

Influence of Corona Effect on Severe Overvoltages due to Critical Fault on Half-Wavelength Transmission Line^{*}

Thassio M. Pereira, Javier A. Santiago, Jhair S. Acosta,
Maria C. Tavares^{*}

^{*} *University of Campinas, Campinas, Brazil, 13083-852,
Contact author Tel.: +55 (19) 3521-0258
e-mails: tmatias@dsce.fee.unicamp.br, javierso@unicamp.br,
jsacosta@dsce.fee.br, ctavares@unicamp.br*

Abstract: This paper presents an analysis about the influence of corona effect in the attenuation of the severe overvoltages that occur in half-wavelength transmission lines (HWL). These overvoltages are usually observed during the occurrence of line-to-line fault in specific critical locations, and the high magnitude is due a resonance condition. To represent the corona effect the Siliciu corona model was adopted, and the model's parameters were tuned using genetic algorithms. The results prove that the corona effect causes changes in the resonance condition, thus reducing the magnitude of maximum overvoltage drastically. Simulations were performed in the PSCAD/EMTDC software.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise da influência do efeito corona na atenuação de sobretensões severas que ocorrem em linhas transmissão de meio comprimento de onda (TMO). Tais sobretensões normalmente são observadas durante a ocorrência de faltas entre fases em certos trechos críticos da linha, e sua elevada magnitude se deve a uma condição de ressonância. Para a representação do efeito corona utilizou-se o modelo de Siliciu, onde a sintonização dos parâmetros foi realizada utilizando algoritmos genéticos. Os resultados obtidos mostram que o efeito corona provoca modificações na condição de ressonância, reduzindo drasticamente a magnitude das máximas sobretensões. As simulações foram realizadas no programa PSCAD/EMTDC.

Keywords: Corona; Half-wavelength lines; Overvoltages; Fault analysis.

Palavras-chaves: Efeito Corona; Linhas de Meio Comprimento de Onda, Sobretensões; Análise de faltas.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a transmissão de energia elétrica a longas distâncias é feita utilizando-se linhas de corrente contínua em alta tensão (High-Voltage Direct Current – HVDC). Contudo, uma alternativa que se mostra bastante promissora é a transmissão em corrente alternada feita a partir de linhas com propriedades de meio comprimento de onda (TMO), que para a frequência de operação de 60 Hz corresponde a uma linha de aproximadamente 2600 km. As linhas de transmissão em TMO também são chamadas de Elo CA, pois, assim como nos sistemas HVDC, a transmissão é do tipo ponto-a-ponto (sem subestações intermediárias). Esse sistema está livre de problemas como efeito Ferranti, excessiva corrente de carga e instabilidade dinâmica, além de apresentar um custo para linhas com capacidade de transmissão semelhante aproximadamente 25% menor do que as linhas de transmissão em corrente contínua (Portela et al. (2007)) e (Samorodov et al. (2017)).

Porém, conforme descrito em (Santiago and Tavares (2019)), uma importante característica das linhas TMO consiste na ocorrência de sobretensões muito severas para casos de faltas críticas (trifásicas com e sem terra, bifásicas e bifásicas para terra) que ocorrem em um trecho específico da linha, normalmente compreendido entre 83% e 87% do comprimento da linha medido a partir de cada terminal. Para tais faltas, as maiores sobretensões são observadas a cerca de 38% do comprimento da linha, podendo atingir valores extremamente elevados. O motivo para ocorrência dessas sobretensões extremas se deve a uma condição de ressonância, quando a impedância vista pelo terminal assume valores mínimos, contribuindo assim para elevação das correntes e tensões devido ao efeito capacitivo da linha.

Como de forma geral o efeito corona age como um atenuador natural das sobretensões (Cervantes et al. (2018)), neste trabalho é investigada a influência deste fenômeno na atenuação das sobretensões na linha com propriedades de TMO. Pelo conhecimento dos autores, no que diz respeito à análise do efeito corona em linhas TMO, o único trabalho existente na literatura é apresentado em (Iliceto and Cinieri (1988)). Contudo, os resultados apresentados

^{*} Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: CAPES (no. 001, 88887.369762/2019-00), CNPq e FAPESP (no. 2018/04174-7, 2017/20010-1, 2015/05626-0, e 2015/26096-0).

neste trabalho são bastante limitados, visto que o modelo utilizado para representação do efeito corona é simplificado, pois representa apenas as perdas de potência ativa causadas por este fenômeno, sem representar a variação da admitância transversal da linha.

