

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

MODELAGEM DE SUBESTAÇÕES ISOLADAS A GÁS PARA O ESTUDO DE TRANSITÓRIOS UTILIZANDO TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ESTENDIDA PARA FENÔMENOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS

EDGAR JOSÉ OLIVEIRA RIBEIRO (1); ALBERTO DE CONTI (1); RAFAEL ALÍPIO (2);
SANDRO DE CASTRO ASSIS (3);
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (1); CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS (2); CEMIG DISTRIBUIÇÃO (3)

RESUMO

Subestações isoladas a gás (*Gas Insulated Substations* - GIS) apresentam dimensões inferiores a subestações equivalentes isoladas a ar. Essa característica torna a GIS suscetível a sobretensões transitórias muito rápidas (*Very Fast Transient Overvoltages* – VFTOs), que possuem componentes de frequência elevadas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a modelagem de barramentos de uma GIS utilizando a teoria estendida de linha de transmissão. Um caso típico envolvendo a energização de um módulo GIS inserido em um sistema de 138 kV é analisado. Os resultados obtidos indicam que o modelo baseado na teoria estendida de linhas de transmissão leva a sobretensões que, nas situações avaliadas, apresentam comportamento semelhante às calculadas com o modelo de linha clássico. Por outro lado, leva a diferenças mais significativas em relação ao modelo sem perdas, que é tipicamente utilizado neste tipo de análise.

1.0 INTRODUÇÃO

Subestações isoladas a gás (*Gas Insulated Substations* – GIS) são formadas por barramentos no interior de tubos pressurizados com um gás de característica mais isolante que o ar, como o SF₆ [1]. Esse tipo de estrutura tem encontrado uso crescente em todo o mundo devido a vantagens como menores requisitos de espaço, maior nível de segurança e facilidade de manutenção. Por outro lado, suas menores dimensões tornam a GIS suscetível às sobretensões transitórias muito rápidas (*Very Fast Transient Overvoltages* – VFTOs).

As VFTOs apresentam formas de onda complexas e componentes de frequências elevadas devido à presença, nas subestações isoladas a gás, de componentes, como barramentos e conectores, que possuem comprimentos reduzidos e impedâncias de surto distintas. A realização de manobras em disjuntores gera, assim, sobretensões que são modificadas por inúmeras reflexões nos pontos de descontinuidade de impedância ali presentes. O aumento da utilização de GIS e o desenvolvimento de instalações com nível de tensão cada vez maior torna o estudo das VFTOs importante para a coordenação de isolamento. A análise correta de VFTO é importante, por exemplo, para avaliação dos estresses elétricos em transformadores de potência [2].

Tradicionalmente, supõe-se que os barramentos de GIS possam ser modelados como trechos de linhas de transmissão sem perdas [3], bastando para isso determinar os tempos de trânsito e as impedâncias de surto dos barramentos. Em [1], descreve-se como calcular esses parâmetros para configurações de GIS com uma ou três fases por invólucro. Embora essa modelagem seja frequentemente adotada na análise de VFTOs em programas do tipo ATP/EMTP (*Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program*), ela despreza as perdas nos condutores e no solo. Uma alternativa seria empregar a teoria clássica de linhas de transmissão, que permite a inclusão das perdas no solo utilizando as expressões para cálculo da impedância de retorno do solo propostas por Carson [4]. Isso poderia ser feito, por exemplo, utilizando-se os modelos de linha de transmissão disponíveis no ATP. Contudo, tal abordagem não leva em consideração o fato de que, em altas frequências, a formulação de Carson não é capaz de descrever de forma rigorosa os fenômenos eletromagnéticos associados à propagação de sinais em linhas de transmissão por ignorar a admitância de retorno do solo e pressupor, em sua dedução, que a permissividade do solo seja unitária [4]. Além disso, os modelos de linha de transmissão disponíveis no ATP desprezam a variação dos parâmetros do solo com a frequência [5], o que introduz um erro em sua formulação.

As limitações identificadas na teoria clássica de linhas de transmissão têm motivado, nas últimas décadas, o desenvolvimento de teorias mais completas que permitam o emprego da teoria de linhas em faixas de frequências superiores à faixa de validade da teoria tradicional de linhas, usualmente limitada a frequências inferiores a alguns MHz [6]. Essas teorias, chamadas de *teorias estendidas de linhas de transmissão*, propõem formulações mais rigorosas que a de Carson para o cálculo da impedância de retorno do solo e incorporam a admitância de retorno do

solo no cálculo dos parâmetros por unidade de comprimento da linha. Recentemente, um desses modelos estendidos de linha de transmissão foi empregado para avaliar VFTOs em um barramento de GIS implementado no EMTP [7]. Os resultados obtidos indicaram que esse tipo de modelo seria mais adequado para a análise do problema que o emprego da teoria de linhas utilizando o modelo de Carson. Contudo, não foram avaliados os potenciais erros associados ao emprego da abordagem simplificada que supõe a representação dos barramentos da GIS como linhas sem perdas. Além disso, nas análises realizadas desprezou-se a variação dos parâmetros do solo com a frequência, o que pode levar à estimação incorreta de sobretensões na faixa de altas frequências.

