

**Surtos transferidos à rede de baixa tensão via transformador –  
influência da carga conectada ao secundário**

**A. Piantini e A. G. Kanashiro – IEE/USP e J. C. Carneiro - CPFL**

E-mail: [piantini@iee.usp.br](mailto:piantini@iee.usp.br)

**Palavras-chave** – descargas atmosféricas, modelagem, tensões transferidas, transformadores de distribuição.

**Resumo** – Uma das formas de sobretensão na rede secundária diz respeito aos surtos transferidos pelo transformador quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas ou próximas à rede. Os modelos normalmente utilizados para avaliação desses surtos são em geral inadequados ou excessivamente complexos, além de raramente considerar os efeitos da carga no secundário. Este trabalho apresenta um novo modelo para representação de transformadores de distribuição para análise dos surtos transferidos à rede secundária, considerando-se os efeitos da carga. A validação do modelo foi confirmada através de comparações entre resultados de simulações computacionais e de ensaios realizados em laboratório. Uma das características do modelo é a sua simplicidade, sendo o mesmo facilmente implementável em programas como o EMTP/ATP. São apresentados os resultados dos testes e a avaliação das tensões transferidas ao secundário, em termos de amplitude e forma de onda, para várias condições de carga. O artigo apresenta também exemplos de aplicação do modelo desenvolvido, ilustrando as formas de onda de correntes e tensões transferidas em diversos pontos de uma rede secundária típica quando da ocorrência de descargas diretas no primário.

## 1. INTRODUÇÃO

Os surtos de origem atmosférica são os principais causadores de perturbações nas redes de distribuição, influenciando significativamente os indicadores de qualidade da energia fornecida. O conhecimento dos diversos mecanismos de indução das sobretensões se faz então necessário, a fim de se poder avaliar adequadamente as técnicas para minimização do problema. Alguns resultados de pesquisas a respeito das características das tensões induzidas em linhas de distribuição de baixa tensão são apresentados em [1 - 4].

Uma das formas de sobretensão na rede secundária diz respeito aos surtos transferidos do primário, via transformador. A avaliação desses surtos requer a utilização de modelos confiáveis para a representação dos elementos envolvidos no fenômeno. No que se refere aos transformadores de distribuição, contudo, os modelos normalmente utilizados para essa finalidade são em geral inadequados, como o modelo PI-capacitivo, ou bastante complexos [5]. Importante se faz ressaltar que mesmo

estes últimos têm em geral sua validade restrita à condição em vazio, impossibilitando desse modo a determinação do efeito da carga conectada ao secundário nas amplitudes e formas de onda dos surtos transferidos [6-9].

A determinação das tensões transferidas depende do conhecimento das características das tensões induzidas no primário e do comportamento do transformador em altas frequências. As tensões induzidas devido a descargas atmosféricas têm sido tema de várias pesquisas, sendo o fenômeno estudado com o objetivo de se avaliar o desempenho de linhas aéreas face a descargas atmosféricas e de se determinar os métodos de proteção mais adequados [10 - 16].

Com relação ao comportamento dos transformadores, deve-se ressaltar a inexistência de um modelo simples e que represente adequadamente o transformador em altas frequências tendo em vista o fenômeno de transferência de surtos e que também leve em consideração o efeito da carga conectada ao secundário. Assim, apesar dos modelos propostos em [5-9], o desenvolvimento de um modelo que leve em conta o efeito da carga conectada ao secundário representaria uma contribuição importante para o estudo das tensões transferidas à rede secundária. Apenas para ilustrar a importância do assunto, são mostradas em [17] comparações entre os valores das tensões transferidas utilizando-se o modelo PI-capacitivo e o modelo de Vaessen [6], com o transformador simulado na condição a vazio. Os resultados mostram diferenças significativas entre as tensões transferidas calculadas com os dois modelos.

Em [18] foi apresentado um modelo extremamente simples e confiável para representação de transformadores de distribuição trifásicos, porém limitado à condição em aberto. Esse modelo propiciou o desenvolvimento dos estudos apresentados em [19, 20] a respeito das tensões transferidas ao secundário. Os estudos evoluíram, sendo apresentado em [21] um modelo que representa razoavelmente bem o transformador de distribuição também na condição sob carga. O desenvolvimento foi baseado nas características de transferência (relação entre as tensões do secundário e do primário, em função da frequência) de um transformador de distribuição típico. Um aprimoramento do modelo foi apresentado em [22].

Os bons resultados obtidos motivaram a continuidade da pesquisa, passando-se a investigar a aplicabilidade do modelo proposto para outros transformadores de

distribuição. Foram então considerados nove transformadores, de diferentes fabricantes e potências nominais, sendo obtidas as suas características em função da frequência, resultando no desenvolvimento de um modelo genérico para representação de transformadores de distribuição trifásicos [23].

Este trabalho apresenta o modelo proposto em [23], sendo mostrados os resultados dos testes realizados com os transformadores de 30 kVA e de 45kVA, considerando-se a aplicação de impulsos de tensão com a forma de onda normalizada (1,2/50  $\mu$ s). As características das tensões transferidas ao secundário são avaliadas, analisando-se as amplitudes e formas de onda, para várias condições de carga. O modelo apresenta resultados confiáveis, sendo simples e de fácil implementação em programas computacionais para o estudo de transitórios .

## 2. MODELO DE TRANSFORMADOR

Para o desenvolvimento do modelo levou-se em consideração o fato de que as tensões induzidas nas linhas de distribuição têm aproximadamente a mesma amplitude e forma de onda nas três fases, em virtude do espaçamento entre os condutores fase ser em geral muito menor que a distância da linha até o local de incidência da descarga. Além disso, os transformadores de distribuição são normalmente protegidos por pára-raios, resultando em tensões com características semelhantes nos terminais do primário do transformador. O transformador de distribuição foi então considerado como um quadripolo, sendo determinadas as suas impedâncias em função da frequência. Considerando-se o quadripolo linear e invariante no tempo, e sendo  $V_1$ ,  $I_1$  e  $V_2$ ,  $I_2$  as tensões e correntes na entrada e saída do quadripolo, respectivamente, a relação (1) pode ser obtida:

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned} \quad (1),$$

onde:

$Z_{11}$  = impedância de entrada do quadripolo;

$Z_{22}$  = impedância de saída do quadripolo;

$Z_{12}$  e  $Z_{21}$  = impedâncias de transferência do quadripolo.

Com base nessa relação, o circuito equivalente mostrado na Figura 1 foi estabelecido, onde:

$Z_1$  = impedância entre o primário e o terra;

$Z_2$  = impedância entre o secundário e o terra;

$Z_3$  = impedância entre o primário e o secundário.

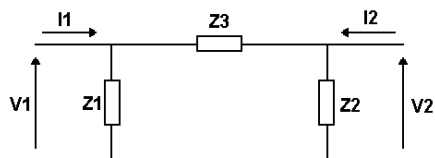


FIGURA 1 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO QUADRIPOLO.

Considerando-se a expressão (1) e o circuito equivalente da Figura 1, pode-se determinar as expressões relacionando-se  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  e  $Z_{21}$  a  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ . Em [23] as características do transformador, representadas pelas impedâncias  $Z_{11}$ ,  $Z_{21}$  e  $Z_{22}$ , foram determinadas através da utilização de um gerador de sinais, sendo aplicados valores de tensão, com forma de onda senoidal, na faixa de frequência de 10 kHz a 1 MHz. Nesse desenvolvimento utilizou-se como excitação a forma de onda de impulso normalizada (1,2/50  $\mu$ s), sendo registrados os valores de tensão e de corrente para obtenção das impedâncias  $Z_{11}$ ,  $Z_{21}$  e  $Z_{22}$ . Para a determinação das impedâncias e da função de transferência os sinais registrados no domínio do tempo foram decompostos, obtendo-se o espectro de frequências de cada sinal. A partir desses dados foram determinados os módulos e as fases das impedâncias e da função de transferência em função da frequência. Esse procedimento foi adotado em virtude da rapidez quanto à obtenção das características dos transformadores em laboratório.

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para obtenção das impedâncias  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  e  $Z_{21}$  em função da frequência. Considerando-se que as tensões incidem com a mesma amplitude e forma de onda nas três fases, as configurações para a determinação da função de transferência e das impedâncias de entrada, de transferência e de saída correspondem, no caso da excitação ser aplicada no enrolamento primário, aos terminais primários curto-circuitados e secundários em aberto e, no caso de excitação pelo enrolamento secundário, aos terminais secundários curto-circuitados e primários em aberto. O neutro permanece aterrado em ambas as configurações.

Para o desenvolvimento do modelo foi utilizado um transformador de distribuição trifásico de 30 kVA, 13,8 kV / 220-127 V, conectado na alta tensão em delta e na baixa tensão em estrela. O transformador de 30 kVA foi submetido à excitação impulsiva com forma de onda normalizada para determinação das impedâncias  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  e  $Z_{12}$ . Os valores de tensão foram medidos utilizando-se um divisor resistivo e os valores de corrente foram obtidos através de um derivador (resistor "shunt"). Foi utilizado um osciloscópio digital de 250 MHz para aquisição dos sinais. A Figura 2 mostra o circuito utilizado para a determinação de  $Z_{11}$ .

