DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2449

Modelagem de Linhas de Transmissão em Programas EMTP: Um Estudo sobre a Propagação de Ondas Viajantes

Luiza M. A. Ribeiro *, **Eduardo P. A. Ribeiro** *, **Gustavo A. Cunha** *, **Felipe V. Lopes** *

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília), DF, (e-mail: luizaaviani@lapse.unb.br), (e-mail: eduardopassos@lapse.unb.br), (e-mail: gustavocunha@lapse.unb.br), (e-mail: felipevlopes@ene.unb.br).*

Abstract: An analysis on the impact of different transmission line models available in Electromagnetic Transients Programs (EMTP) on studies regarding traveling waves (TW) propagation is presented in this paper. The models taken into account are: Bergeron and J. Martí, which are implemented assuming fully transposed, transposed and untransposed lines. In the proposed study, transients induced by single-phase faults are analyzed, which are evaluated by means of a typical TW filtering method. In each case, phase and modal signals are evaluated, revealing differences from the point of view of TW propagation when different line models are used. From the obtained results, it is concluded that each line model results in different TW propagation patterns, specially in ground mode waves.

Resumo: Apresenta-se nesse trabalho uma análise sobre o impacto de diferentes tipos de modelos de linhas de transmissão (LTs) disponíveis em programas *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) sobre estudos relacionados à propagação de ondas viajantes (OVs). Os modelos considerados são: Bergeron e J. Martí, os quais são implementados assumindo LTs perfeitamente transpostas, transpostas e não transpostas. No estudo proposto, consideram-se transitórios induzidos por faltas monofásicas, os quais são avaliados por meio de um método típico de filtragem de OVs. Em cada caso, sinais nos domínios de fase e modal são avaliados, revelando diferenças do ponto de vista da propagação de OVs quando diferentes modelos de LT são utilizados. Dos resultados obtidos, conclui-se que cada modelo de LT resulta em diferentes padrões de propagação das OVs, especialmente nas ondas de modo terra.

Keywords: Fault; traveling waves; DS filter; transmission line modeling; modal waves.

Palavras-chaves: Faltas; ondas viajantes; filtro DS; modelagem de linha de transmissão; ondas modais.

1. INTRODUÇÃO

Avanços tecnológicos na área de processamento de sinais têm propiciado o aumento das taxas de amostragem de dispositivos eletrônicos inteligentes (DEIs) utilizados em sistemas elétricos de energia (SEEs), a exemplo de relés microprocessados e registradores digitais de perturbações. Deste modo, o monitoramento de uma larga faixa do espectro de frequência de sinais elétricos tem se tornado viável, fato este que vem motivando a aplicação em campo de técnicas de análise de faltas baseadas na teoria das OVs. Nos últimos anos, soluções baseadas em OVs ganharam notoriedade entre os agentes do SEE, visto que seus algoritmos viabilizam a extração de informações oriundas do fenômeno de indução e propagação de transitórios em LTs, permitindo o aprimoramento de metodologias de proteção e localização de faltas (Schweitzer et al., 2014, 2016; Ribeiro and Lopes, 2018).

Considerando os avanços das funções baseadas na análise de transitórios de falta, o desenvolvimento de modelos de LTs que aprimorem testes que demandam análises em uma faixa mais ampla do espectro de frequência, bem como estudos que demonstrem diferenças nos padrões de propagação de OVs quando considerados diferentes modelos de LT têm atraído o interesse de profissionais do setor elétrico. Apesar de alguns estudos já terem avaliado o impacto de diferentes modelos de LT sobre procedimentos de localização de faltas (Chalangar et al., 2019), ainda são escassas investigações comparativas quanto ao comportamento das OVs em simulações EMTP quando do uso de diferentes modelos. Tal fato pode se justificar em parte pela predominância de funcionalidades baseadas na análise de componentes de frequência fundamental, nas quais transitórios em faixas superiores do espectro de frequência são filtrados, sendo extintos do sinal original. No entanto, ao considerar as funcionalidades baseadas em OVs, a avaliação do impacto de modelos de LTs se torna relevante, principalmente para esclarecer as diferenças que

⋆ Este trabalho recebeu apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

podem surgir nos padrões de propagação das OVs nos domínios de fase e modal.

