

Influência de Ramais e Edificações nas Tensões Induzidas em Linhas de Distribuição Urbanas devido a Descargas Atmosféricas

A. Piantini - IEE/USP e J. M. Janiszewski - PTC/EPUSP

E-mail: piantini@iee.usp.br

Palavras-chave – descargas atmosféricas, distribuição, linhas urbanas, sobretensões, tensões induzidas.

Resumo - Este trabalho apresenta alguns resultados experimentais relativos a uma pesquisa desenvolvida com o objetivo de se avaliar a influência, nas tensões induzidas por descargas atmosféricas, dos ramais e da presença de edificações próximas à rede. Através da utilização de um modelo em escala reduzida, com fator de escala para comprimentos igual a 1:50, foram realizados diversos ensaios simulando configurações típicas de linhas primárias de distribuição. Foram consideradas linhas urbanas trifásicas com comprimento de 1,4 km, tendo sido também representados o condutor neutro, ramais, edificações e equipamentos como transformadores e pára-raios. São apresentadas comparações entre as tensões induzidas nos terminais dos transformadores, localizados em diferentes pontos (no tronco ou final de ramal), e edificações de diferentes alturas. Os resultados mostram que em certas circunstâncias os ramais e as estruturas próximas à linha podem afetar significativamente as tensões nela induzidas.

1. INTRODUÇÃO

A importância do estudo das características das tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição urbanas está relacionada basicamente a dois aspectos: ao grande número de falhas de transformadores atribuído a descargas atmosféricas [1, 2] e ao fato de que em áreas urbanas a presença de estruturas altas próximas à linha diminui a sua exposição a descargas diretas. Essa última situação, contudo, possibilita a ocorrência de descargas muito próximas à rede (descargas indiretas), as quais podem induzir sobretensões de amplitudes muito elevadas, aumentando assim a importância do fenômeno.

Além da presença de edificações em suas proximidades, as linhas urbanas são caracterizadas pelos seus ramais e por uma maior densidade de pára-raios e transformadores que as linhas rurais. Tais características aumentam a complexidade do fenômeno e dificultam sobremaneira a determinação das tensões induzidas, que passam a ser influenciadas por um número maior de parâmetros. Em particular, cada ponto de conexão do tronco com os ramais representa um ponto de descontinuidade, enquanto que a presença de edificações altera o campo eletromagnético nas vizinhanças da linha, ambos os efeitos afetando diretamente as tensões induzidas. A presença do neutro também contribui nesse sentido, visto

que o mesmo tem efeito análogo ao do cabo guarda no caso de descargas indiretas, reduzindo em função do acoplamento, as tensões induzidas nos condutores fase. A complexidade do problema é, portanto, ainda maior que no caso de linhas rurais.

Embora a validade dos modelos de acoplamento “Extended Rusck” [3] e de Agrawal-Price-Gurbaxani [4] para cálculo de tensões induzidas em linhas com geometrias complexas já tenha sido comprovada por meio de comparações entre resultados teóricos e experimentais [3, 5], poucas investigações têm sido feitas no sentido de se avaliar a influência dos ramais das linhas e das edificações em suas proximidades [6, 7]. Visando avaliar tais efeitos nas tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas, desenvolveu-se e implementou-se um modelo em escala reduzida, com fator de escala para comprimentos igual a 1:50.

As investigações foram conduzidas simulando-se uma linha urbana típica, trifásica, com neutro, transformadores e pára-raios, além dos ramais. Diferentes configurações foram consideradas, tendo as tensões induzidas sido medidas nos terminais primários de modelos de transformadores situados tanto no alimentador como em finais de ramais. Diversos ensaios foram realizados, em várias condições, possibilitando assim uma investigação experimental das características das tensões induzidas em linhas primárias urbanas levando-se em consideração os efeitos de suas ramificações e da presença de edifícios nas proximidades da rede.

2. O MODELO EM ESCALA REDUZIDA

A parte experimental do estudo foi desenvolvida por meio de um modelo em escala reduzida. O modelo, implementado na Universidade de São Paulo, permitiu variar diversos parâmetros, tais como a localização e a forma de onda da corrente de retorno da descarga atmosférica, a configuração da linha e o ponto de observação das tensões induzidas. As principais vantagens da utilização dessa técnica são a possibilidade de obtenção de uma grande quantidade de dados experimentais em um intervalo de tempo relativamente curto, uma vez implementado o modelo, e o fato de que o experimento pode ser conduzido de forma a simular o fenômeno em condições controladas.

Os fatores de escala, definidos como a relação entre os valores das grandezas no modelo e no sistema em escala real, estão representados na Tabela 1 para as grandezas mais importantes. A escolha do fator de escala para

comprimentos levou em conta as características dos sistemas de geração e de medição, bem como a área disponível para a construção do modelo. Os fatores de escala para tensões e correntes, por outro lado, foram definidos considerando a possibilidade de simulação de pára-raios. Doravante, a menos que indicado em contrário, os valores de todos os parâmetros serão referidos ao sistema em escala real.

TABELA I
FATORES DE ESCALA

GRANDEZA	FATOR DE ESCALA
comprimento	1:50
tempo	1:50
resistência	1:1
capacitância	1:50
indutância	1:50
impedância	1:1
velocidade	1:1
freqüência	50:1
condutividade	50:1
tensão	1:18000
corrente	1:18000

A linha de distribuição objeto da simulação é trifásica, com neutro, e tem configuração horizontal, com altura das fases de 10 m. O neutro está alinhado com a fase central, a uma altura de 8 m, sendo aterrado em cada transformador, bem como no meio dos ramais. O espaçamento entre as fases externas e a central é igual a 0,75 m, sendo os comprimentos do tronco e dos ramais iguais a 1,4 km e 150 m, respectivamente. O valor da resistência de aterramento (R) é de 50Ω , exceto no ponto de medição, onde $R = 0 \Omega$ (situação conservativa em termos de tensão na bucha do transformador). O mesmo diâmetro, 2 cm, foi adotado para os condutores fase e neutro.

Simulou-se um canal da descarga de retorno (“return stroke”) com comprimento de 600 m, através de um condutor de cobre enrolado num tubo isolante de forma a constituir uma linha de transmissão artificial com impedância característica de aproximadamente $2,2 \text{ k}\Omega$ e velocidade de propagação igual a aproximadamente 11 % da velocidade da luz no vácuo. Uma análise prévia de resultados de medições da corrente injetada nesse modelo de “return stroke” e das tensões induzidas em uma linha monofásica sem proteção (linha de referência) mostrou que a corrente na base do canal poderia ser representada com boa aproximação através de uma forma de onda triangular com tempo de frente de $2 \mu\text{s}$ e tempo até meio valor de $85 \mu\text{s}$, podendo sua amplitude ser variada conforme o caso a ser analisado. O sistema de geração e o modelo do “return stroke” (m.r.s.) são descritos com mais detalhes em [8]. Placas de alumínio interconectadas foram usadas para simular o plano de terra (solo), de forma que este foi considerado, com razoável aproximação, um condutor perfeito, com área de $1400 \times 450 \text{ m}^2$.

Em estudos de transitórios muito rápidos, como aqueles ocasionados por descargas atmosféricas, os transformadores são geralmente representados por meio de um circuito aberto ou de um capacitor. Visando determinar o modelo mais adequado tendo em vista os ensaios em escala reduzida, foram realizados ensaios em um transformador de distribuição típico (trifásico, potência nominal 30 kVA, relação 13,8 kV - 220/127 V, ligação delta-estrela), de modo a se obter sua impedância de entrada em função da freqüência.