Aplicou-se então um impulso de tensão ( $V'_1$ ) simultaneamente nos terminais  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$  e, através do resistor "shunt", obteve-se o valor de corrente ( $I'_1$ ). O terminal  $X_0$  e o tanque do transformador foram aterrados através do resistor "shunt". Com base nos valores de  $V'_1$  e  $I'_1$  foram determinados  $V_1$  e  $I_1$ , sendo consideradas as constantes do sistema de medição, ou seja, a relação do divisor (172:1), o valor do resistor "shunt" (5  $\Omega$ ) e a impedância característica do cabo coaxial (75  $\Omega$ ). Os valores de tensão  $V_1$  e de corrente  $I_1$  foram registrados no domínio do tempo e para a determinação do módulo e da fase da impedância  $Z_{11}$  os sinais foram decompostos utilizando-se a série de Fourier, obtendo-se os

componentes em frequência de cada sinal. A impedância  $Z_{11}$  foi determinada através da relação  $V_1/I_1$ . Para a determinação da impedância de saída  $Z_{22}$  foi utilizado procedimento análogo ao descrito na determinação da impedância  $Z_{11}$ , sendo o impulso de tensão  $V_2$  aplicado simultaneamente nos terminais  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ . A corrente  $I_2$  no secundário foi obtida através do resistor "shunt". O módulo e a fase da impedância  $Z_{22}$  foram determinados através da relação  $V_2/I_2$ , sendo  $V_2$  e  $I_2$  obtidos a partir de  $V_2'$  e  $I_2'$  de forma análoga à determinação de  $V_1$  e  $I_1$  a partir de  $V_1'$  e  $I_1'$ . Para a determinação da impedância  $Z_{21}$  foi aplicado impulso de tensão nos terminais primários, sendo obtida a tensão transferida  $V_2$  no terminal  $X_3$  do enrolamento secundário e a corrente  $I_1$  que circula pelo resistor "shunt". O módulo e a fase da impedância  $Z_{21}$  foram determinados através da relação  $V_2/I_1$ .

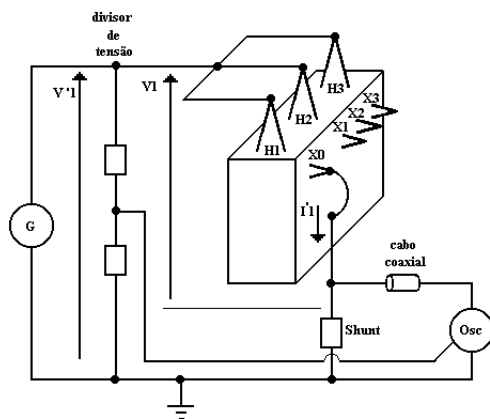


FIGURA 2 – CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DE  $Z_{11}$ .

A impedância de entrada  $Z_{11}$  apresentou comportamento capacitivo, pois a excitação foi aplicada nos terminais primários simultaneamente e os enrolamentos estão conectados em delta. Por sua vez, o comportamento da impedância de saída  $Z_{22}$  apresentou-se indutivo para as frequências mais baixas e capacitivo para as frequências mais elevadas. Para as frequências mais baixas prevalece o efeito indutivo do enrolamento secundário, pois as bobinas referentes a cada fase são conectadas em paralelo durante a aplicação do impulso de tensão nos terminais secundários do transformador. Para frequências mais elevadas prevalece o efeito capacitivo, com o módulo da impedância  $Z_{22}$  diminuindo com a frequência. Comportamento semelhante foi observado para a impedância de transferência  $Z_{21}$ .

O passo seguinte consistiu na determinação das impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  em função da frequência utilizando-se os valores das impedâncias  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$  e  $Z_{21}$ . A partir das características de  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  foi investigada a representação de cada uma dessas impedâncias, separadamente, através de elementos resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C).

A representação da impedância  $Z_1$  foi feita através de um capacitor, sendo o seu valor estabelecido em função do comportamento de  $Z_1$  em função da frequência.

A impedância  $Z_2$  apresentou comportamento indutivo até a frequência de aproximadamente 800 kHz; a partir daí tornou-se predominantemente capacitivo. Para a representação desse comportamento foi utilizado um circuito ressonante paralelo constituído de elementos RLC. Com base no comportamento de  $Z_2$  foram determinados para o circuito RLC, na frequência de ressonância  $\omega_0$ , os valores da resistência R e do produto L.C. Em seguida foram determinados os valores da indutância L e da capacitância C. Utilizando-se o circuito e os parâmetros determinados conforme procedimento descrito, foram realizadas simulações buscando-se melhor representação em relação ao comportamento de  $Z_2$ .

Com relação à impedância  $Z_3$ , o espectro de frequências foi dividido em três intervalos, onde procurou-se caracterizar o seu comportamento em cada um deles. Um circuito RLC série foi considerado adequado para representar a impedância  $Z_3$  entre 200 kHz e 950 kHz. A frequência de ressonância foi fixada em 800 kHz, sendo ajustados os parâmetros do circuito. Para frequências menores que 200 kHz o procedimento foi similar e os parâmetros do circuito RLC série foram ajustados considerando-se a frequência de ressonância em 130 kHz. Para frequências superiores a 950 kHz o comportamento foi representado através de um capacitor. Os parâmetros de cada circuito RLC série foram determinados na frequência de ressonância  $\omega_0$ , onde foram obtidos os valores da resistência R e do produto L.C do circuito ressonante. Em seguida foram determinados os valores da capacitância C e da indutância L. A impedância  $Z_3$  foi então representada considerando-se a superposição dos circuitos ressonantes série e do capacitor, os quais foram associados em paralelo. Um resistor R foi colocado em série com esse circuito paralelo de modo a ajustar os valores do módulo de  $Z_3$ . Após a determinação dos elementos R, L e C foram realizadas simulações procurando-se obter melhor representação do comportamento de  $Z_3$ .

A partir dessa etapa foram realizadas simulações com o circuito equivalente, sendo as impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  representadas pelos parâmetros R, L e C determinados anteriormente. Através de simulações computacionais foram comparadas as curvas da função de transferência e das impedâncias de entrada, de transferência e de saída, quanto aos módulos e fases, apresentadas pelo circuito equivalente e pelo transformador representado pelo quadripolo. Em função dos resultados, os parâmetros do circuito equivalente foram ajustados.

O circuito equivalente e o quadripolo do transformador foram comparados com base no comportamento da função de transferência (relação entre  $V_2$  e  $V_1$  – tensões no secundário e no primário em função da frequência) e das impedâncias de entrada, de saída e de transferência. Em uma comparação inicial foi constatada a necessidade de ajustar os valores dos parâmetros do circuito

equivalente para melhor aproximação da relação de ganho, sendo alterados os valores dos parâmetros correspondentes aos circuitos que representam as impedâncias  $Z_2$  e  $Z_3$ .

Apresenta-se em [22] o circuito equivalente, para o transformador de 30 kVA considerado, onde podem ser identificados os parâmetros resistivos, indutivos e capacitivos referentes às impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$ . Um capacitor representa a impedância  $Z_1$  e um circuito ressonante paralelo RLC representa a impedância  $Z_2$ . Por sua vez, a impedância  $Z_3$  é representada por um resistor em série com um circuito paralelo composto de dois circuitos ressonantes RLC e de um capacitor. Foram comparados os comportamentos das impedâncias de entrada, de saída e de transferência do quadripolo e do circuito equivalente. Para obtenção das impedâncias do circuito equivalente foi utilizado o programa PSpice. Um gerador de sinais foi utilizado para a excitação senoidal na entrada do circuito equivalente. A validação do modelo de transformador foi realizada comparando-se os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios de laboratório [22]. A carga foi colocada diretamente nos terminais secundários do transformador. Foram comparadas as respostas do modelo e do transformador quando da excitação através de tensão de impulso com forma de onda normalizada e com formas de onda típicas de tensões induzidas por descargas atmosféricas.

A generalidade do modelo foi investigada aplicando-se a mesma metodologia em nove transformadores de distribuição típicos, trifásicos, 13,8 kV / 220 – 127 V, de diferentes fabricantes e potências nominais variando de 30 kVA a 225 kVA, conectados na alta tensão em delta e na baixa tensão em estrela.

Os resultados dos ensaios realizados para a validação do modelo são mostrados em [23], sendo que a Tabela 1 apresenta os parâmetros referentes aos transformadores de 30 kVA e de 45 kVA. A Figura 3 mostra o modelo obtido, válido para os transformadores considerados.

TABELA 1 - PARÂMETROS DO MODELO PARA OS TRANSFORMADORES DE 30 kVA E 45 kVA.

