



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GDS

GRUPO DE ESTUDO DESEMPENHO DE SISTEMAS ELETRICOS- GDS

Estimativa da Impedância de Surto de Torres das Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Elementos Finitos

Paulo C. A. Mota*
UFU

Marcelo L. R. Chaves
UFU

José R. Camacho
UFU

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar métodos para cálculo da impedância de surto das torres de linhas de transmissão, quais sejam: método analítico tradicional, que utiliza equações simplificadas; e o método proposto que utiliza o Método de Elementos Finitos (1). Neste último, foram empregados dois softwares: o software FEMM de domínio público; e o software FLUX3D de uso comercial. Também foi verificada a variação da impedância de surto com a altura da torre. Para tanto, foi empregado o software ATP-EMTP, no qual foi modelado um caso simples de utilização de impedância constante e variável.

PALAVRAS-CHAVE

ATP-EMTP, Elementos Finitos, Impedância de Surto, Torre de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema elétrico é constantemente afetado por diversos fenômenos, tais como: correntes de energização de transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, efeitos de chaveamentos de capacitores em linhas de transmissão e ainda descargas atmosféricas. Desta forma, o sistema elétrico é sempre posto a prova quanto a sua continuidade, e capacidade de suportar e minimizar as consequências destes fenômenos.

A impedância de surto das estruturas que compõem as linhas de transmissão é um fator importante no que diz respeito à análise do desempenho das mesmas frente a descargas atmosféricas. Tal análise fica comprometida quando este parâmetro é desconsiderado ou considerado de forma inadequada. Seu valor pode ser determinado através de três métodos: por medições; por cálculos analíticos utilizando-se equações baseadas em modelos geométricos simples das torres; e por métodos de cálculos numéricos baseados na teoria de campo eletromagnético.

A medição, de um modo simples, consiste em injetar um surto de corrente no topo da torre e medir a forma de onda da tensão produzida para a determinação da impedância de surto (2). No entanto, este método traz alguns inconvenientes como a necessidade de se desenergizar a linha para sua realização. Além de ser uma prática muito trabalhosa, este método requer a existência física das torres de transmissão e, preferencialmente, ainda não conectadas às demais torres pelo cabo para-raios. Esta situação é viável somente no período de construção da linha.

Outro método consiste em fazer uma estimativa com base em equações matemáticas aproximadas que consideram a forma geométrica das torres (3)-(6). A grande variedade de estruturas com diversas formas geométricas torna complexa a criação de um método geral para o cálculo desta impedância, fazendo com que cada estrutura tenha um equacionamento específico para este cálculo. Portanto, os equacionamentos da impedância de surto consideram as estruturas com formatos simplificados, como cilíndricos e cônicos, ou uma combinação destes. Isto faz com que, em casos de torres com formatos mais distintos das formas aproximadas, imprecisões relevantes

possam ocorrer. Além disso, sabe-se que a impedância de surto da torre é variável ao longo da sua altura, e este método apresenta um valor fixo desconsiderando tal fato.

Este trabalho baseia-se no método que faz a estimativa do valor da impedância de surto da torre a partir de simulações nos softwares FEMM e o FLUX3D, os quais utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF) para resolução de problemas eletromagnéticos. A partir de um desenho representativo da estrutura é obtida a capacitância da mesma, e através deste parâmetro chega-se à impedância de surto. Deste modo pode-se obter a impedância de surto para qualquer tipo de torre, bastando apenas conhecer as suas características geométricas para sua representação nestes softwares. Ainda, pode ser verificada a variação da impedância de surto da estrutura ao longo de sua altura, o que não é explicitado nos outros métodos.

A impedância de surto das torres de transmissão obtidas pelos métodos indicados acima serão avaliados por estudos computacionais através do software ATP-EMTP que simula os efeitos causados por descargas atmosféricas em linhas de transmissão.

