

APLICAÇÃO DO FILTRO *DIFFERENTIATOR-SMOOTHER* DURANTE A ANÁLISE DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

FELIPE LOPES*, WASHINGTON NEVES†, EDUARDO LEITE JR.*, JOÃO PAULO RIBEIRO*

**Universidade de Brasília (UnB), Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE)
Campus Darcy Ribeiro, Caixa postal 04397, CEP 70910-900, Asa Norte
Brasília-DF, Brasil*

†*Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Laboratório de Sistemas de Potência (LSP)
Rua Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-000, Bairro Universitário
Campina Grande-PB, Brasil*

Emails: felipevlopes@ene.unb.br, waneves@dee.ufcg.edu.br, eduardoleite@aluno.unb.br,
joaopauloribeiro@aluno.unb.br

Abstract— Modern solutions for transmission lines have increasingly used traveling wave (TW)-based algorithms, motivating the development of reliable techniques to identify incident and reflected fault-induced wavefronts that propagate along the monitored power grid. To do so, the Differentiator-Smoother filter (DS filter) has been proposed in recent years to be used in real-world TW-based applications. Since the main concepts of the DS filter are somewhat new for utilities, this paper presents the procedures and principles to be taken into account when using the DS filter to analyze TWs. The main issues related to the filter settings, time response for different signal waveforms and practical application are addressed by means of electromagnetic transients simulations using the Alternative Transients Program (ATP). The obtained results show that the DS filter is promising for TW-based applications, such as time-domain protection and fault location.

Keywords— Differentiator-smoother filter, electromagnetic transients, power systems, traveling waves.

Resumo— Soluções modernas para linhas de transmissão têm usado cada vez mais algoritmos baseados em ondas viajantes (OVs), fato este que tem motivado o desenvolvimento de técnicas confiáveis para identificação de OVs incidentes e refletidas induzidas por faltas que se propagam ao longo do sistema elétrico monitorado. Para tanto, o filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS) foi proposto em anos recentes para uso em aplicações reais baseadas na análise de OVs. Uma vez que os conceitos fundamentais do filtro DS são em alguns aspectos novos para as concessionárias, tem-se nesse trabalho o propósito de descrever os procedimentos e princípios de funcionamento do filtro DS. Questões importantes relacionadas aos ajustes, resposta no tempo para diferentes formas de onda e aplicação prática são estudadas por meio de simulações no software *Alternative Transients Program* (ATP). Dos resultados obtidos, nota-se que o filtro DS é promissor para aplicações baseadas em OVs, tais como funções de proteção no domínio do tempo e de localização de faltas.

Palavras-chave— Filtro *Differentiator-Smoother*, transitórios eletromagnéticos, sistemas elétricos de potência, ondas viajantes.

1 Introdução

Nos sistemas elétricos de potência modernos, cada vez mais, tem-se verificado o uso de algoritmos baseados na análise de componentes transitórias para fins de aprimoramento de funções de monitoração de linhas de transmissão (LTs) (Schweitzer et al., 2014). Neste contexto, funções de proteção e localização de faltas baseadas na teoria das OVs têm atraído o interesse de concessionárias, especialmente por serem imunes a fontes de erro que afetam técnicas tradicionais baseadas em análises fasoriais (Schweitzer et al., 2015).

Sabendo que o fenômeno de propagação de OVs em LTs tem caráter transitório, para a análise de frentes de onda induzidas por faltas, necessita-se de filtros capazes de eliminar componentes de baixa frequência, de modo a extrair informações das componentes transitórias que estejam relacionadas às distorções impostas aos sinais monitorados devido à incidência de OVs nos terminais da LT (Costa et al., 2010). Para tanto, aplicações reportadas na literatura fazem uso de

filtros digitais passa-altas ou passa-faixa, com o objetivo de identificar de forma confiável as características de amplitude e tempo de propagação das OVs que incidem nos pontos de medição (Saha et al., 2010; Zimath et al., 2010).

Na literatura, diversas técnicas para detecção e análise de OVs têm sido reportadas ao longo dos anos, dentre as quais se destacam: as transformadas wavelet discreta (TWD) e discreta redundante (TWDR) (Costa et al., 2008; Costa, 2014), transformada de Park (TDQ) (Lopes et al., 2013); filtros digitais FIR (Zimath et al., 2010); filtro *Differentiator-Smoother*, aqui chamado de filtro DS (Schweitzer et al., 2014; Schweitzer et al., 2015); entre outros.

A TWD e a TWDR são reconhecidamente úteis na análise tanto de OVs incidentes quanto no estudo de OVs refletidas. Basicamente, essas transformadas permitem restringir diferentes faixas de interesse no espectro de frequência analisado por meio da aplicação de filtros digitais em cascata (Percival and Walden, 2000), cujos coeficientes e desempenhos dependem da *wavelet* mãe

adotada (Costa et al., 2011). Embora os fundamentos de aplicação da TWD e da TWDR sejam semelhantes em vários aspectos, a TWD requer ainda um processo de subamostragem, o qual não é requerido pela TWDR (Saha et al., 2010). Desse modo, a TWDR tem se mostrado mais apropriada para aplicações baseadas na teoria das OV's.