A Figura 1 apresenta o circuito utilizado nos ensaios. Os três terminais do lado de alta tensão foram interligados devido ao fato de que as diferenças entre as tensões induzidas nas fases de uma linha com pára-raios (nas três fases) são muito pequenas, podendo ser desprezadas. No secundário do transformador foram conectados resistores com valores ôhmicos correspondentes à carga nominal ($R_n = 1,6 \Omega$). Os ensaios foram realizados variando-se a freqüência da tensão aplicada (de amplitude fixa) através do gerador de sinais e medindo-se simultaneamente a tensão no ponto P1 e a corrente no ponto P2. As medições foram feitas em 50 diferentes freqüências, distribuídas na faixa de 2 kHz a 1 MHz, tendo a impedância de entrada Z_e do transformador, correspondente ao terminal H2, sido obtida (em módulo e fase) através da relação entre esse dois parâmetros. Essas medições foram efetuadas com um osciloscópio de armazenamento digital, dois canais e taxa de amostragem de 500 MS/s. Foram também realizados ensaios medindo-se a corrente no ponto P3, obtendo-se nesse caso a impedância de entrada correspondente aos terminais H1 e H3 (iguais em função da simetria). Como pode-se observar através da Figura 2, as diferenças entre os resultados são muito pequenas, podendo ser desprezadas. Assim, a menos que indicado em contrário, doravante Z_e referir-se-á à impedância de entrada correspondente ao terminal H2, considerando-se carga nominal.

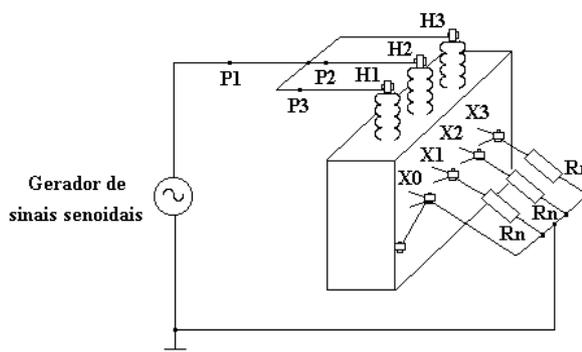
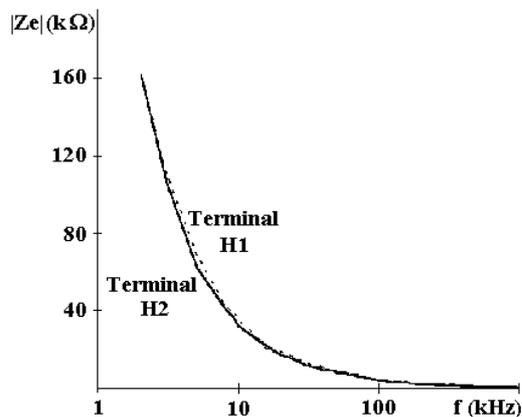


FIGURA 1: CIRCUITO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DO TRANSFORMADOR EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.

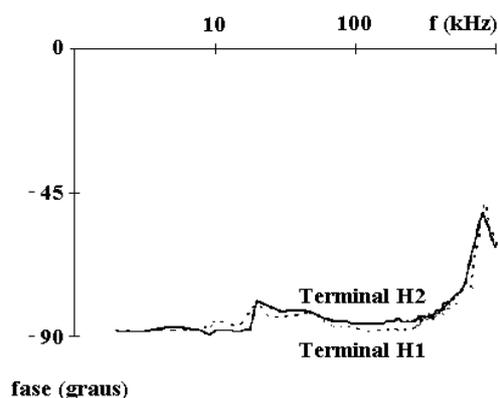
P1: PONTO DE MEDIÇÃO DA TENSÃO (EM RELAÇÃO AO TERRA). P2 E P3: PONTOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE.

Visando avaliar a influência da carga, a impedância de entrada do transformador foi determinada também nas

condições de secundário em aberto e em curto-circuito (medição da corrente no terminal H2), conforme indicado na Figura 3. Entretanto, sendo a ligação do primário em delta e considerando o circuito indicado na Figura 1 (mesma tensão aplicada aos três terminais), não existem diferenças de potencial entre os enrolamentos, de modo que Z_e praticamente independe da condição do secundário.



(A)

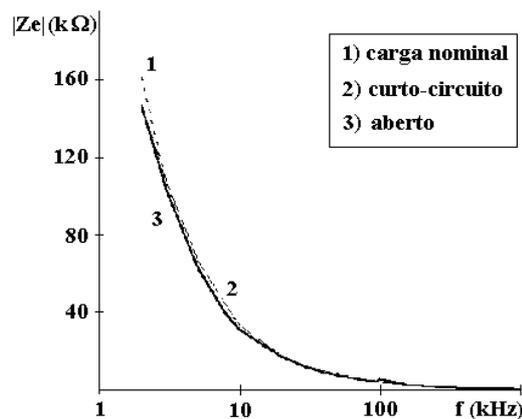


(B)

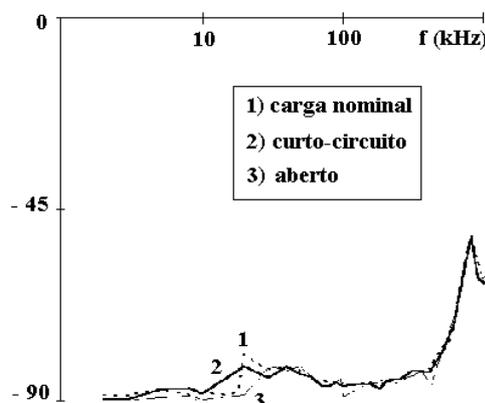
FIGURA 2: IMPEDÂNCIA DE ENTRADA (Z_e) DO TRANSFORMADOR (CARGA NOMINAL).
A) MÓDULO B) FASE

Conforme indicado na Figura 4, o comportamento de Z_e pode ser representado por meio de um capacitor de 0,5 nF em série com um resistor de 300 Ω (curva Z_{et}). Levando-se em conta os fatores de escala para capacitâncias (1:50) e resistências (1:1), tais valores correspondem, no modelo reduzido, a 10 pF e 300 Ω , respectivamente. A Figura 4 mostra também os resultados dos ensaios realizados em um capacitor de 10 pF, referidos à frequência do sistema real (curva Z_{mod}). Em função de uma limitação do gerador de sinais - frequência máxima igual a 20 MHz, correspondente a 400 kHz no sistema real -, a comparação pôde ser feita apenas em uma determinada faixa de frequências. O limite inferior se deve à

dificuldade de medição dos valores das correntes, que se tornam muito baixos para frequências inferiores a aproximadamente 400 kHz (8 kHz no sistema real). Apesar da comparação se restringir a essa faixa de frequências, pode-se observar que o capacitor representa relativamente bem o comportamento de Z_e , não sendo necessária a presença do resistor (as perdas "fazem o papel" do resistor). Assim, nos ensaios em escala reduzida o transformador foi simulado colocando-se, entre cada fase e o neutro, um capacitor de 10 pF. No ponto de medição de tensão, a própria capacitância da ponta de prova (13 pF) representou o transformador.