Neste trabalho apresenta-se uma análise comparativa dos padrões de propagação de OVs verificados quando consideradas simulações no *software Alternative Transients Program* (ATP) em que as LTs são modeladas segundo os modelos de Bergeron e J. Martí. Para tanto, diferentes cenários de faltas monofásicas são simulados no ATP para fins de visualização dos padrões de propagação de OVs de modo aéreo e terra. Esses modos são avaliados por meio da extração de informações das frentes de onda simuladas utilizando uma técnica típica de filtragem de transitórios empregada em dispositivos reais. Durante os estudos, são utilizados três sistemas baseados no modelo de Bergeron e três baseados no modelo de J. Martí, os quais consistem em cenários nos quais as LTs são modeladas como perfeitamente transpostas, transpostas e não transpostas. Por meio dos resultados obtidos, demonstra-se que diferenças relevantes podem ser verificadas nos padrões de propagação das OVs, especialmente nas características das ondas de modo terra.

2. EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÃO DE OV

Técnicas de análise de transitórios de alta frequência têm sido desenvolvidas ao longo dos anos com objetivo de detectar e estimar amplitude e polaridade de OVs induzidas por faltas em LTs (Schweitzer et al., 2016; Lopes et al., 2019; Ribeiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2019). Dentre essas, destacam-se as soluções baseadas na transformada *wavelet* discreta (TWD); na transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR); na transformada de Park (TDQ); e no filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS). As técnicas TWD e TWDR avaliam diferentes faixas do espectro de frequência do sinal monitorado e para isso, fazem uso de filtros digitais em cascata, os quais possuem coeficientes cujos valores dependem da escolha de uma *wavelet* mãe (Costa et al., 2011; Percival and Walden, 2000). A TDQ é sensibilizada por transitórios e por desequilíbrios no sistema, sendo capaz de detectar até mesmo transitórios com elevado nível de amortecimento (Lopes et al., 2013). Por fim, o filtro DS caracteriza-se por apresentar ganho unitário quando da análise das OVs, facilitando a extração de informações de amplitude e polaridade das OVs medidas, sem a necessidade de ajustes complexos (Lopes et al., 2019; Ribeiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2019).

O fenômeno de indução das OVs nos sinais monitorados de uma LT ocorre em casos de faltas no SEE, sendo estas responsáveis pela variação súbita de tensão no sistema, lançando OVs de tensão e corrente a partir do ponto de falta em direção a ambos os terminais da LT. Logo, durante o estudo de transitórios em LTs, a compreensão de OVs induzidas por faltas se faz importante (Lopes et al., 2019; Ribeiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2019).

2.1 Fenômeno de OV

A ocorrência de curtos-circuitos em uma LT caracteriza-se por uma variação abrupta de tensão no local do defeito, modificando a configuração original do SEE. Logo, esta variação abrupta de tensão propaga-se em forma de ondas eletromagnéticas em direção aos terminais da LT em velocidades próximas à da luz (em LTs aéreas), sendo estes transitórios popularmente chamados de OVs (Lopes et al., 2019; Ribeiro et al., 2018; Ribeiro et al., 2019).

Ilustra-se na Figura 1 o circuito puro de falta de uma LT para explicar o fenômeno de OV, no qual v_f representa a tensão no local no momento da falta; v_{OV} e i_{OV} representam, respectivamente, as amplitudes das OVs de tensão e corrente lançadas na LT; Z_S representa a impedância de surto da LT; e R_f representa a resistência de falta.

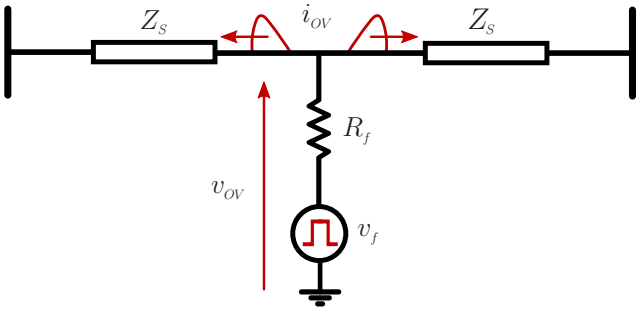

Figura 1. Circuito puro de falta.