A TDQ foi apresentada em Lopes et al. (2013) como ferramenta passível de utilização na detecção de OV's incidentes em uma aplicação voltada para a localização de faltas em LT's usando dados de dois terminais. Como vantagem, destaca-se a sensibilidade da transformada a transitórios e desequilíbrios entre fases, o que torna o algoritmo sensível mesmo em situações de transitórios sobre-amortecidos na fase com falta. Entretanto, embora não requeira ajustes complicados, por considerar informações das três fases simultaneamente, o algoritmo reportado em Lopes et al. (2013) não permite a avaliação das frentes de onda em cada fase do sistema separadamente, procedimento este necessário em algumas funções de proteção baseadas em OV's.

Os filtros digitais FIR também têm sido empregados na detecção de OV's (Zimath et al., 2010). Porém, em geral, não existe uma restrição bem definida de regiões de interesse no espectro avaliado, o que pode excitar as saídas do filtro mesmo em casos de transitórios espúrios. Ademais, o desempenho dessa solução depende dos coeficientes adotados para o filtro, assim como a escolha da *wavelet* mãe no caso da TWD e TWDR, fazendo necessários estudos preliminares para definição dos ajustes.

Visando otimizar o processo de identificação de OV's em LT's, sejam essas frentes de onda incidentes ou refletidas, em Schweitzer et al. (2014) e Schweitzer et al. (2015), propõe-se a aplicação do filtro DS em esquemas de proteção rápida no domínio do tempo, bem como em algoritmos de localização de faltas baseados na teoria de OV's. Esse filtro tem se mostrando promissor, principalmente porque cria padrões nos sinais de saída que facilitam a análise de OV's, mantendo um ganho unitário (Schweitzer et al., 2015). Embora o uso desse filtro tenha sido reportado em diversos trabalhos no âmbito de sistemas de proteção e localização de faltas no domínio do tempo, detalhes sobre sua aplicação e desempenho ainda são de certo modo novos no setor elétrico, fator este motivador do presente trabalho.

Neste artigo, apresentam-se detalhes sobre a implementação computacional, ajustes, resposta no tempo e frequência, e desempenho do filtro DS, ressaltando características vantajosas para aplicações baseadas em OV's. Para realizar as devidas demonstrações, simulações computacionais de faltas são realizadas usando o ATP, através das quais o desempenho do filtro DS é avaliado considerando diferentes cenários de falta e ajustes distintos.

2 Transitórios Induzidos por OV's em LT's

Para melhor compreender as potencialidades do filtro DS, é imprescindível o entendimento dos transitórios induzidos em tensões e correntes quando da incidência de OV's nos terminais monitorados. De fato, o filtro DS foi desenvolvido para apresentar uma saída favorável à análise de OV's, visando facilitar o cálculo de limiares e até mesmo de interpolação de dados para otimização do processo de estimação dos instantes de incidência das frentes de onda (Schweitzer et al., 2014).

OV's serão lançadas em uma LT sempre que ocorrer uma mudança abrupta da tensão no sistema. Por exemplo, durante faltas, a tensão no ponto de ocorrência do distúrbio muda abruptamente, lançando OV's na LT. Para uma falta franca, a tensão no ponto de falta passa de um valor elevado para zero quase que instantaneamente, promovendo a indução de OV's com amplitude proporcional à variação da tensão. Porém, na presença de uma resistência de falta, a variação da tensão será reduzida, resultando portanto no lançamento de OV's mais atenuadas. Esse fenômeno pode ser explicado por meio da Figura 1, na qual se apresenta parte do circuito puro de falta de uma LT, sendo R_F a resistência de falta, Z_s a impedância de surto da LT, v_{falta} tensão no ponto de falta antes da ocorrência do distúrbio e $v_{F,OV}$ a amplitude das OV's de tensão lançadas.

Deve-se ressaltar que na Figura 1 os sistemas conectados em ambos os terminais da LT não são representados porque eles não possuem influência sobre a amplitude das OV's lançadas a partir do ponto de falta, mas apenas sobre a amplitude das OV's medidas nos terminais da LT (Schweitzer et al., 2014). Assim, sendo $v_{falta} \approx V_{nom} \cdot \sin(\theta)$, onde V_{nom} é a tensão nominal da LT e θ é o ângulo de incidência da falta, a amplitude $v_{F,OV}$ das OV's lançadas na LT pode ser calculada considerando o divisor de tensão formado pela resistência de falta R_F e o paralelo dos trechos da LT a montante e justante do ponto de falta, resultando em:

$$v_{F,OV} = \frac{Z_s \cdot V_{nom} \cdot \sin(\theta)}{Z_s + 2 \cdot R_F}, \quad (1)$$

sendo a amplitude das OV's de corrente dada por:

$$i_{F,OV} = \frac{v_{F,OV}}{Z_s} = \frac{V_{nom} \cdot \sin(\theta)}{Z_s + 2 \cdot R_F}. \quad (2)$$

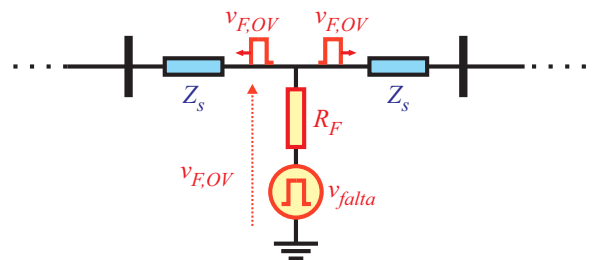


Figura 1: OV's de tensão lançadas em LT's.

