuns problemas de qualidade de energia que afetam consumidores industriais [4], [5], [6]. Vários estudos, apontaram que 92% dos distúrbios em sistemas de energia elétrica são devidos a afundamentos de tensão [7]. Entre as possíveis causas de afundamentos de tensão há eventos de chaveamentos de uma carga, bloqueio de um banco de capacitores, acionamento de grandes cargas como motores ou condições de falta ou curto-circuito em algum ponto próximo [1]. As consequências desses fenômenos são paradas em processos industriais ou danos em equipamentos.

Na definição da PRODIST, assim como em IEEE std 1159-2009, o afundamento de tensão é caracterizado pela queda do valor eficaz, em relação a tensão de referência, para 0,1pu a 0,9pu. Enquanto a PRODIST considera durações entre 1 ciclo e 3 segundos como momentâneas e entre 3 segundos e 3 minutos como temporárias, para a IEEE std 1159-2009 as durações momentâneas estão na faixa de 30 ciclos a 3 segundos e durações temporárias entre 3 segundos e 1 minuto. Na IEEE std 1159-2009 ainda tem as durações instantâneas situadas entre 0,5 ciclo e 30 ciclos [2], [3].

Estudos sobre tais fenômenos quanto às principais causas, frequência de ocorrência, condições que favorecem ocorrência, quantificação de prejuízos causados são de suma importância para avaliação de medidas para resolução desses problemas de qualidade de energia [1], [5]. Nos anos 1980s algumas pesquisas foram levantadas pela EPRI (Electric Power Research Institute) com a colaboração de alguns usuários no EUA. Foi possível descobrir que a severidade do afundamento de tensão era tão maior quanto mais próximo se estava da falta que o gerou. Além disso os afundamentos monofásicos são os mais comuns com cerca de 66% das ocorrências, enquanto bifásicos e trifásicos tiveram 16% e 18% na pesquisa levantada [5], [8].

Algumas medidas que podem ser tomadas pelo lado do usuário para solução de problemas específicos a determinadas cargas sensíveis, que têm necessidade de operar continuamente em produção industrial são a instalação de dispositivo de mitigação de afundamentos como conjunto motor-gerador (motor-generator set, MG set), alimentador de energia ininterrupta (uninterruptible power supplier, UPS), transformador de tensão ferromagnético constante

(ferroresonant constant voltage transformer, CVT), sintetizador magnético e dispositivos de armazenamento em supercondutores (superconducting storage device, SSD) [4], [5]. Um dispositivo que tem se popularizado pelo baixo custo e alta eficiência é o Restaurador Dinâmico de Tensão (dynamic voltage restorer, DVR). Este tem mostrado boa capacidade de mitigar os impactos de afundamentos de tensão [4], [9], [10].

O DVR é formado por um inversor trifásico que injeta tensão através de um transformador em série com a carga [11]. Esse dispositivo é recomendado para equipamentos com potência na ordem de kVA a MVA [12]. Pode ter armazenamento interno de energia através de bateria ou banco de capacitores ou usar a própria tensão de alimentação, ainda que sob distúrbio, para prover compensação na tensão da carga [13]. Quanto a atuação, pode ser standby, isso é, atuando apenas quando um afundamento de tensão é detectado, ou online, onde alguma tensão de compensação é injetada o tempo todo. O primeiro tipo em termos de atuação requer medição e detecção de afundamento de tensão.

III. TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Para uma solução de mitigação de afundamentos de tensão, uma etapa importante para acionamento do processo de compensação do afundamento de tensão é a detecção desse distúrbio. É desejável que um sistema faça tal detecção tão rapidamente quanto possível [7].

Algumas definições importantes sobre a natureza do afundamento de tensão são [14]:

- Salto de fase: diferença entre o ângulo-fase da tensão de uma fase afetada durante um afundamento e o ângulo-fase que a mesma teria sem a ocorrência de tal distúrbio.
- Profundidade do afundamento: diferença entre o valor eficaz nominal e o valor eficaz presente na fase afetada durante um afundamento.

A detecção pode atuar nas três fases ou em cada fase individualmente. Em geral, um algoritmo de detecção de afundamento de tensão baseado em uma fase monitorando cada uma das fases individualmente é suficiente para um bom desempenho de detecção. Já um algoritmo baseado em três fases, tende a não ser suficiente para detecção eficiente por considerar apenas a componente de tensão de sequência positiva [15].