Parâmetros	30 kVA (Fab. A)	45 kVA (Fab. B)
R1 (kΩ)	-	-
R2 (kΩ)	14	0,6
R3 (kΩ)	0,8	1,0
R5 (kΩ)	-	9,0
R6 (kΩ)	1,1	-
R7 (kΩ)	1,62	20
C1 (pF)	493	773
C2 (pF)	94,8	53
C3 (pF)	21,51	110
C4 (pF)	50	1,0
C5 (pF)	-	500
C7 (pF)	759,5	1000
L2 (mH)	16	1,147
L3 (mH)	1,84	0,2
L5 (mH)	-	0,015
L7 (mH)	0,05	0,020

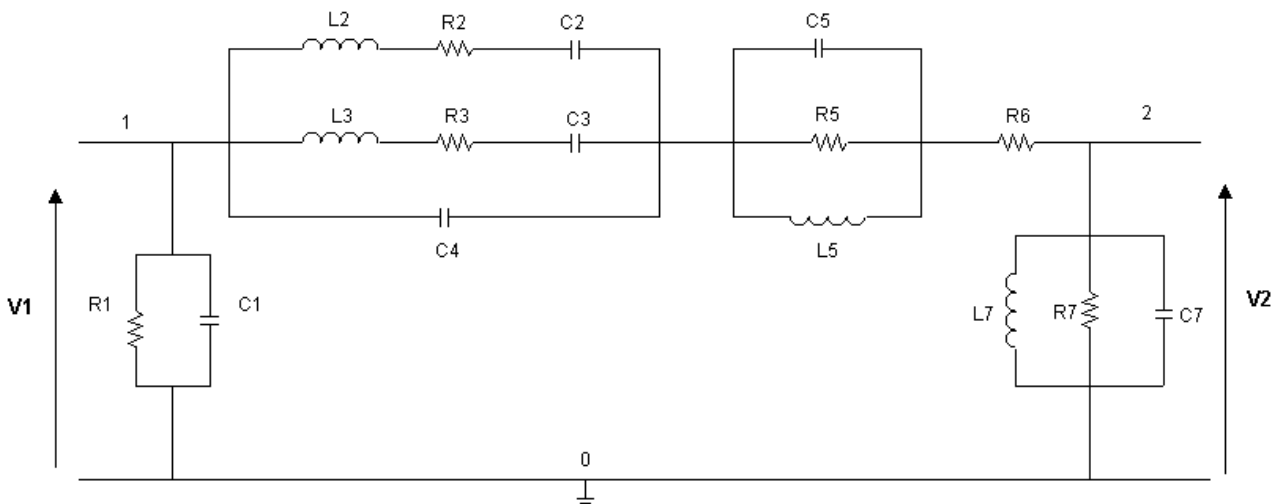


FIGURA 3 – MODELO PARA REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICOS TENDO EM VISTA A TRANSFERÊNCIA DE SURTOS.

### 3. RESULTADOS

Neste item são apresentadas formas de onda de tensões transferidas ao secundário dos transformadores de distribuição de 30 kVA e de 45 kVA obtidas através de ensaios, em várias condições de carga. São também apresentadas comparações com os resultados obtidos através da utilização do modelo desenvolvido para representação dos transformadores. Nos testes, impulsos de tensão com a forma de onda normalizada (1,2/50  $\mu$ s) foram aplicados aos terminais (interligados) de alta tensão dos transformadores, sendo medidas, simultaneamente, as tensões transferidas ao secundário. Inicialmente os ensaios foram realizados com o transformador em vazio, sendo em seguida conectadas, ao secundário, cargas equilibradas, resistivas e capacitivas, sendo também registradas as tensões transferidas.

As tensões transferidas foram medidas no terminal X<sub>3</sub> do enrolamento secundário. Foi utilizado um gerador de impulsos, sendo as tensões no primário medidas através de um divisor de tensão e as tensões no secundário, através da ponta de prova do osciloscópio. Os arquivos correspondentes aos impulsos de tensão aplicados nos terminais primários do transformador foram utilizados para simulações no programa PSpice, obtendo-se desta forma as tensões transferidas na saída do modelo.

A Figura 4 mostra a forma de onda da tensão aplicada aos terminais de alta tensão dos transformadores. Em alguns casos o valor de crista foi variado, embora a forma de onda tenha sido mantida inalterada em todas as aplicações. As Figuras 5 a 10 mostram as comparações entre as tensões transferidas apresentadas pelo modelo e pelos transformadores de 30 kVA e de 45 kVA, respectivamente, sob diferentes condições de carga.

Embora a análise apresentada neste item se refira à tensão de impulso aplicada (onda normalizada), em [19] são consideradas outras situações, sendo no entanto as tensões transferidas avaliadas com o transformador na condição em aberto.

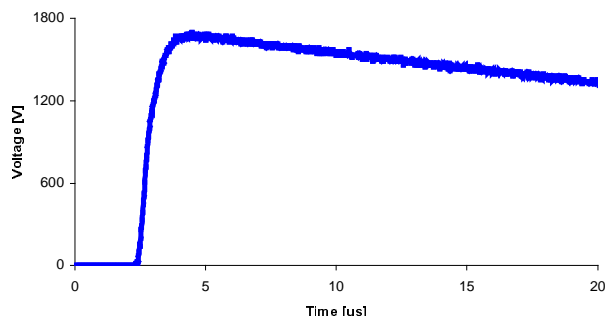


FIGURA 4 – TENSÃO COM FORMA DE ONDA NORMALIZADA (1,2/50  $\mu$ s), APLICADA AOS TERMINAIS DE ALTA TENSÃO DOS TRANSFORMADORES.

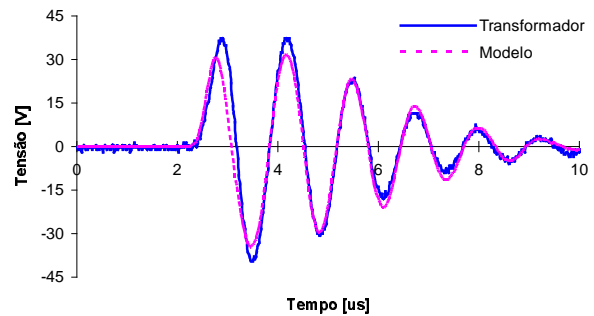


FIGURA 5 – TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 30 kVA, EM VAZIO. VALOR DE CRISTA DA TENSÃO APLICADA: 1,70 kV.

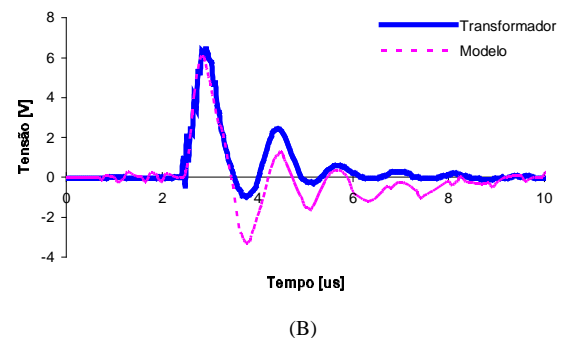
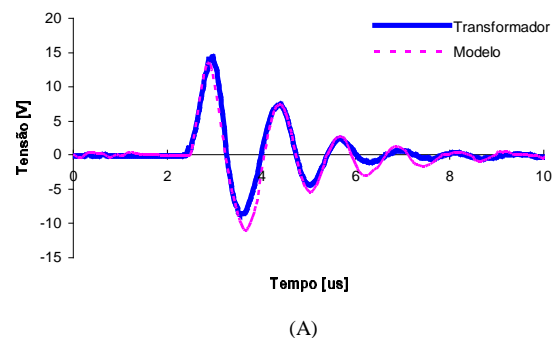
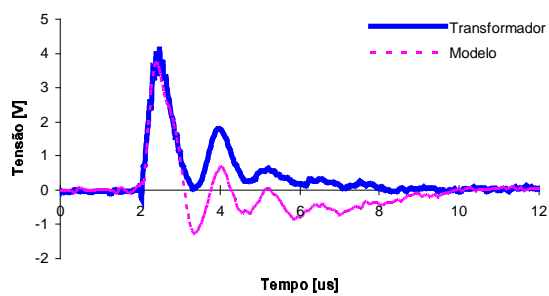
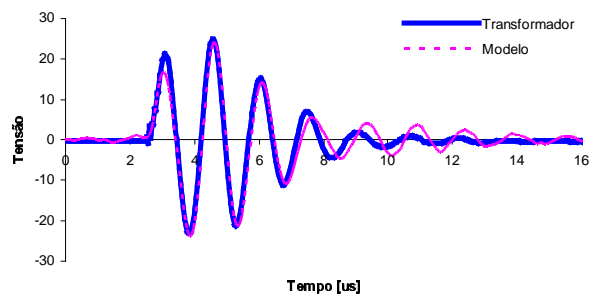


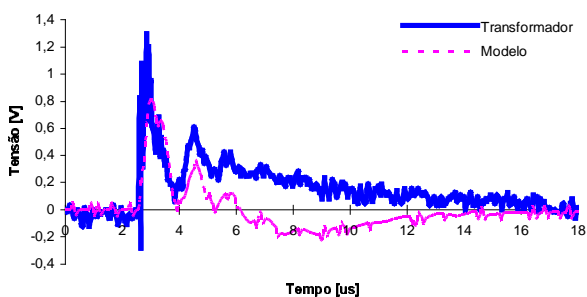
FIGURA 6 – TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 30 kVA, COM CARGAS RESISTIVAS (500  $\Omega$  E 100  $\Omega$ ) NO SECUNDÁRIO. VALOR DE CRISTA DAS TENSÕES APLICADAS: 946 V.  
A) 500  $\Omega$  B) 100  $\Omega$



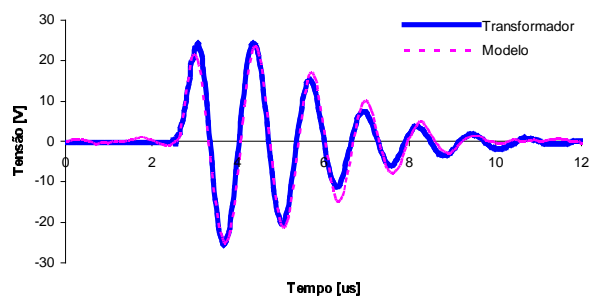
(A)



(A)



(B)



(B)

FIGURA 7 – TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 30 kVA, COM CARGAS RESISTIVAS ( $50\ \Omega$  E  $10\ \Omega$ ) NO SECUNDÁRIO. VALORES DE CRISTA DAS TENSÕES APLICADAS: 946 V PARA O CASO (A) E 1,13 kV PARA O CASO (B).  
A)  $50\ \Omega$       B)  $10\ \Omega$