Analisando (1) e (2), destacam-se as seguintes considerações: 1) A incidência de OV's nos terminais monitorados da LT resulta em transitórios iniciais com forma de degrau nos sinais medidos. Decorridos alguns instantes após o início da falta, frentes de onda passam a se sobrepor, gerando transitórios com formatos diversos; 2) Para valores muito elevados de R_F e quando $\theta \approx 0^\circ$ ou $\theta \approx 180^\circ$, o degrau de tensão no ponto de falta será nulo e, por isso, OV's não são lançadas na LT. Assim, demonstra-se a importância de filtros cujas saídas tenham relação com o formato típico de um degrau, apresentando ganho unitário para análise das amplitudes e polaridades das OV's, o que facilita sobremaneira o ajuste de limiares em processos de detecção de frentes de onda induzidas por faltas em LTs.

3 O Filtro DS

Na Figura 2, apresenta-se a janela de coeficientes do filtro DS, bem como o formato de sua saída quando aplicado um degrau na sua entrada (Schweitzer et al., 2015). Destaca-se que, uma vez que OV's impõem transitórios em forma de degrau nos sinais monitorados, os desenvolvedores do filtro DS optaram pela geração de uma saída triangular, com ganho unitário, a qual favorece o processo de identificação da amplitude da OV, bem como a estimação do instante de incidência da frente de onda nos locais de medição. Esse formato triangular facilita ainda o processo de in-

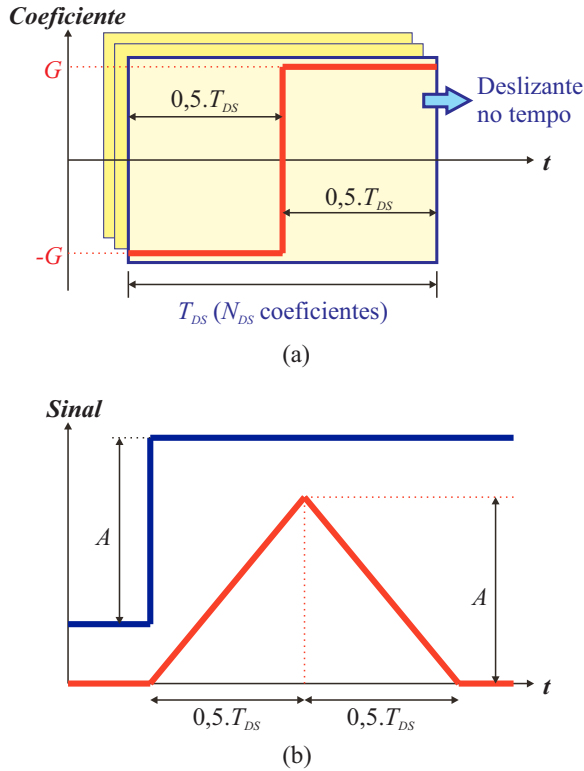


Figura 2: Coeficientes do filtro DS: (a) Janela de coeficientes; (b) Resposta para entrada em degrau.

terpolação de amostras para refinamento das estimativas do instante de incidência das OV's, no qual a saída é aproximada por uma parábola com número de amostras maior do que o verificado na saída original (Schweitzer et al., 2014).

3.1 Coeficientes para Obter Ganho Unitário

Da Figura 2(b), percebe-se que a amplitude da saída triangular do filtro DS é igual à amplitude do degrau de entrada. Este ganho unitário só é possível quando considerado o ajuste apropriado do ganho G dos N_{DS} coeficientes do filtro DS. Conforme ilustrado na Figura 2(a), os coeficientes são determinados pelo ganho G (metade dos coeficientes com valor G e a outra metade com valor $-G$), de modo que se deve obter um valor de G que mantenha o ganho unitário do filtro, independentemente dos N_{DS} coeficientes considerados.

Para identificar o valor de G que garantirá um ganho unitário do filtro DS, considere o exemplo apresentado na Figura 3, no qual a janela de coeficientes desliza sobre um sinal de corrente em forma de degrau com amplitude A . Na figura, três estágios são ilustrados: Estágio 1) Região em que a janela do filtro DS se encontra antes do degrau; Estágio 2) Momento em que a janela de coeficientes se encontra centrada na subida do degrau; e Estágio 3) Região em que a janela do filtro DS se encontra completamente dentro da região na qual o degrau possui amplitude A .

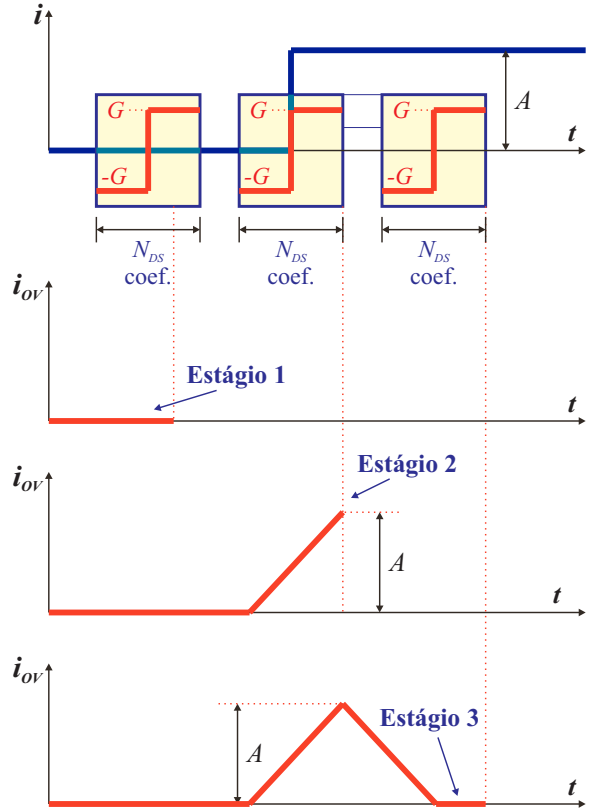


Figura 3: Estimando o valor do ganho G para obter ganho unitário do filtro DS.