2.0 - METODOLOGIAS

Uma vez que este trabalho propõe uma metodologia para o cálculo da impedância de surto de torres, é importante a aplicação de outros métodos para comparar os resultados obtidos. Assim, primeiramente será apresentada a metodologia que usa equações analíticas para tal cálculo, seguida pela proposta que emprega o Método de Elementos Finitos (FEM) através dos softwares FEMM e FLUX3D.

2.1 Método Analítico

A impedância de surto de torres está intimamente relacionada às formas e dimensões geométricas e dimensões das mesmas. No entanto, a existência de formas complexas torres torna complicado o cálculo de sua impedância de surto. A variedade de estruturas, com diferentes formas e tamanhos faz com que não se tenha uma equação geral, que abranja todos os casos. Desta forma foram desenvolvidas equações obtidas a partir de formas geométricas simples, como cilindros e cones (3)-(6), a fim de representar os vários tipos de torres. Alguns dos modelos existentes (3)-(6) são mostrados na Figura 1.

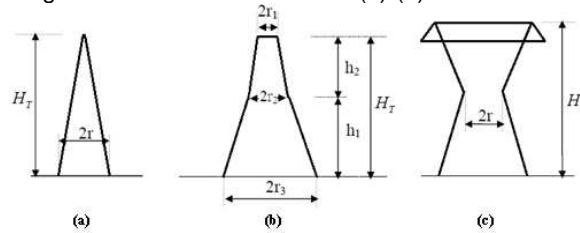


Figura 1 – Formas geométricas simples utilizadas para equacionamento da impedância de surto de torres de transmissão.

Cada uma das formas da Figura 1 possui formulação específica para o cálculo da impedância de surto. A equação 1 é apresentada para a Figura 1 - (a).

$$Z_t = 30. \ln \frac{2. (H_t^2 + r^2)}{r^2} \quad (1)$$

Onde:

Z_t é a impedância de surto;

H_t é a altura da torre;

r é o raio da base da torre.

As equações 2 e 3 foram desenvolvidas a partir da forma geométrica da Figura 1 - (b).

$$Z_t = 60. \ln \left\{ \cot \left[0,5. \tan^{-1} \left(r_{avg} / H_t \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$r_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 H_t + r_3 h_1}{H_t} \quad (3)$$

Onde:

r_1, r_2, r_3 são os raios.

r_{avg} é o raio médio geométrico;

A forma geométrica da Figura 1 – (c) é representada pela equação 4 para cálculo da impedância de surto.

$$Z_t = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2H_t}{r} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Onde:

r é o raio.

Desta forma, com tais equações determina-se o valor aproximado da impedância de surto de torres. Vale lembrar que a grandeza obtida pelos equacionamentos anteriores representa um valor equivalente que não considera a variação da impedância ao longo da altura da torre.

2.2 Software FEMM

O software FEMM utiliza o método de elementos finitos para resolução de problemas magnéticos, eletrostáticos e térmicos (9). Para tanto, ele emprega a técnica de triangularização do problema, ou seja, trabalha com a representação em apenas duas dimensões da estrutura à qual é subdividida em uma malha composta por triângulos.

O fato de o software utilizar representações em duas dimensões implica em um cuidado maior que se deve tomar ao escolher a vista do desenho em questão, para que detalhes importantes não sejam desprezados. No caso da torre de transmissão, esta foi representada de forma que seus condutores posicionados ortogonalmente ao plano da figura.

Um parâmetro importante para a representação neste software é a profundidade do problema, a qual deverá representar a terceira dimensão. Na representação de modelos tridimensionais no FEMM é considerada a vista frontal do modelo e pela extrusão desta figura no eixo ortogonal da mesma tem-se a terceira dimensão, que é referida como profundidade. Deste modo, para se obter resultados coerentes, deve-se escolher a profundidade do problema de modo que o volume do mesmo seja igual ao seu valor real.