Neste trabalho é feita uma análise mais robusta, representando o efeito corona através do modelo de Siliciu que permite a representação tanto das perdas condutivas, bem como do aumento da capacitância transversal da linha. Ademais, as análises focaram nas condições de faltas críticas, com o intuito de quantificar a atenuação causada pelo fenômeno. Pode-se mostrar que a representação do efeito corona reduz de forma muito importante as sobretensões na TMO para faltas críticas.

2. SISTEMA TESTE

O sistema teste é composto por uma linha de transmissão (LT) de 735 kV com propriedades de TMO que conecta uma estação geradora a um sistema de potência (geração-rede), constituindo assim uma transmissão ponto a ponto. As características dos sistemas equivalentes, bem como da linha de transmissão utilizada são descritas nas seções subsequentes.

2.1 Sistemas Equivalentes Terminais

A subestação geradora é representada pelo sistema equivalente de uma usina de geração hidrelétrica composta por 4 máquinas síncronas e 4 transformadores elevadores (T1), resultando em uma corrente de curto-circuito trifásica (I_{sc}) de 3,8 kA na barra de envio em 735 kV. Por outro lado, no terminal receptor tem-se um transformador abaixador equivalente (T2) e um equivalente de sistema similar ao sistema brasileiro de 500 kV, cuja corrente de curto-circuito é de 40 kA (um barramento forte). Os dados dos geradores e transformadores são apresentados na Tabela I e são baseados em uma subestação real (Serra da Mesa, Brasil).

2.2 Linha de transmissão

A linha de transmissão utilizada foi baseada na linha real de 735 kV da Hydro-Québec (Trinh et al. (1982)), cuja geometria da torre é apresentada na Fig.1. É oportuno ressaltar que originalmente esta linha operava compensada, sendo que neste trabalho utilizou-se a mesma geometria e considerou-se o comprimento da linha igual à 2600 km para que ela pudesse operar com propriedades de uma linha TMO. A justificativa da escolha desta linha para

Tabela 1. Parâmetros do sistema de potência

Impedância equivalente das fontes				
Fonte		Sequência Zero (Ω)		
Geração – 15 kV		0,000942 + j 0,032380		
Sistema equivalente – 500 kV		7,2169 + j 36,084		
Fonte		Sequência Positiva (Ω)		
Geração – 15 kV		0,000942 + j 0,032380		
Sistema equivalente – 500 kV		0,4801 + j 7,201		
Impedância equivalente dos transformadores				
Transformador	Xr (%)	kV	MVA	Conexão
T1	11,84	735/15	1890	Yn/ Δ
T2	10,00	735/500	1800	Yn/ Yn

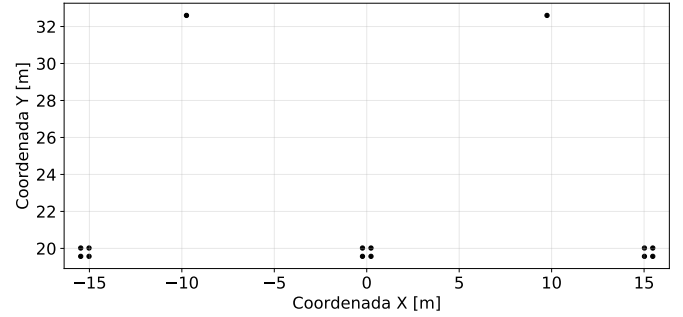


Figura 1. Perfil transversal da linha de transmissão de 735 kV da Hydro-Québec - Altura média.

Tabela 2. Parâmetros da linha de transmissão (60 Hz).

Sequência zero		
$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	$B_0(\mu S/km)$
0,3080	1,1060	3,4010
Sequência positiva/negativa		
$R_1(\Omega/km)$	$X_1(\Omega/km)$	$B_1(\mu S/km)$
0,0111	0,3412	4,8583

realização das análises reside no fato de que, conforme será melhor discutido posteriormente, para sintonização dos parâmetros do modelo de corona utilizado neste trabalho (Modelo de Siliciu) é necessário que existam medições de curvas carga-tensão ($q - v$) para o feixe de condutores utilizado na linha. Tais medições são muito difíceis de serem encontradas na literatura, principalmente para casos de sobretensões de dupla polaridade a 60 Hz. Contudo, foram realizadas medidas para o feixe de 4 condutores/fase utilizado na linha de transmissão da Hydro-Québec, cujos detalhes estão descritos em um relatório interno do IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) (Maruvada and Nguyen (1986)). A potência característica da linha (P_c) é de 2038 MW, e a resistividade do solo foi considerada como 100 $\Omega.m$. A Tabela II apresenta os parâmetros da linha para frequência de 60 Hz.