Sabendo que a saída do filtro DS é resultado do produto interno entre as amostras do sinal de entrada e os coeficientes do filtro, para cada estágio ilustrado na Figura 3, são obtidos os seguintes valores de saída i_{OV} :

- **Estágio 1:**

$$i_{OV} = \frac{N_{DS}}{2} \cdot (-G \cdot 0) + \frac{N_{DS}}{2} \cdot (G \cdot 0) = 0. \quad (3)$$

- **Estágio 2:**

$$\begin{aligned} i_{OV} &= \frac{N_{DS}}{2} \cdot (-G \cdot 0) + \frac{N_{DS}}{2} \cdot (G \cdot A) \\ i_{OV} &= \frac{N_{DS}}{2} \cdot (G \cdot A). \end{aligned} \quad (4)$$

- **Estágio 3:**

$$i_{OV} = \frac{N_{DS}}{2} \cdot (-G \cdot A) + \frac{N_{DS}}{2} \cdot (G \cdot A) = 0. \quad (5)$$

Do exposto, nota-se que o sinal i_{OV} é nulo nas regiões em que o sinal de entrada é constante (Estágio 1 e Estágio 3) e apresenta valor máximo quando sua janela de coeficientes se encontra alinhada com o instante de subida do degrau (Estágio 2). Desse modo, sabendo que uma saída $i_{OV} = A$ deve ser obtida no Estágio 2 ilustrado na Figura 3, obtém-se que o ganho G é dado por:

$$G = \frac{2}{N_{DS}}. \quad (6)$$

Na Figura 4, apresenta-se um exemplo de aplicação do filtro DS em um sinal de corrente simulado no ATP, com destaque para as amplitudes das variações A_1 , A_2 e A_3 nos sinais de entrada e saída referentes às três primeiras frentes de onda que incidiram no terminal de medição. Conforme esperado, a saída do filtro DS se aproxima do formato de uma onda triangular, apresentando amplitude semelhante à variação em degrau verificada no sinal de entrada. Ademais, nota-se que a polaridade da variação no sinal de entrada também é representada de forma apropriada no sinal de saída, característica esta crucial para métodos de proteção de LTs e localização de faltas baseados na teoria de OV.

3.2 Tamanho da Janela de Coeficientes

Neste trabalho, o tamanho da janela de coeficientes T_{DS} do filtro DS é representado em termos de tempo, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2. Ademais, considerando um dado período de amostragem Δt , pode-se então obter o número de coeficientes N_{DS} do filtro DS contidos no período T_{DS} , sendo $N_{DS} = \lfloor \frac{T_{DS}}{\Delta t} \rfloor$, onde $\lfloor \cdot \rfloor$ representa a função *floor* de arredondamento para número inteiro inferior.

Deve-se ressaltar que T_{DS} tem influência direta sobre o formato dos sinais de saída do filtro DS. De fato, conforme ilustrado na Figura 2, a largura da onda triangular de saída para o caso de entrada na forma de um degrau é igual ao tamanho da janela de coeficientes, fato este que pode influenciar na interpretação das OV's medidas. Com o objetivo de facilitar a visualização de tal problemática, apresenta-se na Figura 5 a aplicação do filtro DS considerando três implementações distintas, onde $T_{DS} = 20 \mu s$, $160 \mu s$ e $320 \mu s$ são considerados, assumindo $\Delta t = 1 \mu s$.

Conforme esperado, nota-se que quão maiores os valores de T_{DS} , maior o tempo que a janela de coeficientes leva para alinhar sua amostra central com a subida da entrada em degrau e, portanto, mais largas ficam as saídas triangulares do filtro DS, o que pode dificultar a identificação de OV's que incidem no terminal monitorado em instantes próximos entre si. Por exemplo, no caso apresentado na Figura 5, usando $T_{DS} = 20 \mu s$ e $160 \mu s$, é possível identificar as duas primeiras frentes de onda no sinal avaliado. Entretanto, ao considerar $T_{DS} = 320 \mu s$, nota-se que a onda triangular de saída fica tão larga que impede a identificação da segunda OV, fazendo parecer que apenas uma frente de onda incidiu no ponto de medição.

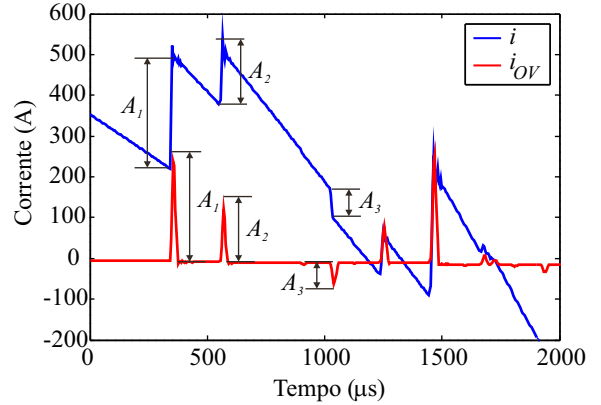


Figura 4: Exemplo de aplicação do filtro DS em um registro de corrente simulado.