Da simulação é obtida a capacitância da torre, e pela equação 5 chega-se ao valor da impedância de surto.

$$Z_t = \frac{1}{C \cdot v} \quad (5)$$

Onde:

C é a capacitância da torre (F/m);

v é a velocidade de propagação da onda de tensão pela torre, a qual é considerada igual à velocidade da luz (8) (300 m/us).

2.3 Software FLUX3D

Semelhante ao FEMM, o FLUX3D também aplica o MEF na resolução de problemas eletromagnéticos (9). Sua grande diferença é a utilização de representações em três dimensões e, devido a este fato, sua malha é composta por elementos tridimensionais, como pirâmides, prismas, cubos e paralelepípedos. A escolha destes elementos para formulação da malha é automatizada pelo software de modo que esta se aproxime ao máximo da forma do desenho.

No caso do FLUX3D, um parâmetro importante é a condição de contorno a ser adotada. A obtenção dos resultados desejados neste estudo é relacionada com o espaço que envolve a torre, que na prática deve-se limitar ao raio de interação do campo elétrico, para que os resultados sejam coerentes com os valores reais. A condição de contorno empregada é estabelecida pela referência (7) e será utilizada em um caso especial apresentado na sequência, que será tomado como referência para a comparação dos resultados.

3.0 - RESULTADOS DE IMPEDÂNCIAS DE SURTO

A impedância de surto será obtida a partir dos métodos supracitados, em três casos diferentes. No primeiro caso optou-se por se criar uma situação teórica para balizar as condições de contorno, conforme mencionado anteriormente. A partir de então, simularam-se mais dois casos, nos quais foram consideradas estruturas reais de linhas de transmissão.

3.1 Primeiro caso – Representação da estrutura por um cone

As aproximações do cálculo analítico aliado às formas variadas das torres das linhas de transmissão podem trazer grande discrepância nos resultados entre métodos adotados. Para se promover um padrão na implementação dos modelos nos softwares empregados, foi escolhida a forma de um cone, devido a sua formulação analítica bem definida e simplicidade. A Figura 2 mostra a representação de um cone de 30 metros de altura e 10 metros de diâmetro de base nos softwares FEMM e FLUX3D.

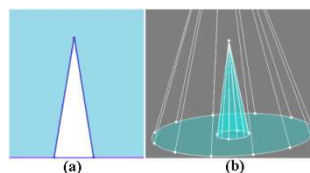


Figura 2 - Representações da torre em formato de cone nos softwares (a) FEMM e (b) FLUX3D.

Na utilização do FEMM (bidimensional), a profundidade do problema foi tal que seu produto pela área do triângulo representativo do cone no software correspondesse ao volume do mesmo. Neste caso a figura geométrica

simulada é uma cunha e não um cone, porém ambas de volumes iguais.

Na representação do cone no FLUX3D, a regra geral é que a distância do centro do problema para o limite externo deve ser em torno de cinco vezes a distância do centro para o exterior do objeto de interesse (7). Como o centro do problema está no interior do cone, a condição de contorno que melhor resultado apresentou é um cone de raio e altura iguais a 4,8 vezes às respectivas dimensões do cone em estudo. Este procedimento será adotado nas simulações seguintes, como um procedimento padrão.

A Tabela 1 mostra os resultados de impedância de surto obtidos nos três métodos.

Tabela 1 - Resultados de Impedância de Surto para a Torre em Forma de Cone

	Analítico	FEMM	FLUX3D
Impedância de surto (Ω)	129,12	155,77	125,94

3.2 Segundo caso – Linha de transmissão de 230kV e circuito simples.

A torre em questão corresponde à estrutura padrão de uma linha de transmissão de circuito simples, com nível de tensão de 230 kV.

Para o cálculo analítico foi considerada a Figura 1 - (c) como padrão de representação da estrutura, utilizando a equação 4 para encontrar sua impedância de surto, sendo a altura de 37 metros e o raio representado na Figura 1 - (c) de 1,8 metros. Na simulação com o FLUX3D a condição de contorno adotada é uma cunha de raio e altura iguais a 4,8 vezes às respectivas dimensões da torre em estudo.