3. EFEITO CORONA

3.1 Representação em programas do tipo EMT

Os modelos de linha existentes no software PSCAD, assim como nos demais programas do tipo EMT (Electromagnetic Transient Program) desprezam a ocorrência do efeito corona. Deste modo, atualmente a representação do fenômeno somente pode ser efetuada através de elementos concentrados e externos à linha. Mais especificamente, o procedimento adotado consiste em realizar a discretização espacial da linha num grande número de trechos, sendo que na junção entre cada trecho é disposto um barramento transversal que representa o efeito corona em cada fase de acordo com o modelo adotado (Fig. 2).

Deve ser ressaltado que nesta representação a ionização em torno da fase equivalente não impacta nos parâmetros mútuos. Esta aproximação pode ser considerada válida em função das distâncias entre as fases. Ademais, o comprimento dos trechos adotado na discretização espacial depende da frequência dos fenômenos envolvidos, sendo que este assunto será melhor abordado posteriormente.

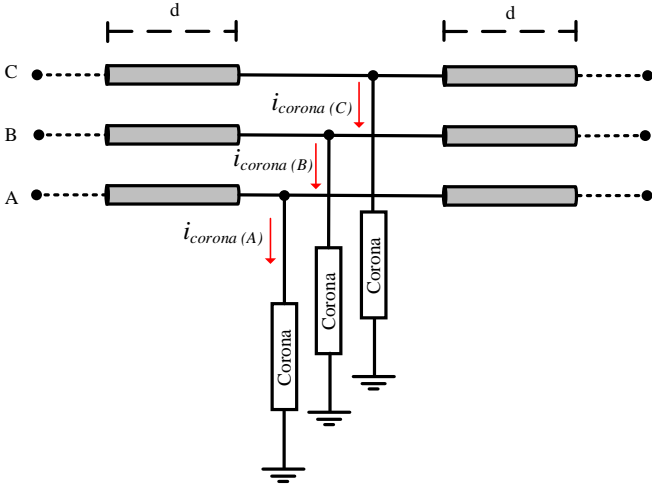


Figura 2. Representação do efeito corona em programas do tipo EMT.

Conforme já apresentado anteriormente, para representação do efeito corona utilizou-se o modelo de Siliciu. Este modelo foi adotado por ser altamente robusto e capaz de representar com alto nível de precisão as principais características do fenômeno, como a elevação das perdas, a variação da capacitância da linha e também a dependência do fenômeno com a frequência (Maruvada et al. (1988)). Contudo os seus parâmetros são difíceis de serem obtidos. É oportuno ressaltar que o modelo de Siliciu foi inicialmente desenvolvido para estudos de sobretensões unipolares (Mihăilescu-Suliciu and Suliciu (1981)), e posteriormente foi estendido para aplicação em sobretensões de dupla polaridade (Hamadani-Zadeh (1986)), sendo este último o modelo utilizado neste trabalho e apresentado a seguir.

3.2 Modelo de Siliciu

Quando um determinado condutor (ou feixe de condutores) da linha transmissão está sob efeito corona os processos de ionização do ar provocam o surgimento de cargas espaciais próximo à sua superfície, também chamadas de cargas de corona (Q_c). Desse modo, quando a tensão no condutor torna-se nula parte da carga é atraída novamente para a superfície do condutor, e o restante permanece concentrado em um cilindro de raio x , que é coaxial ao condutor da linha. Nessas circunstâncias, sendo C_0 a capacitância entre o condutor e o solo e C_x a capacitância entre condutor e a superfície do cilindro, tem-se que a capacitância entre a superfície do cilindro e o solo (C_r) é dada por:

$$C_r = \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_x} \right)^{-1} \quad (1)$$

Sendo V a tensão entre o condutor e o solo, V_x a tensão entre o condutor e a superfície do cilindro, e Q a carga total, tem-se que:

$$V = V_x + \frac{Q}{C_r} \quad (2)$$

$$Q = C_x V_x + Q_c \quad (3)$$

A carga de corona Q_c pode ser obtida por meio da integração da corrente de corona dentro do cilindro (i_c), que pelo modelo de Siliciu é obtida conforme apresentado em (4).