Sendo v_f um valor instantâneo da tensão do sistema, em que θ é o ângulo de incidência da falta, segundo Phadke and Thorp (2009), v_{OV} é calculada aplicando-se LKT no circuito puro de falta. Dessa forma, em (1) e (2) são calculadas v_{OV} e i_{OV}, respectivamente, para faltas monofásicas, uma vez que foi o tipo de falta analisada no presente trabalho, onde Z_{S0} é a impedância de surto de sequência zero e Z_{S1}, a de sequência positiva da LT.

$$v_{OV} = -V_{Sis} \cdot sen(\theta) - 2 \cdot R_f \cdot i_{OV} = -v_f - 2 \cdot R_f \cdot i_{OV} \quad (1)$$

$$i_{OV} = \frac{-3 \cdot v_f}{Z_{S0} + 2 \cdot Z_{S1} + 6 \cdot R_f} \quad (2)$$

2.2 Filtro DS

Esta técnica de filtragem destacou-se por estar embarcada em um relé de proteção com funções aplicadas no domínio do tempo. Além disso, seu destaque perante as demais técnicas para a extração de OVs apenas tornou-se possível devido ao avanço tecnológico na área de processamento de sinais realizado por DEIs, visto que a possibilidade de amostrar sinais elétricos na ordem de milhões de amostras por segundo viabilizou o uso em campo do filtro. Segundo man (2017), o DEI de proteção no qual o filtro DS está embarcado funciona com taxa de amostragem de 1 MHz (F_s), possibilitando analisar sinais até a frequência de 500 kHz conforme o critério de Nyquist (man, 2017). Além disso, Ribeiro et al. (2019) comprovam que o filtro possui uma janela de comprimento (T_{DS}) igual a 21 μs, ou seja, existem 21 coeficientes de janelamento (N_{DS}).

A saída do filtro DS é resultado do produto interno entre a janela de coeficientes do filtro e o janelamento do sinal de entrada compreendendo as N_{DS} amostras atuais, caracterizando-se por apresentar forma de onda triangular em sua saída em resposta a variações em degrau em sua

entrada. Assim, para obtenção do ganho unitário, observa-se que a janela de coeficientes do filtro é composta por dez coeficientes ajustados com valor G, um coeficiente central com valor nulo e dez coeficientes ajustados com valor -G, sendo $G = \frac{2}{N_{DS}-1} = 0,1$, uma vez que $N_{DS} = 21$.

Na Figura 2, ilustra-se o processo de filtragem, podendo ser dividido em três etapas, tomando como referência o sinal monitorado. São elas: Etapa I) antes do início do degrau decorrente da OV; Etapa II) na borda de subida do degrau proveniente da OV; e Etapa III) após o início do degrau decorrente da OV. Na Etapa I, enquanto o filtro recebe como entrada apenas sinais na frequência nominal do SEE, sua saída apresenta valor aproximadamente nulo, representado em (3); na Etapa II, o momento em que o filtro está centrado na variação em degrau, sua saída apresenta valor máximo, conforme (4); na Etapa III, quando o filtro se encontra dentro do degrau, sua saída apresenta valor aproximadamente nulo, conforme (5).

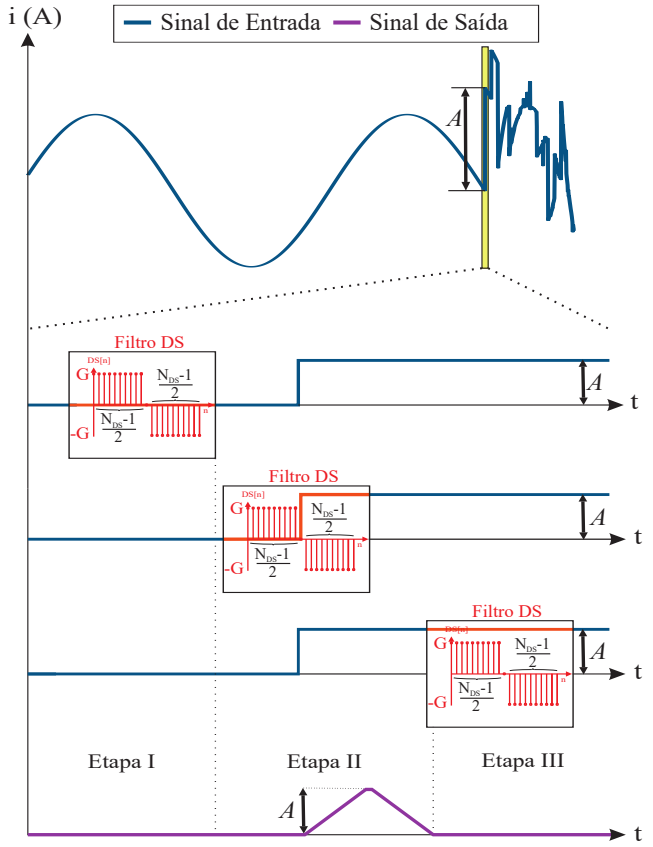

Figura 2. Processo de filtragem do filtro DS.