(A)



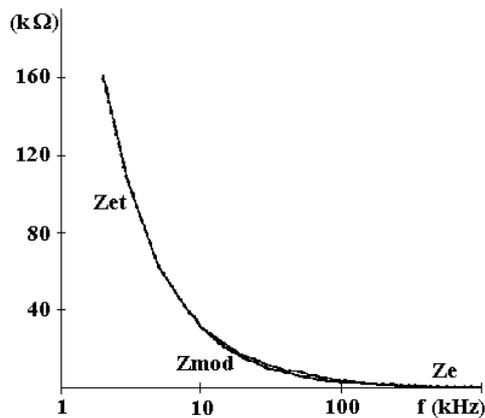
fase (graus)

(B)

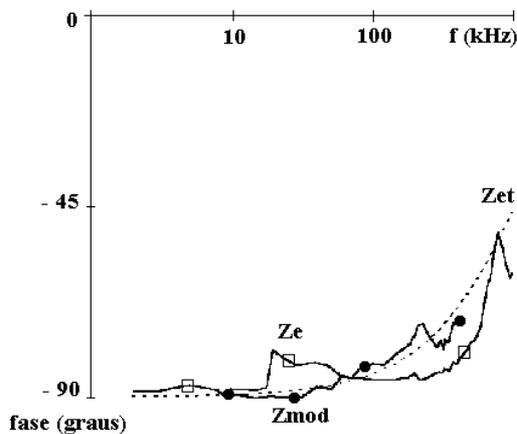
FIGURA 3: IMPEDÂNCIA DE ENTRADA (Z_e) DO TRANSFORMADOR EM FUNÇÃO DA CARGA.
A) MÓDULO B) FASE

O comportamento não linear dos pára-raios foi representado através de uma combinação de diodos e resistores; o circuito equivalente [5, 9] - no qual uma indutância e uma capacitância foram acrescentadas para melhorar a exatidão do modelo - é apresentada na Figura 5. A característica tensão x corrente (curva V_{xI}) do resistor não-linear é apresentada na Figura 6. Uma comparação entre curvas V_{xI} do modelo e aquelas de pára-raios reais de SiC e ZnO é mostrada na Figura 7.

Mais detalhes a respeito da modelagem dos pára-raios são apresentados em [9, 10].



(A)



(B)

FIG. 4 - IMPEDÂNCIAS Z_e (TRANSFORMADOR), Z_{et} (TEÓRICO) E Z_{mod} (MODELO).
A) MÓDULO B) FASE

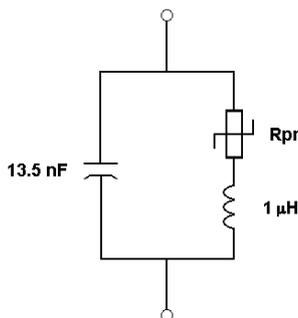


FIGURA 5: CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO DE PÁRA-RAIOS.

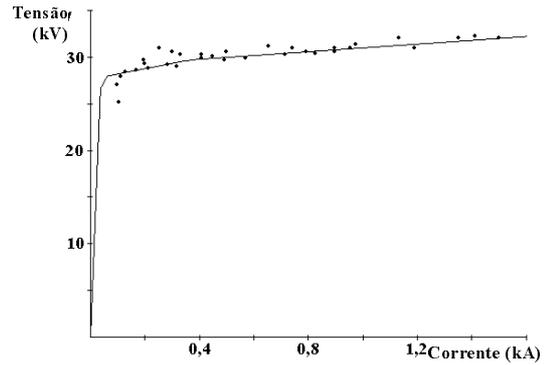


FIGURA 6: CARACTERÍSTICA TENSÃO x CORRENTE (VxI) DO RESISTOR NÃO-LINEAR R_{pr} .

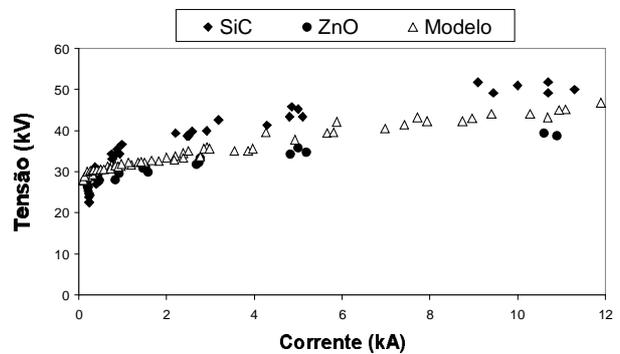


FIGURA 7: CARACTERÍSTICAS TENSÃO X CORRENTE (VxI) DE PÁRA-RAIOS REAIS (SiC E ZnO) E DO MODELO.

Os edifícios foram representados através de caixas de alumínio de mesma altura (5 m ou 15 m, dependendo da configuração de teste), conforme mostrado nas Figuras 8 e 9.

O sistema de medição foi posicionado sob o plano de terra; um osciloscópio de armazenamento digital com taxa de amostragem de 1 GS/s, banda passante de 250 MHz e resolução de 8 bits foi usado nas medições.

As tensões induzidas (fase-terra) foram medidas tanto num transformador do alimentador principal (tronco) como num transformador situado na extremidade de um ramal próximo ao m.r.s., porém sempre na fase mais próxima ao m.r.s., em ambas as situações. Durante os testes alguns parâmetros permaneceram fixos (por exemplo, altura dos condutores, forma de onda e velocidade de propagação da corrente da descarga), enquanto outros foram variados (distância entre o transformador e o m.r.s., amplitude da corrente da descarga, posição dos pára-raios, etc.).



FIGURA 8: EXEMPLO DE UMA CONFIGURAÇÃO DE TESTE COM EDIFICAÇÕES DE ALTURA $h_e = 5$ m.

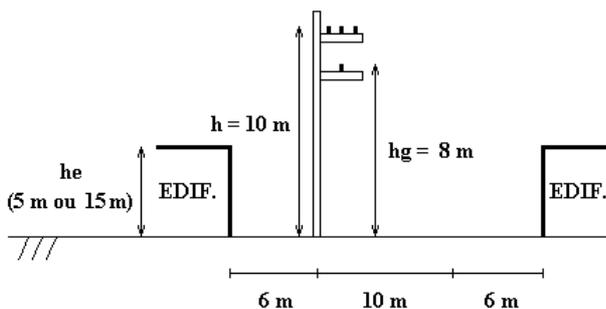


FIGURA 9: DISTÂNCIAS ENTRE O ALIMENTADOR PRINCIPAL (TRONCO) E AS EDIFICAÇÕES.

3. INFLUÊNCIA DOS RAMAIS

A grande variedade de possíveis geometrias das linhas de distribuição, com a presença de ramais de diferentes comprimentos e condições de terminação, com diferentes espaçamentos, etc., aumenta a complexidade do estudo das tensões induzidas.

Os pontos de intersecção dos ramais com o tronco constituem-se em pontos de descontinuidade, uma vez que ao chegar em um desses pontos um determinado surto "enxerga" uma impedância diferente da impedância característica da linha, sofrendo então reflexão e refração. Sendo essa impedância menor que a impedância da linha, as componentes de tensão refletidas terão polaridades contrárias às das ondas incidentes, ao passo que as componentes refratadas (transmitidas), embora de mesma polaridade, terão amplitudes menores que as das ondas incidentes. Como resultado, as tensões induzidas em pontos situados próximos a um ramal tendem, em geral, a atingir amplitudes inferiores àquelas que seriam atingidas na ausência dos ramais. Essa situação pode ocorrer quando a distância entre o ponto considerado e o ramal é pequena o suficiente para que o efeito da reflexão seja "sentido" antes que a tensão atinja seu valor máximo.

A Figura 10 apresenta a configuração de ensaio utilizada para avaliação da influência da presença dos ramais. As duas linhas apresentadas estão situadas à mesma distância (70 m) em relação ao m.r.s.. A menor, com comprimento de 271 m, monofásica e casada em ambas as extremidades, foi denominada "linha de referência", enquanto que à outra, trifásica, com neutro e ramificada, denominou-se "linha de teste". Ambas as linhas foram desprovidas de pára-raios.