Algumas simulações foram realizadas para avaliar a influência da presença das treliças na impedância de surto da torre. Constatou-se uma diminuição insignificante – cerca de 0,35%, quando se desconsideram as treliças da torre. Deste modo, nas simulações seguintes, para facilitar as representações nos softwares, as treliças não serão consideradas. Contudo todas as dimensões reais do contorno da estrutura serão consideradas nas simulações, a exceção da simulação no FEMM, na qual a profundidade é obtida pela equivalência de volumes.

A Figura 3 mostra as representações desta torre nos softwares utilizados.

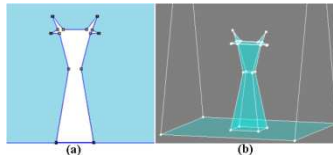


Figura 3 - Representação da torre da LT de 230 kV, circuito simples, nos softwares (a) FEMM e (b) FLUX3D.

A partir da equação 4 e das simulações dos modelos foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de Impedância de Surto para a Torre da LT de Circuito Simples

	Analítico	FEMM	FLUX3D
Impedância de surto (Ω)	183,77	198,03	115,42

Percebe-se que o resultado obtido no FLUX3D é o que mais se difere em relação aos outros, porém, o mesmo deve ser considerado o mais próximo do valor real, pois nenhuma aproximação é feita em relação às dimensões geométricas.

3.3 Terceiro caso – Linha de transmissão de 138kV e circuito duplo.

No estudo deste caso foi utilizada uma torre presente em uma linha de transmissão de 138 kV, a qual possui dois circuitos e altura de 44 metros.

Neste caso, o cálculo analítico da impedância é efetuado com base no perfil padrão da Figura 1 - (b) utilizando as equações 2 e 3.

A Figura 4 mostra as representações desta torre no FEMM e no FLUX3D.

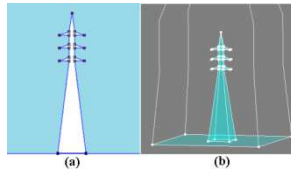


Figura 4 - Representação da torre da LT de 138 kV, circuito duplo, nos softwares (a) FEMM e (b) FLUX3D.

Após as simulações e cálculos foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de Impedância de Surto para a Torre da LT de Circuito Duplo

	Analítico	FEMM	FLUX3D
Impedância de surto (Ω)	187,62	284,65	159,91

Como pode ser visto nas Tabelas 1, 2 e 3, os resultados obtidos pelo FEMM são mais elevados. A justificativa para tal fato baseia-se na profundidade obtida pela equivalência de volumes. Essa operação impõe aumento de volume no topo da torre em contraste com a redução na base. Isso ocasiona numa redução da capacitância equivalente da estrutura, e desse modo uma elevação da impedância.

Os resultados obtidos pelo FLUX3D devem ser considerados próximos dos valores reais, visto que nenhuma aproximação é feita em relação ao perfil geométrico da estrutura. Observa-se que no caso da representação da estrutura por um cone que possui uma formulação analítica bem definida, a simulação no FLUX3D e o método analítico apresentaram resultados semelhantes.

4.0 - VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO AO LONGO DA ALTURA DA TORRE DE TRANSMISSÃO

Tanto a indutância como a capacitância são variáveis de acordo com a distância relativa ao solo, consequentemente a impedância também o será. Logo, à medida que uma corrente de surto percorre uma torre no sentido de seu topo até o solo, esta onda de corrente é submetida a uma impedância variável e, pela teoria de ondas viajantes, ondas refletidas surgirão. O cálculo da sobretensão que a torre será submetida deve considerar este aspecto. Contudo a variação contínua destes parâmetros, no presente trabalho, não será abordada. Aqui será considerada a estrutura subdividida ao longo de sua altura em partes iguais, para as quais serão determinadas as impedâncias de surto. Como o acoplamento capacitivo com o solo se eleva à medida que o surto se aproxima deste, é de se esperar que a impedância de surto tenha uma redução neste sentido.

