



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

REPRESENTAÇÃO EFICIENTE DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA ESTUDOS DE PROPAGAÇÃO DE SURTOS DE ORIGEM ATMOSFÉRICA

JOÃO CLAVIO SALARI FILHO(1)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1)

RESUMO

Aborda-se e exemplifica-se neste informe técnico uma eficiente e prática modelagem de torres autoportantes e estaiadas de linhas de transmissão para estudos de propagação de surtos atmosféricos. Faz-se comparações com os resultados obtidos utilizando-se tradicionais equações da impedância de onda de torres implementadas em conhecidos programas computacionais do Setor, e comentam-se imprecisões de algumas destas equações para certos tipos de torres empregados em empreendimentos de transmissão típicos.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento, Descarga Atmosférica, Síntese de Circuitos, Torres de Transmissão, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

Quando uma descarga atmosférica atinge uma linha aérea de transmissão (LT) ou um ponto na superfície do solo na região próxima da linha, inicia-se um complexo fenômeno eletromagnético transitório, o qual depende da geometria e dos parâmetros da linha, e dos parâmetros da descarga, sendo que muitos destes elementos possuem grande dispersão estatística e requerem um tratamento baseado nesta distribuição estatística.

Em ambos os casos, devido ao acoplamento eletromagnético entre os componentes da LT e entre estes e o canal da descarga atmosférica, o fenômeno eletromagnético irá se propagar nos cabos para-raios e nos cabos de fase (ou de polo), por toda as partes da estrutura das torres (trancos, mísulas, pernas etc), e pelos seus sistemas de aterramento. Em função de tal propagação, ocorrerão sobretensões, p.ex. próximo de uma torre entre a estrutura e um cabo de fase, e entre um cabo para-raios e um cabo de fase. Se alguma dessas sobretensões exceder a tensão suportável do isolamento em questão, um curto-circuito ocorre (1–3).

Considerando-se a distribuição estatística de cada parâmetro pertinente que caracteriza a descarga atmosférica, o desempenho da LT pode ser calculado, i.e., o consequente número médio de curtos-circuitos (N_{cc}) na linha por 100 km de comprimento e por ano, sendo em geral desejável que este número médio não ultrapasse 1 (um). Necessitam-se, portanto, 2 etapas para o cálculo deste desempenho da LT:

- 1) Simular cada incidência de descarga atmosférica pelo trecho representativo da LT. Esta etapa é de implementação relativamente moderada, exige pouco esforço computacional, e pode ser realizada bi ou tridimensionalmente, embora para muitas análises de LT as modelagens bidimensionais sejam suficientes, sobretudo em função da imprecisão e variação espacial e temporal de dados inerentes ao processo de cálculo.
- 2) Para cada incidência de descarga, por algum programa específico para cálculo de transitórios eletromagnéticos, calcular o subsequente regime transitório e verificar se ocorrerá ou não um curto-circuito na LT. Aqui há uma variedade de soluções, e, dependendo do domínio de cálculo utilizado (frequência, tempo, híbrido tempo-frequência), cada cálculo de regime transitório pode levar desde alguns segundos até horas.

Como se sabe, há programas computacionais dedicados a este tipo de cálculo, e que já têm em sua codificação as etapas 1) e 2), como, p.ex., o programa DATMOS (3), (4), e o programa Flash/IEEE (5). Numa outra vertente de programas, implementa-se apenas a etapa 1), e a etapa 2) é conduzida executando-se um programa externo (p.ex. algum programa da série EMTF).

Pela etapa 1), pode-se notar que o valor de N_{cc} será uma combinação dos resultados de uma quantidade grande de simulações, por forma a abranger ao menos os parâmetros mais importantes da corrente da descarga atmosférica (amplitude, tempo de frente, tempo de meia onda, etc) e dos pontos de incidência, necessitando-se facilmente a

gama de centenas e até milhares de casos, sobretudo nos casos em que se tem elementos não lineares na LT. Considerando-se os parâmetros típicos da corrente da descarga atmosférica e da LT, em geral para o cálculo de N_{cc} importa sobretudo os parâmetros que definem a frente da onda (amplitude e tempo de frente) e, p.ex. em casos em que se estuda a capacidade de absorção de energia de para-raios de linha, o restante do sinal.

Logo, na etapa 2), deve-se buscar fazer a simulação de cada regime transitório no menor tempo computacional possível, e sem perder a precisão necessária ao cálculo; caso contrário, o processo total pode levar várias horas e até ser proibitivo nos computadores usuais.

O cálculo de cada regime transitório, quando realizado no domínio do tempo, tem a grande vantagem de em geral ser rápido e ser prático incluir não linearidades (para-raios de linha, efeito corona em cabos, ionização do solo, etc), mas há certas dificuldades para a inclusão de acoplamentos eletromagnéticos entre elementos e, naturalmente, a inclusão de alguma variação com a frequência, como efeitos peliculares no solo e nos cabos. Percebe-se que esta é a tendência da maioria dos desenvolvedores, e utilizam-se substancialmente os conhecidos programas da série EMTP. Mas, haverá a dificuldade para a modelagem tridimensional dos elementos (torres, cabos, sistemas de aterramento), embora neste caso, melhor comentado adiante, costume-se adotar algumas simplificações de modelagem, quais sejam: 1) cabos condutores da LT por quadripolos completos ou por simplificações por linhas de transmissão sem perdas (definidas pela impedância de onda Z_{LT} e velocidade de propagação v_{LT}); 2) torres (completa ou cada parte principal componente) por linhas de transmissão sem perdas (definidas por Z_T e v_T), eventualmente combinadas com elementos RL; 3) sistemas de aterramento por elementos R, RC ou RLC. Uma outra estratégia no domínio do tempo, com mais facilidade para a modelagem tridimensional dos elementos, é usar programas baseados em FDTD (*Finite Difference Time Domain*) ou TLM (*Transmission Line Modelling*).

