

## **XV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI 2002**

### **Avaliação de Sobretensões Transferidas em Redes de Baixa Tensão Instaladas em Áreas Urbanas**

**A. R. De Conti, S. F. Visacro –UFMG, J. V. P. Duarte – CEMIG**

**LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas**

E-mail: [LRC@cpdee.ufmg.br](mailto:LRC@cpdee.ufmg.br)

**Palavras-chave** – Proteção de Unidades Consumidoras. Sobretensões Atmosféricas em Redes de Baixa Tensão. Surtos Transferidos.

**Resumo** – No presente trabalho, os autores apresentam recentes desenvolvimentos de uma pesquisa dedicada à avaliação do impacto das sobretensões de origem atmosférica em redes de baixa tensão (RBT) e em cargas consumidoras. Foi analisado especificamente o fenômeno da transferência de surtos através de transformadores de distribuição, sendo contempladas configurações de rede de baixa tensão tipicamente encontradas em áreas urbanas. O papel de diversos componentes de rede no desenvolvimento dos surtos transferidos foi avaliado através de sistemáticas simulações computacionais realizadas na plataforma EMTP. Também são apresentados, para uma melhor contextualização, resultados anteriores obtidos para uma configuração de rede simplificada, que se aproxima das configurações de rede encontradas em áreas rurais.

#### **1. INTRODUÇÃO**

Uma das principais causas de interrupções e desligamentos em redes de energia elétrica no Brasil são as descargas atmosféricas. As sobretensões associadas a este fenômeno são responsáveis por redução na vida útil e destruição de equipamentos instalados pelas empresas concessionárias, bem como por danos relevantes em instalações consumidoras.

Tal quadro determina a necessidade de definição e avaliação de práticas de proteção que assegurem a manutenção do fornecimento de energia dentro de limites de qualidade desejáveis e que possam preservar a segurança das cargas conectadas.

Deve ser frisado, entretanto, que a determinação do papel preciso dos diversos componentes do sistema no processo de disseminação de surtos nas redes de baixa tensão é uma tarefa complexa. Isto ocorre principalmente devido ao grande número de variáveis presentes (transformador, aterramentos, cargas, ramificações, pára-raios, etc.) e à grande diversidade de instalações encontradas, especialmente em áreas urbanas.

Trabalhos recentes, publicados pelos autores em diversos fóruns de discussão nacionais e internacionais, têm avaliado os efeitos associados às sobretensões transferidas nas cargas consumidoras [1-6]. Nos referidos

trabalhos, foi analisada uma rede de baixa tensão simplificada, muito próxima dos padrões de instalação encontrados em regiões rurais. Alguns dos resultados obtidos para esta configuração de rede são novamente apresentados ao longo do presente texto, para uma melhor contextualização dos recentes desenvolvimentos, que estendem as análises realizadas a configurações de rede encontradas em áreas urbanas.

#### **2. PRINCIPAIS MECANISMOS DE INTERAÇÃO ENTRE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E AS REDES DE BAIXA TENSÃO**

As sobretensões de origem atmosférica podem atingir as redes de distribuição fundamentalmente através de quatro diferentes ocorrências, que vêm sendo sistematicamente avaliadas pela equipe do LRC através de um projeto de pesquisa desenvolvido em conjunto com a CEMIG:

1. Descargas Diretas: Ocorrem principalmente em redes de média tensão instaladas em regiões de maior exposição, onde não há edificações e vegetação de grande porte em sua proximidade. Descargas diretas sobre redes de baixa tensão são pouco comuns, devido à usual presença dos condutores da média tensão em posição mais elevada nas estruturas. As descargas diretas injetam correntes de elevada intensidade no sistema elétrico, capazes de causar danos consideráveis à rede e aos equipamentos conectados [7].
2. Sobretensões Induzidas: Estão associadas aos campos eletromagnéticos gerados por descargas que interceptam o solo em regiões próximas às linhas em consideração. A forma e a intensidade das solicitações geradas dependem de inúmeros fatores, conforme descrito em [8]. Ainda que o grau de severidade destas solicitações seja usualmente menor do que aquele associado às descargas diretas, a maior frequência de ocorrência das sobretensões induzidas faz com que este fenômeno seja extremamente importante para a definição do desempenho das redes de distribuição frente às descargas atmosféricas [9].
3. Descargas sobre edificações e estruturas elevadas: Podem injetar surtos nas redes de baixa tensão que as alimentam através da elevação de potencial nas redondezas do ponto atingido, além de causar danos

nas cargas conectadas internamente às estruturas [10].