Os métodos de cálculos apresentados consideram a torre como um todo, e a impedância determinada refere-se ao valor equivalente da impedância variável.

Sob este aspecto, a torre será dividida em três partes iguais ao longo de sua altura, para verificação da impedância de surto de cada parte, sendo possível assim a análise de sua variação.

Vale ressaltar que o software FEMM também poderia ser utilizado, no entanto, a aproximação realizada no cálculo da profundidade pode levar a uma discrepância significativa dos resultados, sendo necessário um maior cuidado com a representação desses modelos no referido software.

As torres das linhas de transmissão de circuito simples e de circuito duplo, já estudadas anteriormente, serão consideradas nesta análise.

4.1 Variação da impedância de surto na torre da LT de circuito simples.

Esta torre, de 37 metros de altura, foi dividida em três partes de 12,33 metros, como mostra a Figura 5.

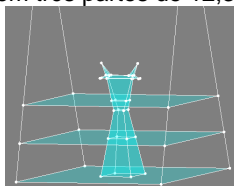


Figura 5 - Torre da LT de 230 kV, circuito simples, dividida em três partes.

O cálculo da capacitância de cada parte é realizado considerando a energia elétrica armazenada na mesma.

A partir deste procedimento, realizado no FLUX3D, obteve-se a impedância de surto correspondente a cada parte da torre. A Tabela 4 mostra tais resultados.

Tabela 4 - Resultados de Impedância de Surto em Três Partes da Torre da LT de Circuito Simples.

	TOPO	MEIO	BASE
Impedância de surto (Ω)	1510,33	690,25	156,12

Percebe-se uma grande diminuição da impedância de surto à medida que o ponto de medição se aproxima do solo.

4.2 Variação da impedância de surto na torre da LT de circuito duplo.

A torre de circuito duplo foi dividida em três partes iguais de 14,67 metros, representando seus 44 metros de altura, como mostra a Figura 6.

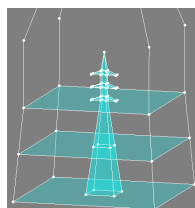


Figura 6 - Torre da LT de 138 kV, circuito duplo, dividida em três partes.

Os resultados das impedâncias de surto obtidos para cada uma destas partes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de Impedância de Surto em Três Partes da Torre da LT de Circuito Duplo.

	TOPO	MEIO	BASE
Impedância de surto (Ω)	4552,04	1252,70	196,74

5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DE IMPEDÂNCIA DE SURTO UTILIZANDO O SOFTWARE ATP-EMTP

Para se analisar os resultados é necessária a representação dos vários elementos que possam influenciar no estudo. Deste modo optou-se por modelar no software ATP-EMTP uma linha de transmissão monofásica, com algumas simplificações, sendo a mesma composta por 11 torres igualmente espaçadas com vãos de 200 metros. No estudo foi representado somente as torres e o cabo para-raios desta LT, ao qual foi aplicada o surto de corrente.

Cada torre foi representada por três linhas monofásicas, a parâmetros distribuídos, cada uma com um terço da altura da torre e os respectivos valores de impedância (topo, 2/3 e 1/3 da altura), de modo que a variação da mesma fosse reproduzida.

As impedâncias de pé de torre foram representadas por impedâncias puramente resistivas com valores típicos de 6,5 ohms (2).

A impedância característica do cabo para-raios é de 455 ohms, e para se evitar reflexões indesejadas, as extremidades do cabo foram conectadas a resistências para a terra de igual valor.

O surto de corrente é aplicado na sexta torre, na qual é analisada a sobretensão nos três pontos considerados, como mostra a Figura 7.

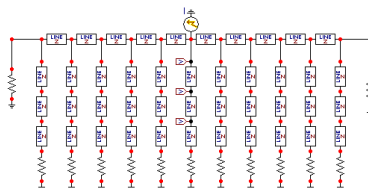


Figura 7 - Arranjo no ATP-EMTP do cabo para-raios e torres da linha de transmissão.