No caso do programa Flash e de alguns programas comerciais semelhantes, a Etapa 2) utiliza uma solução expedita no domínio do tempo fundamentada nas equações de ondas viajantes, tanto para a propagação pelos cabos quanto pela torre com incidência da descarga. Neste caso, a torre é modelada por uma linha de transmissão sem perdas, definida por uma impedância de onda Z_T e uma velocidade de propagação v_T , havendo no programa Flash quatro equações disponíveis para Z_T . Trechos verticais ao longo do topo da torre até a base da torre são representados por estes mesmos valores de Z_T e v_T , apenas com alteração do comprimento da linha sem perdas (vide Figura 3 – a). Portanto, apesar da praticidade deste tipo de solução, é importante estar-se atento à adequação destas equações para Z_T e de outras desenvolvidas ao longo dos anos pelos pesquisadores, tal como se discute brevemente nos exemplos de aplicação deste informe.

Além disso, apesar de não ser objetivo deste informe tecer maiores críticas ao programa Flash, é importante ressaltar que nas suas versões mais usadas o mesmo incorpora várias simplificações de cálculo, como, p.ex., cálculo aproximado do número de descargas que incidem na linha, simulação de basicamente apenas a torre com incidência direta da descarga e os vãos adjacentes, descarte da eventual interrupção do isolamento por descargas que incidem a meio do vão (um fator de redução de incidências é aplicado), ter limitação para a geometria do feixe de condutores da linha, entre diversas outras simplificações que o seu usuário deve estar atento quando de sua execução para que o número total de curtos-circuitos calculado não apresente muita imprecisão.

Já em algumas implementações computacionais de outros autores, opta-se por não se utilizar estes programas comerciais, e modela-se cada parte principal da torre por um diferente par (Z_T , v_T), eventualmente combinado com um elemento RL paralelo, podendo-se assim realizar mais facilmente o cálculo para quaisquer torres autoportantes e estaiadas, embora se precise de um simulador genérico do regime transitório no domínio do tempo, como os da série EMTP.

Por sua vez, nas soluções tradicionais de cálculo tridimensional baseadas no domínio da frequência, com reconhecida precisão, sobretudo para a inclusão dos efeitos peliculares e facilidade de consideração dos acoplamentos eletromagnéticos entre elementos, a modelagem tridimensional de todas as torres, sistemas de aterramento e cabos da LT é direta e é feita somente por eletrodos cilíndricos. Como essa estratégia tipicamente demanda para a modelagem de alguns vãos da linha ao menos alguns milhares de eletrodos, está-se diante de um complexo e demorado cálculo de matrizes não esparsas, e que deverá ser repetido para cada uma das diversas frequências que representa o sinal atmosférico no domínio do tempo, dificultando ainda mais o processo. Logo, sem cautela com a dimensão destas matrizes, trata-se de um processo que pode consumir muitas horas.

Por outro lado, a modelagem computacional diferenciada desenvolvida no programa FDET (3, 4, 6, 7), com fundamentos no domínio da frequência, combinando elementos do tipo “circuito” e do tipo “campo eletromagnético tridimensional”, tem demonstrado ser muito eficiente, i.e., permitindo-se reduzir drasticamente o tempo total de cálculo com baixo impacto na precisão numérica dos resultados. Este processo pode ser aplicado tanto para modelar toda a seção da LT, com suas várias torres, sistemas de aterramento, cadeias de isoladores, cabos condutores etc; ou apenas algum grupo com acoplamento eletromagnético que precisa ser considerado (p.ex. uma torre da LT e seu sistema de aterramento); ou apenas uma torre da LT; etc.

Uma vantagem de se modelar apenas um elemento como uma torre da LT, é que se pode gerar a resposta em frequência da matriz de admitâncias entre os nós que conectam esta torre ao restante do trecho da LT, e converter esta resposta num circuito sintético RLC (ou síntese) ou linhas de transmissão multiterminais, o que pode ser

facilmente utilizado em diversos programas fundamentados no domínio do tempo (8), (9), sendo que para gerar os parâmetros necessários ao uso p.ex. do programa Flash ou outros semelhantes, necessita-se a admitância equivalente entre o topo e a base da torre. Naturalmente que quanto mais se isola um elemento para a obtenção desta síntese, menos se incorpora o acoplamento eletromagnético deste elemento com os demais elementos do trecho da LT e introduz-se imprecisões no cálculo final das sobretensões. De qualquer forma, estando-se ciente das faixas efetivas de aplicação desta estratégia, combina-se uma grande vantagem de um processo no domínio da frequência com a velocidade computacional e outras facilidades de um processo no domínio do tempo.

Portanto, neste informe técnico, exemplifica-se e discute-se este procedimento para a modelagem de torres de LT, considerando diferentes torres, incluindo as suas versões autoportantes e estaiadas. Faz-se um contraponto com os resultados obtidos com a aplicação de tradicionais equações de impedâncias de onda de torres implementadas em conhecidos programas computacionais, e aponta-se uma forma prática para se introduzir nestes programas um valor da impedância de onda da torre calculado tridimensionalmente com maior precisão por outro programa computacional.