Na literatura, diversas técnicas são propostas para detecção de afundamentos de tensão, especialmente para atuação de DVR. Não existe uma preferida ou considerada a melhor, mas existe um grupo de técnicas padrão frequentemente usadas para detectar início e fim de afundamento de tensão [12]. Essa seção apresenta essas técnicas.

A. Monitoramento do valor no último pico

Essa técnica detecta picos da tensão de alimentação através da sua derivada, quando essa vale zero. O valor da tensão nos instantes de pico é comparado com a referência de 1,0pu e se a diferença superar um limiar de tolerância, a técnica acusa afundamento de tensão. O término do afundamento é

encontrado quando essa diferença volta para inferior ao limiar na ocorrência de pico [12].

A vantagem é a simplicidade de implementação, baixa complexidade e fácil interpretação do algoritmo.

As desvantagens estão em sensibilidade alta em presença de ruído na tensão. Como as detecções de afundamento são feitas apenas nos picos, um simples afundamento que não saia muito do formato senoidal pode ter atraso de até meio ciclo para sua detecção. Por esse motivo, o algoritmo tende a detectar o início e fim de tal afundamento com um considerável atraso. Além disso, não é capaz de entregar informações de profundidade do afundamento e salto de fase.

Para fins práticos, a condição de derivada nula não é necessariamente o valor zero exato, mas um intervalo, por exemplo, (-5%, 5%) na qual o valor da derivada é desprezível. Para contornar o problema de rápido cruzamento pelo zero, o algoritmo pode ser feito para detectar não somente a ocorrência de derivada contida em (-5%, 5%) como também variação de sinal da derivada.

B. Monitoramento do valor de pico

A tensão de alimentação é tida como senoidal com determinada amplitude V_p . O monitoramento do valor de pico consiste em determinar essa amplitude instantaneamente, ao contrário da técnica anterior que procura condição na derivada da tensão.

Uma forma de determinar a amplitude é analisando as componentes DQ (direta e em quadratura, da transformada Park) obtidas a partir de uma PLL (Phase Locked Loop) rastreando um ângulo de referencial síncrono. Essa forma pode ser aplicada a uma ou nas três fases. Pode-se monitorar o valor de pico como em (1) [12].

$$V_p = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (1)$$

Em que V_d é a componente direta e V_q é a componente em quadratura. O controle da PLL pode fixar uma das componentes em zero para rastrear o ângulo de fase.

Uma desvantagem ao aplicar (1) em três fases é a sensibilidade a desbalanceamento de fases. Esse problema gera valor não nulo na componente de sequência zero V_0 . Consequentemente o valor de pico calculado não representa o valor de pico em ambas as três fases.

Para de aplicar (1) em cada fase individualmente, usa-se uma PLL monofásica. Para a forma de detecção monofásica, a vantagem é informar prontamente o salto de fase e o valor de pico instantâneos [12].

Outra forma de determinar a amplitude V_p , em cada fase individualmente, é obter duas funções ortogonais. Uma dada tensão de alimentação $v(t)$ é da forma de uma senoidal de período T em regime sem distúrbios. Ao se deslocar o ângulo em 90° com um deslocamento de tempo, obtém-se uma

senoidal ortogonal $v\left(t - \frac{1}{4}T\right)$. Essa forma calcula o valor de pico como em (2) [16].

$$V_p = \sqrt{v(t)^2 + v\left(t - \frac{1}{4}T\right)^2} \quad (2)$$

Outra forma de se obter uma senoidal ortogonal para se obter o par de funções ortogonais é extrair a derivada do sinal de tensão e aplicar um ajuste de escala. Essa forma calcula o valor de pico como em (3) e demonstrado em [7].

$$V_p = \sqrt{v(t)^2 + \left(\frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} v(t)\right)^2} \quad (3)$$

Pelo fato de usar duas funções ortogonais para calcular o valor de pico, essa técnica costuma ser chamada de método ortogonal de detecção de afundamento de tensão. [7], [16]. Essa técnica tem vantagem de ser de baixa complexidade e ter monitoramento do valor de pico instantaneamente.

Por qualquer uma das formas de se obter o valor de pico, a técnica compara tal valor com uma referência e acusa afundamento de tensão se a diferença superar um limiar. O fim do afundamento se dá quando a diferença volta para inferior ao limiar.