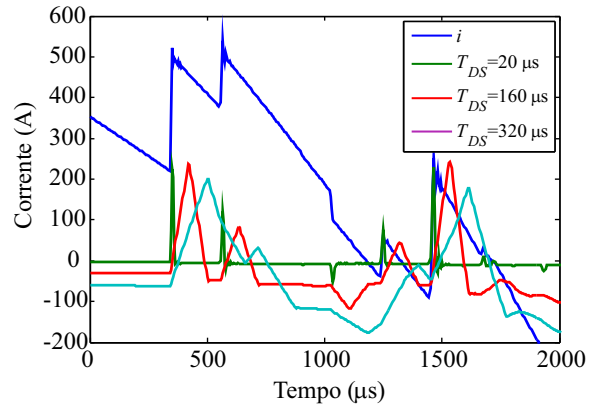


Figura 5: Influência de T_{DS} sobre o desempenho do filtro DS.

3.3 Resposta em Frequência

Ainda avaliando a Figura 5, nota-se que para valores de T_{DS} maiores, nos primeiros instantes dos sinais ilustrados na figura, os sinais de saída apresentam valores aproximadamente constantes, porém diferentes entre si. Tal comportamento se explica pela influência do T_{DS} sobre a resposta em frequência do filtro DS. Na Figura 6, ilustram-se as respostas em frequência do filtro DS para $T_{DS} = 20 \mu s$, $160 \mu s$ e $320 \mu s$, dando-se destaque ao ganho do filtro na frequência fundamental, que neste trabalho é igual a 60 Hz. Considerou-se um período de amostragem $\Delta t = 1 \mu s$, resultando em uma frequência de amostragem $f_s = 1 \text{ MHz}$. Por isso, as respostas em frequência obtidas são ilustradas até 500 kHz, limite este até o qual o critério de Nyquist é respeitado.

Analisando a Figura 6, percebe-se que ao variar T_{DS} , varia-se a atenuação imposta às altas frequências. Por exemplo, para $T_{DS} = 20 \mu s$, frequências nas proximidades de 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz e 500 kHz são bastante atenuadas, enquanto que componentes intermediárias nas faixas de frequência entre 100-200 kHz, 200-300 kHz, 300-400 kHz e 400-500 kHz possuem ganhos suficientes para serem percebidas nos sinais de saída do filtro. Por outro lado, aumentando o valor de T_{DS} , promove-se uma maior atenuação das frequências a partir de 100 kHz, o que está em conformidade com as análises apresentadas anteriormente, nas quais se demonstrou a impossibilidade de avaliação de transitórios muito rápidos quando da aplicação de valores de T_{DS} elevados.

Em relação à resposta em frequência em 60 Hz, conforme destacado na Figura 6, observa-se ainda que quão menor o valor de T_{DS} , mais atenuada será a frequência fundamental. Por outro lado, aumentando o valor de T_{DS} , a parcela passante da componente fundamental do sistema também fica mais significativa, podendo ser verificada nos sinais de saída do filtro DS. Tal característica operacional explica os diferentes valores

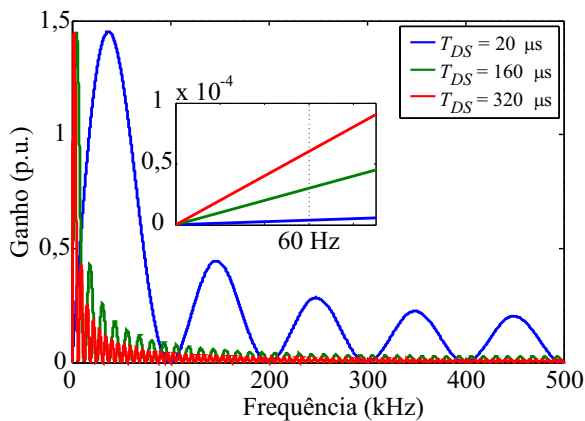


Figura 6: Resposta em frequência do filtro DS para diferentes valores de T_{DS} .

observados nos primeiros instantes dos sinais ilustrado na Figura 5. De fato, os valores constantes representam na verdade a componente fundamental presente nos sinais de saída do filtro DS, a qual se assemelha a um sinal contínuo devido à representação das formas de onda em uma escala de microssegundos.

É importante destacar que as constatações apresentadas até então são de grande relevância para processos de detecção de OV, sejam estes empregados em esquemas de proteção ou de localização de faltas, especialmente quando se deseja identificar frentes de onda atenuadas. Em verdade, é de se esperar que a presença da componente fundamental nas saídas do filtro DS possa comprometer o desempenho de algoritmos de detecção de OV, especialmente se a onda triangular de saída estiver dentro de um vale do sinal na frequência fundamental. Se isso acontecer, torna-se impossível determinar limiares factíveis que viabilizem a detecção correta da frente de onda por um esquema de *hard threshold* (Santoso et al., 1996), no qual limiares fixos são empregados com o objetivo de separar amostras relacionadas ao regime permanente da rede elétrica das amostras relacionadas a possíveis distúrbios, como por exemplo, faltas.

Na Figura 7, ilustra-se o problema da presença da componente fundamental nas saídas do filtro DS para uma situação de falta com R_F elevada, sendo $T_{DS} = 160 \mu s$ e empregando limiares fixos ajustados como sendo $\pm 0,1$ vezes o valor máximo absoluto do sinal no período de análise.