2.0 - A MODELAGEM HÍBRIDA CONSIDERADA

Conforme introduzido no item anterior, para a simulação de trechos de linhas de transmissão para estudos de propagação de surtos atmosféricos, modelagens híbridas, considerando elementos do tipo "circuito" e do tipo "campo elétrico tridimensional", proporcionam ótima precisão numérica sob baixo esforço computacional.

Em outras palavras, para o cálculo das sobretensões induzidas na linha em virtude da incidência de descargas atmosféricas, ao invés de se modelar todos os cabos, torres e sistemas de aterramento da linha por elementos tridimensionais, alguns, ou mesmo todos, podem ser modelados eficientemente por combinações específicas de elementos RLC e de linhas de transmissão ideais. Para exemplificação do impacto computacional de um ou outro procedimento de modelagem, considerando-se a solução de todo o problema por um sistema genérico de equações lineares, a inclusão de apenas uma torre autoportante trifásica com circuito simples e dois cabos para-raios modelada por eletrodos tridimensionais significa a adição de ao menos uma centena de novas equações, enquanto a mesma torre modelada por elementos do tipo "circuito" exige em torno de não mais do que nove novas equações, tornando o cálculo total substancialmente mais rápido.

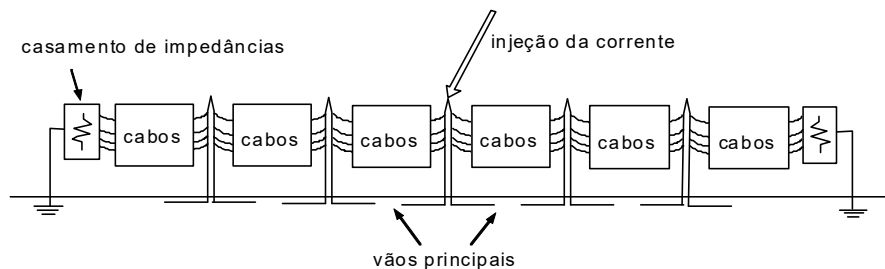


FIGURA 1 – Modelagem adotada para o trecho da linha de transmissão

Portanto, para a proposta do presente informe, considerou-se cada trecho da linha composto por seis vãos e a incidência direta de descargas atmosféricas no cabo para-raios perto da torre intermediária, conforme ilustrado na Figura 1. Tal como também ilustrado nesta figura, empregou-se o casamento expresso das impedâncias em ambos os terminais do trecho da linha, por forma a reduzir efeitos de reflexão e refração nestes pontos. Com relação à modelagem das torres, cabos e sistemas de aterramento, consideraram-se três alternativas, i.e.:

1 - Modelagem de todas as torres, sistemas de aterramento e cabos dos vãos principais por eletrodos cilíndricos tridimensionais, e os cabos dos demais vãos pelo tradicional modelo bidimensional de quadripolo no domínio da frequência:

Neste caso, somente para os vãos principais (perto do ponto de incidência) ambos os efeitos das flechas dos cabos e do acoplamento eletromagnético entre cabos e torres são considerados com precisão. Demonstrou-se em (3), (6) a eficiência deste tipo de modelagem para trechos de linhas de transmissão.

Logo, para os outros vãos, o acoplamento eletromagnético entre cabos e torres não é incluído, mas apenas as conexões diretas entre cabos e torres nos pontos terminais de cada vão. Consideraram-se nestes vãos os cabos com as suas respectivas alturas médias. Apesar de, entre várias simplificações, o tradicional modelo de quadripolo ser fundamentado em cabos com comprimento infinito e paralelos à superfície do solo, poder-se-ia incluir aproximadamente o efeito das flechas dos cabos considerando-se uma cascata de quadripolos calculados para diferentes alturas dos cabos, tal como apresentado em (3), (10).

2 - Modelagem de todas as torres e sistemas de aterramento por eletrodos cilíndricos tridimensionais, e de todos os cabos condutores pelo tradicional modelo bidimensional de quadripolo no domínio da frequência:

Tal como em parte da alternativa 1, neste caso, o acoplamento eletromagnético entre todos os cabos e torres não é incluído, mas apenas as conexões diretas entre cabos e torres nos pontos terminais de cada vão.

3 - Modelagem de todos os sistemas de aterramento por circuitos sintéticos RLC, das torres por adequadas combinações entre linhas de transmissão ideais, e de todos os cabos pelo tradicional modelo bidimensional de quadripolo no domínio da frequência:

Tal como na alternativa 2, neste caso, o acoplamento eletromagnético entre todos os cabos e torres é degradado, porém trata-se de uma solução que pode ser facilmente e totalmente implementada em programas baseados no domínio do tempo.

Em 1, 2 e 3, para cada torre, os parâmetros da respectiva linha de transmissão ideal (impedância de onda, Z_T , velocidade de propagação, v_T , e comprimento, l_T) são obtidos analisando-se a resposta em frequência das suas admitâncias equivalentes entre nós terminais. Essa correlação é computada previamente pelo programa FDETP modelando-se a torre por elementos cilíndricos tridimensionais. Este processo está exemplificado em (9).

Quando utilizados, circuitos sintéticos dos sistemas de aterramento foram obtidos também da simulação com o programa FDETP, estando alguns exemplos em (8), (9).

3.0 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.1 - Torre autoportante tronco piramidal circuito simples em 138 kV

Investigou-se este exemplo de torre autoportante em uma LT com um cabo CAA código *linnet* por fase e um cabo para-raios EAR código 3/8", conforme a Figura 2 - (a). Considerou-se o comprimento do vão de 300 m.