4. Transferência de surtos da média para a baixa tensão em redes de distribuição: Surtos gerados por descargas diretas ou por sobretensões induzidas em redes de média tensão podem ser transferidos para a rede de baixa tensão através dos transformadores de distribuição e/ou através de disrupções em isoladores. O presente artigo se dedica ao estudo das sobretensões transferidas através de transformadores de distribuição, sendo verificado seu impacto nas cargas conectadas no circuito secundário. Não foi considerada, nesta etapa de desenvolvimentos, a ocorrência de disrupções ao longo da rede e nas cargas consumidoras.

### 3. SOBRETENSÕES TRANSFERIDAS DA MÉDIA PARA A BAIXA TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

O fenômeno de transferência de surtos da média para a baixa tensão através de transformadores de distribuição pode ocorrer de duas maneiras distintas. A primeira corresponde ao acoplamento eletromagnético entre os dois circuitos através dos enrolamentos do transformador, que depende principalmente da constituição física deste equipamento e das frequências representativas da solicitação. A segunda corresponde à elevação de potencial no aterramento do transformador, que ocorre devido à condução da maior parcela da corrente associada ao surto atmosférico pelos pára-raios que protegem o primário do equipamento. Esta corrente pode se dividir entre o aterramento local e o circuito de baixa tensão, de acordo com a configuração física do sistema.

Nos casos em que o aterramento do transformador e o neutro do circuito secundário são obrigatoriamente conectados, prática geralmente adotada pela maioria das concessionárias brasileiras, a parcela de transferência oriunda da elevação de potencial no aterramento do transformador predomina amplamente sobre a parcela de transferência associada ao acoplamento eletromagnético entre os circuitos de média e baixa tensão (assumindo-se a presença de pára-raios protegendo o primário do equipamento). Quando pára-raios são instalados também nos terminais de secundário do equipamento, o mecanismo de transferência praticamente se resume aos efeitos da elevação de potencial no aterramento do transformador, na grande maioria das ocorrências [4].

### 4. SOBRETENSÕES TRANSFERIDAS EM REDES DE BAIXA TENSÃO QUE ALIMENTAM CONJUNTOS CONCENTRADOS DE CARGAS

#### 4.1. Sistema Avaliado

Em trabalhos anteriores, os autores chegaram a diversas conclusões a respeito do papel dos elementos constituintes das redes de baixa tensão no desenvolvimento das sobretensões transferidas nas cargas consumidoras. Para tal, partiu-se de um circuito

simplificado, que se aproximava consideravelmente das configurações de rede normalmente encontradas em regiões rurais (Figura 1).

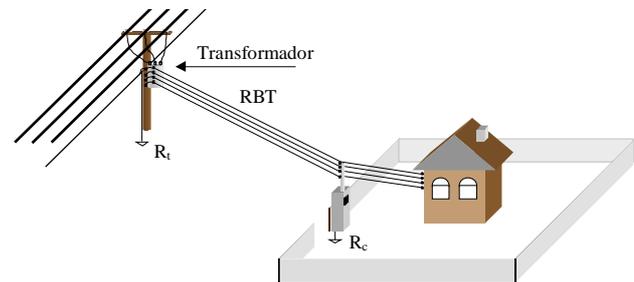


Figura 1 – Ilustração do sistema simples avaliado em [1-6]

Foram injetadas nas simulações computacionais correntes de 1 kA (5/60  $\mu$ s) e 10 kA (5/60  $\mu$ s) diretamente no primário do transformador, de acordo com os pressupostos assumidos em [11]. Utilizou-se um modelo de transformador trifásico, idêntico ao utilizado em [12], protegido em seus terminais de primário por pára-raios de ZnO com curva  $V \times I$  típica de dispositivos encontrados em redes de média tensão. Transformador e consumidor foram aterrados através de resistores com valores  $R_t$  e  $R_c$ , respectivamente. Foram consideradas redes de baixa tensão multiplexadas e convencionais (verticalmente espaçadas) nas análises. A presença dos condutores de média tensão sobre os condutores da RBT e a ocorrência de disrupções ao longo do circuito não foram incluídas nas simulações.