FIGURA 8 – TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 30 kVA, COM CARGAS CAPACITIVAS ( $390\ \text{pF}$  E  $10\ \text{pF}$ ) NO SECUNDÁRIO. VALOR DE CRISTA DAS TENSÕES APLICADAS: 1,13 kV.  
A)  $390\ \text{pF}$       B)  $10\ \text{pF}$

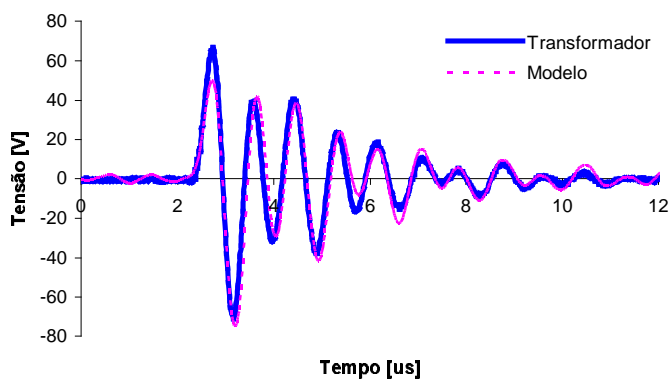
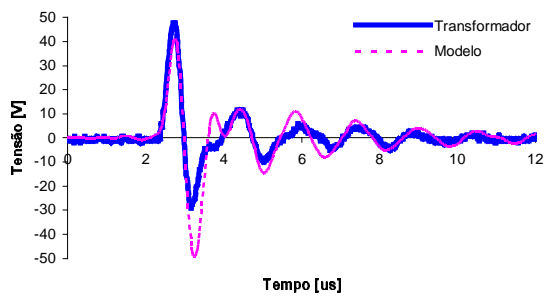
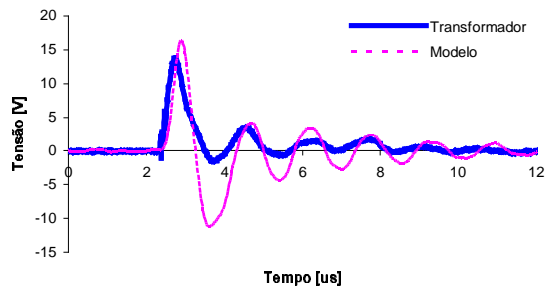


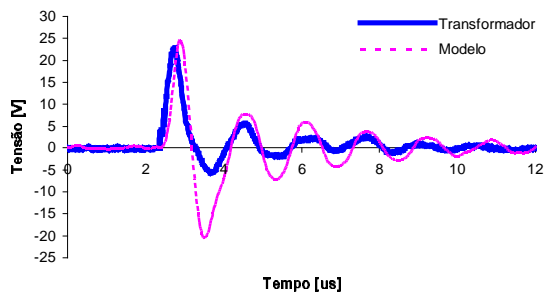
FIGURA 9 – TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 45 kVA, EM VAZIO. VALOR DE CRISTA DA TENSÃO APLICADA: 1,87 kV.



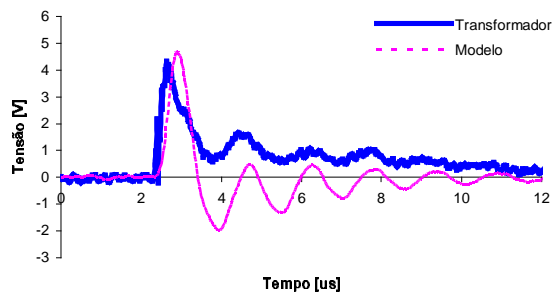
(A)



(C)



(B)



(D)

FIGURA 10 -- TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 45 kVA, COM CARGAS RESISTIVAS (510  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 50  $\Omega$  E 10  $\Omega$ ) NO SECUNDÁRIO.

VALORES DE CRISTA DAS TENSÕES APLICADAS: 1,87 kV

PARA OS CASOS (A), (C) E (D) E 1,86 kV PARA O CASO (B).

A) 510  $\Omega$

B) 100  $\Omega$

C) 50  $\Omega$

D) 10  $\Omega$

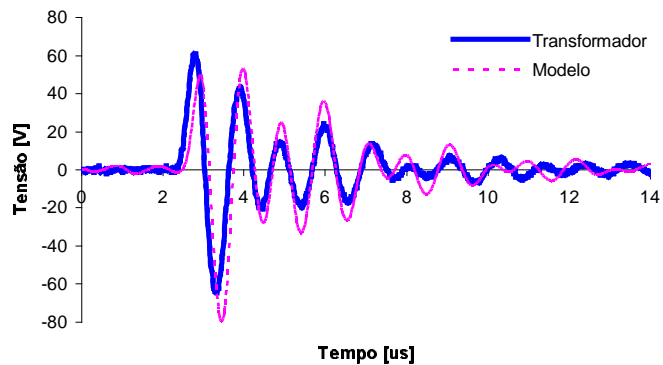


FIGURA 11 -- TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 45 kVA, COM CARGA CAPACITIVA (330 pF). VALOR DE CRISTA DA TENSÃO APLICADA: 1,86 kV.

Visando facilitar a avaliação dos resultados, a Tabela 2 apresenta os valores máximos das tensões transferidas ao secundário considerando as ondas registradas nos ensaios e as amplitudes das tensões no primário normalizadas para 100 kV. Esse procedimento de linearização pode ser adotado tendo em vista a configuração dos dois transformadores (delta - estrela) e o fato dos ensaios terem sido realizados com os terminais de alta tensão interligados, conforme mencionado anteriormente.

TABELA 2 - VALORES MÁXIMOS DAS TENSÕES TRANSFERIDAS AO SECUNDÁRIO COM A TENSÃO NO PRIMÁRIO (1,2 / 50  $\mu$ s) NORMALIZADA PARA 100 kV.

CARGA	TENSÕES TRANSFERIDAS AO SECUNDÁRIO (kV)	
	TRANSF. 30 kVA	TRANSF. 45 kVA
Em vazio	2,34	3,78
10 pF	2,27	--
390 pF	2,21	--
330 pF	--	3,48
510 $\Omega$	--	2,54
500 $\Omega$	1,52	--
100 $\Omega$	0,68	1,23
50 $\Omega$	0,44	0,74
10 $\Omega$	0,11	0,23

Comparando-se os resultados correspondentes aos transformadores de 30 kVA e de 45 kVA, constata-se que a este último correspondem as tensões transferidas de maiores amplitudes, em todas as situações analisadas. A relação entre os valores relativos aos dois transformadores considerados é da ordem de 70 %, embora esse número varie conforme a carga conectada ao secundário.

Conforme esperado, as amplitudes das tensões transferidas diminuem à medida que se reduz a impedância da carga. Para os dois transformadores analisados neste trabalho, a redução, em relação à condição em vazio, foi de aproximadamente 35 % para a carga de 500  $\Omega$  e de 80 % para a carga de 50  $\Omega$ .

As formas de onda das tensões transferidas apresentam em geral comportamento oscilatório amortecido, sendo este amortecimento, no caso de cargas resistivas, tanto maior quanto menor for o valor da impedância da carga. Verifica-se, por exemplo, que para cargas resistivas com impedâncias inferiores a 50  $\Omega$  as ondas podem ser consideradas praticamente unidirecionais. Por outro lado, no caso de cargas capacitivas pode ocorrer o contrário, ou seja, um amortecimento mais fraco para cargas de menor impedância.

Com relação à frequência observa-se, no caso de cargas resistivas, uma leve tendência de redução à medida que diminui o valor da impedância. Comportamento semelhante é observado no caso de cargas capacitivas, embora a variação da frequência tenda a ser mais acentuada.

As comparações entre as tensões transferidas medidas e calculadas apresentadas nas Figuras 5 a 11 mostram que o modelo proposto representa adequadamente o comportamento dos transformadores tendo em vista o fenômeno sob análise. Observa-se uma boa concordância entre as ondas medidas e aquelas previstas pelo modelo, tanto em termos dos valores de crista como das formas de onda das tensões. No caso do transformador de 30 kVA, o erro médio encontrado, considerando-se os valores de crista, foi de 10,8 %. Caso seja desconsiderado o caso correspondente à carga de 10  $\Omega$ , mais afetado por ruídos em função da baixa amplitude do sinal medido (aproximadamente 1,3 V, Figura 7b), esse valor diminui para 6,6 %. Por sua vez, o modelo do transformador de 45 kVA apresentou, nas comparações efetuadas, erro médio de 12,8 %. Esses erros podem ser considerados bastante razoáveis, especialmente quando comparados aos valores correspondentes ao circuito PI-capacitivo, freqüentemente utilizado para estimativa das tensões transferidas via transformador em função da sua simplicidade. Neste circuito, indicado na Figura 12 (VT1 e VT2 correspondem às tensões no primário e no secundário, respectivamente), o transformador é representado através das capacitâncias C1 (entre o primário e o terra), C2 (entre o secundário e o terra) e C12 (entre o primário e o secundário). A título de ilustração a Figura 13 apresenta, para o transformador de 30 kVA na condição em vazio, a tensão transferida calculada quando o mesmo é representado pelo modelo PI-capacitivo.