O cálculo em (2) considera a tensão em instante passado de um quarto de ciclo. A desvantagem desse cálculo surge quando a tensão estava em um estado diferente a um quarto de ciclo em termos de presença de afundamento e assim o valor de pico calculado não representa o valor de pico instantâneo da tensão.

Quanto ao cálculo em (3), existe certa sensibilidade a ruídos na tensão. Para contornar esse problema, pode ser inserido um filtro. O preço a se pagar por isso é um acréscimo no atraso de detecção devido a dinâmica do filtro.

C. Monitoramento do valor eficaz

O monitoramento do valor eficaz consiste em calcular o valor eficaz V_{rms} da tensão de alimentação e acusar afundamento quando a diferença entre o valor eficaz nominal e o valor calculado for maior que um limiar de tolerância. A interpretação da técnica fica claramente igual a definição de afundamento de tensão segundo a PRODIST e IEEE quando o limiar de tolerância é de 0,1pu.

Uma dificuldade de se calcular o valor eficaz como na sua definição a cada amostra de tensão de rede é aplicar uma soma em um grande volume de dados. Dado que um ciclo tem N amostras, uma forma mais prática de se implementar foi demonstrada em [16] e expressa em (4) e (5), dispensando a necessidade de somar todos os valores de um ciclo inteiro.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} S[k]} \quad (4)$$

$$S[k] = S[k-1] + v[k]^2 - v[k-N]^2 \quad (5)$$

Essa técnica tem implementação simples e baixa complexidade computacional com a forma prática demonstrada de se obter o valor eficaz. Por outro lado, não entrega informação de salto de fase e há atraso na detecção de instantes inicial e final do afundamento por efeito de se considerar média em uma janela [16].

D. Monitoramento do desvio do valor instantâneo

Essa técnica é aplicada a cada fase individualmente. O desvio do valor instantâneo é a diferença entre o valor da tensão de rede e uma referência variável que tem forma senoidal, com amplitude, fase e frequência que a tensão teria em condições sem distúrbio. A maneira de se obter essa referência é aplicando uma PLL monofásica na tensão de rede para rastrear o ângulo de fase [16]. É desejável que o tempo de resposta da PLL seja grande para o rastreamento rejeitar a perturbação do próprio distúrbio que ocorrer na tensão [15].

Sendo a tensão de rede $v(t)$ e a referência obtida por uma PLL aplicada a tensão de rede $v_{ref}(t)$, o desvio do valor instantâneo é dado em (6).

$$v_m(t) = v_{ref}(t) - v(t) \quad (6)$$

Assumindo que ambas as tensões $v_{ref}(t)$ e $v(t)$ são senoidais com amplitudes V_{ref} e V e fases ϕ_{ref} e ϕ , o desvio assume a forma dada por (7).

$$\begin{aligned} v_m(t) &= V_m \sin(\omega t + \phi_m) \\ V_m &= \sqrt{V_{ref}^2 + V^2 - 2V_{ref}V \cos(\phi_{ref} - \phi)} \\ \phi_m &= \tan^{-1} \left(\frac{V_{ref} \sin(\phi_{ref}) - V \sin(\phi)}{V_{ref} \cos(\phi_{ref}) - V \cos(\phi)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

As vantagens dessa técnica são a rapidez em detectar os instantes inicial e final do afundamento de tensão, capacidade de entregar informações instantâneas de profundidade e salto de fase do distúrbio e robustez a distorções na forma de onda da tensão de rede [16].

E. Análise da transformada de Fourier com janela

Essa técnica é aplicada a cada fase individualmente e aplica uma janela deslizante para se fazer uma análise. A ferramenta de transformada de Fourier com janela (windowed fast fourier transform, WFFT) é aplicada em uma janela deslizante para se obter informações de magnitude e fase de cada componente de frequência [12].

Por ser aplicado a uma janela com N dados com valores $v[k]$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, usa-se a transformada discreta de Fourier dada por (8).

$$F(w) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v[k] e^{-j \frac{2\pi w k}{N}} \quad (8)$$

Para detecção de afundamento de tensão, a magnitude da componente fundamental é avaliada e comparada com uma referência. A fase dessa componente também pode ser útil para informar o salto de fase instantâneo durante um distúrbio.