Neste trabalho, emprega-se a teoria estendida de linhas de transmissão no cálculo de VFTOs em uma GIS. Para isso, calculam-se os parâmetros por unidade de comprimento da linha utilizando a impedância de retorno do solo de Nakagawa [8] e admitância de retorno no solo de Wise [9], considerando-se a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência [10]. O modelo resultante é simulado no ATP utilizando-se o modelo de linha JMarti [11], o que é feito utilizando a estratégia proposta em [12]. Resultados obtidos com esse modelo são primeiramente validados por meio de comparações com resultados obtidos com o modelo estendido de [7]. Em seguida, são feitas comparações com resultados obtidos com modelos mais simples que consideram a modelagem de barramentos da GIS como linhas sem perdas ou considerando a impedância de retorno do solo de Carson, sem considerar a admitância do solo. Os resultados obtidos consideram uma GIS isolada ou conectada a um sistema típico contendo uma linha de transmissão aérea de 138 kV e cabos subterrâneos.

2.0 CÁLCULO DE PARÂMETROS POR UNIDADE DE COMPRIMENTO

O cálculo dos parâmetros por unidade de comprimento de barramentos de GIS representados utilizando a teoria de linhas de transmissão requer a determinação da impedância (Z) e da admitância (Y) por unidade de comprimento do barramento. De forma geral, pode-se escrever

$$Z = Z_i + Z_e + Z_g \quad (1)$$

$$Y = (Y_e^{-1} + Y_g^{-1})^{-1} \quad (2)$$

onde Z_i , Z_e e Z_g são, respectivamente, as impedâncias por unidade de comprimento interna, externa e de retorno do solo associadas ao barramento e Y_e e Y_g são, respectivamente, as admitâncias externa e de retorno no solo por unidade de comprimento.

2.1 MODELAGEM COMO LINHA SEM PERDAS

Na modelagem do barramento de uma GIS como linha sem perdas, supõe-se que Z_i e Z_g sejam nulos e despreza-se o efeito de Y_g . Nesse caso, o barramento da GIS é representado pela impedância de surto $Z_s = (Z_e/Y_e)^{1/2}$ e a velocidade de propagação ao longo do barramento passa a ser igual ou ligeiramente inferior à velocidade da luz. Em [1] são apresentados detalhes de como se determinar Z_s para diferentes configurações geométricas de barramentos. Essa mesma abordagem é empregada na determinação do modelo simplificado utilizado nas análises apresentadas neste artigo, que foi implementado no ATP utilizando os modelos de linhas sem perdas disponíveis nessa plataforma.

2.2 MODELAGEM UTILIZANDO A TEORIA CLÁSSICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ao se utilizar a teoria clássica de linhas de transmissão, considera-se Z_i e Z_g diferentes de zero e despreza-se o efeito de Y_g . A impedância interna dos condutores (condutores internos e tubo) é normalmente calculada utilizando expressões baseadas em equações de Bessel ou aproximações [8]. Por sua vez, Z_g é calculada empregando-se as equações de Carson [4] supondo-se solo com parâmetros constantes. Rigorosamente, essa abordagem só pode ser considerada correta para a análise de fenômenos transitórios em solos de baixas resistividades e/ou fenômenos de baixas frequências. Portanto, seu emprego na modelagem de GIS é discutível. Contudo, essa abordagem é utilizada neste trabalho para se identificar até que ponto sua utilização seria efetivamente inadequada na modelagem de GIS. Nos casos avaliados, considerou-se o modelo JMarti disponível no ATP [11]. O modelo de JMarti é um modelo de linha de transmissão no domínio modal que utiliza uma matriz real e constante [11].

2.3 MODELAGEM UTILIZANDO A TEORIA ESTENDIDA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A modelagem estendida de linhas de transmissão considera a formulação de Z e Y conforme indicado em (1) e (2), sem aproximações. Neste trabalho, considera-se Z_g calculado com a formulação de Nakagawa [8], Y_g calculado com a formulação de Wise [9] e variação dos parâmetros do solo com a frequência com o modelo de Alípio e Visacro [10]. O modelo foi implementado no ATP utilizando a estratégia proposta por De Conti e Emídio [12]. Para isso, foi realizado o cálculo e o ajuste da função de propagação e da impedância característica necessárias para simulação com o modelo JMarti empregando-se a técnica de ajuste vetorial no MATLAB [15], [16], [17]. Os polos e resíduos obtidos foram exportados para o ATP na forma de um arquivo texto no formato pch, que é lido pelo programa e interpretado como o modelo de Marti [11]. Por uma restrição do ATP, o ajuste foi realizado considerando-se polos exclusivamente reais.

3.0 ATENUAÇÃO DE SINAIS EM ALTAS FREQUÊNCIAS UTILIZANDO DIFERENTES ABORDAGENS

A importância de se considerar a formulação estendida de linhas de transmissão para a simulação de fenômenos transitórios pode ser compreendida ao se analisar a penetração de campos eletromagnéticos no solo em altas frequências. Essa análise é relevante pelo fato de as VFTOs em GIS possuírem componentes de frequências que podem atingir dezenas de MHz.