Baseando-se neste esquema, foram realizadas simulações com a finalidade de se comparar os resultados e também de se verificar impactos na torre de transmissão.

5.1 Comparação com Resultados de medições.

Devido à complexidade de se medir a impedância de surto de torres, sendo necessário, como já dito, o desligamento da linha de transmissão, além da técnica demandar equipamentos e métodos caros, não foi possível a realização destas medições no presente trabalho. No entanto, para uma análise sólida e fundamentada dos resultados obtidos é necessário compara-los com dados reais providos de medições em campo. Em vista disto, tomou-se como base medições de sobretensões realizadas por Motoyama et al (2) para comparação dos resultados obtidos, onde se utiliza uma torre semelhante a torre de linha de circuito duplo aqui modelada.

No referido trabalho foi aplicada uma corrente conhecida no topo da torre e simultaneamente registrou-se a tensão em alguns pontos da mesma. A comparação realizada considerou a medição da tensão no ponto da estrutura no qual se conecta o isolador do cabo fase mais baixo, coincidentemente o ponto que equivale a 2/3 da altura da torre modelada, onde se pode obter o registro de tensão como já mostrado. A onda de corrente injetada na torre alvo da medição é mostrada na Figura 8.

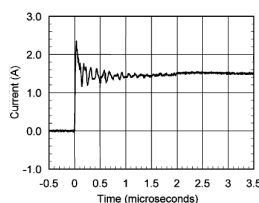


Figura 8 – Corrente injetada na torre para medição da tensão.

Esta mesma corrente foi representada no ATP-EMTP para obtenção dos resultados de tensão.

A Figura 9 mostra a tensão medida e os resultados obtidos a partir das simulações no ATP-EMTP.

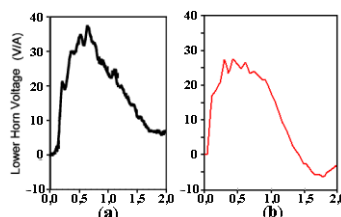


Figura 9 – Registro de tensão no ponto da torre em que o isolador da fase mais baixa se conecta, obtido por (a) medição e (b) por simulação no ATP-EMTP.

Como pode ser visto as formas de ondas, provenientes de medição e de simulação, são semelhantes sendo que a onda medida tomou um pico maior. Outra observação importante é que a onda obtida no ATP-EMTP toma valores negativos. Isto acontece porque o efeito de reflexões de onda são mais sentidos neste caso, fazendo com que a tensão tome valores negativos. Ressalta-se que apesar das duas torres em questão serem de formato semelhantes, as mesmas possuem dimensões diferentes, explicando a diferença na amplitude das tensões registradas.

5.2 Comparação com Resultados Obtidos a partir de Equações Analíticas.

Com a finalidade de verificar o impacto da variação de impedância ao longo da altura da torre pela sobretensão proporcionada por uma descarga atmosférica, apresentam-se os resultados de simulação obtidos do programa ATP-EMTP.

Para tanto foi utilizado o esquema da linha de transmissão monofásica já modelado no ATP-EMTP, assolado por uma descarga atmosférica. Esta é representada por uma fonte de surto que se baseia na forma de dupla exponencial (1), alcançando valor de crista de 10 kA no tempo de 1,2 microssegundos e com tempo de calda (metade do valor de crista) de 50 microssegundos (1,2x50us).

A título de comparação, também foram utilizados os valores de impedância obtidos dos cálculos analíticos. Neste caso manteve-se a representação de três linhas para uma torre, cada linha com um terço da altura, porém com os valores de impedância iguais à impedância calculada.

Primeiramente foram utilizados os valores obtidos da torre da LT de circuito simples a partir dos cálculos analíticos e simulação com o FLUX3D. Foram registradas tensões ao longo da torre como mostra a Figura 10.