A vantagem é a riqueza de informações de magnitude e fase de cada um dos componentes harmônicos, além da fundamental, da rede de alimentação. Dependendo da aplicação, tais informações extras podem ser usadas. Um exemplo de uso dessas informações é para uma etapa de classificação do distúrbio, podendo-se ampliar o estudo para incluir outros fenômenos de qualidade de energia conhecidos tais como impulsos, transientes oscilatórios, elevações de tensão, distorções harmônicas, ruído e interrupções [17]. Uma ferramenta alternativa a WFFT que tem sido usado para prover informações para a etapa de classificação é a transformada Wavelet (Wavelet transform, WT) [12], [17], [18].

IV. COMPARAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DETECÇÃO

Para comparar as técnicas de detecção de afundamento apresentadas na seção III, cada uma foi implementada em script Matlab e diagramas no Simulink. Nas implementações, foi incluída uma regra de 16 pontos. Essa regra consiste em considerar a transição de estado devido a ultrapassagem de limiar na ao se superar 16 pontos de amostragem na nova condição em relação ao limiar. Essa regra está em conformidade com práticas recomendadas de medições [19].

A aplicação de cada técnica foi em dados reais de medição de tensão com ocorrência de afundamento de tensão vindos da referência [20]. Muitos trabalhos demonstram as suas propostas de algoritmos de detecção com dados gerados em simulação. Optou-se por utilizar dados reais para provar mais severamente cada uma das técnicas com relação a situações reais nas quais são utilizadas para uma solução prática de atenuação dos efeitos de afundamentos de tensão sobre uma carga sensível. O afundamento de tensão em questão é mostrado em gráfico na Fig. 1.

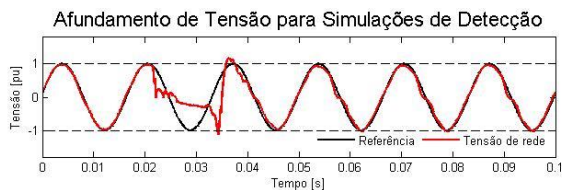


Fig. 1. Dados de afundamento de tensão obtido com medição.

O gráfico na Fig. 1 mostra os dados reais e uma tensão de referência para mostrar o comportamento que deveria ter a tensão se não houvesse afundamento.

A. Monitoramento do valor no último pico

A técnica de monitoramento do valor no último pico foi implementada conforme a Fig. 2. Ao se detectar pico, o valor da tensão é avaliado para alterar o estado de detecção se tiver maior ou menor que um limiar. Aplicando os dados reais, essa técnica gerou o resultado na Fig. 3, que mostra a tensão com distúrbio e a detecção.

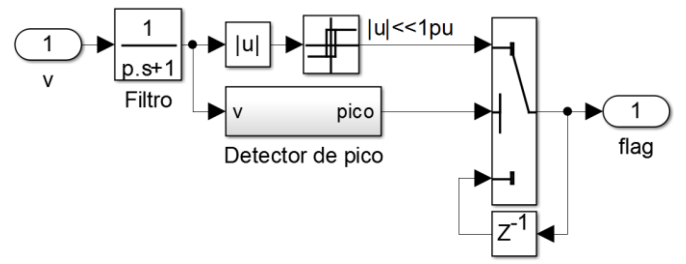


Fig. 2. Diagrama de blocos do monitoramento do valor no último pico.

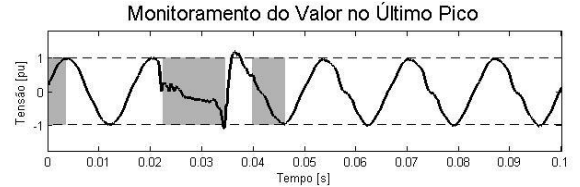


Fig. 3. Resultados da técnica de monitoramento do valor de tensão no pico.

Quase imediatamente após o início real do afundamento, já ocorre uma situação de derivada nula na tensão, o que ajudou o algoritmo a detectar muito rapidamente o distúrbio. Já no final, o algoritmo detectou uma situação de derivada nula com a tensão com valor absoluto maior que 1, porém com sinal contrário ao da tensão se não houvesse distúrbio, fazendo o algoritmo detectar um final antecipado ao instante final real do distúrbio.

Outra fraqueza ocorreu após o afundamento em questão, em decorrência de ruído que levou a situação derivada nula quando com a tensão próxima de 0,5. Isso fez o algoritmo detectar um falso positivo.