$$i_{DS} = \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot G \cdot 0 + \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot (-G) \cdot 0 = 0, \quad (3)$$

$$i_{DS} = \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot G \cdot A + \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot (-G) \cdot 0 = A, \quad (4)$$

$$i_{DS} = \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot G \cdot A + \frac{N_{DS}-1}{2} \cdot (-G) \cdot A = 0. \quad (5)$$

O motivo pelo qual o filtro DS apresenta saída aproximadamente nula para sinais de entrada na frequência nominal do SEE (Etapas I e III de filtragem) pode ser melhor entendido via análise da resposta em frequência do filtro DS, conforme ilustrado na Figura 3. Analisando a resposta em frequência do filtro DS quando configurado com $N_{DS} = 21$ e funcionando com frequência de amostragem F_s, percebe-se que o mesmo atenua na ordem de 250 vezes (ganho de aproximadamente 0,004 pu) sinais na frequência de 60 Hz, frequência esta adotada como nominal no presente trabalho.

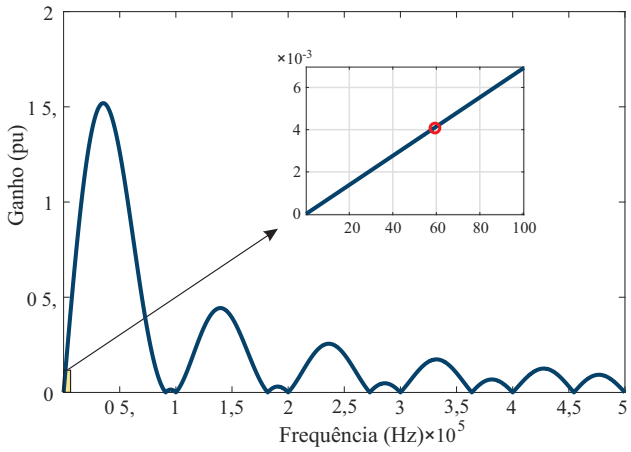

Figura 3. Resposta em frequência do filtro DS (Ribeiro et al., 2019).

Ribeiro et al. (2019) validaram um modelo computacional do filtro DS via análise de transitórios e resposta em frequência, realizando análises comparativas com o filtro DS embarcado no relé de proteção real. Dos estudos, Ribeiro et al. (2019) concluíram que o modelo obtido é capaz de emular o filtro DS real em estudos de aplicações baseadas em OVs no ATP. Portanto, nos estudos apresentados nesse trabalho, o modelo desenvolvido por Ribeiro et al. (2019) será considerado para realizar a análise da propagação de transitórios eletromagnéticos sobre dois tipos de modelo de LT utilizados no ATP em estudos de transitórios. A primeira, desenvolvida por Luis Bergeron, funciona com parâmetros de indutância e capacitância distribuídos, constantes na frequência e com perdas concentradas nos terminais da LT. A segunda, modelada segundo J. Martí, possuiu parâmetros variantes na frequência e simula o efeito da frequência sobre os parâmetros da LT.

Para melhorar o entendimento dos fenômenos estudados, utiliza-se a transformada de Clarke para desacoplar os sinais originais em ondas modais denominadas modos aéreos (α e β) e modo terra (0). Este procedimento pode ser observado em (6), onde $i_{DS}\alpha$, $i_{DS}\beta$ e $i_{DS}0$ são as correntes modais desacopladas referenciadas à fase A. Assim, permite-se analisar o efeito das OVs de forma separada por modo, identificando as diferenças quando usados diferentes modelos de LT (Schweitzer et al., 2014).

$$\begin{bmatrix} i_{DS}\alpha \\ i_{DS}\beta \\ i_{DS}0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

Neste trabalho, realiza-se a análise do fenômeno de propagação de transitórios eletromagnéticos em diferentes modelos de LT disponíveis no ATP, visando identificar e analisar diferenças nos transitórios de falta quando do uso de cada modelo. Para isto, aplica-se o filtro DS em seis sistemas de transmissão 230 kV/60 Hz, sendo três modelados segundo Bergeron e três modelados segundo J. Martí cujos dados dos cabos (raio e resistência), da torre e os parâmetros da LT são apresentados na Figura 4. Os sistemas avaliados dividem-se em idealmente transpostos, transpostos e não transpostos, nos quais todas as LTs são intencionalmente modeladas com comprimentos iguais, com valor de 210 km e considerando o efeito pelicular, sendo compostas por blocos *Line Constants* (LCC).