Na Figura 2 - (b) apresentam-se os oito nós de conexão desta torre com o restante do sistema; na Figura 2 - (c), considerando-se um "nó equivalente" T do sistema de aterramento, cinco nós de conexão; e, na Figura 2(d), o circuito equivalente aproximado desta torre considerando os diferentes trechos da torre modelados por LT ideais com o mesmo valor de Z_T e v_T .

A resposta em frequência do módulo da admitância equivalente entre os nós P e T, Y_{PT} , obtida da modelagem 3D pelo programa FDETP, e pela modelagem aproximada pela LT sem perdas, e pela LT sem perdas adicionada de um elemento RL paralelo constam nas Figura 3 - (a) e Figura 4 - (b), respectivamente.

Como se pode observar da Figura 3, considerando em primeira aproximação $v_T = c = 300$ Mm/s, o valor $Z_T = 200 \Omega$ proporcionou ótimo ajuste. Além disso, vale comentar para este exemplo de torre que, se a relação Z_T / v_T (que tem o sentido de "indutância de onda equivalente") é mantida em torno de $(200/300) \mu\text{H/m}$, existem outros pares dos parâmetros Z_T e v_T que também proporcionam resultados satisfatórios para frequências até cerca de 5 MHz, mas surgindo efeitos de defasagem (sobretudo nos picos ressonantes) após este nível de frequência. Esta situação para p.ex. $v_T = 0,85 c = 255$ Mm/s e $Z_T = 200 \cdot 0,85 = 170 \Omega$ também está apresentada na Figura 3 - (a).

Observou-se esta tendência também para outros exemplos de torres, e, por esta experiência, considera-se razoável estabelecer uma faixa típica desta "indutância de onda" para estudos gerais entre 0,5 e 1,5 $\mu\text{H/m}$.

Além disso, buscando-se maior precisão nos resultados, sobretudo em situações em que as mísulas das torres têm dimensões consideráveis, como é o caso p.ex. das torres em circuito duplo do tipo danúbio, ou para torres muito altas, o que é especialmente importante se o tempo de frente dos sinais que se propagam pela torre for muito curto, pode-se aplicar a mesma modelagem por Z_T e RL para cada trecho vertical ou horizontal da torre. Uma alternativa nestes casos é utilizar uma modelagem sintética envolvendo grupos de elementos RLC, conforme introduzido em (9).

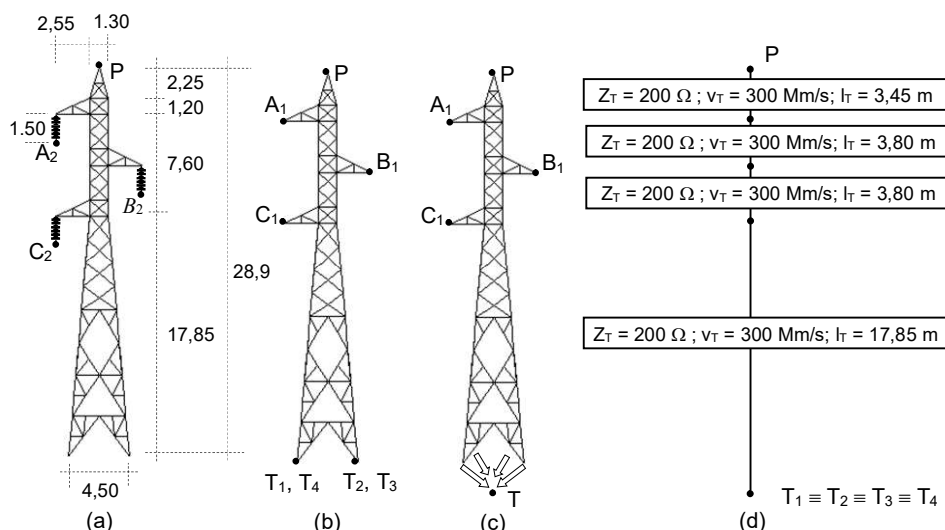


FIGURA 2 – Torre autoportante de 138 kV circuito simples: (a) dimensões básicas; (b) oito nós de conexão da torre; (c) cinco nós de conexão; (d) circuito equivalente aproximado da torre visto dos cinco nós de conexão