B. Monitoramento do valor de pico

A técnica de monitoramento do valor de pico foi implementada com duas formas de se obter as duas funções ortogonais: com atraso de tempo de um quarto de ciclo pela equação (2) e com derivação e ajuste de escala na tensão pela equação (3). Essas implementações são mostradas na Fig. 4, diferindo da maneira de se calcular a função ortogonal.

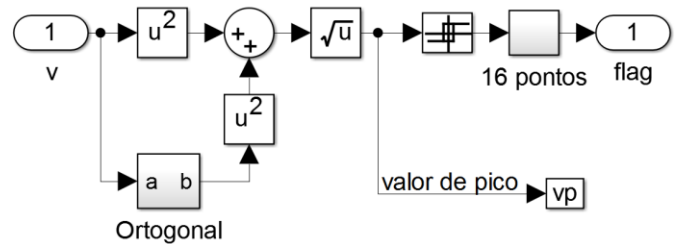


Fig. 4. Diagrama de blocos do monitoramento do valor de pico.

Aplicando os mesmos dados reais, foram obtidos os resultados na Fig. 5 para forma de atraso de tempo e na Fig. 6 para forma de derivação e ajuste de escala.

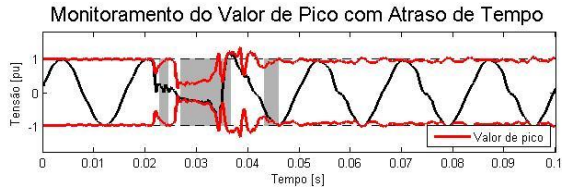


Fig. 5. Resultados da técnica de monitoramento do valor de pico com deslocamento de tempo para obtenção de função ortogonal.

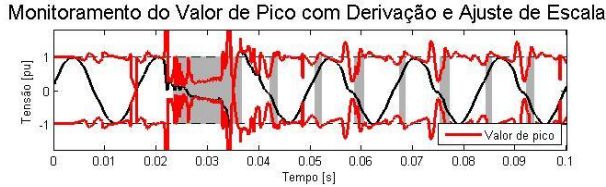


Fig. 6. Resultados da técnica de monitoramento do valor de pico com derivação e ganho na tensão para obtenção de função ortogonal.

Os resultados mostram que a técnica foi eficiente para detectar o afundamento. O atraso na detecção, tanto do início como do fim do distúrbio, é o tempo equivalente a 16 amostras, que é devido à aplicação da regra dos 16 pontos. Isso que faz notar que o algoritmo detecta os instantes inicial e final com precisão de um milissegundo para o distúrbio exposto de exemplo.

O ponto fraco da técnica usando atraso de tempo foi exposto ao se notar que um quarto de ciclo após o início do afundamento, houve detecção de falso final do distúrbio. Quanto à versão que usa derivação e ajuste de escala, houve vários falsos positivos após o afundamento devido a ruído que interferiu fortemente na derivada da tensão.

C. Monitoramento do valor eficaz

A técnica do monitoramento do valor eficaz foi implementada conforme a equação (4) e é mostrada na Fig. 7. O valor eficaz é comparado com o valor nominal e é aplicada a regra dos 16 pontos para a detecção.

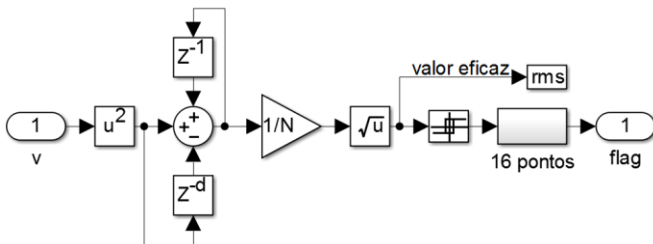


Fig. 7. Diagrama de blocos do monitoramento do valor eficaz.

Os resultados da aplicação dessa técnica nos dados são mostrados na Fig. 8. Ao invés de mostrar o valor eficaz, optou-se por multiplicar por $\sqrt{2}$ e mostrar o valor de pico para ter o mesmo padrão de comparação com a técnica anterior.

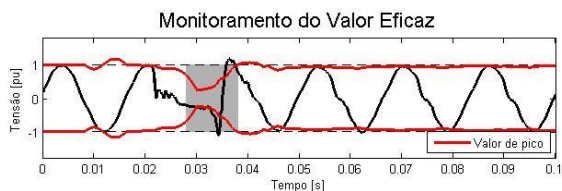


Fig. 8. Resultados da técnica de monitoramento do valor eficaz.