As formas de onda apresentadas nas Figuras 11 e 12, obtidas através de ensaios no modelo reduzido, ilustram o efeito da presença de ramais nas tensões induzidas no ponto da linha mais próximo ao local de incidência da descarga. As tensões, fase-terra, foram medidas nas linhas de teste e de referência para uma corrente de descarga com amplitude (I) e tempo de frente (tf) correspondentes a 46 kA e 2 μ s, respectivamente. Nesses ensaios, em particular, os transformadores foram representados por um circuito aberto, tendo-se variado a condição de terminação dos ramais (em aberto ou casados) e a distância entre o ponto de medição e o ramal mais próximo. Conforme indicado na Figura 10, as medições foram feitas, nas duas linhas, nos pontos $x = 42$ m, onde x indica a distância entre o ponto de medição e o ponto da linha mais próximo ao m.r.s.. A distância entre o m.r.s. e as duas linhas (d) foi mantida constante (70 m) em todos os testes.

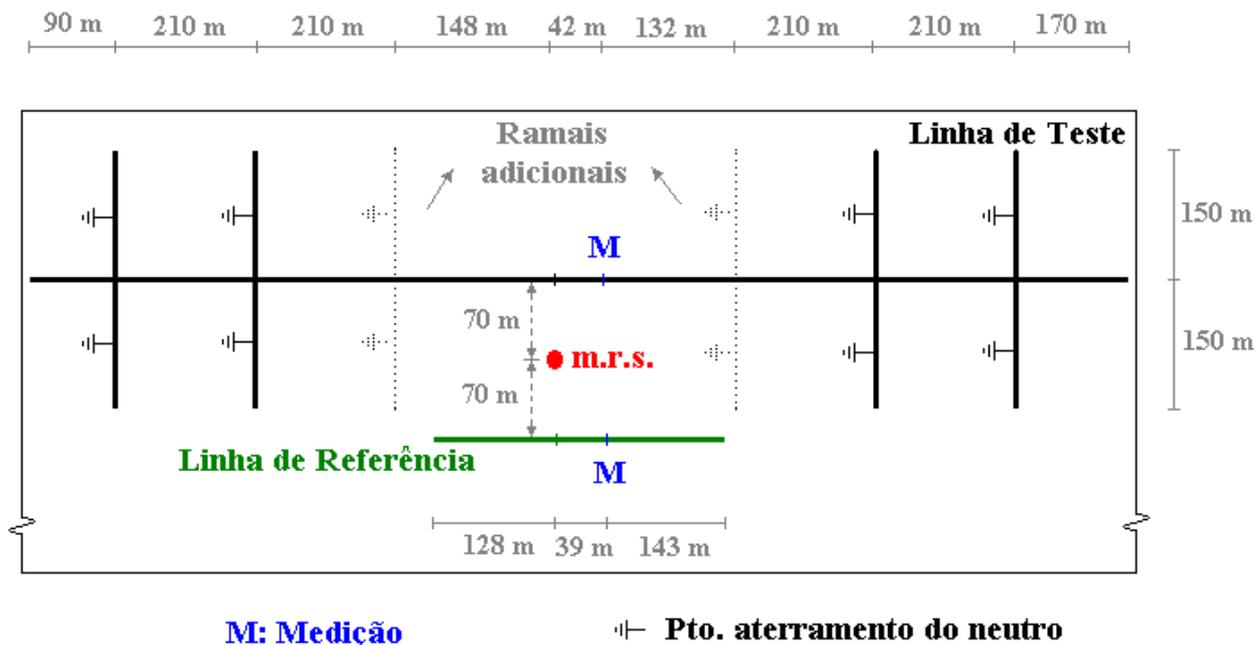


FIGURA 10: CONFIGURAÇÃO DE TESTE PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS RAMAIS NAS TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS INDIRETAS.

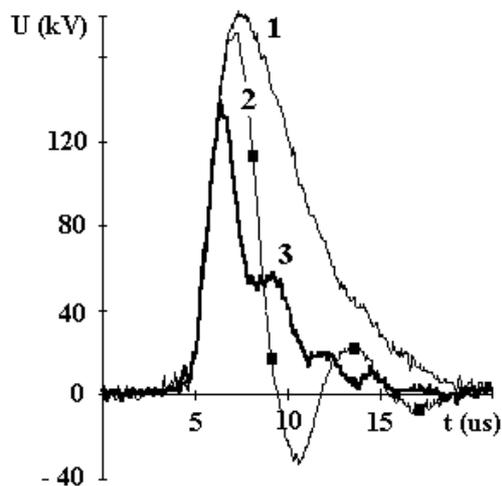


FIGURA 11: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA), NAS LINHAS DE TESTE E DE REFERÊNCIA (CONFIGURAÇÃO INDICADA NA FIGURA 10). TODOS OS RAMAIS COM AS EXTREMIDADES CASADAS.
 $I = 46 \text{ kA}$; $t_f = 2 \text{ } \mu\text{s}$; $x = 42 \text{ m}$; $d = 70 \text{ m}$;
 $R = 50 \text{ } \Omega$ ($0 \text{ } \Omega$ NO PONTO DE MEDIÇÃO).
 TENSÃO 1: LINHA DE REFERÊNCIA;
 TENSÃO 2: LINHA DE TESTE, SEM OS RAMAIS ADICIONAIS;
 TENSÃO 3: LINHA DE TESTE, COM OS RAMAIS ADICIONAIS.

As tensões induzidas medidas no tronco, nas condições ensaiadas, foram influenciadas não só pela presença, mas também pela condição de terminação dos ramais adicionais. No caso da presença de ramais longos (ou

casados), as tensões induzidas apresentam tendência de redução. Quanto menor a distância entre o ponto de observação e o ramal mais próximo, maior a redução, conforme pode-se verificar na Figura 11. Por outro lado, se as extremidades dos ramais estiverem em aberto, a tensão induzida tende a aumentar à medida que diminui a distância entre o ponto de observação e o ramal mais próximo, conforme mostrado na Figura 12.

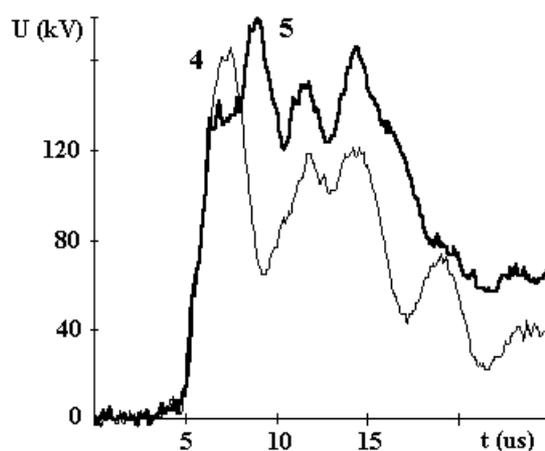


FIGURA 12: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) NA LINHA DE TESTE (CONFIGURAÇÃO INDICADA NA FIGURA 10). TODOS OS RAMAIS COM AS EXTREMIDADES EM ABERTO.
 $I = 46 \text{ kA}$; $t_f = 2 \text{ } \mu\text{s}$; $x = 42 \text{ m}$; $d = 70 \text{ m}$;
 $R = 50 \text{ } \Omega$ ($0 \text{ } \Omega$ NO PONTO DE MEDIÇÃO).
 TENSÃO 4: SEM OS RAMAIS ADICIONAIS;
 TENSÃO 5: COM OS RAMAIS ADICIONAIS.

As tensões correspondentes ao caso de ramais com extremidades em aberto tendem a ser maiores que aquelas relativas a ramais longos (ou casados); a diferença tende a aumentar à medida que o ponto de observação se aproxima do ramal. Quando se considera uma distância de 132 m entre o ponto de observação e o ramal mais próximo (Figura 10, com os ramais adicionais), verifica-se uma diferença de aproximadamente 30 % entre as amplitudes das curvas 3 (Figura 11, extremidades de todos os ramais casadas) e 5 (Figura 12, extremidades de todos os ramais em aberto).