A transposição ideal é realizada matematicamente pelo ATP. Em contrapartida, a transposição do sistema transposto foi realizada de tal modo que a posição de cada fase muda ao longo da mesma linha, percorrendo cada trecho de transposição pela mesma distância equivalente. Nesse contexto, a LT foi dividida em quatro trechos, sendo estes de $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{3}$ e $\frac{1}{6}$ do tamanho total da LT, respectivamente. Portanto, conforme ilustrado na Figura 5(b), a representação visual da LT idealmente transposta e não transposta é a mesma, diferindo-se apenas em relação à LT transposta, conforme observado na Figura 5(a).

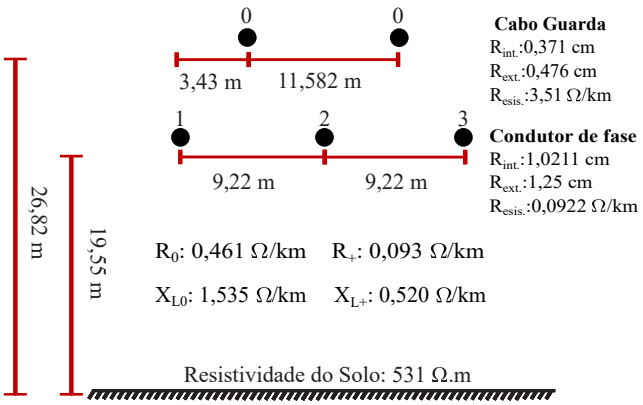

Figura 4. Configuração de torre típica da LT avaliada.

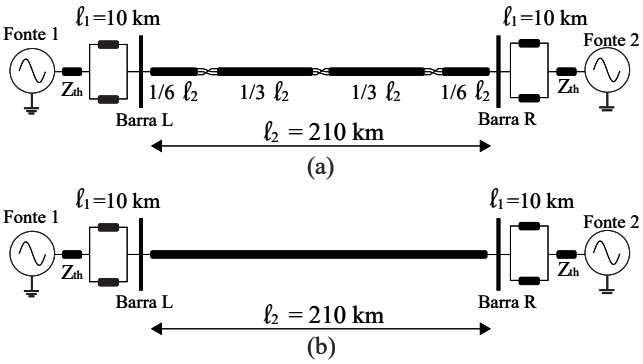

Figura 5. Modelagem da LT do sistema teste: (a) LT transposta; e (b) LT idealmente transposta e não transposta.

4. SIMULAÇÕES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Utilizando os sistemas descritos na seção anterior, realizam-se três análises. No primeiro e segundo caso, monitoram-se os terminais local e remoto, respectivamente, para uma falta franca monofásica na fase A (AT), em 0,119 pu da Barra L, enquanto que no terceiro caso, monitora-se o terminal local para uma falta em 0,5 pu da Barra L. Todos os casos foram analisados a partir da aplicação do filtro DS no transitório gerado por faltas aplicadas nos sistemas de transmissão modelados, sendo o filtro implementado conforme Ribeiro et al. (2019). Como resultado, por meio dos casos avaliados, apresenta-se a análise sobre amplitudes e instantes de detecção das frentes de onda.

4.1 Terminal Local

Nesta subseção, analisam-se os resultados obtidos a partir dos sinais medidos no terminal local (mais próximo do defeito) para uma falta AT aplicada em cada um dos seis sistemas avaliados em 0,119 pu da LT monitorada. Assim, ilustra-se na Figura 6 a saída do filtro DS quando aplicado no terminal local da LT monitorada nos diferentes sistemas avaliados. Na Tabela 1, listam-se os momentos de incidência do pico das OVs no terminal local nos instantes ① e ② e suas amplitudes para cada tipo de modelagem [1].

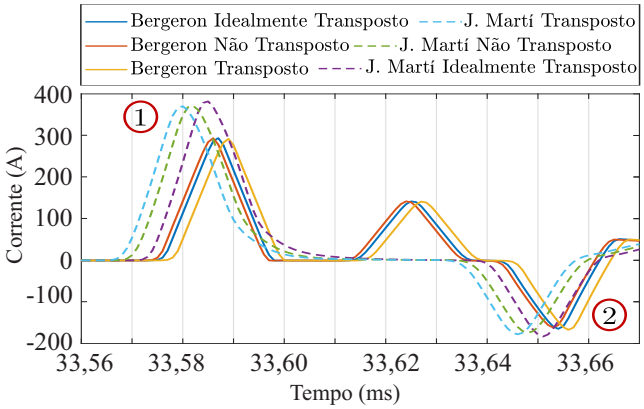

Figura 6. Resposta do filtro DS no terminal local para os sistemas avaliados considerando OVs de fase.