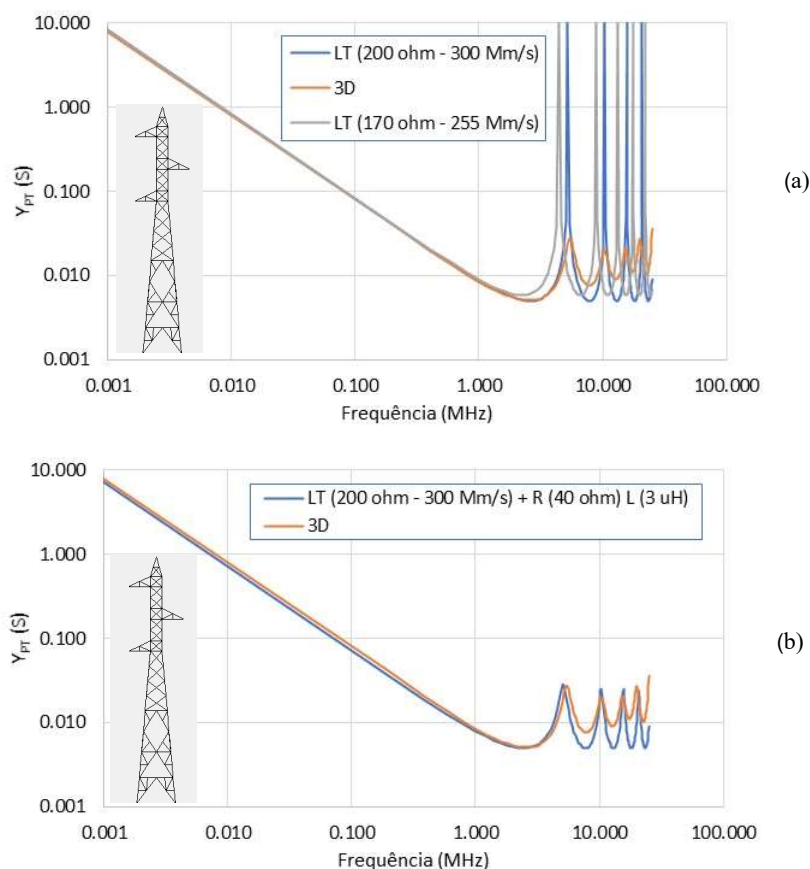


FIGURA 3 – Torre autoportante de 138 kV circuito simples: (a) resposta em frequência do módulo de Y_{PT} para a modelagem 3D (3D), para a LT sem perdas com $Z_T = 200 \, \Omega$ e $v_T = 300 \, \text{Mm/s}$, e para a LT sem perdas com $Z_T = 170 \, \Omega$ e $v_T = 255 \, \text{Mm/s}$; (b) resposta em frequência do módulo de Y_{PT} para a modelagem 3D (3D) e para a LT sem perdas com $Z_T = 200 \, \Omega$ e $v_T = 300 \, \text{Mm/s}$ adicionada de um elemento RL paralelo

Para a análise das tensões induzidas nas cadeias de isoladores, buscou-se representar apenas a situação da incidência de primeiras descargas atmosféricas negativas, e, para cada descarga simulada, adotou-se a forma de onda estilizada apresentada na Figura 4. Para simplicidade de entendimento dos resultados, a amplitude, I_o , foi postulada igual a 1 A, e o tempo de frente, t_r , foi suposto igual a 1, 5 ou 10 μs .

As dimensões básicas dos sistemas de aterramento das torres e os parâmetros elétricos do solo foram considerados dependentes da frequência conforme consta em (2). Citou-se em (3), (6) a importância desta variação com a frequência para estudos de fenômenos rápidos, como os associados à propagação de descargas atmosféricas.

A variação no tempo das tensões induzidas na cadeia de isoladores da fase A para o presente exemplo está apresentada na Figura 5. Pode-se observar claramente o ajuste razoável entre todas as alternativas de modelagem, especialmente durante o tempo de frente, que é a porção do sinal em geral mais importante para o cálculo de N_{cc} . Após este tempo, como esperado, em relação à alternativa 1, que é a mais precisa, alguns picos ocorrem com as alternativas de modelagem mais simples 2 e 3. Também como esperado, ocorre um pequeno efeito de defasagem com as alternativas 2 e 3. Esse efeito é consequência, principalmente, do fato das alternativas 2 e 3 não incorporarem o acoplamento eletromagnético entre torres e cabos, e nem diretamente o acoplamento entre os diversos elementos da torre, os quais são levados em conta com o emprego da alternativa 1. Por outro lado, neste ponto é importante confrontar a precisão numérica obtida e o esforço computacional entre as alternativas de modelagem, por forma a auxiliar a escolha da melhor alternativa ao cálculo em vista. Para este exemplo de LT, o tempo computacional para as alternativas 1, 2 e 3 é da ordem de 1; 0,25; e 0,0062 pu; respectivamente; apontando que a alternativa 3, apesar de ser a menos precisa, demanda um esforço computacional mínimo.

Contudo, é importante citar que, a despeito da comparação anterior, deve-se ter em mente que as alternativas 2 e 3 são inadequadas para estudos que demandem o cálculo do campo eletromagnético 3D, tais como, p.ex., para análises de tensões de passo e de toque junto a torres de linhas de transmissão, de tensões transferidas, de tensões induzidas em estruturas perto da linha, do campo elétrico no meio externo etc. Outro caso especial é quando se pretende modelar adequadamente o canal da descarga atmosférica e a sua interação com a linha de transmissão. Portanto, se algum desses casos é requerido, a alternativa 1, ou apenas uma pequena variação dela, deve ser

empregada.

Como complemento, apresenta-se na Tabela 1 os valores de Z_T obtidos por diversas formulações disponíveis na literatura técnica, em geral mais aplicáveis a torres do tipo autoportante. As equações rotuladas com (*), (**) e (***) referem-se a torres com os formatos cilíndrico, cônico e cinturado, respectivamente. Significam: h – altura da torre; h_1 – altura da base à cintura da torre; h_2 – altura da cintura ao topo da torre; r_0 – raio da base da torre; r_1 – raio da cintura da torre; r_2 – raio do topo da torre; $T = (r_2 h_2 + r_1 h + r_0 h_1)/h^2$. No caso das equações que utilizam um valor de v_T diferente da velocidade 300 Mm/s, deve-se fazer a comparação utilizando-se aproximadamente o valor $Z_T = 200 v_T / 300$.

Pode-se observar da Tabela 1 que apenas algumas destas equações proporcionam valores de Z_T próximos do obtido pela modelagem 3D.

A imprecisão ao se utilizar um valor inadequado de Z_T para o cálculo das tensões induzidas na cadeia de isoladores das fases será maior no caso de impedâncias de onda equivalente do sistema de aterramento das torres (Z_{at}) relativamente baixas, e menos relevante para valores muito elevados de Z_{at} . Como concretização numérica, para uma certa torre típica, se Z_{at} é da ordem de 5 Ω , variar Z_T em -20% e +20% pode significar desvios em -10% e +10% no valor máximo das tensões induzidas nas cadeias de isoladores, respectivamente, enquanto para Z_{at} da ordem 100 Ω estes desvios se reduzem à metade.