Por outro lado, quando os ramais adicionais indicados na Figura 10 não estão presentes - e a distância entre o ponto de observação e o ramal mais próximo aumenta de 132 m para 342 m -, a variação das tensões induzidas em função da condição de terminação dos ramais tende a ser menos acentuada. É o que se observa, por exemplo, quando se comparam as curvas 2 (Figura 11, extremidades de todos os ramais casadas) e 4 (Figura 12, extremidades de todos os ramais em aberto); os valores de crista são praticamente iguais, embora diferenças significativas possam ser observadas entre as caudas das ondas.

4. PRESENÇA DE EDIFICAÇÕES NAS PROXIMIDADES DA LINHA

Várias configurações de teste foram utilizadas para avaliação do efeito das edificações próximas à linha nas tensões nela induzidas por descargas indiretas.

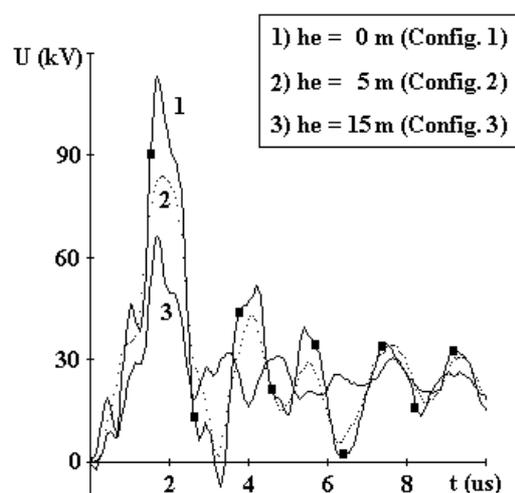
A Figura 13 ilustra a influência, nas tensões induzidas no transformador do tronco mais próximo ao local de incidência da descarga (m.r.s.), da presença de edificações de diferentes alturas (h_e) nas proximidades da linha. As ondas apresentadas referem-se às configurações mostradas na Figura 14, a uma descarga com amplitude de 34 kA e tempo de frente de 2 μ s, e à distância de 20 m entre o tronco e o m.r.s.. Duas situações foram consideradas com respeito às distâncias s_e e s_d (indicadas na Figura 14) entre o transformador (em cujos terminais foram feitas as medições de tensão) e o conjunto de pára-raios mais próximo. Pode-se observar claramente que a presença de edificações causa uma redução das amplitudes das tensões induzidas. Tal redução tende a ser mais significativa à medida que aumenta a altura das estruturas próximas à linha, que desse modo proporcionam à linha uma blindagem mais efetiva dos campos eletromagnéticos gerados pela descarga.

A dependência das amplitudes das tensões induzidas com respeito a s_e e s_d tende a ser menor à medida que diminui a altura das estruturas. Na ausência de edificações (ou seja, $h_e = 0$ m), a relação entre os valores de crista das tensões induzidas correspondentes aos casos 1 ($s_e = s_d = 75$ m) e 2 ($s_e = 148$ m, $s_d = 174$ m) é de aproximadamente 0,57, enquanto que para $h_e = 15$ m esse valor aumenta para 0,96. Esse comportamento se explica pelo fato de que, na ausência de edificações, as diferenças entre as tensões induzidas são devidas unicamente às diferentes distâncias entre o ponto de medição e os pára-

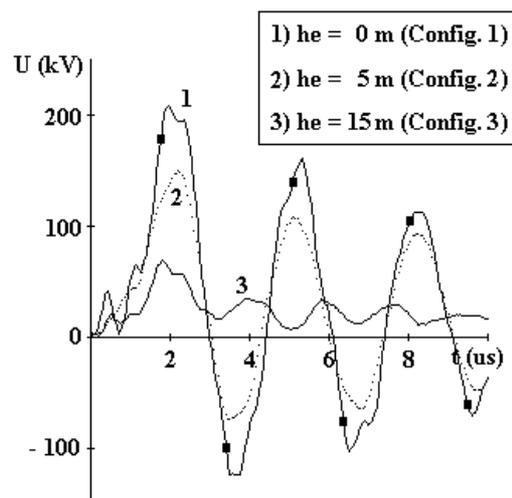
raios mais próximos (s_e e s_d). Essas distâncias têm uma influência marcante, particularmente para o caso de descargas próximas à linha.

Por outro lado, a amplitude do campo eletromagnético total nas vizinhanças da linha diminui à medida que aumenta a altura das edificações, como consequência da blindagem, que se torna mais efetiva. Desse modo, nas condições dos ensaios e para a altura $h_e = 15$ m, as tensões induzidas são mais influenciadas pela presença das edificações que pela distância entre o ponto de observação e os pára-raios mais próximos.

Foram também realizados outros ensaios, visando obter subsídios para análise das tensões induzidas em transformadores situados em ramais, conforme indicado na Figura 15.



(A)



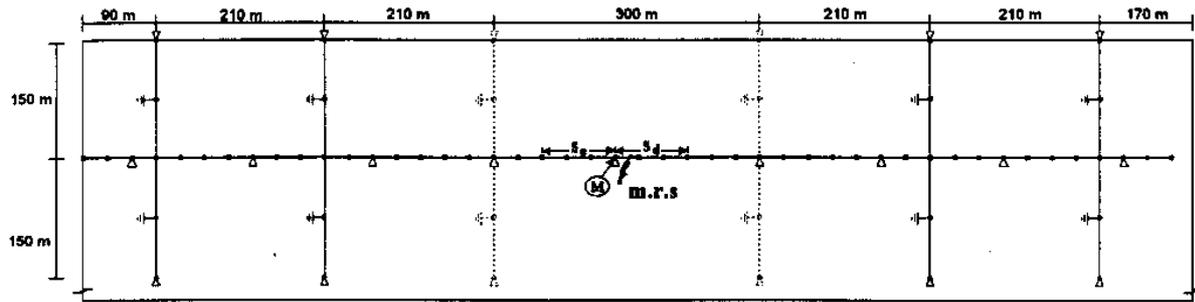
(B)

FIGURA 13: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) PARA AS CONFIGURAÇÕES DE TESTE INDICADAS NA FIGURA 14.

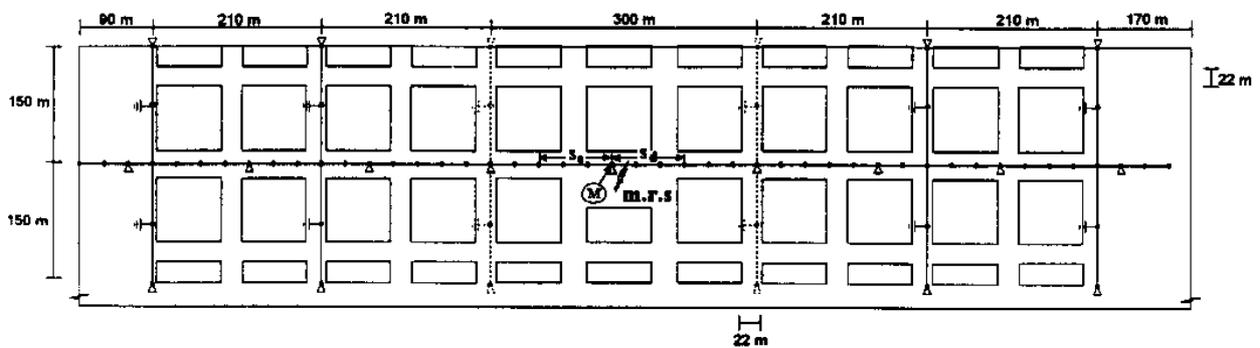
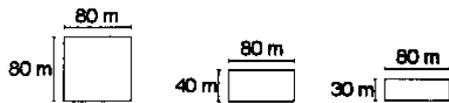
$I = 34$ kA; $t_f = 2$ μ s; $d = 20$ m.