$$i_c = \frac{d}{dt} q_c = \begin{cases} 0 & \text{se } g_2 \leq 0 & \text{estado 6} \\ g_2 & \text{se } g_1 \leq 0 < g_2 & \text{estado 2} \\ g_1 + g_2 & \text{se } g_1 > 0 & \text{estado 1} \end{cases} V_x > 0$$

$$\begin{cases} 0 & \text{se } g_4 \geq 0 & \text{estado 5} \\ g_4 & \text{se } g_4 < 0 \leq g_3 & \text{estado 4} \\ g_3 + g_4 & \text{se } g_3 < 0 & \text{estado 3} \end{cases} V_x \leq 0 \quad (4)$$

$$g_m = k_m [(C_m - C_x)(V_x - V_m) - Q_c], \quad m = 1, \dots, 4 \quad (5)$$

Nas equações (4) – (5) tem-se que C_m , V_m e k_m são parâmetros do modelo, os quais podem ser sintonizados utilizando-se curvas $q-v$ obtidas por medições em gaiolas de corona (Maruvada et al. (1988)), conforme será melhor discutido na seção 4.

Finalmente, obtém-se a corrente de corona na linha de transmissão (i_{corona}):

$$i_{corona} = C_0 \left(\frac{1}{C_x} \right) i_c \quad (6)$$

4. METODOLOGIA

4.1 Implementação do sistema teste

O sistema descrito na seção 2 foi implementado no *software* PSCAD/EMTDC. Para representação do efeito corona, a linha de transmissão foi discretizada em trechos de 10 km, totalizando assim 260 trechos para a linha TMO. Quando se realiza a discretização espacial da linha e inserem-se barramentos transversais de corona, está sendo suposto que a tensão da onda viajante não varia ao longo de cada trecho. Desse modo, tal aproximação somente é válida se o tempo que um sinal leva para viajar de uma extremidade a outra do trecho for apenas uma fração do tempo relacionado à máxima variação de tensão do sinal aplicado. Neste trabalho, foram analisadas apenas as sobretensões causadas por faltas trifásicas, onde os fenômenos envolvidos são sustentados (temporários), ou seja, a frequência dominante é 60 Hz. Sendo assim, o tempo em que ocorre a máxima variação de tensão é de 4,16 ms (ou 1/4 de ciclo), cuja frequência relacionada é $f_{max} = 240$ Hz. Como um sinal viaja aproximadamente a $3 \cdot 10^5$ km/s, o comprimento dos trechos (d) para a discretização espacial deve obedecer a equação (7).

$$d \ll \frac{3 \cdot 10^5}{f_{max}} [km] \quad (7)$$

Aplicando-se a equação (7) para o caso analisado, tem-se que o comprimento do trechos (d) deve ser muito menor que 1250 km. Sabendo-se que quanto menor o comprimento adotado na discretização espacial maior é a precisão dos resultados, optou-se por utilizar trechos de 10 km. Em todas as análises realizadas neste trabalho a linha foi considerada idealmente transposta, e o modelo de

linha utilizado é o *Universal Line Model* (ULM - domínio das fases), que representa adequadamente a variação dos parâmetros longitudinais com a frequência.

Para representação do modelo de Siliciu utilizou-se a ferramenta *Component Wizard* do PSCAD, que permite a criação de novos componentes dentro do ambiente do programa. Desse modo, pode-se realizar a implementação das equações (1) – (6), e o modelo foi representado através de uma fonte de corrente controlada por tensão. Para realizar o cálculo da corrente de corona é necessário monitorar a tensão em cada fase no terminal receptor de cada trecho de linha.

4.2 Sintonização dos parâmetros do modelo de corona

Conforme descrito na seção anterior, para aplicação do modelo de Siliciu é necessário conhecer os parâmetros C_m , V_m e k_m , sendo que para $m = 1, 2$ os parâmetros referem-se ao caso em que a tensão possui polaridade positiva (ou $V_x > 0$), e para $m = 3, 4$ os parâmetros referem-se ao caso em que a tensão possui polaridade negativa ($V_x \leq 0$). A obtenção dos valores desses parâmetros pode ser realizada através de curvas $q-v$ obtidas por medições. Mais especificamente, deve-se realizar um ajuste de modo que a curva $q-v$ produzida pelo modelo seja igual àquela obtidas nas medições. Contudo, conforme apresentado a seguir, o processo normalmente adotado para obtenção desses parâmetros é trabalhoso, principalmente no caso em que a curva $q-v$ possui dupla polaridade.