À medida em que a frequência das ondas eletromagnéticas que se propagam em uma linha de transmissão aumenta, espera-se que a penetração dos campos elétrico e magnético no solo sofra uma redução gradual por ação do efeito pelicular. Como efeito, observa-se uma redução na área efetiva utilizada para o retorno de correntes no solo, com o que se espera um aumento gradual da resistência por unidade de comprimento da linha e, consequentemente, da atenuação dos sinais que nela se propagam. Esse efeito é reproduzido quando se considera o cálculo da impedância de retorno do solo com a formulação de Carson. Contudo, no limite em que a frequência tende a infinito, a área de condução das correntes de retorno no solo tende a zero. Nesse caso, pode-se imaginar que a resistência por unidade de comprimento da linha também devesse tender a infinito, o que é predito pela fórmula de Carson. No entanto, há uma inconsistência física nesta análise: a não penetração de campos elétrico e magnético no solo no limite em que a frequência tende a infinito é um caso análogo à consideração de solo condutor perfeito. Nessa situação, Z_g é nulo e o solo não contribui para a atenuação dos sinais que se propagam em uma linha. Esse argumento é, inclusive, base para a utilização do modelo de linha sem perdas para a simulação de barramentos de GIS, visto que as VFTOs apresentam frequências muito elevadas.

Identificam-se, portanto, as seguintes contradições: na teoria clássica de linhas de transmissão, a formulação de Carson consegue descrever o crescimento da função de atenuação até certa faixa de frequências, falhando ao estimar atenuação infinita à medida que a frequência tende a infinito. Por outro lado, a hipótese de linhas sem perdas descreve adequadamente o fato de que, no limite em que a frequência tende a infinito, não há penetração de campos eletromagnéticos no solo e a atenuação de sinais associada a esse meio deve ser nula. Contudo, falha ao estender a hipótese de atenuação nula a todo o espectro considerado, o que é incorreto para frequências mais baixas.

A importância da teoria estendida de linhas de transmissão decorre exatamente do fato de fazer um balanço entre os resultados obtidos com o emprego da formulação de Carson e da formulação baseada em linhas sem perdas: ela descreve, de forma rigorosa, a transição suave entre a região de atenuação crescente com a frequência devida ao efeito pelicular e a região de atenuação desprezível associada ao solo na região de altas frequências. Isso é feito com a consideração de expressões adequadas para o cálculo da impedância e da admitância do solo.

Como exemplo, a Figura 1 apresenta a constante de atenuação, calculada como a parte real de $(ZY)^{1/2}$ [14], associada ao modo terrestre de um barramento de GIS de três condutores por invólucro (ver Figura 2) a 1,55 m de altura, supondo-se um solo com resistividade de 100 Ωm . Nota-se que a atenuação calculada considerando-se a teoria clássica de linhas de transmissão cresce indefinidamente, o que é fisicamente inconsistente, enquanto o emprego da teoria estendida de linhas de transmissão leva a um crescimento da atenuação somente até determinada frequência, a partir da qual a atenuação tende naturalmente a zero, conforme esperado. Embora não ilustrado na figura, a atenuação associada à hipótese de barramento sem perdas é identicamente nula em todo o espectro.

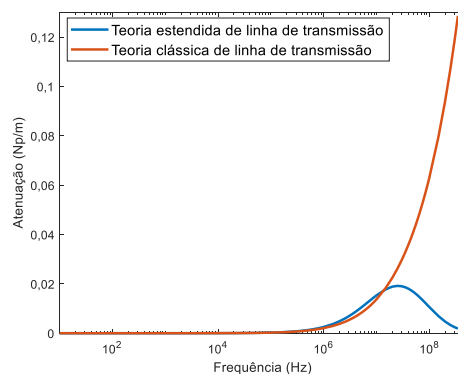


Figura 1: Atenuação do modo terra do barramento GIS.

4.0 GIS AVALIADA

Nas análises realizadas neste trabalho, considerou-se um módulo GIS compacto não abrigado conforme Figura 2. Supôs-se uma altura de 1,55 m para todos os barramentos da GIS, considerando-se a configuração da Figura 2(b). Consideraram-se duas situações: módulo GIS conectado diretamente a uma fonte de tensão senoidal, representando um barramento infinito, conforme ilustrado na Figura 3(a), e o módulo GIS alimentado por linha de transmissão aérea de 138 kV via ramal subterrâneo de 100 m, como mostrado na Figura 3(b). A primeira situação é importante para evidenciar a influência dos modelos de GIS na resposta transitória calculada. A segunda demonstra se a aplicação de um modelo mais rigoroso da GIS é capaz de levar, quando integrado ao resto do sistema, a alterações substanciais nas análises de VFTOs. Em ambos os casos, considerou-se a GIS a vazio com dados apresentados na Tabela 1. As simulações foram realizadas no ATPDraw. As linhas de transmissão aéreas foram modeladas utilizando

o modelo JMarti, com impedância de solo calculada com a equação de Carson, enquanto os cabos foram modelados utilizando o modelo de Bergeron. Os dados dessas linhas se encontram nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 1: Dados dos barramentos da GIS.