A) CASO 1: $s_e = 75$ m; $s_d = 75$ m

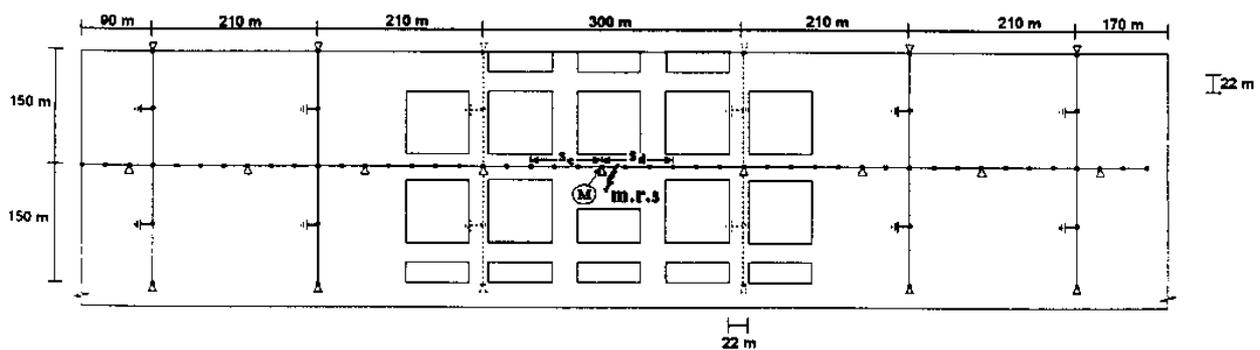
B) CASO 2: $s_e = 148$ m; $s_d = 174$ m



(a)

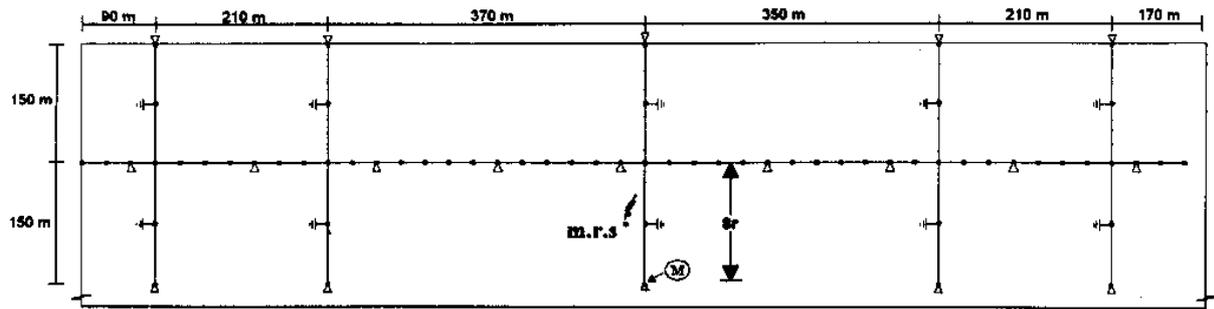


(b)

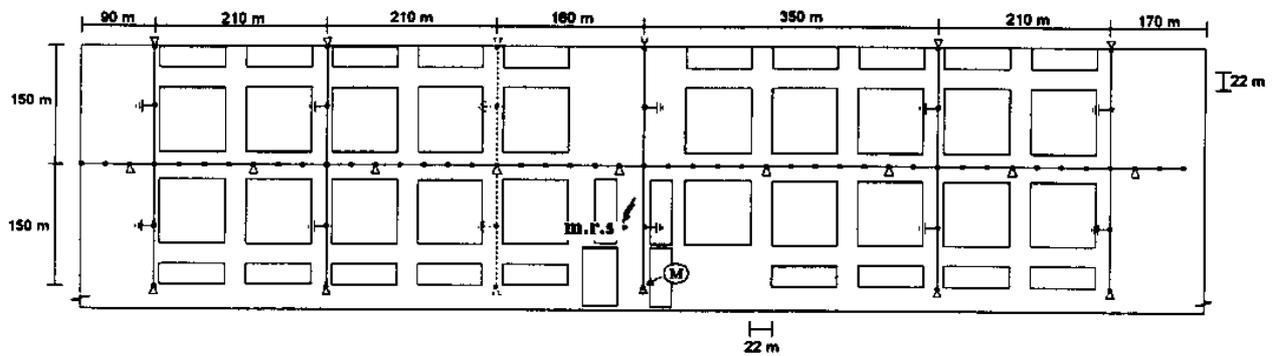


(c)

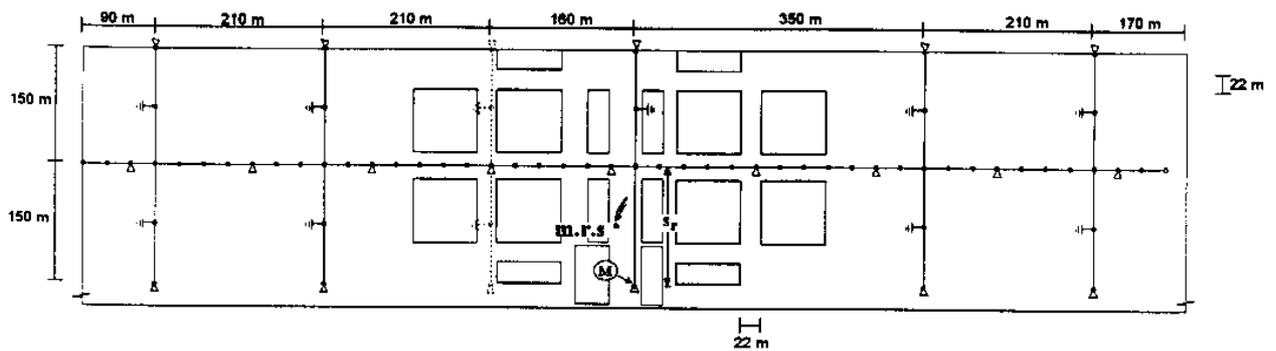
FIGURA 14: CONFIGURAÇÕES DE TESTE 1, 2 E 3. TENSÕES MEDIDAS JUNTO AO TRANSFORMADOR DO TRONCO (M: PONTO DE MEDIÇÃO). DISTÂNCIA d ENTRE O TRONCO E O LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA (m.r.s.): 20 m.
 QUADRADOS E RETÂNGULOS CORRESPONDEM A EDIFICAÇÕES;
 TRIÂNGULOS REPRESENTAM TRANSFORMADORES. RAMAIS EM TRACEJADO AUSENTES.
 CONDUTOR NEUTRO ATERRADO NOS PONTOS INDICADOS E EM TODOS OS PONTOS DE INSTALAÇÃO DE TRANSFORMADORES.
 PÁRA-RAIOS INSTALADOS NOS FINAIS DOS RAMAIS E A DISTÂNCIAS s_e E s_d DO PONTO DE MEDIÇÃO.
 a) CONFIGURAÇÃO 1 ($h_e = 0$ m) b) CONFIGURAÇÃO 2 ($h_e = 5$ m) c) CONFIGURAÇÃO 3 ($h_e = 15$ m)



(a)



(b)



(c)

FIGURA 15: CONFIGURAÇÕES DE TESTE 4, 5 E 6. TENSÕES MEDIDAS JUNTO AO TRANSFORMADOR DO RAMAL MAIS PRÓXIMO AO O LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA (m.r.s.). M: PONTO DE MEDIÇÃO. DISTÂNCIA d ENTRE O TRONCO E O m.r.s.: 70 m; DISTÂNCIA d_l ENTRE O m.r.s. E O RAMAL MAIS PRÓXIMO: 20 m..