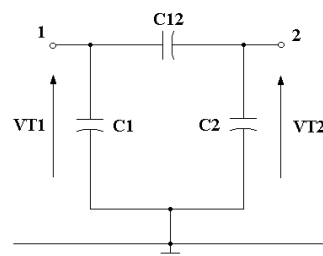


FIGURA 12 - CIRCUITO PI-CAPACITIVO. TRANSFORMADOR DE 30 kVA: C1= 0,138 nF, C2 = 0,423 nF, C12 = 0,305 nF.

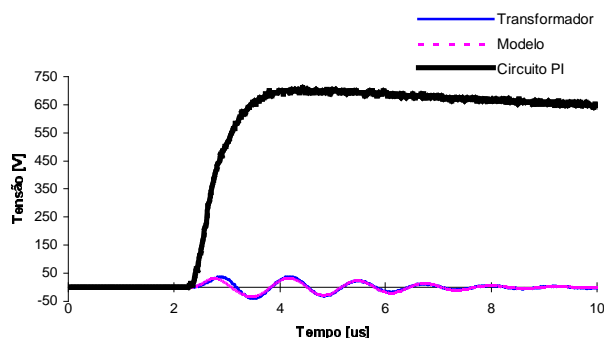


FIGURA 13 - TENSÕES TRANSFERIDAS MEDIDAS E CALCULADAS. TRANSFORMADOR DE 30 kVA, EM VAZIO. VALOR DE CRISTA DA TENSÃO APLICADA: 1,70 kV.



#### 4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM SITUAÇÕES PRÁTICAS

Para a avaliação do desempenho da rede de baixa tensão face a descargas atmosféricas e o estabelecimento de critérios para a sua proteção, faz-se necessário avaliar os níveis de surtos que são transferidos do primário para o secundário via transformador. Conforme mencionado anteriormente, tais surtos podem ser provocados tanto por descargas atmosféricas diretas no primário quanto por descargas que incidem nas proximidades da rede de distribuição. Neste item são apresentados exemplos de utilização do modelo desenvolvido para representação de transformadores de distribuição, considerando-se uma configuração típica de rede secundária. Nas simulações são representados, além do transformador, os componentes mais relevantes do sistema, como pára-raios, isoladores, resistências de aterramento, etc.. As simulações foram realizadas utilizando-se o programa ATP ("Alternative Transients Program") para a análise de surtos de tensão no transformador e nos consumidores considerando-se, ainda, a presença de dispositivos de proteção. A influência de diversos parâmetros dos componentes da rede e da descarga é investigada para o caso de descargas atmosféricas atingindo diretamente a linha primária. Adotou-se, nas simulações, uma corrente de descarga com forma de onda triangular, amplitude de 45 kA, tempo de frente de 2,25  $\mu$ s e tempo até a metade do valor de crista, na cauda, de 80  $\mu$ s. Essa corrente foi tomada como representativa das descargas com média probabilidade de ocorrência uma vez que, de acordo com os dados registrados pela CEMIG [24], o valor médio das amplitudes das correntes é de aproximadamente 47 kA.

A configuração básica utilizada nas simulações, apresentada nas Figuras 14 e 15, conta com uma linha primária de 10 km de comprimento, com condutores fase 3x336,4 MCM e neutro 1x1/0 AWG (todos condutores de alumínio), com neutro aterrado a cada 300 m. A instalação do transformador de distribuição que supre o circuito secundário analisado foi definida no ponto médio do circuito primário. Adotou-se para o circuito secundário a extensão de 300 m (150 m para cada lado do transformador), sendo o mesmo acoplado à linha primária, com condutor de fase 1/0 AWG (alumínio) e neutro comum com a linha primária. As derivações dos consumidores secundários estão definidas a cada 30 m, sendo o neutro aterrado nas entradas dos consumidores. Conforme pode-se observar na Figura 14, os blocos "E" e "D" situados, respectivamente, à esquerda e à direita do transformador, são simétricos em relação a este. A Figura 15 mostra o bloco "D" em detalhe. O bloco "E" é exatamente igual, devendo-se no entanto substituir os pontos D1, D2, ..., D167, por E1, E2, ..., E167, respectivamente. As simulações consideraram as seguintes resistências de aterramento:

$R_T$ : resistência de aterramento dos postes aterrados;

$R_p$ : resistência de aterramento dos postes não francamente aterrados;

$R_C$ : resistência de aterramento dos consumidores do circuito secundário em estudo;

$R_S$ : resistência de aterramento dos demais consumidores do sistema.

A forma de utilização da proteção da rede de baixa tensão (BT) e as sobretensões que afetam os equipamentos dependem do esquema de aterramento utilizado. No esquema TN, onde o aterramento dos equipamentos é ligado ao neutro da rede de alimentação, as grandezas de maior importância são as tensões entre os condutores fase e, principalmente, entre fases e neutro. No esquema TT, onde o aterramento dos equipamentos é independente (não ligado ao neutro da rede), as tensões dos condutores fase e neutro em relação à terra tomam grande importância. A forma de utilização de dispositivos de proteção e as grandezas avaliadas neste estudo consideram a utilização do esquema de aterramento TN nas instalações de consumidores de BT, de acordo com o padrão utilizado. Assim, nos casos que simulam a utilização de dispositivos de proteção de baixa tensão ("surge protective devices" - SPDs), estes foram conectados entre os condutores fase e neutro.

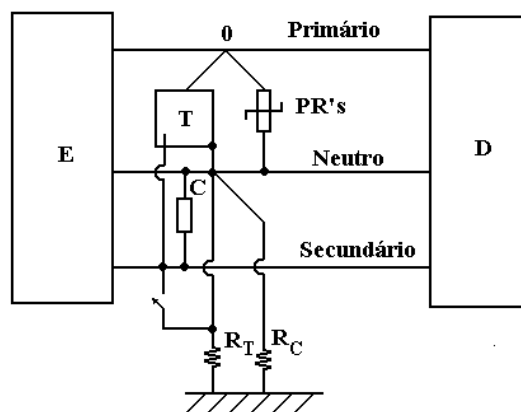


FIGURA 14 - CONFIGURAÇÃO DE REDE UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES. BLOCOS "E" E "D" DESIGNAM, RESPECTIVAMENTE, LADOS "ESQUERDO" E "DIREITO" DO TRANSFORMADOR

As seguintes configurações foram analisadas quanto ao posicionamento de SPDs na rede secundária:

- G1: sem nenhuma proteção de BT;
- G2: com proteção apenas na saída do transformador;
- G3: com proteção na saída do transformador e nas extremidades do circuito secundário.

Os componentes da rede foram representados nas simulações de acordo com o seguinte procedimento:

- a) as linhas primária e secundária foram representadas com parâmetros distribuídos dependentes de frequência;

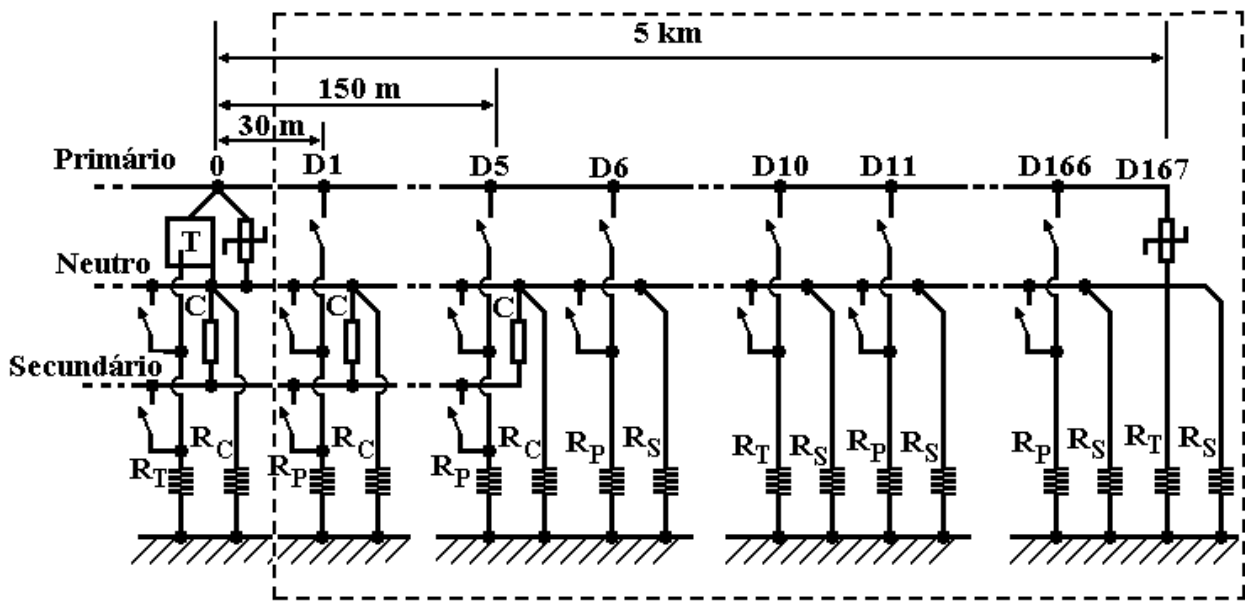


FIGURA 15 – DETALHE DO BLOCO "D" INDICADO NA FIGURA 14. O BLOCO "E" É IDÊNTICO, PORÉM COM OS PONTOS E<sub>i</sub> SUBSTITUINDO OS PONTOS D<sub>i</sub>.