A queda e a subida do valor eficaz são suaves e têm um certo atraso de tempo em relação aos instantes inicial e final do afundamento de tensão. Isso acontece porque o cálculo é feito sobre uma média em uma janela de tamanho de um ciclo. Por esse motivo, o algoritmo teve um atraso considerável em detectar o distúrbio.

D. Monitoramento do desvio do valor instantâneo

Foi implementada a técnica do monitoramento do desvio do valor instantâneo conforme a equação (6) e mostrada na Fig. 9. Com a aplicação da técnica implementada nos dados, o resultado obtido é mostrado na Fig. 10.

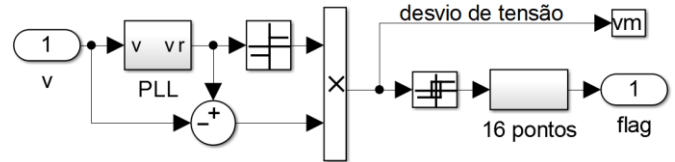


Fig. 9. Diagrama de blocos do monitoramento do desvio do valor instantâneo

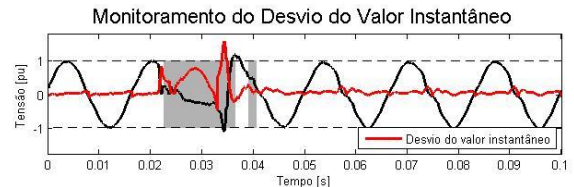


Fig. 10. Resultados da técnica de monitoramento do desvio do valor instantâneo.

A detecção foi rápida e eficiente. O tempo que o algoritmo levou para detectar tanto o início como o fim do afundamento foi de um milissegundo, equivalente a 16 amostras. Isso mostra que os atrasos são devidos a regra dos 16 pontos e o algoritmo tem precisão de um milissegundo na detecção de início e fim do afundamento. Também é notável a capacidade de entrega da informação de profundidade instantânea na forma de desvio como é mostrado no gráfico.

E. Análise da transformada de Fourier com janela

A técnica que usa a WFFT foi implementada, em Matlab, avaliando a magnitude da componente de 60Hz com diferentes tamanhos de janela. Os tamanhos usados foram de variam de 1 a 2 ciclos. O resultado da aplicação dessa técnica nos dados é mostrado na Fig. 11.

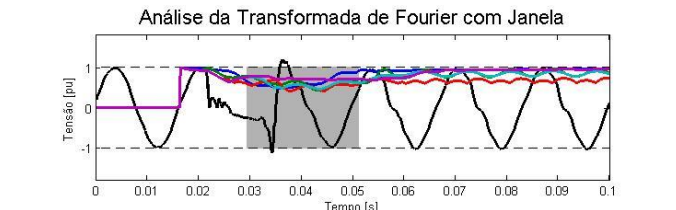


Fig. 11. Resultados da técnica de análise da transformada de Fourier com janela.

O afundamento de tensão surtiu efeito na magnitude da componente de 60Hz, mas por se aplicar a análise em janelas, a magnitude obtida só ficou abaixo do limiar após um tempo considerável de atraso de detecção. O limiar também demorou para ser atingido na volta, tornando a detecção do instante final

do afundamento lenta também. Por outro lado não houve falsos positivos.

V. COMPARAÇÕES DE RESULTADOS

A fim de se comparar o desempenho das técnicas como foram implementadas quanto a rapidez de detecção, a Fig. 12 mostra a detecção de cada uma nos dados reais, com foco no momento em que ocorreu afundamento de tensão.

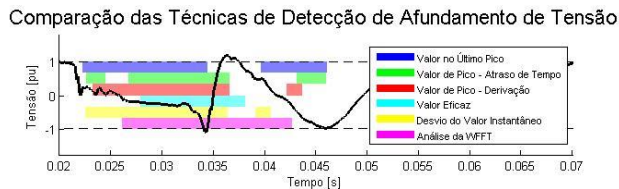


Fig. 12. Detecção de afundamento de tensão com cada uma das técnicas.

As técnicas baseadas em valor eficaz e na análise da WFFT tiveram tempo de resposta muito lenta. Isso é consequência de usar uma janela de dados.