A fim de exemplificar o processo de ajuste dos parâmetros, a Fig. 3 apresenta o esquema utilizado para estimar os parâmetros no caso em que a curva possui apenas polaridade positiva (sobretensão unipolar). Conforme apresentado na Fig. 3, C_1 , C_2 , V_1 e V_2 podem ser estimados traçando-se retas tangentes e secantes à curva medida. Por outro lado, os parâmetros k_1 e k_2 somente podem ser obtidos através de um processo de tentativa e erro, onde variam-se os valores desses parâmetros e os resultados obtidos são comparados às medições. O mesmo procedimento pode ser adotado para o caso em que a tensão possui apenas polaridade negativa.

É fácil perceber que a dificuldade existente no processo de obtenção dos parâmetros do modelo cresce consideravelmente quando a curva $q-v$ possui dupla polaridade, como ocorre no caso de sobretensões sustentadas. Mais especificamente, tal dificuldade se deve ao fato de que os valores adotados para representação de um determinado semiciclo influenciam diretamente nos resultados obtidos no semiciclo subsequente, dificultando assim a sintonização dos parâmetros k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , que são obtidos através de tentativa e erro. Visando contornar este problema, neste trabalho a sintonização de todos os parâmetros do modelo foi realizada por meio de algoritmos genéticos (AG), pois eles apresentam boas soluções para diferentes tipos de problemas (Vikhar (2017)). De modo a minimizar a distância dos pontos produzidos pelo modelo com a curva obtida das medições, utilizou-se um AG com uma população de 100 indivíduos, evoluindo durante 100 gerações, usando o operador de crossover aritmético com uma probabilidade 90%; o operador de mutação com uma probabilidade de 10%, controlado a quantidade de mutação com gaussianas com desvios padrão de 100 para k_m e V_m , e desvios

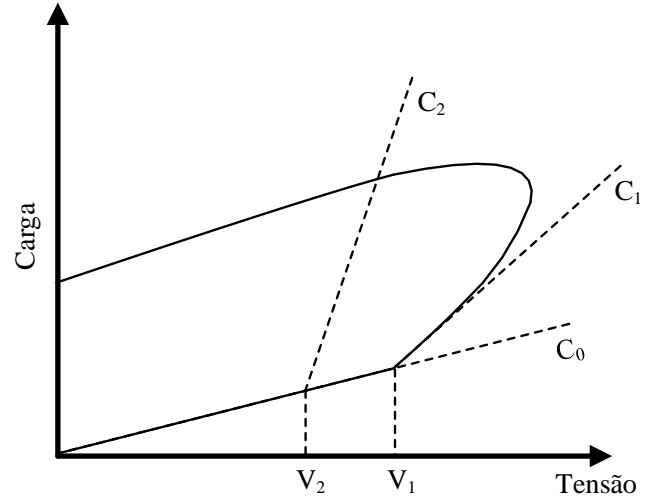


Figura 3. Sintonização dos parâmetros do modelo de Siliciu.

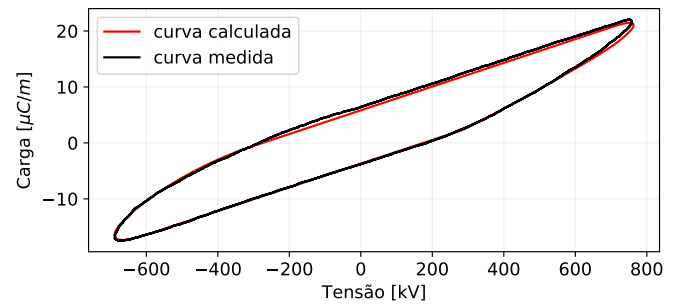


Figura 4. Comparação entre a curva $q-v$ medida pelo IREQ e a calculada pelo modelo de Siliciu utilizando parâmetros sintonizados por algoritmos genéticos.

padrões de 0,1 para C_m ; e uma seleção natural por meio de torneios modificados com grupos com tamanho de 20% da população total. A utilização de algoritmos genéticos permite a obtenção dos parâmetros de forma otimizada, garantindo um melhor ajuste da curva de maneira mais eficiente.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 4, onde é apresentada uma comparação entre a curva $q-v$ medida em uma gaiola de corona (para o feixe de 4 cond/fase utilizado na LT descrita na seção 2) e a curva calculada pelo modelo de Siliciu com os parâmetros sintonizados por algoritmos genéticos conforme descrito acima. Como pode ser observado, a curva sintonizada apresenta alto grau de concordância com a curva medida, garantindo assim elevada precisão para os resultados obtidos nas simulações.