Tabela 1. Amplitude e tempo de cada OV.

Frente de Onda	Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
①	J. Martí T.	33,580	370,373
①	J. Martí N. T.	33,582	371,659
①	J. Martí Id. T.	33,585	382,079
①	Bergeron N. T.	33,586	293,405
①	Bergeron Id. T.	33,587	293,780
①	Bergeron T.	33,589	291,850
②	J. Martí T.	33,646	-177,982
②	J. Martí N. T.	33,648	-174,313
②	J. Martí Id. T.	33,651	-183,332
②	Bergeron N. T.	33,653	-161,633
②	Bergeron Id. T.	33,654	-164,926
②	Bergeron T.	33,656	-167,175

[1] T.: Transposto; Id. T.: Idealmente Transposto; e N. T.: Não Transposto

Nota-se que, entre as frentes de onda sinalizadas como ① e ② na Figura 6, existem ondas intermediárias presentes apenas nos sinais referentes às OVs das modelagens do tipo Bergeron. Visando compreender este resultado, ilustram-se na Figura 7 os sinais desacoplados de modo α e 0, a partir do uso da transformada de Clarke para o caso de LT idealmente transposta.

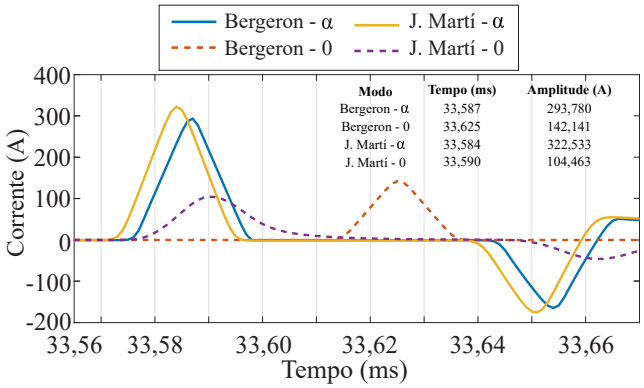

Figura 7. Resposta do filtro DS com modo α e 0 desacoplados.

A partir da análise da Figura 7 constata-se que a segunda frente de onda da Figura 6 consiste em OVs de modo 0 do sistema de Bergeron, que se propagam com menor velocidade que a ondas de modo aéreo desse mesmo modelo. Por outro lado, as ondas modais α e 0 relativas à modelagem segundo J. Martí possuem velocidades diferentes, porém próximas, se sobrepondo no domínio de fases para faltas próximas ao terminal.

Assim, constata-se na Tabela 1 que as OVs geradas a partir da modelagem segundo J. Martí propagam-se com maior velocidade que as OVs obtidas nas modelagens segundo Bergeron, visto que os picos das OVs observadas nos modelos segundo J. Martí ocorrem mais rapidamente em relação aos de Bergeron. É importante esclarecer que nesse trabalho foi utilizado o instante de pico da onda triangular como o momento de detecção de ocorrência da falta. Além de apresentar maior velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, as OVs referentes aos modelos J. Martí apresentam maior amplitude em relação aos de Bergeron. Entretanto, ao observar a Figura 8, nota-se que, apesar de iniciar com amplitude mais elevada, as OVs dos sistemas J. Martí sofrem maior dispersão e atenuação, resultando em padrões de transitórios distintos, especialmente para ondas refletidas, refratadas e de modo 0.

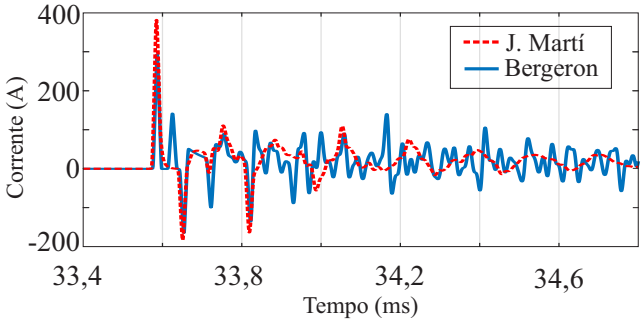

Figura 8. Saída do filtro DS no terminal local para modelagem idealmente transposta para OVs de fase.