As demais quatro técnicas se mostraram eficientes em detectar o início e o fim do afundamento rapidamente. Todas essas, no entanto, detectaram falso positivo em instantes após o afundamento. Em ambos os quatro casos, foi devido a ruído. No caso do monitoramento do valor de pico com atraso de tempo, o efeito do ruído surtiu na componente ortogonal, fazendo essa técnica detectar o falso positivo um quarto de ciclo após as outras três técnicas. O monitoramento do valor no último pico levou muito tempo para parar a falsa detecção, já que só altera o estado de detecção quando a derivada da tensão é próxima de zero ou troca sinal.

A técnica que detectou mais rapidamente o início foi o monitoramento do valor no último pico, por ocasião do afundamento ter começado com ruídos e derivada próxima de zero. Em seguida o monitoramento do valor de pico com atraso de tempo e o monitoramento do desvio do valor instantâneo, com o atraso devido a regra dos 16 pontos. Quanto a detecção do fim, o monitoramento do valor de pico, com ambas as versões, e o monitoramento do desvio do valor instantâneo tiveram desempenho muito próximos entre si e foram os que mais se aproximaram do fim real do afundamento.

VI. CONCLUSÕES

As técnicas de detecção de afundamentos de tensão foram apresentadas, implementadas e testadas com dados reais de medição de tensão de rede com a ocorrência de um afundamento. Ao se comparar tais técnicas, os pontos fracos de cada uma foram expostos. Mesmo assim, cada uma, a exceção das baseadas em valor eficaz e análise da transformada de Fourier, tiveram desempenho satisfatório em termo de rapidez de detecção.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2ª ed., McGraw-Hill, 2012.
- [2] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional," 2016.
- [3] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," 2009.
- [4] S. M. Silva, "Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão," UFMG, Belo Horizonte, 1999.
- [5] J. Lamoree, D. Mueller, P. Vinett, W. Jones e M. Samotyj, "Voltage Sag Analysis Case Studies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, nº 4, pp. 1083-1089, 1994.
- [6] X. Zhu, W. Chen, C. Ding e L. Wang, "Measures against Voltage Sags & Cases from On-Site Data," *China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 1-4, 2016.
- [7] Y. Sillapawicharn, "A Fast Voltage Sag Detector Based on Peak Detection," *IEEE*, 2015.
- [8] S. W. Middlekauff e E. R. C. Jr., "System and Customer Impact: Considerations for Series Custom Power Devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, nº 1, pp. 278-282, 1998.
- [9] R. Omar e N. A. Rahim, "New Control Technique Applied in Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation," *IEEE ICIEA*, pp. 848-852, 2009.
- [10] R. Saxena e M. Kushwah, "Optimization of Voltage Sag/Swell Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*, pp. 4046-4051, 2016.
- [11] L. F. J. Meloni, Â. J. J. Rezek e Ê. R. Ribeiro, "Small-Signal Modeling of a Single-Phase DVR for Voltage Sag Mitigation," *Harmonics and Quality of Power*, pp. 55-59, 2016.
- [12] C. Fitzer, M. Barnes e P. Green, "Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 917-924, 2002.
- [13] S. M. Silva, "Análise e Implementação de um Restaurador Dinâmico de Tensão," UFMG, Belo Horizonte, 2003.
- [14] A. S. Poste, B. T. Deshmukh e B. E. Kushare, "Detection, Classification and Characterisation of Voltage Sag," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques*, pp. 232-237, 2016.
- [15] Z. Sizhan, L. Jinjun, Z. Linyuan, Z. Y. e Y. Xu, "Sag Detection Algorithm for Dynamic Voltage Restorer used in Wind F arms under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 601-606, 2013.
- [16] M. Mansor e N. A. Rahim, "Voltage Sag Detection – A Survey," *International Conference for Technical Postgraduates*, 2009.
- [17] M. Oleskovicz, A. A. F. M. Carneiro, O. D. F. D. V. Coury, E. F. Arruda e S. A. Souza, "Estudo Comparativo de Ferramentas Modernas de Análise Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica," *Revista Controle & Automação*, vol. 17, nº 3, pp. 331-341, 2006.
- [18] A. Gaouda e M. M. A. Salama, "Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, nº 4, pp. 1469-1476, 1999.
- [19] IEEE Power & Energy Society, "Recommended Practice For Power Quality Measurements in A.C. Power Supply Systems," 2004.
- [20] L. Morgan, "Power Quality Event Characterization," IEEE Standards, 6 Fevereiro 2001. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/index.html>. [Acesso em 1 Maio 2017].