| Descrição | Barramento com três condutores por tubo | Barramento com um condutor por tubo |
|---|---|-------------------------------------|
| Raio interno condutor (mm) | 0 | 0 |
| Raio externo condutor (mm) | 32,5 | 32,5 |
| Raio interno do tubo (mm) | 300 | 127 |
| Raio externo do tubo (mm) | 332,5 | 143 |
| Distância dos condutores ao centro do tubo (mm) | 140 | 0 |
| Resistividade do condutor ($\mu\Omega/\text{km}$) | 16,8 | 16,8 |
| Resistividade do tubo ($\mu\Omega/\text{km}$) | 28,2 | 28,2 |

Tabela 2: Dados da linha de transmissão aérea típica de 138 kV.

| | Raio interno (cm) | Raio externo (cm) | Resistividade (Ω/km) | Posição horizontal (m) | Altura média (m) |
|------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------|
| Fase A | 0,3366 | 0,9144 | 0,173 | -3 | 11,33 |
| Fase B | 0,3366 | 0,9144 | 0,173 | 3 | 13,19 |
| Fase C | 0,3366 | 0,9144 | 0,173 | -3 | 15,05 |
| Para-raios | 0 | 0,397 | 4,306 | 20,37 | 20,37 |

Tabela 3: Dados dos cabos da linha de transmissão subterrânea típica de 138 kV.

| Descrição | Condutor Interno | Blindagem |
|-------------------------------------|------------------|-----------|
| Raio interno (cm) | 0 | 3,335 |
| Raio externo (cm) | 1,025 | 3,795 |
| Resistividade | 0,0172 | 0,0172 |
| Espessura da isolação (cm) | 2,31 | 0,37 |
| Permissividade relativa da isolação | 3,5 | 3,5 |

Tabela 4: Posição dos cabos da linha de transmissão subterrânea típica de 138 kV.

| | Posição horizontal (m) | Posição vertical (m) |
|--------|------------------------|----------------------|
| Cabo 1 | -0,9 | 0,33 |
| Cabo 2 | 0 | 0,33 |
| Cabo 3 | 0,9 | 0,33 |

Nos casos simulados utilizando os modelos estendido e clássico, os terminais do invólucro da GIS foram conectados para a terra por meio de uma linha de transmissão vertical sem perdas com impedância de surto determinada conforme indicado em [18] considerando um comprimento de 0,72 m de altura e 0,102 m de diâmetro. Além disso, as capacitâncias dos equipamentos foram representadas das fases para o invólucro e seus valores estão apresentados na Tabela 5. Para o modelo sem perdas [1], as capacitâncias estão conectadas para terra, uma vez que o invólucro é considerado perfeitamente aterrado [19].

Tabela 5: Capacitâncias típicas dos equipamentos da GIS.

| Equipamento | Capacitância (pF) |
|----------------------|-------------------|
| Buchas de isolamento | 25 |
| Disjuntor | 60 |
| Chave seccionadora | 50 |

Nas análises, foi realizada a energização da GIS com o fechamento do disjuntor (ver Figura 3) de uma das fases no instante de máximo de tensão considerando diferentes valores de resistividade do solo: 100 Ωm , 1000 Ωm e 5000 Ωm . O ponto de análise de tensão é o terminal do módulo GIS (ver Figura 3), que normalmente é conectado a um transformador de potência.



Figura 2: (a) Módulo GIS compacto típico considerado nas análises; (b) Barramentos interiores à uma GIS de três fases por invólucro.

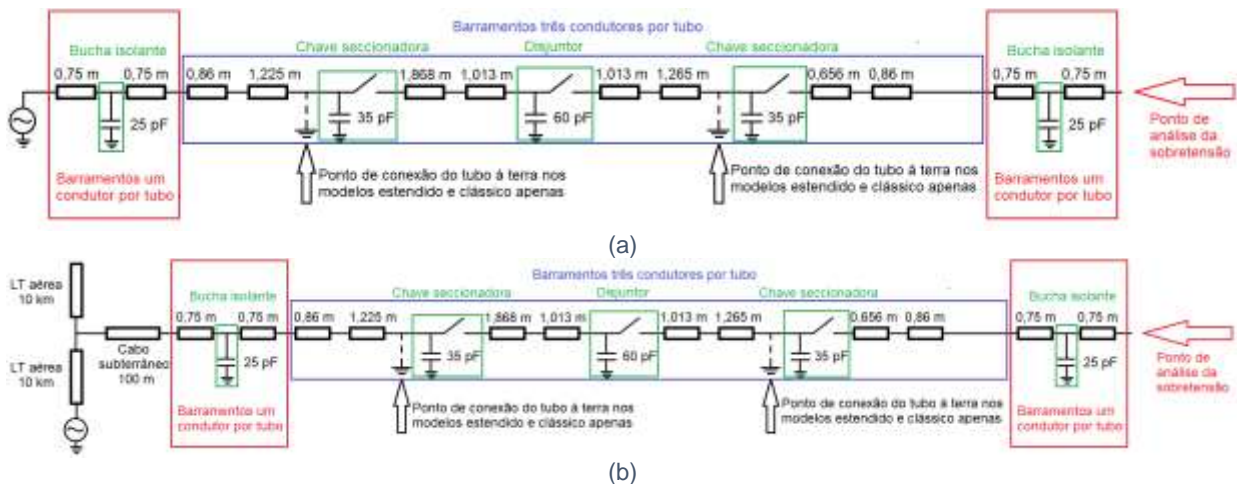


Figura 3: Circuitos utilizados para simular no ATPDraw uma (a) GIS isolada (b) GIS inserida em um sistema de 138 kV.