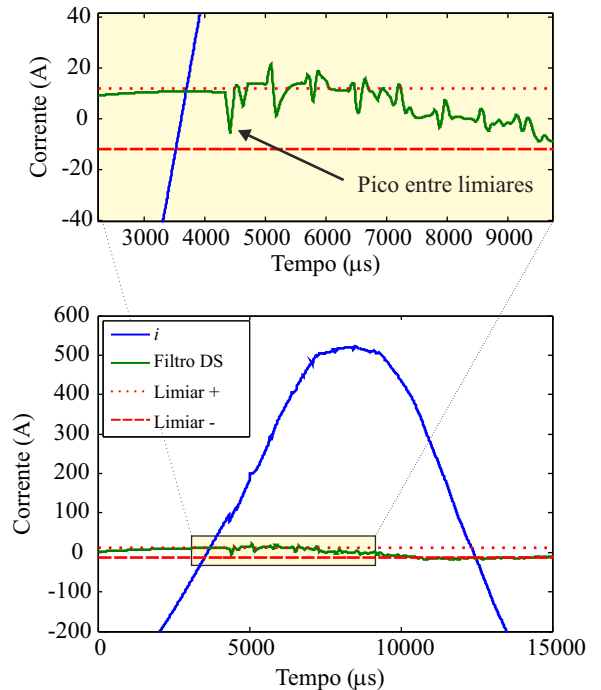


Figura 7: Problema na detecção de OV devido à presença da frequência fundamental na saída do filtro DS.

Avaliando a região ampliada destacada na Figura 7, observa-se que a primeira OV que incide no terminal monitorado, de fato, resulta em uma saída do filtro DS com formato aproximadamente triangular, porém com pico localizado entre os limiares positivo e negativo ajustados. Isso decorre da atenuação da OV e de sua polaridade, combinação esta que inviabiliza a correta detecção do instante de incidência da primeira frente de onda no ponto de medição, mesmo que visualmente se perceba a descontinuidade no sinal de saída do filtro DS. Em outras palavras, embora o sinal de saída do filtro DS indique com boa nitidez visual a incidência de uma frente de onda no terminal monitorado, computacionalmente, não é trivial definir limiares fixos capazes de promover uma correta detecção da OV. Neste contexto, destaca-se que o uso de limiares positivo e negativo mais espaçados resultaria em uma maior dessensibilização do detector de OV, enquanto que a aproximação de ambos os limiares ocasionaria detecções indevidas ainda no regime permanente devido à amplitude da componente de frequência fundamental presente na saída do filtro DS.

Em decorrência da problemática descrita nesta subseção, evidencia-se a necessidade de remoção da maior parte possível da componente fundamental, sem comprometer a detecção de OV que incidem no ponto de medição em instantes próximos entre si e sem se tornar muito sensível a transitórios espúrios. Nesse cenário, o uso de janelas curtas de coeficientes seria indicado. Porém, a redução de T_{DS} resultaria também em uma maior sensibilidade do filtro DS a ruídos e transitórios espúrios. Por isso, os desenvolvedores do filtro DS optaram por utilizar em seus dispositivos baseados em OV $T_{DS} = 20 \mu s$ (SEL, 2017).

3.4 Analisando Transitórios Atenuados

Sabe-se que os transitórios induzidos por faltas podem chegar aos terminais de medição com algum grau de atenuação. Assim, as variações decorrentes da incidência de OV nos pontos de medição não resulta em degraus, mas sim, em rampas, cujas taxas de variação entre os valores inicial e final dependem do nível de atenuação das frentes de onda. Neste contexto, torna-se necessária a análise do comportamento do filtro DS em situações nas quais as entradas possuem a forma de rampa ao invés de um degrau perfeito. Na Figura 8, apresenta-se a resposta do filtro DS considerando quatro sinais de entrada distintos na forma de rampas com diferentes taxas de variação.

A Entrada 1 ilustrada na Figura 8 apresenta taxa de variação elevada, se aproximando de um degrau. Com isso, a saída do filtro DS, conforme explicado anteriormente, se aproxima de uma onda triangular com ganho unitário e valor de pico verificado em um instante aproximadamente

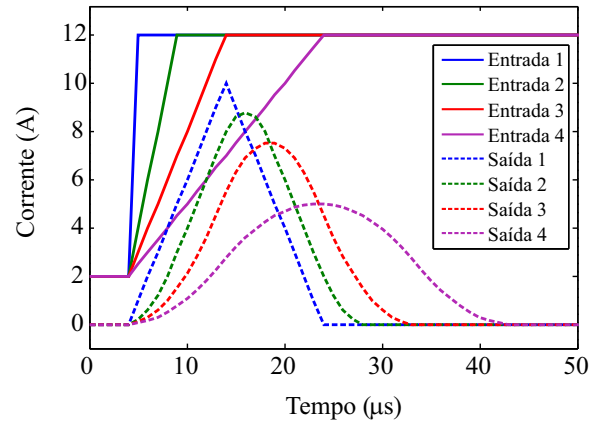


Figura 8: Exemplo de aplicação do filtro DS considerando transitórios atenuados.