Portanto, sendo essencial para um programa computacional em uso o emprego de alguma destas equações da Tabela 1, uma opção para incluir, indiretamente, o valor mais preciso de Z_T obtido da modelagem 3D, é calcular um “raio equivalente” r_{eq} da torre que resulta neste mesmo valor de Z_T . Por exemplo, para qualquer equação desenvolvida para torres com o formato cilíndrico, para h e Z_T conhecidos infere-se facilmente o valor de r_{eq} .

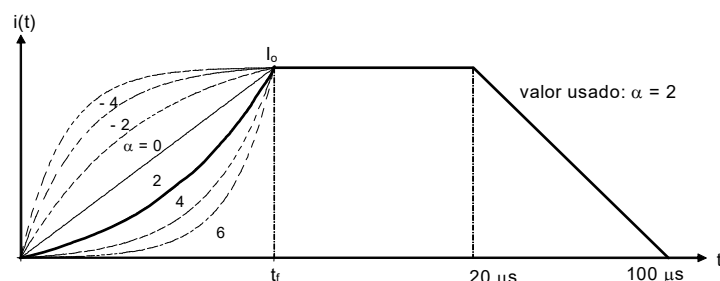


FIGURA 4 – Representação estilizada da forma de onda da corrente da descarga atmosférica

TABELA 1 – Impedâncias de onda (Z_T) da torre conforme várias equações publicadas na literatura técnica

Nº	Modelo	Equação	138 kV Autop.	230 kV Autop.
1	Wagner e Hileman (11) (*)	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_0} \right)$	216	185
2	Jordan (16) (*)	$Z_T \cong 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{h}{r_1} \right) - 1 \right)$	168	202
3	“Cylinder” Versões 1.7 e 1.9 do Flash (5) (*)	$Z_T = 60 \cdot \left(\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_1} \right) - 1 \right)$; $v_T = 0,85 c$	230	264
4	“Cone” Sargent e Darveniza (16) (**) Versões 1.7 e 1.9 do Flash (5)	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{h^2 + r_0^2}}{r_0} \right)$; $v_T = 0,85 c$	174	144
5	Chisholm et al. (14) (**)	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{\tan^{-1} \left(\frac{r_0}{h} \right)}{2} \right) \right)$	195	165
6	Chisholm et al. (14) (*)	$Z_T = 60 \cdot \left(\ln \left(\cot \left(\frac{\tan^{-1} \left(\frac{r_0}{h} \right)}{2} \right) \right) - 1 \right)$	135	105
7	Chisholm et al. (15) (***)	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{\tan^{-1}(T)}{2} \right) \right)$	194	165
8	“Waist” Versões 1.7 e 1.9 do Flash (5) (***)	$Z_T = 60 \sqrt{\frac{\pi}{4}} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cot \left(\frac{\tan^{-1}(T)}{2} \right) \right)$; $v_T = 0,85 c$	154	127
9	Hara e Yamamoto (12) (*)	$Z_T = 60 \cdot \left(\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_1} \right) - 2 \right)$; $v_T = c$	170	204
10	Takahashi (13) (*)	$Z_T = 60 \cdot \left(\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_1} \right) - 1,54 \right)$	198	232

3.2 - Torres estaiada e autoportante monomastro cara de gato circuito simples em 230 kV

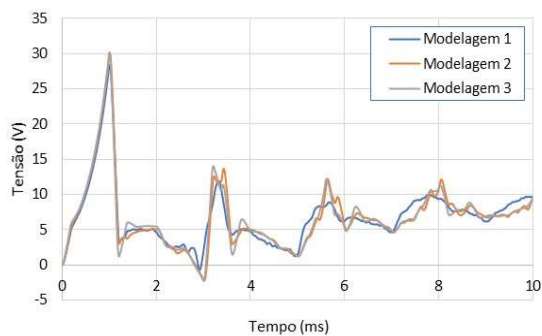
Consideram-se neste exemplo torres “cara de gato” com silhueta típica, comportando fases espaçadas horizontalmente de 4 m, e dois cabos para-raios. Apresentam-se na Figura 6 os resultados obtidos para as versões autoportante e estaiada, sendo que para a torre estaiada, para facilidade de comparação futura com equações existentes, gerou-se os resultados para a torre completa e para apenas com o mastro (sem estais).

Empregando-se o programa FDETP, e assumindo-se como primeira aproximação $v_T = 300$ Mm/s, obteve-se para a versão autoportante $Z_T = 180 \Omega$, e para a versão estaiada $Z_T = 175$ e 280Ω , considerando a torre completa e a torre com apenas o mastro, respectivamente. Destes resultados, fica evidente a forte influência dos estais no valor de Z_T da torre completa.

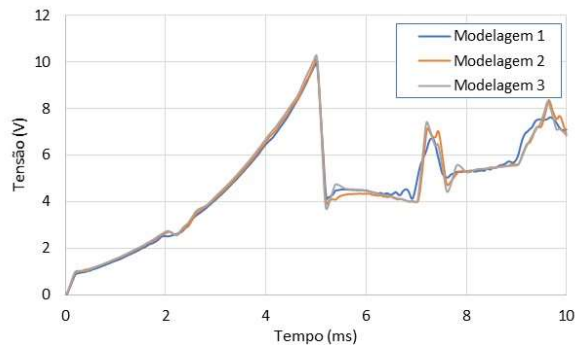
Apresenta-se também na Tabela 1 os valores de Z_T para a torre autoportante em 230 kV conforme diversas equações publicadas na literatura técnica, sendo que, no caso das equações que utilizam um valor de v_T diferente de 300 Mm/s, deve-se fazer a comparação utilizando-se aproximadamente o valor $Z_T = 180 v_T / 300$.