5.0 RESULTADOS

5.1 GIS LIGADA A BARRAMENTO INFINITO

Nesta seção são apresentados resultados obtidos com a GIS conectada a um barramento infinito, situação ilustrada na Figura 3(a). As sobretensões calculadas da fase A para a terra na extremidade a vazia da GIS, ponto onde seria conectado o transformador, são mostradas na Figura 4. Para ressaltar o impacto das diferentes modelagens realizadas, foram consideradas quatro diferentes resistividades do solo, 100 Ωm , 1000 Ωm e 5000 Ωm . As componentes de frequência associadas às sobretensões calculadas, obtidas com a transformada de Fourier, são ilustradas na Figura 5.

A partir dos resultados ilustrados na Figura 4, é possível fazer três observações. A primeira é que a sobretensão calculada com o modelo de linha sem perdas apresenta uma amplitude inicial consistente com aquela obtida com os demais modelos. Contudo, essa amplitude se mantém elevada durante todo o tempo de simulação, o que é inconsistente. Nos modelos baseados nas teorias de linha de transmissão clássica e estendida, que consideram as perdas nos condutores e no solo, observa-se o amortecimento gradual da sobretensão, que tende ao regime permanente em torno de 3,5 μs após o seu início. Esse fenômeno se reflete nos espectros de frequência das sobretensões apresentadas na Figura 5, uma vez que as componentes de frequência da sobretensão calculada com o modelo de linha sem perdas apresentam amplitudes muito maiores que nos demais modelos.

O segundo ponto é que as componentes de frequência do modelo de linha sem perdas apresentam consideráveis diferenças em relação aos modelos estendido e clássico. Isso se deve à consideração das perdas nos condutores e no solo nesses dois últimos modelos e às diferenças em relação ao aterramento do tubo, que se considera perfeitamente aterrado no caso de linhas sem perdas (tensão nula), e que se supõe estar conectado à terra por meio de um condutor vertical no caso de emprego das teorias clássica e estendida de linhas. O fato de se aterrar o tubo metálico por meio de um condutor vertical faz com que cada ponto de aterramento da GIS seja um ponto adicional de descontinuidade de impedância. Isso faz com que as reflexões nos modelos estendido e clássico ocorram em pontos distintos do modelo de linha sem perdas, possibilitando o surgimento de componentes de frequência mais altas nos modelos estendido e clássico frente ao modelo sem perdas. Além disso, a consideração das perdas torna a velocidade de propagação das ondas menor do que a velocidade da luz. Dessa forma, se por um lado é possível

encontrar componentes com maiores frequências nos modelos estendido e clássico em relação ao modelo sem perdas, algumas componentes, como a fundamental, apresentam frequências menores que o modelo sem perdas.

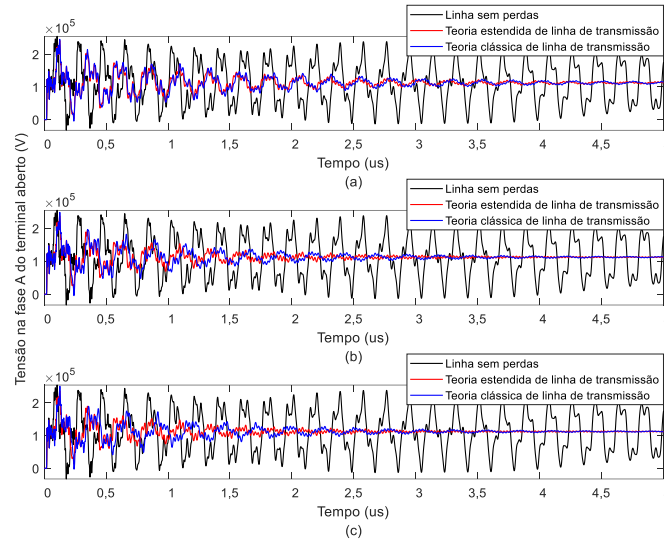


Figura 4: Sobretensão de manobra no circuito da Figura 3(a) considerando resistividade do solo de: (a) 100 Ωm , (b) 1000 Ωm e (c) 5000 Ωm .