$\frac{T_{DS}}{2}$ segundos após o início do degrau de entrada. Por outro lado, as Entradas 2, 3 e 4 apresentam taxas de variação menores. Nesses casos, a saída do filtro DS passa a ter uma característica parabólica, cujo valor de pico apresenta maior atenuação em casos de variações mais lentas. Observa-se também que quanto menor for a taxa de variação da rampa de entrada, maior é o espalhamento da parábola obtida, o que obviamente pode comprometer o processo de detecção de OV.

4 Interpolação de Amostras para Refinamento da Detecção de OV

Em algumas aplicações baseadas na teoria das OV, a exemplo das funções de localização de faltas, a avaliação da amplitude das frentes de onda que incidem nos terminais monitorados não é crucial, muito embora influencie durante o processo de determinação dos limiares a serem empregados. Por outro lado, a identificação dos instantes de incidência das OV é tomada como objetivo principal, visto que as estimativas do ponto de falta podem ser calculadas unicamente por meio da análise dos tempos de propagação das OV entre o ponto de falta e os terminais da LT (Saha et al., 2010).

Diante do exposto, torna-se evidente a influência da taxa de amostragem em algoritmos que dependem da identificação de instantes de incidência de OV em determinados pontos do sistema monitorado. De fato, sabe-se que quanto maior a frequência de amostragem f_s , menor será o período de amostragem Δt e, portanto, melhor será a resolução no tempo dos sinais avaliados, permitindo uma detecção mais precisa dos instantes de incidência das OV.

Como vantagem adicional do filtro DS, destaca-se a possibilidade de interpolação de suas saídas, aproximando-as por uma onda em forma de parábola. Deve-se perceber que essa aproximação por uma parábola é vantajosa, visto que se mostra viável tanto em casos de entradas na forma de degrau, quando as saídas têm formato triangu-

lar, quanto em situações de transitórios atenuados, para as quais as saídas do filtro DS apresentam formato de parábola. Desse modo, aumenta-se o número de amostras em torno da descontinuidade do sinal de saída do filtro DS, permitindo o refinamento da detecção do instante de incidência da frente de onda por meio da identificação da amostra na qual ocorre o pico do sinal interpolado.

Na Figura 9, ilustra-se um exemplo de interpolação do sinal de saída do filtro DS, considerando um aumento de dez vezes o número de amostras do sinal original e um $T_{DS} = 20 \mu s$. Neste exemplo, para tornar a análise mais realística, considerou-se um sinal de entrada do filtro DS com um certo nível de atenuação. Como consequência, conforme esperado, a saída original do filtro apresenta um formato aproximadamente parabólico, com largura um pouco maior do que o valor de T_{DS} adotado. Após o processo de interpolação de dados da saída do filtro DS, nota-se que os valores de pico verificados no sinal original e no sinal interpolado diferem por algumas amostras. Neste contexto, destaca-se que embora as diferenças entre os instantes de incidência estimados usando o sinal original e o sinal interpolado não sejam significativas, em um processo real de localização de faltas, a aplicação da interpolação de dados pode implicar em reduções do erro absoluto da ordem de centenas de metros para poucas dezenas de metros, promovendo uma exatidão da ordem de um vão de torre típico (≈ 300 m) (Saha et al., 2010; Schweitzer et al., 2014; Schweitzer et al., 2015).

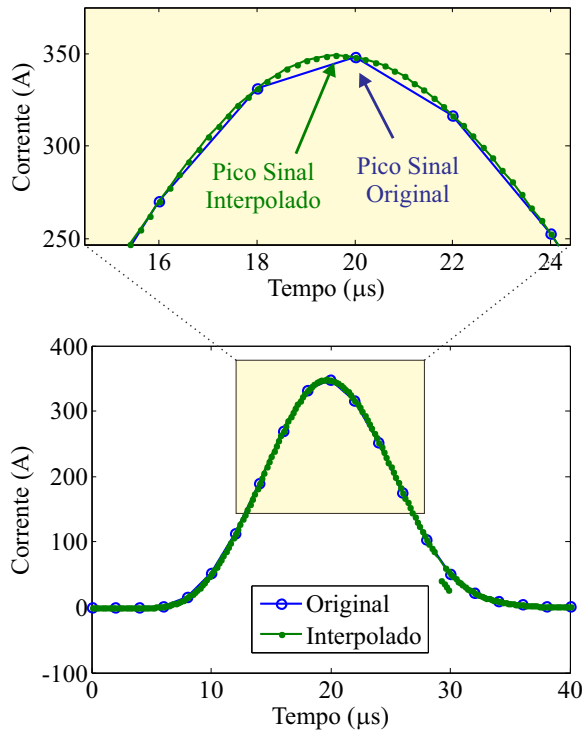


Figura 9: Exemplo do processo de interpolação da saída do filtro DS.

Para ilustrar o impacto do processo de interpolação em um procedimento de localização de faltas, apresenta-se na Tabela 1 resultados da aplicação do método de dois terminais clássico de localização de faltas baseado em OV's quando aplicado na LT 230 kV/60 Hz ilustrada na Figura 10. Nesse método, a localização do defeito é estimada por:

$$\tilde{d} = \frac{\ell - (t_R - t_L) \cdot v}{2}, \quad (7)$$

onde t_L e t_R são os instantes de incidência das primeiras OV's nos terminais local e remoto da LT, respectivamente, $\tilde{d}$ é a distância de falta estimada em relação ao terminal local da LT, ℓ é o comprimento da LT e v é a velocidade de propagação das OV's de modo aéreo.