5. ANÁLISES E RESULTADOS

Para a linha analisada verificou-se que quando o efeito corona não é representado o ponto crítico de falta corresponde ao km 2130 medido do terminal emissor. As maiores sobretensões são observadas a cerca de 1000 km deste terminal. Deve-se ressaltar que para todas as análises realizadas aplicou-se uma falta trifásica para a terra, com resistência de falta de 10 Ω . Além disso, na condição

pré-falta o sistema encontrava-se em regime normal de operação, a plena carga (transmitindo 1,0 Pc).

Em uma primeira análise foram realizadas as simulações sem a representação do efeito corona. Os resultados obtidos são apresentados nas Figs. 5 e 6, onde são apresentados os valores máximos (eficaz) das tensões no ponto crítico (envoltória) e a forma de onda da tensão na fase A, respectivamente. Conforme pode ser observado, inicialmente o sistema encontra-se em regime normal de operação, com tensão de 1,03 pu no ponto de observação. Em 100 ms a falta é aplicada e pode-se observar uma elevação rápida da tensão, estabilizando-se em aproximadamente 12,43 p.u. em 500 ms.

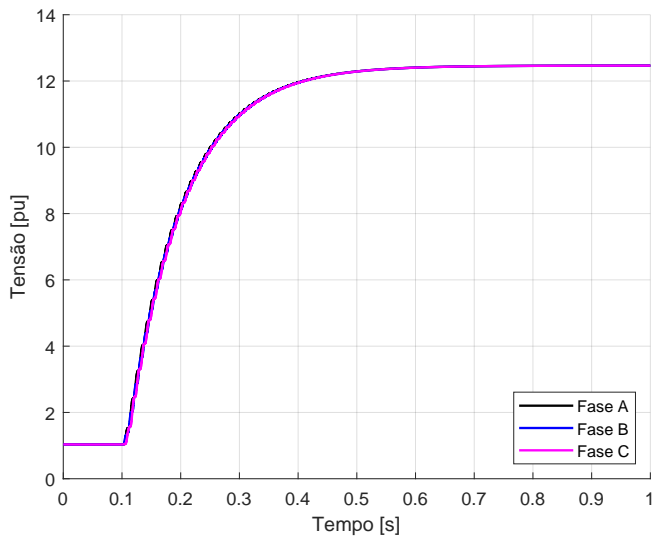


Figura 5. Valores máximos (eficaz) das tensões nas três fases da linha a 1000 km do terminal emissor para falta ABC-t no km 2130 do terminal emissor (simulação sem representação do efeito corona).

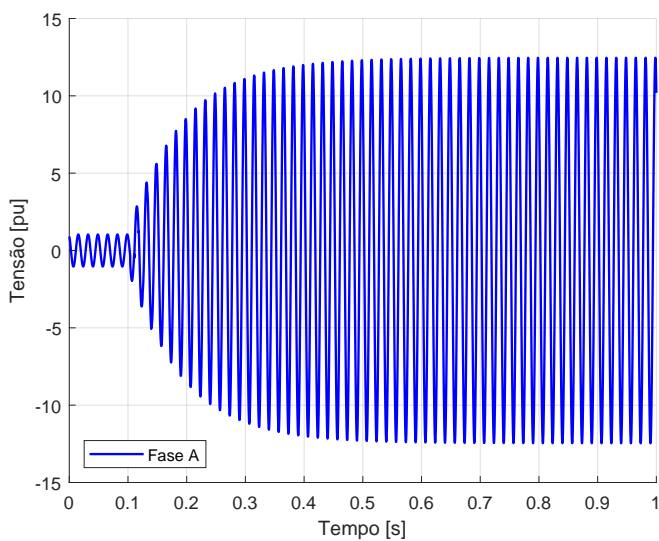


Figura 6. Forma de onda da tensão na fase A a 1000 km do terminal emissor para falta ABC-t no km 2130 do terminal emissor (simulação sem representação do efeito corona).