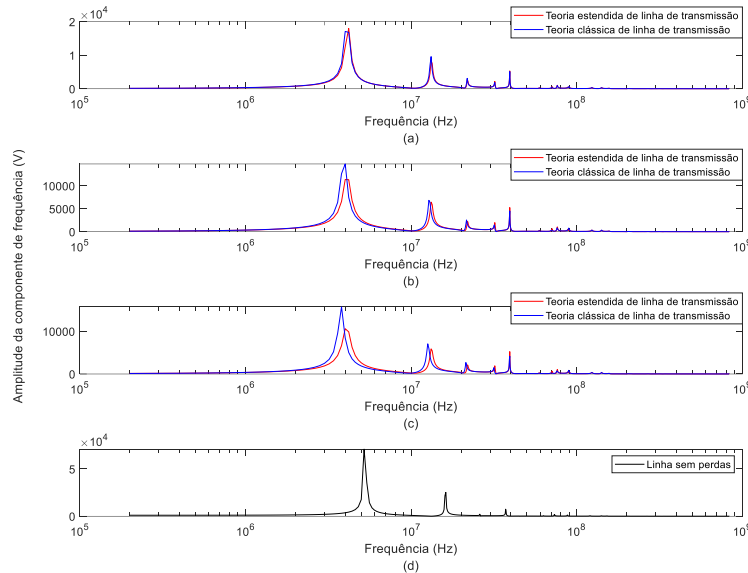


Figura 5: Espectro de frequência das sobretensões manobra ilustradas na Figura 4 considerando resistividades do solo de (a) 100 Ωm , (b) 1000 Ωm , (c) 5000 Ωm e (d) linha de transmissão sem perdas.

A terceira observação é perceber como o espectro de frequência calculado varia entre modelos de linha de transmissão clássica e estendida com o aumento da resistividade do solo. À medida que as perdas aumentam com o aumento da resistividade do solo, nota-se uma redução da amplitude da componente fundamental, de aproximadamente 4 MHz, do modelo estendido em relação ao modelo clássico. Por outro lado, nota-se que as amplitudes das componentes de frequência acima de 10 MHz tendem a se manter as mesmas no modelo estendido, mesmo com o aumento da resistividade do solo. Esse efeito pode ser explicado a partir da Figura 2, em que se observa, até 1 MHz, uma atenuação semelhante no modo terra de ambos os modelos. Entre 1 MHz a 10 MHz, a atenuação do modelo estendido se torna maior que o modelo clássico, o que pode ser observado pelas menores amplitudes das componentes de frequência do primeiro em relação ao segundo na Figuras 5(a), 5(b) e 5(c). A partir de 10 MHz, nota-se que a atenuação no modelo clássico cresce indefinidamente (ver Item 3.0) e se torna maior que a do modelo estendido, que decai a partir de 20 MHz. Esse comportamento se reflete nas componentes de frequência apresentadas nas Figuras 5(a), 5(b) e 5(c), pois as amplitudes a partir de 20 MHz tendem a ser menores no modelo estendido em relação ao modelo clássico.

Com essas observações, é possível concluir que o modelo de linha de transmissão estendido consegue representar, de maneira rigorosa, as componentes de frequência mais baixas da sobretensão, que estão associadas ao modelo clássico e com menor velocidade de propagação, e as componentes de frequência mais elevadas, que estão

associadas ao modelo sem perdas que consegue melhor representatividade nas frequências mais elevadas. De qualquer maneira, no caso avaliado, a teoria clássica de linhas de transmissão leva a resultados semelhantes àqueles obtidos com a teoria estendida.

5.2 GIS INSERIDA EM UM SISTEMA DE 138 KV TÍPICO

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a simulação do caso ilustrado na Figura 3(b). As sobretensões calculadas na fase A do terminal a vazio da GIS são ilustradas na Figura 6, enquanto os espectros de frequência correspondentes são ilustrados na Figura 7.

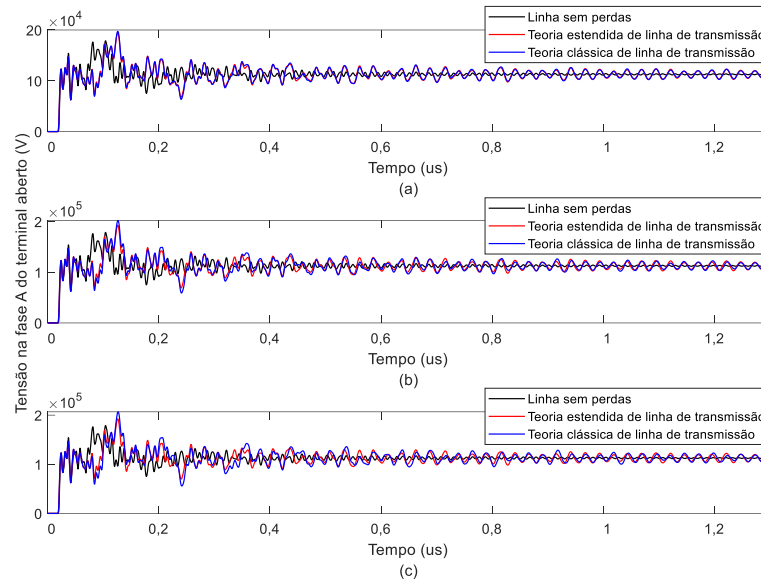


Figura 6: Sobretensão de manobra no circuito da Figura 3(b) considerando resistividade do solo de: (a) 100 Ωm , (b) 1000 Ωm e (c) 5000 Ωm .