- b) para a representação do transformador de distribuição utilizou-se o modelo de transformador de 30 kVA (Figura 3), com os valores dos parâmetros indicados na Tabela 1;
- c) os pára-raios foram representados através de um modelo disponível no programa ATP considerando:
- a característica  $V \times I$  típica de um pára-raios de ZnO para a proteção de média tensão;
  - tensões residuais dos SPDs para a proteção de baixa tensão de 1000 V (instalados no circuito secundário) e 500 V (instalados nas entradas de consumidores);
- d) as cargas dos consumidores de BT foram representadas por meio de resistências e capacitâncias, sendo adotados os seguintes valores:
- resistência entre fase e neutro de 30  $\Omega$ ;
  - capacitância entre os condutores (fase e neutro) e terra de 4 nF;
- e) os ramais de ligação dos consumidores de BT e os cabos de conexão dos aterramentos foram representados por meio de indutâncias (10  $\mu$ H);
- f) as correntes das descargas diretas foram simuladas por meio de uma fonte de corrente conectada à linha, tendo sido utilizada a forma de onda triangular (crescimento linear até a crista e decaimento constante após a mesma);
- g) as descargas disruptivas nos isoladores afetam as sobretensões na rede e as correntes nos SPDs de uma forma muito marcante. Os isoladores foram modelados como uma chave normalmente aberta que

se fecha quando uma determinada condição de tensão é alcançada. O modelo utilizado para controlar a ocorrência da disrupção baseia-se na grandeza denominada "efeito disruptivo" (DE) [25], a qual é definida pela expressão:

$$DE = \int_{t_0}^t [U(t) - U_0]^k dt \quad (1),$$

onde  $U(t)$  é a tensão aplicada,  $t_0$  é o instante de tempo em que  $U(t) > U_0$ ,  $U_0$  é a tensão de início de atuação e  $k$  é uma constante. Para as simulações considerou-se para  $U_0$  o valor correspondente a 90 % do valor da tensão crítica de descarga e  $k = 1$ . As tensões críticas de descarga adotadas foram 120 kV para os isoladores de média tensão e 20 kV para os isoladores de baixa tensão;

- h) os aterramentos foram representados através de resistências concentradas.

Um dos parâmetros variados foi a localização do ponto de incidência da descarga. Em função da simetria dos blocos "E" e "D" em relação ao transformador (ponto 0), as simulações sempre consideraram a incidência de descargas no trecho da linha primária situado do lado direito do transformador (bloco "D"), ou seja, em algum dos pontos  $D_i$  indicados na Figura 15. A Tabela 3 apresenta algumas das situações consideradas nas simulações.

Na Figura 16 são apresentadas as tensões fase-neutro na saída do transformador (junto aos terminais de baixa

tensão) e nas entradas dos consumidores ligados aos pontos 0, D1, D3, D5, E1, E3 e E5 para o caso de uma descarga incidindo a 300 m do transformador (ponto D10), rede com a configuração G1 (sem proteção na baixa tensão) e todas as resistências de aterramento de 100  $\Omega$ .

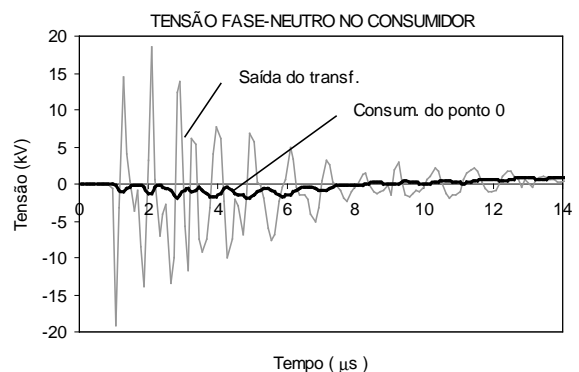
Como pode-se verificar, a tensão junto aos terminais de baixa tensão do transformador oscila com frequência próxima a 1,2 MHz e atinge valores de crista da ordem de 20 kV. Essa tensão pode ser decomposta em duas partes, sendo a primeira associada à transferência da alta para a baixa tensão através do transformador, de acordo com o fenômeno analisado no item 3. O segundo componente é devido à corrente que circula através do neutro em função da atuação do pára-raios da alta tensão e das diversas disrupções através dos isoladores, tanto do primário como do secundário. Em geral é este o componente mais significativo da tensão no secundário quando da ocorrência de descargas diretas no primário. Deve-se ressaltar que tal conclusão foi obtida a partir da utilização de um modelo comprovadamente adequado para representação do transformador. Embora o modelo apresentado neste trabalho seja uma evolução do anterior, o circuito proposto em [21] foi utilizado em [26, 27], tendo conduzido a conclusões semelhantes sob o aspecto qualitativo. Entretanto, a utilização de um modelo inadequado para essa finalidade, como o circuito PI, por exemplo, poderia conduzir a uma conclusão diferente pois, conforme ilustrado na Figura 13, o mesmo prevê tensões com amplitudes bem superiores às efetivamente transferidas. Já na entrada do consumidor ligado ao ponto 0, o valor máximo da tensão é bem inferior, de aproximadamente 2 kV. Com relação aos demais consumidores, nota-se que aqueles mais distantes dos pára-raios tendem a apresentar tensões com maiores amplitudes.

TABELA 3 - CASOS SIMULADOS.

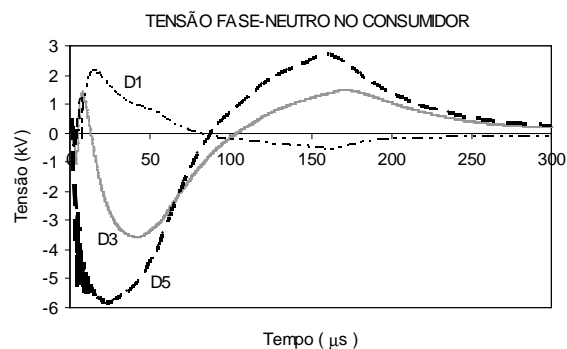
Caso	$R_T, R_C,$ $R_S, R_P$ ( $\Omega$ )	Distância do ponto de incidência da descarga ao transformador (m)	Config.	Figura
1	100	300	G1	16
2	100	300	G3	17 e 18
3	100	90	G3	19
4	300	90	G1	20
5	300	90	G2	21

A Figura 17 apresenta as tensões fase-neutro nas entradas dos consumidores para a mesma situação indicada na Figura 16, porém com a rede na configuração G3 (SPDs, na saída do transformador e nas extremidades do circuito secundário - pontos E5 e D5). Com a instalação da proteção, observa-se uma nítida redução das tensões em todos os pontos, especialmente nos terminais de BT do transformador, nos quais a tensão fica limitada ao valor da tensão residual dos SPDs. Entretanto, em função das

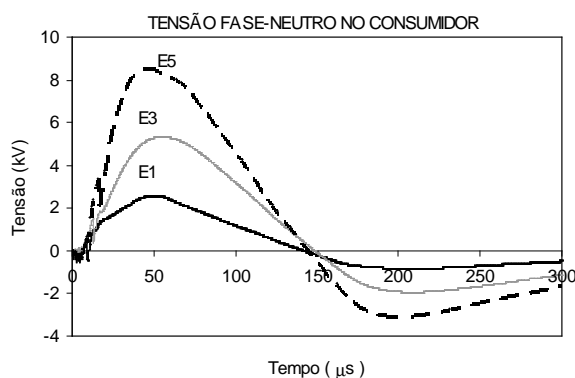
distâncias até os SPDs, as tensões nas entradas dos consumidores atingem valores superiores ao das tensões residuais.



(A)



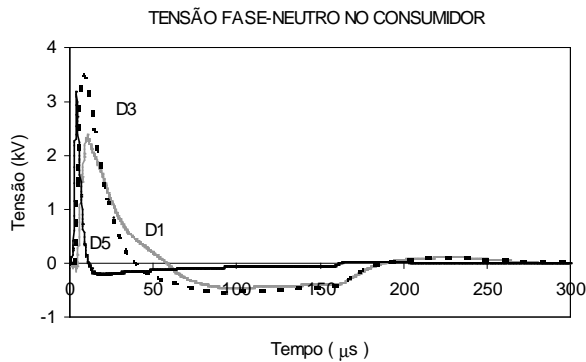
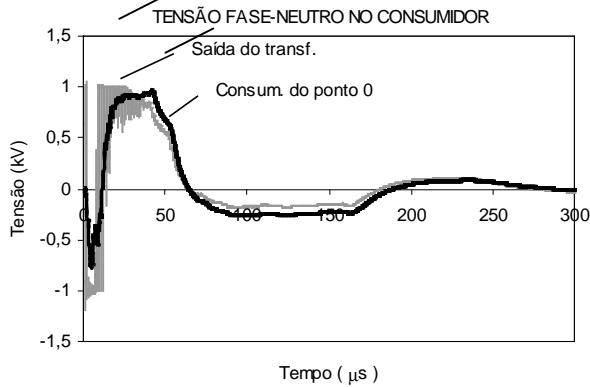
(B)



(C)

FIGURA 16 - TENSÕES FASE-NEUTRO NAS ENTRADAS DOS CONSUMIDORES (CASO 1).  
RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 100  $\Omega$ .  
REDE SECUNDÁRIA SEM PROTEÇÃO (CONFIG. G1).  
DESCARGA DE 45 kA A 300 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D10)  
A) PROXIMIDADES DO TRANSFORMADOR  
B) CONSUMIDORES DO LADO DIREITO  
C) CONSUMIDORES DO LADO ESQUERDO

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas, para a configuração G3, as correntes através dos SPDs para os casos de descargas incidindo, respectivamente, a 300 m e a 90 m do transformador.



(A)

(B)

(C)

FIGURA 17 - TENSÕES FASE-NEUTRO NAS ENTRADAS DOS CONSUMIDORES (CASO 2).

RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 100  $\Omega$ .  
SPDs NO TRANSFORMADOR E NAS EXTREMIDADES DA REDE SECUNDÁRIA (CONFIG. G3). DESCARGA DE 45 kA A 300 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D10).

- A) PROXIMIDADES DO TRANSFORMADOR
- B) CONSUMIDORES DO LADO DIREITO
- C) CONSUMIDORES DO LADO ESQUERDO

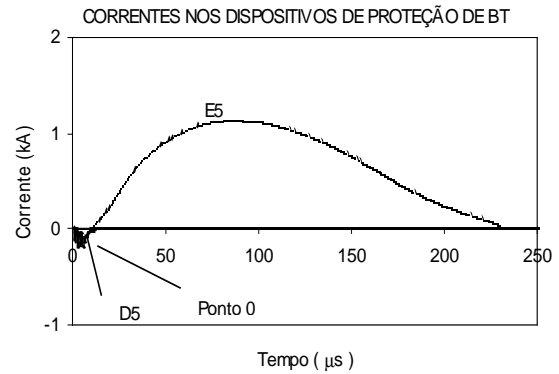
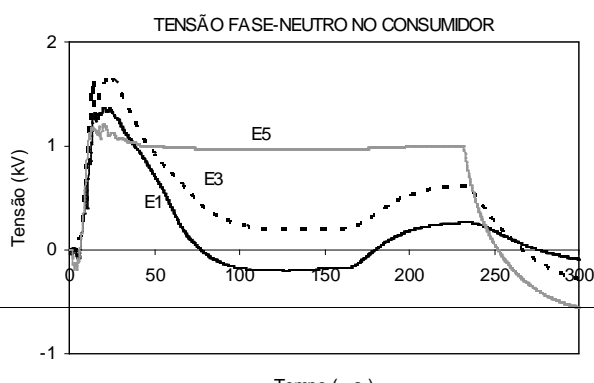


FIGURA 18 - CORRENTES NOS SPDs (CASO 2).  
RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 100  $\Omega$ .  
SPDs NO TRANSFORMADOR E NAS EXTREMIDADES DA REDE SECUNDÁRIA (CONFIG. G3). DESCARGA DE 45 kA A 300 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D10).

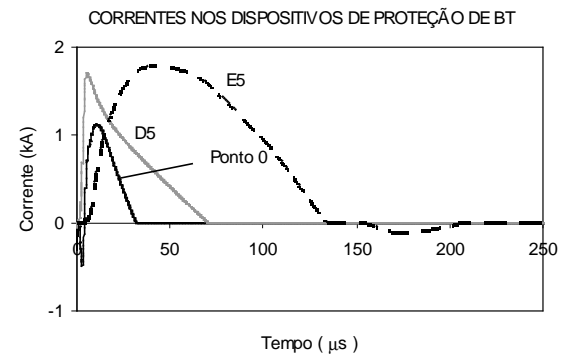
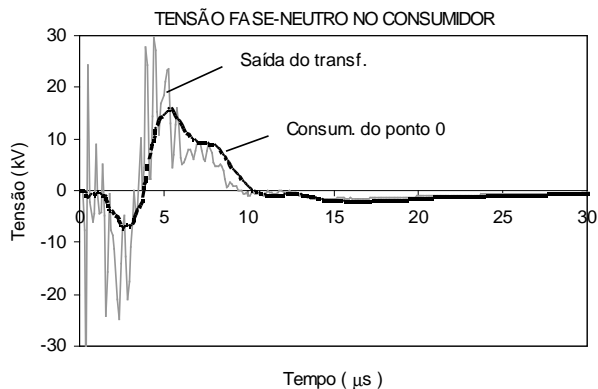


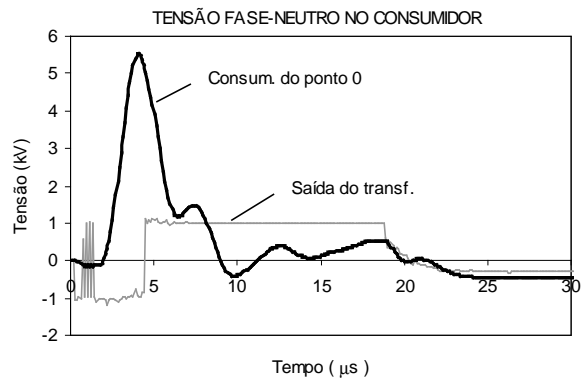
FIGURA 19 - CORRENTES NOS SPDs (CASO 3).  
RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 100  $\Omega$ .  
SPDs NO TRANSFORMADOR E NAS EXTREMIDADES DA REDE SECUNDÁRIA (CONFIG. G3). DESCARGA DE 45 kA A 90 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D3).

As amplitudes das correntes nos SPDs tendem a ser maiores no Caso 3, correspondente à menor distância entre o ponto de incidência da descarga e os SPDs. Observa-se também que os SPDs situados nas extremidades da rede secundária (pontos E5 e D5) são mais solicitados que aquele colocado junto ao transformador (ponto 0), tanto em termos de amplitude como de duração da onda de corrente. Na extremidade mais afastada do ponto de incidência da descarga (ponto E5) as correntes tendem a ser mais elevadas e de maior duração em virtude das descargas disruptivas que ocorrem principalmente nos pontos mais próximos ao local atingido. Essas disruptões proporcionam caminhos de baixa impedância para a corrente, o que faz com que a intensidade desta seja menor nos SPDs mais próximos ao local da descarga (ponto D5) que na extremidade oposta.

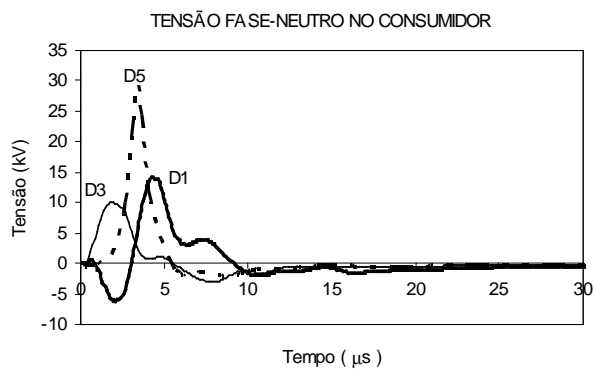
As Figuras 20 e 21 apresentam as tensões correspondentes aos casos 4 e 5 indicados na Tabela 3.



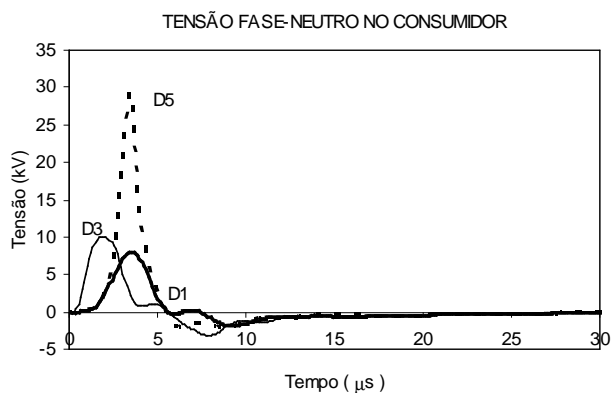
(A)



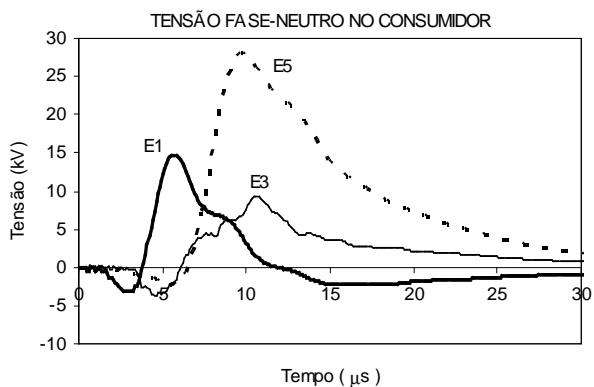
(A)



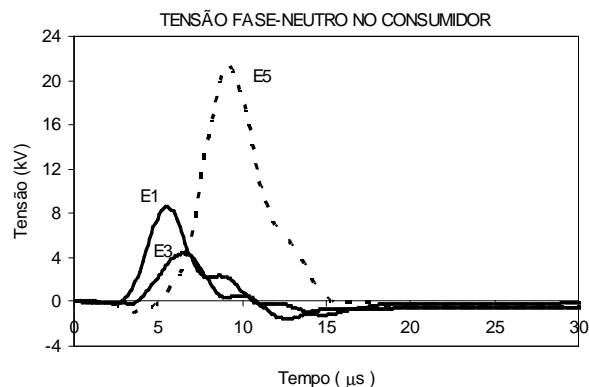
(B)



(B)



(C)



(C)

FIGURA 20 - TENSÕES FASE-NEUTRO NAS ENTRADAS DOS CONSUMIDORES (CASO 4).  
 RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 300 Ω.  
 REDE SECUNDÁRIA SEM PROTEÇÃO (CONFIG. G1).  
 DESCARGA DE 45 kA A 90 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D3).  
 A) PROXIMIDADES DO TRANSFORMADOR  
 B) CONSUMIDORES DO LADO DIREITO  
 C) CONSUMIDORES DO LADO ESQUERDO