A seguir as simulações são realizadas para as mesmas condições, porém com representação do efeito corona. Os resultados obtidos são apresentados nas Figs. 7 e 8, e assim como realizado anteriormente, são apresentados os valores máximos das tensões nas três fases da linha e a forma de onda da tensão apenas na fase A, respectivamente. Conforme pode ser observado, o efeito corona reduz drasticamente os valores das sobretensões obtidas, limitando-os a valores inferiores a 2,8 p.u, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 80% se comparado com o caso em que o fenômeno não é representado.

A elevada redução das sobretensões deve-se ao fato do efeito corona provocar um aumento na capacitância da linha, dessintonizando a ressonância no ponto analisado.

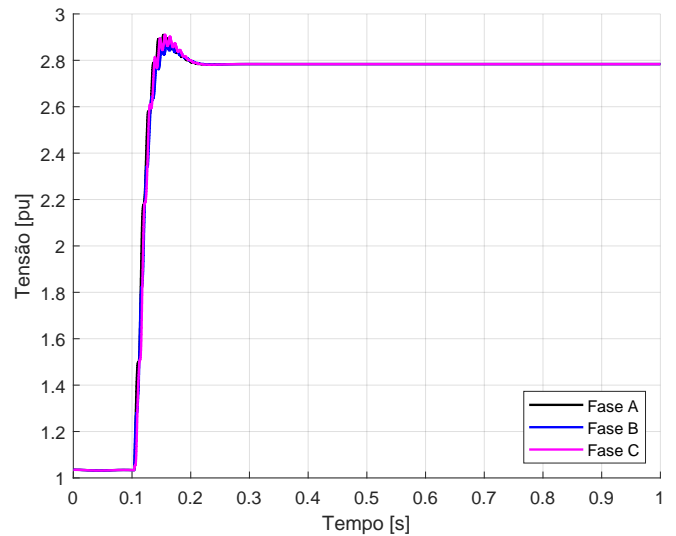


Figura 7. Valores máximos (eficaz) das tensões nas três fases da linha a 1000 km do terminal emissor para falta ABC-t no km 2130 do terminal emissor (simulação com representação do efeito corona).

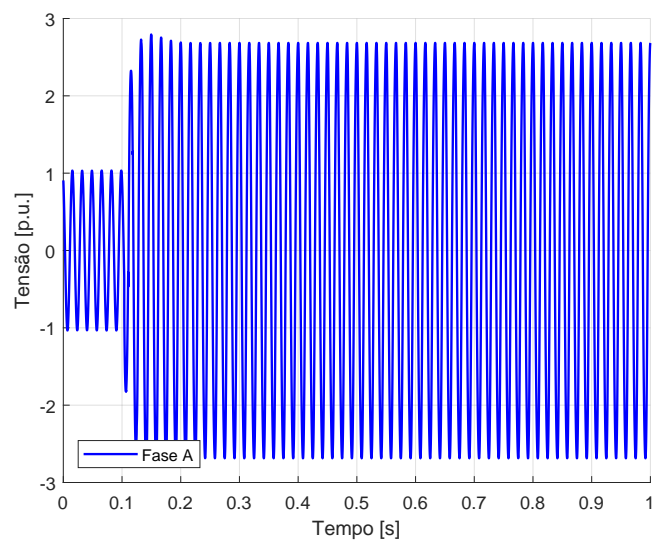


Figura 8. Forma de onda da tensão na fase A a 1000 km do terminal emissor para falta ABC-t no km 2130 do terminal emissor (simulação com representação do efeito corona).

Diferentemente do que se apresentava em trabalhos anteriores onde o efeito corona era desprezado, os resultados aqui apresentados mostram que quando uma falta trifásica ocorre no local crítico (a aproximadamente 2130 km do terminal emissor) as sobretensões máximas que se apresentam na linha (aproximadamente a 1000 km) são fortemente amortecidas pelo efeito corona. Contudo, perante os resultados apresentados ainda não se pode concluir que o efeito corona elimina totalmente as sobretensões extremamente severas, uma vez que o ponto de ressonância pode ter sido apenas deslocado. Desse modo, tais análises serão realizadas em trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre a influência da representação do efeito corona nas sobretensões extremamente severas que ocorrem em linhas TMO. Estas sobretensões são observadas durante a ocorrência de faltas trifásicas em pontos críticos da linha TMO. A ocorrência dessas sobretensões se deve a uma condição de ressonância, onde a impedância vista pela fonte assume valores baixos, provocando assim um aumento drástico nos valores da sobretensões.