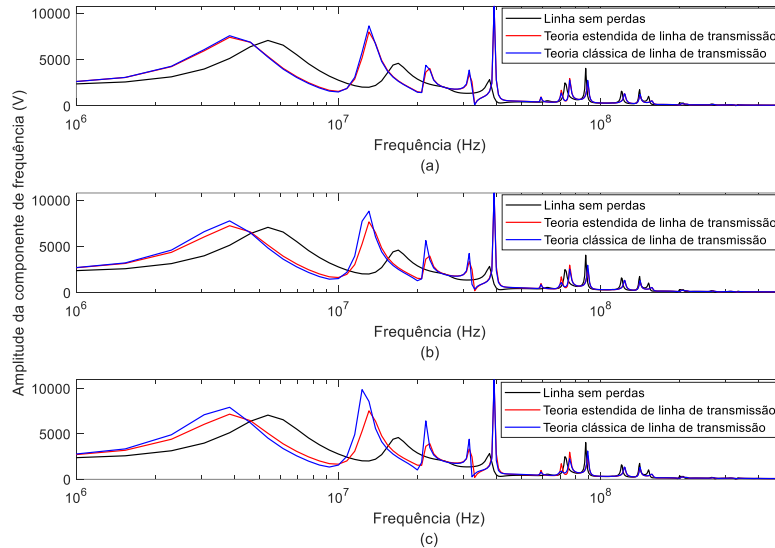


Figura 7: Espectro de frequência das sobretensões manobra ilustradas na Figura 6 considerando resistividades do solo de (a) 100 Ωm , (b) 1000 Ωm , (c) 5000 Ωm .

A partir dos resultados, nota-se pela Figura 7 que as sobretensões calculadas com os diferentes modelos apresentam diferenças consideráveis e podem-se realizar três observações. A primeira é que as sobretensões transitórias apresentadas na Figura 6 tendem ao regime permanente para as três modelagens discutidas. Isso se deve às perdas que ocorrem nos demais elementos do sistema ao qual a GIS faz parte. A segunda é que o modelo sem perdas apresenta espectro de frequência diferente dos demais modelos, como já discutido no Item 5.1. Isso ocorre devido à alteração da velocidade de propagação da sobretensão internamente à GIS por causa das perdas nos condutores e no solo e de pontos de aterramento diferentes nos modelos clássico e estendido. A terceira é que, no caso em análise, os resultados do modelo clássico apresentam amplitudes semelhantes às do modelo estendido para os três valores de resistividade do solo.

O sistema em que o módulo GIS está inserido interfere nas sobretensões transitórias observadas a partir da manobra de fechamento do disjuntor. Em sistemas em que a GIS se encontra próxima de uma fonte de baixa impedância, como demonstrado no Item 5.1, a tendência é de que se observem sobretensões que se mantenham por maior espaço de tempo no modelo sem perdas. Assim, o modelo estendido proposto se mostra a melhor alternativa para a correta representação das VFTOs, uma vez que consegue descrever a transição entre a região de atenuação crescente com a frequência devida ao efeito pelicular e a região de atenuação desprezível associada ao solo na região de altas frequências.

6.0 CONCLUSÃO

As VFTOs em GIS são sobretensões transitórias de elevadas componentes de frequência e por isso são necessários modelos para representá-las adequadamente. A comparação entre três diferentes modelos de barramentos de GIS utilizando a teoria de linhas de transmissão evidencia diferenças que podem ser significativas em determinadas situações. Concluiu-se que o modelo baseado na teoria estendida de linhas de transmissão descreve, de forma rigorosa, a transição suave entre a região de atenuação crescente com a frequência devida ao efeito pelicular e a região de atenuação desprezível associada ao solo na faixa de altas frequências. Ao utilizar o modelo estendido na simulação de um transitório de manobra envolvendo um módulo GIS, foi possível destacar as limitações dos modelos baseados na teoria clássica de linha de transmissão e na consideração de barramentos sem perdas. Dessa forma, o modelo de linha de transmissão estendido proposto, que conta com o cálculo da impedância do solo de Nakagawa e da admitância de retorno do solo de Wise, se mostra como uma alternativa mais rigorosa para se realizar as análises de VFTOs em GIS de diversos valores de resistividade do solo, podendo ser facilmente implementado em plataformas de simulação de transitórios eletromagnéticos como ATP. Nas situações típicas de utilização de módulos GIS em sistemas de 138 kV a cabos subterrâneos, identifica-se que o modelo baseado na teoria clássica de linhas leva a resultados semelhantes àqueles obtidos com o modelo estendido. Por sua vez, o modelo baseado na representação sem perdas apresenta diferenças consideráveis em relação ao modelo baseado na teoria estendida de linhas de transmissão.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D'AJUZ, A. et al. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense Editora Universitária, 1987.
- [2] MALEWSKI, Ryszard, DOUVILLE. Jean, LAVALLÉE. Louis "Measurement of switching transients in 735-kV substations and assessment of their severity for transformer insulation", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no 4, Outubro/1988
- [3] RIECHERT, C., NEUMANN, H., HAMA, H., OKABE, S., SCHICHLER, U., ITO, H., ZAIMA, E., "Very Fast Transient Overvoltages (VFTO) in Gas-Insulated UHV Substations", CIGRÉ, Dezembro 2012.
- [4] CARSON. John R., "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", Bell Sys. Tech. Jour., vol 5, pp. 539-554, Outubro 1926.
- [5] PRINKLER, László., HØIDALEN, Hans K., **Users' Manual: ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista**, Novembro, 2009, 270 páginas.
- [6] AMETANI. Akiriro, MIYAMOTO. Yoshiko, BABA. Yoshihiro, NAGAOKA. Naoto, "Wave propagation on an Overhead Multiconductor in a High-Frequency Region", IEEE Transactions Electromagnetic Compability, VOL. 56, N° 6. December/2014
- [7] AMETANI. Akiriro, MAHSEREDJIN. Jean, RACHID. Farhad, XUE. Haoyan, BABA. Yoshihiro, "Transient Responses of Overhead Cables Due to Mode Transition in High Frequencies", IEEE Transactions Electromagnetic Compability, VOL. 60, N° 3. Junho/2018
- [8] NAKAGAWA, M., "Admittance correction effects of a single overhead line", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 3, 1154-1161, Mar. 1981.
- [9] WISE, W. H., "Potential coefficients for ground return circuits", Bell Syst. Tech. J, vol. 27, página 365-371, 1948.
- [10] ALÍPIO, RAFAEL., VISACRO, SILVÉRIO., "Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil", IEEE Transactions On Electromagnetic Compability, Vol. 56, No. 5, Outubro 2014
- [11] MARTI. J.R., "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N°1, Janeiro 1982.