4.2 Terminal Remoto

Nesta subseção, analisam-se os resultados obtidos no terminal remoto para o mesmo caso de falta apresentado anteriormente. A Figura 9 ilustra a saída do filtro para cada sistema avaliado. Na Tabela 2, observam-se os momentos de incidência do pico da primeira OV no terminal remoto e sua respectiva amplitude. Os resultados obtidos permitem concluir que a modelagem segundo J. Martí apresenta maior velocidade de propagação de OVs em relação à Bergeron, assim como observado no terminal local. Porém, neste caso as OVs referentes à Bergeron apresentam maior amplitude que as OVs referentes à J. Martí. Este resultado justifica-se pelo fato de que a modelagem segundo Bergeron não considera o efeito da variação da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha, enquanto que a modelagem segundo J. Marti considera essa variação. Como cada frequência é responsável por diferentes atenuações, o modelo de J. Martí terá maiores diferenças nas amplitudes no decorrer de sua propagação.

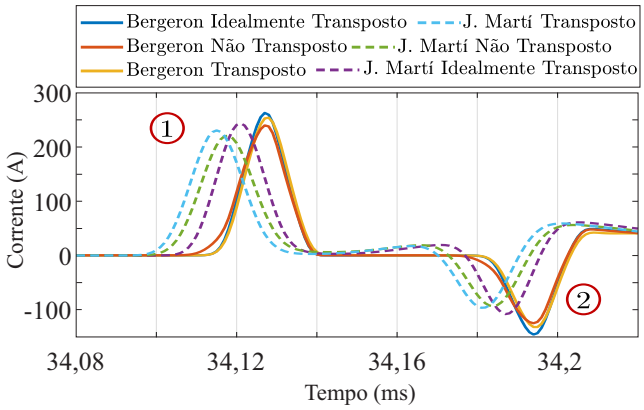

Figura 9. Resposta do filtro DS no terminal remoto para os sistemas avaliados considerando OVs de fase.

Tabela 2. Amplitude e tempo de cada OV.

Frente de Onda	Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
①	J. Martí T.	34,115	230,878
①	J. Martí N. T.	34,118	220,976
①	J. Martí Id. T.	34,121	243,993
①	Bergeron N. T.	34,127	240,105
①	Bergeron Id. T.	34,127	263,196
①	Bergeron T.	34,129	254,409
②	J. Martí T.	34,181	-96,754
②	J. Martí N. T.	34,184	-93,197
②	J. Martí Id. T.	34,187	-107,835
②	Bergeron N. T.	34,194	-124,693
②	Bergeron Id. T.	34,194	-145,566
②	Bergeron T.	34,196	-131,717

4.3 Posição da Falta

Nesta subseção, realiza-se uma última investigação com o intuito de constatar os resultados anteriores. Assim, simulou-se uma falta AT localizada no centro da LT com o intuito de se analisar transitórios com frequências semelhantes em ambos terminais. As OVs geradas são ilustradas na Figura 10 e os valores na Tabela 3, nos quais observam-se que a velocidade de propagação de ondas

eletromagnéticas em modelos J. Martí é maior que em Bergeron. Contudo, para a distância de 0,5 pu, torna-se notável a diferença de velocidade entre os modos α e 0 de J. Martí, conforme observado na Figura 11.

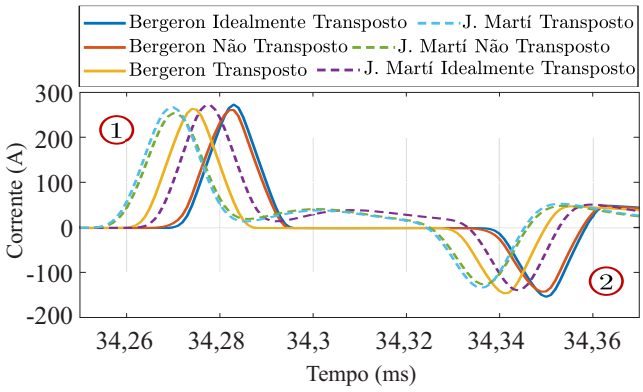

Figura 10. Resposta do filtro DS em terminal local para os sistemas avaliados considerando OVs de fase.