Para a torre estaiada, embora não tenha sido o objetivo deste informe, é possível também empregar-se equações expeditas, mas p.ex. separadamente para a parte superior da torre, e para o equivalente visto da cintura à base da torre, envolvendo os quatro estais e o mastro da torre. Similarmente ao exemplificado no caso anterior, sendo necessário para um programa computacional em uso um valor único de Z_T para toda a torre, pode-se calcular um “raio equivalente” r_{eq} por forma a se obter o mesmo valor de Z_T calculado pela simulação 3D mais refinada.

Entretanto, vale lembrar que dependendo do valor da condutividade elétrica do solo, para sinais muito rápidos como os associados à propagação de correntes de descargas atmosféricas podem observar-se fortes atenuações das correntes pelo sistema de aterramento por alguns metros de comprimento. Portanto, para a torre estaiada deste exemplo (e para a torre estaiada de circuito duplo do próximo exemplo), dado o razoável afastamento dos quatro estais até o mastro central da torre, é mais preciso considerar como equivalente a torre com seu sistema de aterramento, embora neste caso não fiquem explícitos os efeitos da reflexão e refração das ondas de tensão e corrente que chegam na base da torre.



(a)



(b)

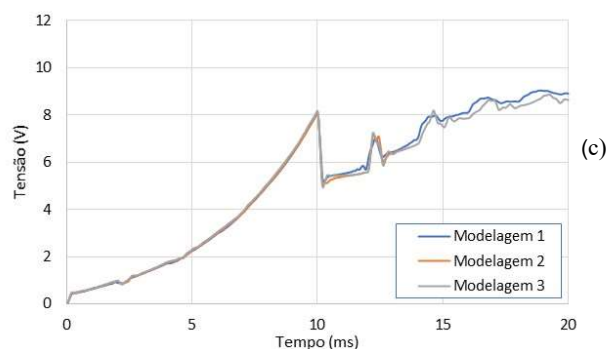


FIGURA 5 – Tensão na cadeia de isoladores da fase A: (a) $t_f = 1 \mu s$; (b) $t_f = 5 \mu s$; (c) $t_f = 10 \mu s$

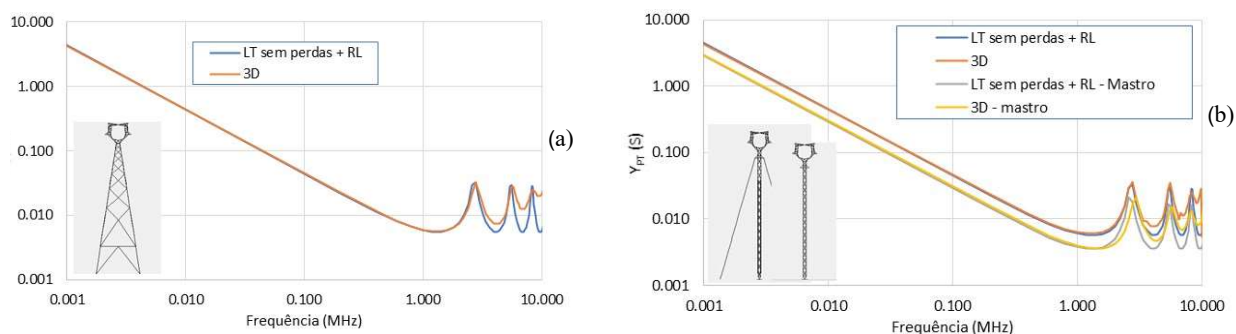


FIGURA 6 – Torre de 230 kV circuito simples: (a) resposta em frequência do módulo de Y_{PT} para a modelagem 3D para a torre autoportante (3D) e para a LT sem perdas adicionada de um elemento RL paralelo; (b) resposta em frequência do módulo de Y_{PT} para a modelagem 3D para a torre estaiada para a torre completa (3D), apenas o mastro (3D - mastro) e para a LT sem perdas adicionada de um elemento RL paralelo

3.3 – Torre estaiada monomastro circuito duplo em 230 kV

Considera-se neste exemplo uma torre estaiada monomastro, para circuito duplo, com silhueta típica, comportando fases espaçadas horizontalmente em torno de 8 m, e dois cabos para-raios. Apresentam-se na Figura 7 os resultados obtidos para a torre completa.

Empregando-se o programa FDETP, obteve-se ótimo ajuste para $v_T = 290 \text{ Mm/s}$ e $Z_T = 160 \Omega$.