QUADRADOS E RETÂNGULOS CORRESPONDEM A EDIFICAÇÕES;

TRIÂNGULOS REPRESENTAM TRANSFORMADORES. RAMAIS EM TRACEJADO AUSENTES.

CONDUTOR NEUTRO ATERRADO NOS PONTOS INDICADOS E EM TODOS OS PONTOS DE INSTALAÇÃO DE TRANSFORMADORES. PÁRA-RAIOS INSTALADOS NOS FINAIS DOS RAMAIS E À DISTÂNCIA s_r DO PONTO DE MEDIÇÃO.

a) CONFIGURAÇÃO 4 ($h_e = 0$ m)

b) CONFIGURAÇÃO 5 ($h_e = 5$ m)

c) CONFIGURAÇÃO 6 ($h_e = 15$ m)

Conforme indicado na Figura 15, os ensaios foram realizados com a medição das tensões induzidas junto a um transformador localizado na extremidade de um ramal. A Figura 16 apresenta as tensões fase-terra no transformador localizado na extremidade do ramal mais próximo ao m.r.s., para uma corrente de descarga com amplitude 50 kA. As distâncias do m.r.s. ao tronco e ao ramal mais próximo foram 70 m e 20 m, respectivamente. Pára-raios foram instalados nas extremidades de todos os ramais, exceto naquele onde as tensões foram medidas (nesse, eles foram colocados a uma distância s_r da extremidade). A Figura 16 mostra as tensões para as configurações de teste de altura $h_e = 0$ m (ausência de edificações), $h_e = 5$ m e $h_e = 10$ m, respectivamente, nas proximidades da linha. Na Figura 17 são mostradas as tensões induzidas correspondentes a essas mesmas configurações, porém com a distância s_r entre o ponto de medição e os pára-raios mais próximos reduzida de 150 m para 75 m.

As amplitudes das tensões diminuem com o aumento da altura das edificações e , como mostrado nas Figuras 16 e 17, esse efeito torna-se mais evidente conforme a distância s_r aumenta. Para $s_r = 150$ m, a relação entre os valores de crista das tensões relativas às alturas $h_e = 15$ m e $h_e = 0$ m (U_{15}/U_0) é aproximadamente 0,48, enquanto que no caso correspondente a $s_r = 75$ m a relação é de aproximadamente 0,70. Se $s_r = 0$ m, as tensões fase-terra nos terminais do transformador são dadas pela soma das tensões residuais dos pára-raios e da queda de potencial no condutor de aterramento pois, conforme mencionado anteriormente, $R = 0 \Omega$ no ponto de medição. Sendo muito pequena a dependência dessas tensões em relação à altura das edificações, a relação U_{15}/U_0 será próxima da unidade. Portanto, a relação diminui (isto é, a influência das edificações aumenta), à medida que s_r aumenta.

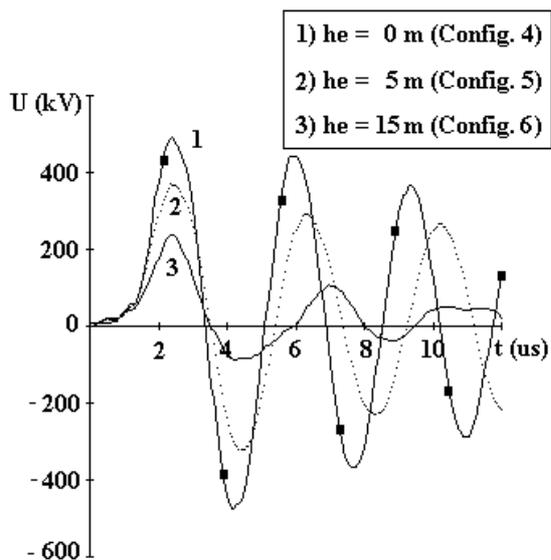


FIGURA 16: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) PARA AS CONFIGURAÇÕES DE TESTE INDICADAS NA FIGURA 15.

$I = 50$ kA; $t_f = 2 \mu$ s; $d = 70$ m; $d_r = 20$ m.

CASO 3: $s_r = 150$ m.

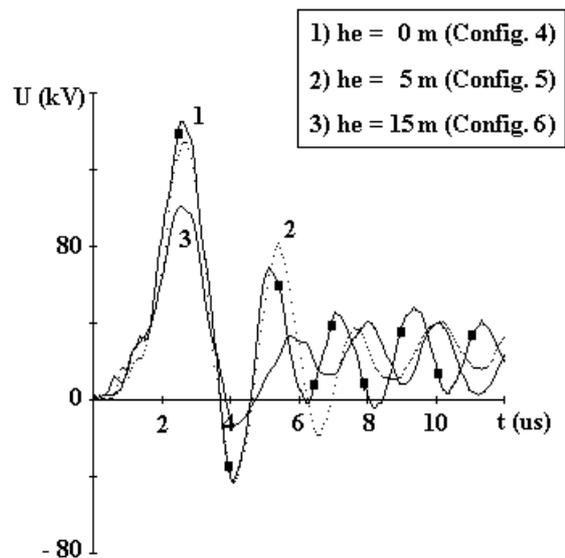


FIGURA 17: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) PARA AS CONFIGURAÇÕES DE TESTE INDICADAS NA FIGURA 15.

$I = 50$ kA; $t_f = 2 \mu$ s; $d = 70$ m; $d_r = 20$ m.

CASO 4: $s_r = 75$ m.

A Figura 18 ilustra esse mesmo comportamento de outra forma, apresentando a relação $U(s_e=148\text{m})/U(s_e=75\text{m})$ entre os valores de crista das tensões induzidas (fase-terra) nos terminais do transformador do tronco para as distâncias $s_e = 148$ m e $s_e = 75$ m entre o ponto de medição e os pára-raios mais próximos em função da altura das edificações próximas à linha. Observa-se que essa relação é de aproximadamente 1,85 quando da ausência de edificações ($h_e = 0$ m). Nesse caso a diferença entre as tensões se deve unicamente à diferença entre as distâncias s_e para os dois casos. Entretanto, a relação diminui com o aumento de h_e , sendo muito próxima à unidade (1,04) quando $h_e = 15$ m. Tal resultado mostra que, nas condições dos testes, o efeito de blindagem proporcionado pelas edificações (para o caso de $h_e = 15$ m) foi grande o suficiente para tornar insignificante a influência dos pára-raios, tendo a diferença entre as tensões induzidas para as duas distâncias s_e sido reduzida de 85 % para 4%.

5. AMPLITUDE DA CORRENTE DA DESCARGA

Testes adicionais foram realizados com o objetivo de se investigar o efeito da amplitude da corrente da descarga I nas tensões induzidas. As tensões dependem fortemente de I e, para as condições dos testes, a variação foi quase linear, como mostrado nas Figuras 19 e 20, correspondentes à configuração de teste 4 indicada na Figura 15. Esse comportamento pode ser explicado basicamente pelo valor relativamente alto da resistência de aterramento (50Ω), pelo curto tempo de frente da tensão induzida e pela distância s_r entre os pára-raios e o ponto de medição. Uma diminuição do valor da resistência de aterramento ou da distância s_r tenderia a aumentar a não linearidade do sistema. Um aumento do tempo de frente da tensão induzida (devido, por exemplo,

a uma corrente de descarga com subida mais íngreme ou a uma maior distância entre a linha e o local de incidência da descarga) teria um efeito similar.