De um modo geral, os resultados obtidos mostram que quando faltas trifásicas ocorrem no ponto crítico (2130 km), o fenômeno do efeito corona reduz a sobretensão a aproximadamente 80% do valor original no local de maior solicitação quando não se considerava o efeito corona, sendo o local de máxima sobretensão a 1000 km do terminal emissor. Desse modo, observa-se que a variação na admitância transversal da linha causada pelo efeito corona modifica a condição crítica de ressonância no ponto analisado, sendo que este processo de ressonância pode ocorrer em outro ponto da linha ou ser totalmente eliminado, conforme será melhor investigado posteriormente.

Sendo assim, em trabalhos futuros será realizada uma análise mais extensa de faltas ao longo da linha TMO considerando o efeito corona, variando os tipos e locais de falta. Outra análise a ser feita é a consideração do efeito corona juntamente com um sistema proposto para a remoção da ressonância em linhas de TMO durante faltas críticas. Este sistema é formado por descarregadores de espaço de ar (*spark gap*) localizados e ajustados estrategicamente para remover a ressonância e mitigar as sobretensões críticas até o relé principal proteção atuar, conforme encontra-se descrito na literatura (Ortega and Tavares (2019)).

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à *Manitoba Hydro International Ltd* pela disponibilização de uma licença profissional do programa PSCAD/EMTDC durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Cervantes, M., Kocar, I., Montenegro, A., Goldsworthy, D., Tobin, T., Mahseredjian, J., Ramos, R., Marti, J., Noda, T., Ametani, A., and Martin, C. (2018). Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6), 2884–2893. doi:10.1109/TPWRD.2018.2834138. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8355791/>.

Hamadani-Zadeh, H. (1986). Dynamic Corona model and frequency dependent line model for EMT. *IREQ Report*.

Iliceto, F. and Cinieri, E. (1988). Analysis of half-wavelength transmission lines with simulation of corona losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(4), 2081–2091. doi:10.1109/61.194020. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/194020/>.

Maruvada, P.S. and Nguyen, D.H. (1986). Modèle Numérique et Analogique de l'Effet Couronne Utilisé pour le Calcul Surtensions Temporaires - IREQ Internal Report No. IREQ - 5RT3571 G. Technical report.

Maruvada, P.S., Nguyen, D.H., and Hamadani-Zadeh, H. (1988). Studies on modelling corona attenuation of dynamic overvoltages. In *IEEE-PES Summer Meeting*.

Mihăilescu-Suliciu, M. and Suliciu, I. (1981). A rate type constitutive equation for the description of the corona effect. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(8), 3681–3685. doi:10.1109/TPAS.1981.317010.

Ortega, J.S. and Tavares, M.C. (2019). Transient Analysis and Mitigation of Resonant Faults on Half-Wavelength Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PP(code 001), 1–1. doi:10.1109/tpwr.2019.2935870.

Portela, C., Silva, J., and Alvim, M. (2007). Non-Conventional AC Solutions Adequate For Very Long Distance Transmission – An Alternative For The Amazon Transmission System. In *IEC / CIGRE UHV Symposium, Beijing, China*. IEC / CIGRE, Beijing.

Samorodov, G., Kandakov, S., Zilberman, S., Krasilnikova, T., Tavares, M.C., Machado, C., and Li, Q. (2017). Technical and economic comparison between direct current and half-wavelength transmission systems for very long distances. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(11), 2871–2878. doi:10.1049/iet-gtd.2017.0024.

Santiago, J. and Tavares, M.C. (2019). Relevant factors for temporary overvoltages due to fault-resonance conditions on half-wavelength transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 175(April), 12. doi:10.1016/j.epr.2019.105886.

Trinh, N.G., Maruvada, P.S., Amand, J.F., and Valotaire, J.R. (1982). A Study of the Corona Performance of Hydro-Québec's 735-kV Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(3), 681–690. doi:10.1109/TPAS.1982.317283. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4111378/>.

Vikhar, P.A. (2017). Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects. *Proc. - Int. Conf. Glob. Trends Signal Process. Inf. Comput. Commun. ICGTSPICC 2016*, -, 261–265. doi:10.1109/ICGTSPICC.2016.7955308.