Os casos apresentados na Tabela 1 são provenientes de simulações de faltas francas AT simulados usando o programa ATP, considerando ângulo de incidência em 90° em diferentes distâncias d em relação ao terminal local e $\Delta t = 1 \mu s$.

Percebe-se que para o método clássico de dois terminais, o impacto da interpolação de amostras tende a ser menos evidente quando o distúrbio está localizado nas proximidades do centro da LT. No entanto, para faltas próximas aos terminais da LT, a interpolação das saídas do filtro DS melhora as estimativas calculadas, reduzindo os erros originais da ordem de centenas de metros para erros da ordem de poucos metros. Em termos práticos, embora os erros obtidos a partir das saídas originais do filtro DS já sejam muito promissores,

Tabela 1: Uso da interpolação de dados na saída do filtro DS em algoritmos de localização de faltas baseados em OV's.

Localização Real	Localização SEM	Localização COM
d	Interpolação	Interpolação
20 km	19,88 km	19,99 km
60 km	60,09 km	59,99 km
100 km	100,00 km	100,00 km
140 km	139,91 km	140,00 km
180 km	180,12 km	180,00 km

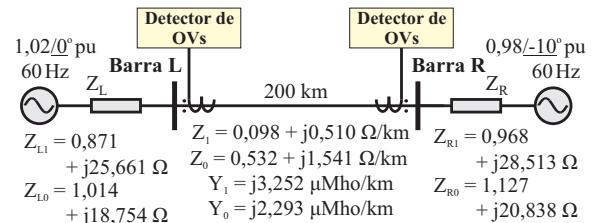


Figura 10: Sistema teste utilizado.

essa redução dos erros é vantajosa, pois pode evitar em algumas situações a inspeção desnecessária de torres adjacentes ao trecho da LT com defeito. Conforme reportado em Schweitzer et al. (2014), ao considerar registros reais, é possível que os erros obtidos sejam ligeiramente maiores do que os apresentados na Tabela 1, porém tipicamente menores do que um vão de torre típico.

5 Conclusões

Neste trabalho, apresentaram-se os fundamentos e características operacionais do filtro *Differentiator-Smoother*, aqui chamado de filtro DS, o qual tem sido empregado em dispositivos reais de proteção e localização de faltas que operam por meio da análise de OV's. Inicialmente, abordou-se a fundamentação dos transitórios de falta, visando facilitar a compreensão das características do filtro DS, bem como de suas potencialidades operacionais.

Dos resultados obtidos, conclui-se que o ganho unitário do filtro DS depende do ajuste correto de seus coeficientes, cujos valores são determinados em função do tamanho da janela de coeficientes. Demonstrou-se também o impacto do tamanho da janela de coeficientes do filtro DS sobre suas respostas no tempo e frequência, com ênfase no problema decorrente da presença da componente de frequência fundamental nas saídas do filtro, o que pode resultar em erros no processo de detecção de OV's em casos de transitórios atenuados.

Em uma segunda etapa do trabalho, demonstrou-se o comportamento das saídas do filtro DS em situações nas quais os transitórios de entrada se encontram atenuados. Demonstrou-se que a resposta triangular esperada para uma entrada em forma de degrau muda para o formato de parábola, com amplitude que depende do nível de atenuação das ondas. Por fim, apresentou-se resumidamente uma metodologia para interpolação de dados, a qual toma vantagem do formato das saídas do filtro DS para refinar o processo de estimação dos instantes de incidência das OV's nos terminais monitorados. Os resultados apresentados esclarecem questões importantes sobre o filtro DS, o qual demonstrou ser promissor e fácil de usar.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil. Agradecemos também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Referências

- Costa, F. B. (2014). Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(6): 2674–2687.
- Costa, F. B., Souza, B. A. and Brito, N. S. D. (2008). A wavelet-based algorithm to analyze oscillographic data with single and multiple disturbances, *2008 IEEE/PES General Meeting*, pp. 1–8.
- Costa, F. B., Souza, B. A. and Brito, N. S. D. (2010). Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines, *IET Electronics Letters* pp. 753–755.
- Costa, F., Sobrinho, A., Ansaldi, M. and Almeida, M. (2011). The effects of the mother wavelet for transmission line fault detection and classification, *3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pp. 1–6.
- Lopes, F. V., Fernandes, D. and Neves, W. (2013). A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators, *IEEE Transactions on Power Delivery* **28**(3): 1626–1634.
- Percival, D. B. and Walden, A. T. (2000). *Wavelet Methods for Time Series Analysis*, Cambridge University Press, New York, USA.
- Saha, M. M., Izykowski, J. and Rosolowski, E. (2010). *Fault Location on Power Networks*, Power Systems, Ed. Springer, London.
- Santoso, S., Powers, E., Grady, W. and Hofmann, P. (1996). Power quality assessment via wavelet transform analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery* **11**(2): 924–930.
- Schweitzer, E., Kasztenny, B. and Mynam, M. V. (2015). Performance of time-domain line protection elements on real-world faults, *42nd Annual Western Protective Relay Conf.*
- Schweitzer, E. O., Guzmán, A., Mynam, M. V., Skendzic, V., Kasztenny, B. and Marx, S. (2014). Locating faults by the traveling waves they launch, *50th Annual Minnesota Power Systems Conference*.
- SEL (2017). *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*.
- Zimath, S. L., Ramos, M. A. F. and Filho, J. E. S. (2010). Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults, *2010 IEEE/PES Trans. and Dist. Conf. and Exposition*, pp. 1–5.