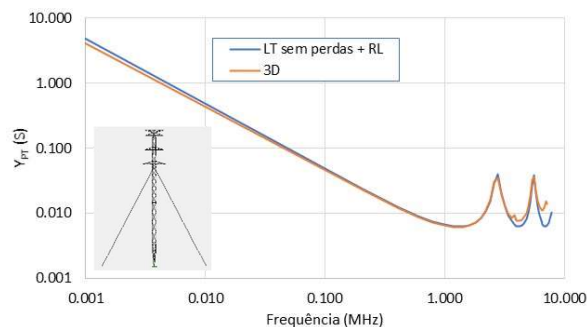


FIGURA 7 – Torre de 230 kV circuito duplo: resposta em frequência do módulo de Y_{PT} para a modelagem 3D e para a LT sem perdas adicionada de um elemento RL paralelo

4.0 - CONCLUSÃO

Exemplificaram-se neste artigo alternativas de modelagem de trechos de linhas de transmissão para estudos da propagação de surtos de origem atmosférica. O objetivo principal foi o de avaliar o efeito da substituição de uma modelagem tridimensional precisa dos cabos condutores, torres e sistemas de aterramento da linha por uma modelagem mais simples, fundamentada em apenas elementos básicos do tipo RLC, linhas de transmissão ideais (Z_T , v_T) etc. Esta estratégia de modelagem é muito empregada em programas computacionais comerciais ou desenvolvidos no Setor. Dos resultados obtidos, associados à tensão induzida nas cadeias de isoladores da linha no evento da incidência direta de uma descarga atmosférica junto a uma das torres da linha, ficou claro que valores

razoavelmente precisos podem ser obtidos por meio da modelagem do trecho da linha por uma aproximação muito simples e que usa apenas elementos clássicos dos cálculos de circuitos elétricos.

Porém, deve-se ter cautela com o emprego de tradicionais equações simplificadas para o cálculo de impedâncias de onda (Z_T) de torres, com as quais se pode obter um valor razoavelmente diferente daquele obtido da análise direta da resposta em frequência das admitâncias que representam a torre vista dos seus terminais. Essa imprecisão torna-se ainda mais importante no caso de impedâncias de onda relativamente baixas dos sistemas de aterramento das torres, situação em que a influência nas sobretensões induzidas nas fases será bem maior.

Esta modelagem simples é realmente de baixo esforço computacional, e pode ser facilmente implementada p.ex. nos programas computacionais da família EMTP, o que é especialmente útil para muitos usuários de programas de transitórios eletromagnéticos comerciais. Recomenda-se tal modelagem, todavia, somente para estudos que não demandem diretamente o cálculo de campos eletromagnéticos, casos em que a total ou parcial modelagem tridimensional da linha faz-se necessária.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SALARI, J. C. "A Methodology for Computing Transmission-Line Short Circuits Caused by Direct and Nearby Ground Lightning Incidence—Part I: Methodological Aspects," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, n. 4, pp. 1578-1585, agosto, 2014.
- (2) SALARI, J. C. "A Methodology for Computing Transmission-Line Short Circuits Caused by Direct and Nearby Ground Lightning Incidence—Part II: Application Examples," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, n. 4, pp. 1586-1590, agosto, 2014.
- (3) SALARI, J. C. "Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão - Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência", Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006 (Disponível para cópia em: <http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120601.pdf>)
- (4) SALARI, J. C., PORTELA, C. "Development of a Frequency Domain Electromagnetic Transients Program", VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), pp. 243-248, São Paulo, Brasil, novembro, 2005.
- (5) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, "IEEE Standard 1243-1997," 1997.
- (6) SALARI, J. C., PORTELA, C. "A Methodology for Electromagnetic Transients Calculation - An Application for the Calculation of Lightning Propagation in Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, pp. 527-536, janeiro, 2007.
- (7) SALARI, J. C., PORTELA, C. "Grounding Systems Modeling Considering Soil Ionization Effects", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 4, pp. 1939-1945, outubro, 2008.
- (8) SALARI, J. C., PORTELA, C. "Combining Grounding Systems Frequency Domain Modeling With EMTP Type Programs", Proceedings of the Ground'2008 International Conference on Grounding and Earthing, pp. 208-212, Florianópolis, Brasil, novembro, 2008.
- (9) SALARI, J. C. "Transmission Lines Circuitual Approach for Lightning Propagation Studies", XV ERIAC, 19 a 23 de maio de 2013, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.
- (10) SALARI, J. C. "Comparative Analysis of Two- and Three-Dimensional Methods for Computing Electric and Magnetic Fields Generated by Overhead Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 1, pp. 338-344, janeiro, 2009.
- (11) WAGNER, C. F., HILEMAN, A. R., "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines III-A Simplified Method: Stroke to Tower", Trans. of the American Inst. Elect. Eng. Part III: Power App. Syst., vol. 79, no. 16, pp. 589-603, 1960.
- (12) HARA, T., YAMAMOTO, O., "Modeling of a Transmission Tower for Lightning-surge Analysis", IEE Proceedings - Gen. Trans. Dist., vol. 143, no. 3, p. 283, 1996.
- (13) TAKAHASHI, H., KODAMA, M., "Theoretical Derivation of Surge Impedance about a Vertical Conductor", IEEE Transm. Distrib. Conference and Exhibition, pp. 688-693, 2002.
- (14) CHISHOLM, W. A., CHOW, Y. L., SRIVASTAVA, K. D., "Lightning Surge Response of Transmission Towers", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232-3242, 1983.
- (15) CHISHOLM, W. A., CHOW, Y. L., "Travel Time of Transmission Towers", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 10, pp. 2922-2928, 1985.
- (16) SARGENT, M. A., DARVENIZA, M., "Tower Surge Impedance", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no. 5, pp. 680-687, 1969.

DADOS BIOGRÁFICOS

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1988), e mestrado (1993) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), com experiência na área de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, especialmente em: cálculo bidimensional e tridimensional de campos e transitórios eletromagnéticos; linhas de transmissão em CA/CC convencionais e não convencionais (LPNE, LNC); subestações de energia elétrica; aterramento elétrico em regime de baixa e alta frequência; análise técnico-econômica de transmissão de energia; propagação de descargas atmosféricas; e ampacidade e efeito corona em condutores.