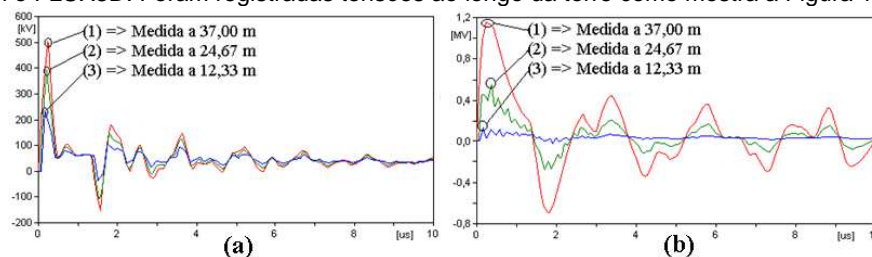


Figura 10 - Sobretensões registradas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito simples.

Outro caso simulado foi o da torre da LT de circuito duplo. De maneira similar, a torre foi representada por linhas monofásicas com as respectivas impedâncias. A Figura 11 mostra os resultados.

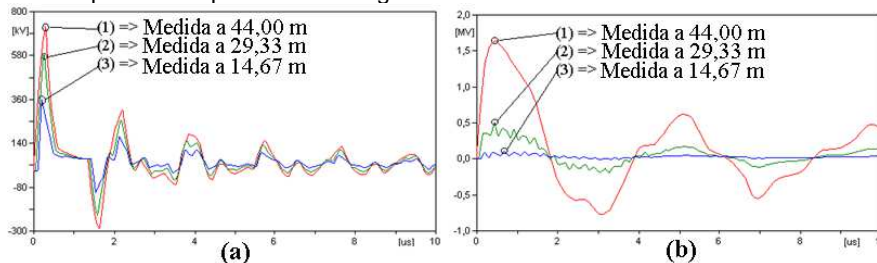


Figura 11 - Sobretensões registradas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito duplo.

No caso da torre da LT de circuito duplo, notam-se maiores diferenças de valores de pico de tensão. A Tabela 6 mostra os resultados numéricos obtidos das simulações no ATP-EMTP.

Tabela 6 - Resultados de Sobretensão do Modelo no Software ATP-EMTP

Tipo de estrutura	Circuito Simples					
Ponto de análise	37 metros (topo)		24,33 metros		12,33 metros	
Método para obtenção da impedância de surto	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D
Pico de tensão [kV]	540	1200	425	530	250	140
Tipo de estrutura	Circuito Duplo					
Ponto de análise	44 metros (topo)		29,33 metros		14,66 metros	
Método para obtenção da impedância de surto	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D
Pico de tensão [kV]	725	1630	580	500	360	100

A Tabela 6 mostra que as diferenças nos valores da sobretensão encontrada nos diferentes pontos da torre são significativas e dependendo do tipo da torre de transmissão e do ponto de análise poderão conduzir a interpretações errôneas.

6.0 - CONCLUSÕES

Este artigo abordou algumas maneiras de se chegar ao valor de impedância de surto de estruturas de linhas de transmissão, estimando-o através de equações analíticas ou de simulações em softwares que utilizam o método de elementos finitos. Devido ao elevado valor da corrente de surto que as torres podem ser submetidas, imprecisões no cálculo da sua impedância de surto podem significar valores de sobretensões muito diferentes daqueles esperados. Por isso se faz importante considerar todos os detalhes construtivos da torre para que todos os componentes da linha de transmissão relacionados com desempenho frente a descargas atmosféricas sejam dimensionados corretamente.

O FEMM é um software livre e de fácil acesso que trabalha em duas dimensões, possibilitando utilizar a profundidade como a terceira dimensão em problemas tridimensionais. A maior dificuldade consiste em determinar um valor ideal de profundidade que seja adequada às características do problema. Neste trabalho foi feita uma equivalência entre o volume real que a torre ocupa e o volume de sua figura representativa no FEMM. Este procedimento se mostrou pouco satisfatório, apresentando resultados de impedâncias mais elevados devido ao aumento do volume da parte superior da torre em detrimento da redução do volume de sua parte inferior.