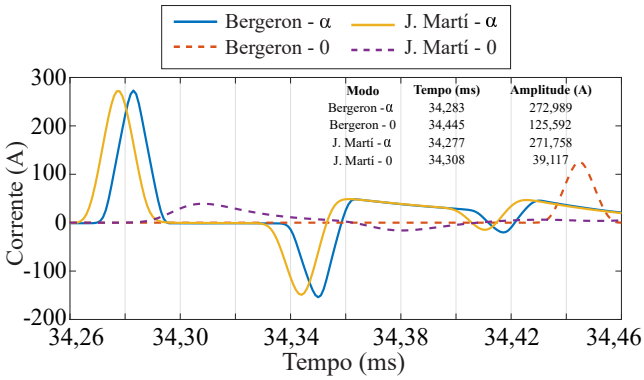

Figura 11. Resposta do filtro DS com modo α e 0 desacoplados para LT idealmente transposta.

Tabela 3. Amplitude e tempo de cada OV.

Frente de Onda	Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
①	J. Martí T.	34,270	267,107
①	J. Martí N. T.	34,270	253,753
①	J. Martí Id. T.	34,277	271,776
①	Bergeron T.	34,274	263,480
①	Bergeron Id. T.	34,283	272,989
①	Bergeron N. T.	34,283	261,012
②	J. Martí T.	34,336	-134,151
②	J. Martí N. T.	34,334	-126,557
②	J. Martí Id. T.	34,344	-139,754
②	Bergeron T.	34,341	-146,361
②	Bergeron Id. T.	34,350	-154,073
②	Bergeron N. T.	34,349	-142,769

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho apresentou-se uma análise dos impactos de dois modelos de LT, disponíveis em programas EMTP, quando da sua aplicação para estudos relacionados à propagação de OVs oriundas de faltas, a saber: J. Martí e Bergeron, considerando LTs idealmente transpostas, transpostas e não transpostas. As diferentes modelagens demonstraram interferir diretamente no comportamento de fenômenos transitórios.

A partir dos sinais no domínio de fase e modal de OVs, obtidos neste trabalho para cada modelagem, conclui-se que modelar LTs segundo J. Martí implica maiores velocidades de propagação de OVs no domínio de fase em relação à modelagem segundo Bergeron, porém maior atenuação. Entretanto, a diferença entre as velocidades de modo 0 e modo α na modelagem segundo Bergeron é menor do que a verificada para o modelo de J. Martí. Desse modo, apesar de não serem verificadas diferenças relevantes quanto às primeiras ondas incidentes de modo α, indica-se ter atenção quanto à escolha dos modelos utilizados em estudos de OVs, especialmente se esses se voltarem para OVs refletidas, refratadas ou de modo 0.

REFERÊNCIAS

(2017). *SEL T400L Ultra high speed transmission line relay traveling wave fault locator high resolution event recorder*. Schweitzer Engineering Laboratories.

Chalangar, H., Ould-Bachir, T., Sheshyekani, K., Li, S., and Mahseredjian, J. (2019). Evaluation of a constant parameter line-based twfl real-time testbed. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1–1. doi:10.1109/TPWRD.2019.2933984.

Costa, F.B., Sobrinho, A.H.P., Ansaldi, M., and Almeida, M.A.D. (2011). The effects of the mother wavelet for transmission line fault detection and classification. In *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, 1–6.

Lopes, F.V., Fernandes, D., and Neves, W.L.A. (2013). A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3), 1626–1634.

Lopes, F., Leite Jr, E., Ribeiro, J.P., Lopes, L., Piardi, A., Otto, R., and Neves, W. (2019). Using the differentiator-smoother filter to analyze traveling waves on transmission lines: Fundamentals, settings and implementation. 1–6.

Percival, D.B. and Walden, A.T. (2000). *Wavelet methods for time series analysis*, volume 4. Cambridge university press.

Phadke, A.G. and Thorp, J.S. (2009). *Computer Relaying for Power System*. John Wiley & Sons.

Ribeiro, E.P.A., Lopes, F.V., Ribeiro, J.P.G., and Leite, E.J.S. (2018). Atp/models differentiator-smoother filter model validated using actual time-domain relay. In *2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 1–4.

Ribeiro, E., Lopes, F., and Honorato, T. (2019). Modelagem do filtro differentiator-smoother: Validação via análise de transitórios e resposta em frequência de dispositivos microprocessados reais. 1–6.

Ribeiro, J.P.G. and Lopes, F.V. (2018). Modelling and simulation of a time-domain line protection relay. *The Journal of Engineering*, 2018(15), 861–865.

Schweitzer, E.O., Guzmán, A., Mynam, M.V., Skendzic, V., Kasztenny, B., and Marx, S. (2014). Locating faults by the traveling waves they launch. In *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 95–110.

Schweitzer, E.O., Kasztenny, B., and Mynam, M.V. (2016). Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 1–17.