- [12] DE CONTI, Alberto, EMÍDIO. Maique Paulo S., "Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters", Electric Power Systems Research, n° 138, 120 – 130, Março 2016
- [13] MARTINEZ. Juan A. Velasco., **Transient analysis of power systems: Solution techniques, tools and applications**, Nova Jersey, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [14] HEDMAN, D. E., "Propagation on overhead transmission lines I – theory of modal analysis", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 84, no. 3, 200-205, Mar. 1965.
- [15] GUSTAVSEN, Björn., SEMLYEN, Adam., "Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, N°. 3, páginas 1052 - 1061, Julho 1999.
- [16] GUSTAVSEN, Björn., "Improving the pole relocating properties of vector fitting", IEEE Trans. Power Delivery, vol 21, N° 3, páginas 1587-1592, Julho 2006
- [17] DESCHRIJVER, Dirk., MROZOWSKI, Michal., DHAENE, Tom., DE ZUTTER, Daniel., "Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 18, no 6, páginas 383-385, Junho 2008
- [18] DE CONTI, Alberto., SOARES JR. Amilton, O.SCHROEDER. Marco Aurélio., "Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors", IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, vol. 48, No. 3, Agosto 2006
- [19] POVH, D.; SCHMITT, H., VÖLCKER, O., WITZMANN, R., "Modelling Guidelines for Very Fast Transients in Gas Insulated Substations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N°4, Outubro de 1996

DADOS BIOGRÁFICOS



Edgar José Oliveira Ribeiro graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2018. Atualmente, é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais com pesquisa em modelos de linhas de transmissão de ampla faixa de frequências aplicados à modelagem de subestações isoladas a gás para análise transitória. É engenheiro da NSA Consultoria desde 2018, onde atua nas áreas de interferências eletromagnéticas de LTs, dimensionamento de sistemas de aterramento de LTs e SEs e cálculo de campos elétrico e magnético, dentre outros.



Sandro de Castro Assis - engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado pela UFMG (2006 - 2017). Possui extensão universitária em gerenciamento em projeto de P&D pela PUC-MG (2009) e especialização em Gestão de Negócios pela Fundação Dom Cabral (FDC - 2021). Engenheiro sênior de projetos de sistemas elétricos de linhas e subestações da CEMIG Distribuição e professor do IEC PucMinas no curso de Transmissão e Distribuição. Experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão de Energia Elétrica, Estudos Elétricos em SEP. Membro CIGRE CE-C4 - Desempenho de Sistemas Elétricos, CE-B3 – Subestações, CE-B2 – Linhas de Transmissão. Possui mais de 40 artigos (<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4731672E0>).



Rafael Alipio é doutor em Engenharia Elétrica (2013) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). É Professor do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). É cofundador e líder do Laboratório de Transitórios Eletromagnéticos (LabTEM) do CEFET-MG. Atua na área de Sistemas de Energia Elétrica, principalmente nos seguintes temas: eletromagnetismo aplicado, aterramentos elétricos (modelagem e medição), transitórios eletromagnéticos e interação de descargas atmosféricas com o sistema elétrico. Serviu como secretário do grupo de estudos do CIGRE WG C4.33. Tem atuado em grupos de estudo da ABNT no tema "aterramentos elétricos".



Alberto De Conti possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Em 2006, atuou como pesquisador visitante na Universidade de Uppsala, Suécia. Desde 2009 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, ocupando atualmente a posição de Professor Associado e orientando trabalhos de mestrado e doutorado. Tem experiência na área de Sistemas de Energia Elétrica, atuando nos temas: transitórios eletromagnéticos, modelagem eletromagnética, descargas atmosféricas e compatibilidade eletromagnética. É autor ou coautor de mais de 150 artigos publicados em periódicos científicos e apresentados em congressos científicos, e de três capítulos de livro.