O software FLUX3D trabalha com representações tridimensionais sendo mais adequado para o problema analisado. Por outro lado, é um software de uso restrito, que requer maiores conhecimentos do usuário. A delimitação da região de contorno do problema é fundamental para se obter resultados confiáveis. Neste trabalho foi utilizada a simulação de um caso especial (cone) para balizar a condição de contorno ideal para o problema. Deste modo os resultados para os diversos casos são mais confiáveis, pois a representação do modelo é 100% fidedigna com as dimensões geométricas reais.

Mostrou-se neste estudo que a impedância de surto da torre apresenta variações significativas relativas ao ponto de análise e o solo. Assim, a análise de sobretensões proporcionadas por surtos de corrente fica muito comprometida se não for considerado este fato. Coincidentemente ou não, é notório que a sobretensão a 2/3 da altura é semelhante nos casos impedância constante e impedância variável da forma proposta. Neste mesmo ponto foi possível a comparação com resultados obtidos a partir de medições, onde se observou boa correlação.

A simulação no software ATP-EMTP utilizou uma modelagem simples visando à análise imediata do impacto causado pela impedância variável na estrutura. Modelos de linhas mais elaborados que consideram um ou mais circuitos, condutores de fase, e o número real de cabos para-raios, estão disponíveis neste software e poderão ser facilmente empregados.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C. Gao, L. Li, B. Li, Z. Zhao, "Computation of Power Line Tower Lightning Surge Impedance Using the Electromagnetic Field Method", 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006.
- (2) H. Motoyama, Y. Kinoshita, K. Nonaka, " Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines", IEEE trans. PWRD, Vol.23, pp 2488-2495, October, 2008.
- (3) General Electric Company and Electric Power Research Institute, "Transmission line reference book, 345KV and above," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1982.
- (4) CIGRE Working Group 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," CIGRE Technical Brochure 63 (1991).
- (5) IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission lines, "IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines," Proposed IEEE P1243 draft (1996).
- (6) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution lines. Approved 09, IEEE Standards Board. IEEE Std 1410TM, IEEE Std 1410TM, Feb. 2004.
- (7) D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics - User's Manual", FEMM4.2, September 28, 2009
- (8) M.Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani, T. Higuchi, "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis", IEEE trans. PWRD, Vol.6, pp 1327-1335, July, 1991.
- (9) CEDRAT, "FLUX® 10 User's guide", vol. 3 & 4, June 25, 2009.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Paulo César Álvares Mota nasceu em Patos de Minas-MG, Brasil, no ano de 1985, concluiu graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 2009. Atualmente está no curso de Mestrado de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia. Possui 2 artigos publicados em anais de eventos.



Marcelo Lynce Ribeiro Chaves nasceu em Ituiutaba - MG, Brasil, no ano de 1951 possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1975), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal de Uberlândia (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1987) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1995). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência.



Jose Roberto Camacho nasceu em Taquaritinga – SP, Brasil, no ano de 1954, concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica na University of Canterbury Nova Zelândia em 1993. Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia. Membro Senior do IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers. Publicou 12 artigos em periódicos especializados e 63 trabalhos em anais de eventos. Possui 1 produto tecnológico registrado, 3 softwares sem registro de patente, 1 processo ou técnica registrado e outros 4 itens de produção técnica. Publicou 10 artigos em jornais. Participou de 21 eventos no exterior e 11 no Brasil. Orientou 8 trabalhos de iniciação científica, 10 trabalhos de conclusão de curso, 9 dissertações de mestrado e 4 teses de doutorado na área de Engenharia Elétrica. No momento orienta 4 doutorandos e 3 mestrandos. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas, Dispositivos de Potência, Geração Distribuída, Fontes Alternativas de Energia e Energia para o meio rural.