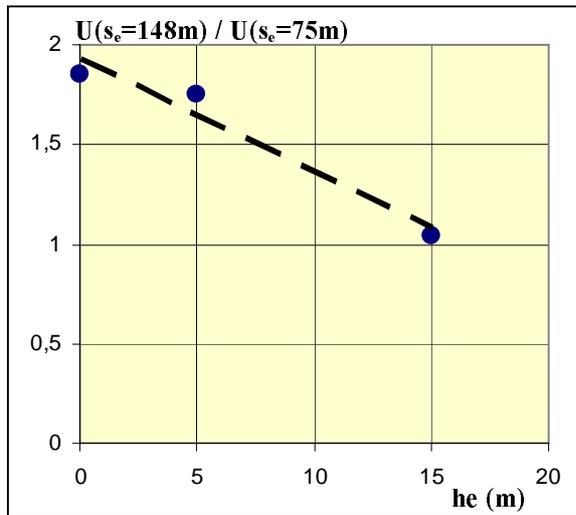


FIGURA 18: RELAÇÃO $U(s_e=148m)/U(s_e=75m)$ EM FUNÇÃO DA ALTURA DAS EDIFICAÇÕES PRÓXIMAS À LINHA (h_e) PARA AS CONFIGURAÇÕES DE TESTE INDICADAS NA FIGURA 14.
 $I = 34 \text{ kA}$; $t_f = 2 \mu\text{s}$; $d = 20 \text{ m}$.

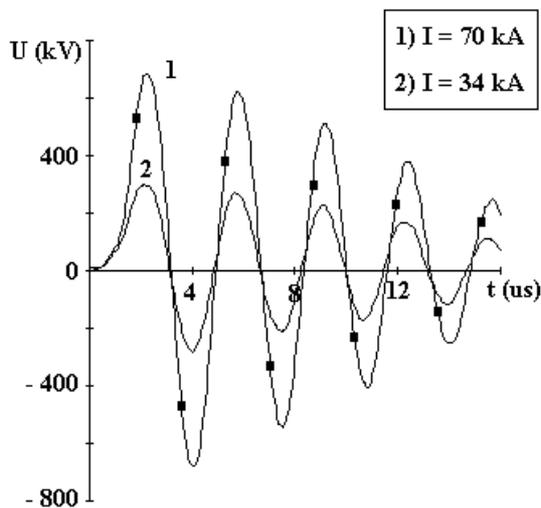


FIGURA 19: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) PARA CORRENTES COM AMPLITUDES DE 34 kA E 70 kA . CONFIGURAÇÃO DE TESTE 4 (FIGURA 15).
 $t_f = 2 \mu\text{s}$; $d = 70 \text{ m}$; $d_l = 20 \text{ m}$.
 CASO 5: $s_r = 150 \text{ m}$.

Nota-se que as tensões induzidas podem atingir valores bastante elevados, em particular nos casos indicados na Figura 19, onde a distância considerada entre o transformador e o conjunto mais próximo de pára-raios foi de 150 m . Outro fator que contribui significativamente para tais resultados é a distância entre o local de

incidência da descarga e o ramal. Tanto no Caso 5 como no Caso 6 (Figuras 19 e 20, respectivamente), adotou-se a distância $d_l = 20 \text{ m}$. Distâncias pequenas como essa são possíveis no caso de linhas urbanas dada a presença de estruturas altas em suas proximidades.

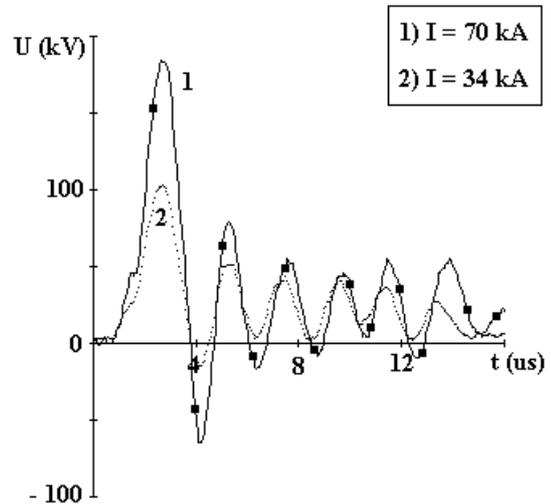


FIGURA 20: TENSÕES INDUZIDAS U (FASE-TERRA) PARA CORRENTES COM AMPLITUDES DE 34 kA E 70 kA . CONFIGURAÇÃO DE TESTE 4 (FIGURA 15).
 $t_f = 2 \mu\text{s}$; $d = 70 \text{ m}$; $d_l = 20 \text{ m}$.
 CASO 6: $s_r = 75 \text{ m}$.

6. CONCLUSÕES

As tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas em suas proximidades podem ser afetadas de modo significativo pelos ramos e pelas edificações nas vizinhanças da linha. A presença de edificações próximas pode reduzir os campos eletromagnéticos associados às descargas atmosféricas e, conseqüentemente, as tensões induzidas. Deve-se ressaltar, entretanto, que estruturas altas podem atrair descargas a distâncias muito curtas em relação à linha, de modo que sobretensões elevadas podem ser induzidas mesmo no caso de descargas com intensidades relativamente moderadas.

É relevante mencionar, contudo, que nos testes realizados as edificações foram simuladas por meio de estruturas metálicas conectadas ao solo, o que é a situação mais favorável em termos de redução das amplitudes das tensões induzidas. Embora para o fenômeno estudado árvores e edifícios possam ser considerados bons condutores [11], uma simulação perfeita por meio do modelo em escala 1:50 construído requereria o uso de materiais com condutividades 50 vezes maiores que aquelas correspondentes aos materiais utilizados em edificações reais, visto que o fator de escala para a condutividade é o inverso daquele para comprimentos. Por essa razão os resultados apresentados são qualitativos e devem ser vistos como limites, isto é, em situações reais

a redução das tensões causada pela presença de estruturas próximas à linha será menor do que aquela obtida através do testes realizados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Parrish, E. Lightning-caused distribution transformer outages on a Florida distribution system. IEEE Trans. on Power Delivery, v. 6, n. 2, pp 880-887, Apr. 1991.
- [2] Gouvêa, M. R. Análise de taxas de falhas em transformadores de distribuição. Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, 1992.
- [3] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. IEEE Trans. on Magnetics, v. 34, n. 5, pp. 2799-2802, Sep. 1998.
- [4] Agrawal, A. K.; Price, H. J. and Gurbaxani, S. H. Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, v. EMC-22, n. 2, pp. 119-129, May 1980.
- [5] Nucci, C. A.; Borghetti, A.; Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Lightning-induced voltages on distribution overhead lines: comparison between experimental results from a reduced-scale model and most recent approaches. Proc. of the 24th Int. Conf. on Lightning Protection (24th ICLP), Birmingham, 1998, v. 1, pp. 314-320.
- [6] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Lightning induced voltages on distribution lines close to buildings. Proc. of the 25th Int. Conf. on Lightning Protection (25th ICLP), Rhodes, 2000, v. B, pp. 558-563.
- [7] Yamamoto, K.; Kawasaki, Z.; Matsuura, K.; Sekioka, S.; Gengi, T.; Yokoyama, S. Reduction effect of reinforced concrete building on lightning induced voltage on distribution power line by using analogue simulation method. Proc. of the VI Int. Symp. on Lightning Protection (VI SIPDA), São Paulo, pp. 83-88, 2000.
- [8] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. An Experimental study of lightning induced voltages by means of a scale model, Proc. of the 21st Int. Conf. on Lightning Protection (21st ICLP), paper 4.08, pp. 195-199, Berlin, 1992.
- [9] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. "Simulação de pára-raios em escala reduzida para estudo de sobretensões". **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXVI, n. 293, pp. 100-109, Ago. 1998.
- [10] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Use of surge arresters for protection of overhead lines against nearby lightning, Proc. of the 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering (10th ISH), vol. 5, pp. 213-216, Montreal, 1997.
- [11] Short, T. A. Lightning protection: analyzing distribution designs. IEEE Computer Applications in Power, v. 5, n. 2, pp. 51-55, Apr. 1992.