FIGURA 21 - TENSÕES FASE-NEUTRO NAS ENTRADAS DOS CONSUMIDORES (CASO 5).  
 RESISTÊNCIAS DE ATERRAMENTO: 300 Ω.  
 SPDs NO TRANSFORMADOR E NAS EXTREMIDADES DA REDE SECUNDÁRIA (CONFIG. G3). DESCARGA DE 45 kA A 90 m DO TRANSFORMADOR (PONTO D3).  
 A) PROXIMIDADES DO TRANSFORMADOR  
 B) CONSUMIDORES DO LADO DIREITO  
 C) CONSUMIDORES DO LADO ESQUERDO

Comparando-se as tensões na saída do transformador nas duas configurações, verifica-se que os SPDs provocam redução significativa do valor de crista, o qual varia de aproximadamente 30 kV para 1,0 kV, valor correspondente à tensão residual. Já a redução no valor máximo da tensão na entrada do consumidor mais próximo ao transformador (ponto 0) é menor, embora também significativa: de aproximadamente 15 kV para 5,5 kV. Por sua vez, nos consumidores próximos aos pontos E1 e E3 as tensões diminuem em aproximadamente 45 % com a instalação dos SPDs; no ponto E5 a variação é menor, de cerca de 20 %. Para os consumidores situados no bloco "D", no qual incide a descarga, nota-se que apenas aquele correspondente ao ponto D1, mais próximo aos SPDs da saída do transformador, tem sua tensão reduzida significativamente (cerca de 45 %); os demais praticamente não são afetados pela presença dos SPDs. Observa-se ainda, no caso de ausência de SPDs (Figura 20), que as amplitudes das tensões nos consumidores equidistantes do transformador são próximas, embora no lado direito (bloco "D") as tensões apresentem caudas mais curtas em função das descargas disruptivas nos isoladores. Por outro lado, quando a rede conta com SPDs (Figura 21), as tensões nas entradas dos consumidores dos pontos E1 e D1 apresentam amplitudes e formas de onda semelhantes, ao passo que nas extremidades os consumidores situados no bloco "D" experimentam tensões de maiores amplitudes, porém com durações mais curtas.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo para representação de transformadores de distribuição trifásicos no que concerne à transferência de surtos à rede secundária quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas no primário ou nas proximidades da rede. O modelo, validado através de comparações entre tensões transferidas calculadas e medidas em transformadores de distribuição trifásicos típicos, representa adequadamente os transformadores considerados, possibilitando a análise dos surtos transferidos levando-se em consideração o efeito da carga conectada ao secundário. Além disso, o modelo é simples e conduz a resultados confiáveis, sendo de fácil aplicação em programas para o estudo de transitórios, como o EMTP/ATP.

As simulações efetuadas consideraram situações práticas e tiveram por objetivo apenas ilustrar a complexidade do problema, tendo em vista a grande quantidade de parâmetros envolvidos e as faixas de variação de seus valores. Entretanto, as informações apresentadas permitem uma visão das características básicas dos surtos transferidos a uma rede secundária típica quando da ocorrência de descargas atmosféricas diretas no primário.

A partir da avaliação dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- as descargas disruptivas nos isoladores de média e de baixa tensão têm efeito significativo nas tensões resultantes na rede e devem ser levadas em consideração;
- é importante que o transformador seja representado de forma apropriada quanto à transferência de surtos ao secundário; o circuito PI, comumente utilizado, é inadequado para essa finalidade;
- o componente de maior relevância nas tensões transferidas em decorrência de descargas diretas no primário é aquele associado à circulação de corrente através do neutro;
- as tensões no secundário do transformador e nas entradas dos consumidores podem atingir valores bastante elevados, da ordem de dezenas de quilovolts no caso de ausência de dispositivos de proteção;
- a presença de pára-raios no primário do transformador não é suficiente para garantir a sua proteção; a instalação de SPDs junto aos terminais de baixa tensão é altamente recomendável;
- a instalação de SPDs no secundário do transformador não evita a ocorrência de tensões elevadas nas entradas dos consumidores.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos aos engenheiros Acácio Silva Neto, Paulo F. Obase e Thaís Ohara, do IEE/USP, e Nelson M. Matsuo, que participaram de diferentes etapas durante o desenvolvimento deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Galvan A., Cooray V. Analytical simulation of lightning induced voltages in low voltage power installations. Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (25<sup>th</sup> ICLP), pp. 290-295, Rhodes, Sep. 2000.
- [2] Piantini A, Janiszewski, J. M. Lightning induced voltages on low-voltage lines. Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection (V SIPDA), pp. 234-239, São Paulo, May 1999.
- [3] Joint CIREN/CIGRÉ Working Group 05, Protection of MV and LV networks against lightning. Part I: basic information. Proceedings of the International Conference on Electricity Distribution (CIREN 97), Conf. Publication No. 438, pp. 2.21.1 - 2.21.7, Birmingham, 1997.
- [4] Mirra C. et al. Lightning overvoltages in low voltage networks. Proceedings of the International Conference on Electricity Distribution (CIREN 97), Conf. Publication n. 438. pp. 2.19.1 - 2.19.6, Birmingham, 1997.
- [5] Morched, A.; Martí, L.; Ottevangers, J. A High frequency transformer model for EMTP. IEEE Transactions on Power Delivery, n. 3, pp. 1615-1626, Jul. 1993.

- [6] Vaessen P. T. Transformer model for high frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, n. 4, pp. 1761-1768, October 1988.
- [7] Soysal, A. O. A Method for wide frequency range modelling of power transformers and rotating machines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, n. 4, pp. 1802-1810, Oct. 1993.
- [8] Woivre, V.; Arthaud, J. P.; Ahmad, A.; Burais, N. Transient overvoltage study and model for shell-type power transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, n. 1, pp. 212-222, Jan. 1993.
- [9] Ueda, T.; Neo, S.; Sugimoto, T.; Funabashi, T.; Takeuchi, N. An improved transformer model for transfer voltage study. *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95)*, pp. 107-112, Lisbon, Sep. 1995.
- [10] Piantini A., Janiszewski, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, n. 5, pp. 2799-2802, Sep. 1998.
- [11] 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. *Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (24<sup>th</sup> ICLP)*, vol. 1, pp. 314-320, Birmingham, Sep. 1998.
- [12] Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Analysis of three different theories for computation of induced voltages on distribution lines due to nearby lightning. *Proceedings of the International Conference on Electricity Distribution (CIRED Argentina'96)*, pp. Session 1 / 127-132, Buenos Aires, 1996.
- [13] Piantini A., Janiszewski, J. M. The Influence of the upward leader on lightning induced voltages. *Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (23<sup>rd</sup> ICLP)*, vol. 1, pp. 352-357, Florence, 1996.
- [14] Nucci, C. A.; Task Force 33.01.01 of Study Committee 33. Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part II: coupling models for the evaluation of the induced voltages. *Electra*, n. 162, pp. 121-145, Oct. 1995.
- [15] Piantini, A. "Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas". São Paulo, Out. 1991. 205 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [16] Nucci, C. A. et al. Comparison of two coupling models for lightning-induced overvoltages calculations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, n.1, pp. 330-339, January 1995.
- [17] Borghetti A. et al. Calculation of voltages induced by nearby lightning on overhead lines terminated on distribution transformers, *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST'95)*, pp. 311-316, Lisbon, 1995.
- [18] Piantini, A.; Malagodi, C. V. S. Modelling of three-phase distribution transformers for calculating lightning induced voltages transferred to the secondary. *Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection (V SIPDA)*. pp 59-64, São Paulo, May 1999.
- [19] Piantini, A.; Malagodi, C. V. S. Voltage surges transferred to the secondary of distribution transformers. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (11<sup>th</sup> ISH)*. vol. 1, pp. 1.365-1.368, London, Aug. 1999.
- [20] Piantini, A.; Malagodi, C. V. S. Voltages transferred to the low-voltage side of distribution transformers due to lightning discharges close to overhead lines. *Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection (V SIPDA)*. pp. 201-205, São Paulo, May 1999.
- [21] Piantini A.; Bassi, W.; Janiszewski, J. M.; Matsuo, N. M. A Simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (15<sup>th</sup> CIRED)*, Nice, 1999.
- [22] Kanashiro A. G., Piantini A., Burani, G. F. A Methodology for transformer modelling concerning high frequency surges. *Proceedings of the VI International Symposium on Lightning Protection (VI SIPDA)*, pp. 275-280, São Paulo, Nov. 2001.
- [23] Piantini A., Kanashiro A. G. A High frequency distribution transformer model for calculating transferred voltages (aprovado para publicação nos anais da 26<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection - 26<sup>th</sup> ICLP -, Cracóvia, 02-06/09/2002).
- [24] Schroeder, M. A.; Soares Jr., A.; Visacro F.; S.; Cherchiglia, L. C. L.; Souza, V. J.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M. Evaluation of directly measured lightning parameters. *Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection (V SIPDA)*. pp. 7-11, São Paulo, May 1999.
- [25] Darveniza, M.; Vlastos, A. E. The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard waveshapes – a theoretical basis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 23, n. 3, pp. 373-381, June 1988.
- [26] De Conti, A. R.; Pereira, C.; Visacro F., S.; Duarte, J. V. P. Lightning and consumer power quality. *Proceedings of the VI International Symposium on Lightning Protection (VI SIPDA)*, pp. 335-340, São Paulo, Nov. 2001.
- [27] Piantini, A.; Bassi, W.; Janiszewski, J. M.; Matsuo, N. M. Sobretensões, na rede secundária, ocasionadas por descargas atmosféricas. São Paulo, Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, Fev. 1998. 102 p. (CED 294 / STRA 002 / RL 002 / OR).