#### 4.2. Desenvolvimentos

Inúmeros resultados foram obtidos através simulações computacionais e de sistemáticas análises de sensibilidade no circuito da Figura 1, merecendo maior destaque avaliações envolvendo o comprimento das redes de baixa tensão, as configurações de rede atualmente utilizadas no Brasil (convencional e multiplexada), a importância dos aterramentos ao longo do sistema e a aplicação de dispositivos pára-raios no circuito secundário. As principais análises e conclusões referentes aos tópicos citados são resumidamente descritas a seguir.

##### 4.2.1. Configuração de Rede

Em redes de baixa tensão, duas diferentes configurações de rede são normalmente encontradas. As redes convencionais correspondem à maior parte do sistema instalado. As redes multiplexadas, por outro lado, vêm sendo gradativamente adotadas pela maioria das concessionárias brasileiras. Análises comparativas quanto ao desempenho de ambas frente a surtos transferidos indicaram que o uso de redes multiplexadas pode representar níveis de solicitação muito menores nas cargas consumidoras e no secundário do transformador de distribuição (ver Figura 2) [2-3].

##### 4.2.2. Comprimento da Rede de Baixa Tensão

Nos casos em que o transformador alimenta apenas um conjunto concentrado de cargas, é desejável que a rede de

baixa tensão possua o menor comprimento possível. Esta prática pode reduzir sensivelmente as amplitudes máximas das sobretensões transferidas para as cargas consumidoras.

#### 4.2.3. Aterramentos

De forma geral, é sempre desejável que os aterramentos do sistema possuam os menores valores de impedância possíveis, pois assim também serão menores as elevações de potencial geradas por surtos de origem atmosférica. Entretanto, em muitos casos não é possível um controle apurado sobre a qualidade dos diversos aterramentos presentes ao longo da rede, sendo necessárias análises que verifiquem a influência da variação deste parâmetro nas sobretensões geradas nas cargas consumidoras.

No caso em que apenas um conjunto concentrado de cargas é conectado a partir do secundário do transformador de distribuição, as menores sobretensões fase-neutro transferidas nas cargas são obtidas para uma relação  $R_t/R_c$  baixa (onde  $R_t$  e  $R_c$  representam, respectivamente, as resistências de aterramento do transformador e do padrão do consumidor). Isto pode ser melhor ilustrado através da Figura 2.

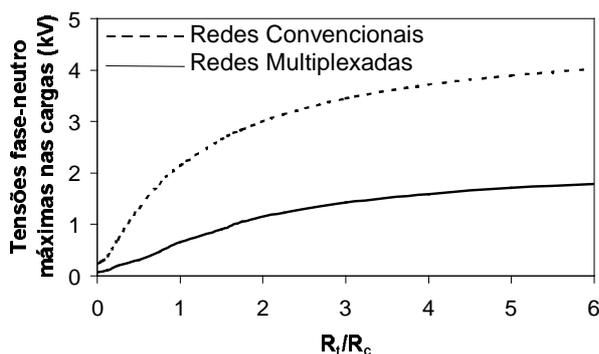


Figura 2 – Sobretensões fase-neutro máximas em função da relação  $R_t/R_c$ . Comprimento da RBT=30 m, pára-raios no secundário do transformador,  $I=1$  kA (5/60  $\mu$ s) [2].

No caso das redes de baixa tensão instaladas em áreas rurais em que o padrão de entrada do consumidor e o transformador compartilham o mesmo poste, é realizado apenas um aterramento neste mesmo ponto. Nesta situação, pode-se analisar a relação  $R_t/R_c$  tendendo a zero, uma vez que  $R_c$  deixa de existir. Assim, são esperadas as mais baixas sobretensões fase-neutro transferidas nas cargas consumidoras. Entretanto, o não estabelecimento de correntes no circuito secundário de uma forma plena determina sobretensões neutro-terra e fase-terra na cargas com valores muito elevados, idênticos à elevação de potencial em  $R_t$ . Para dar um exemplo, se  $R_t=80 \Omega$ , a captação de correntes com intensidade de aproximadamente 1 kA no primário do transformador é capaz de gerar sobretensões fase-terra e neutro-terra da ordem de 80 kV, valor que certamente provocaria a ocorrência de interrupções internas às instalações dos consumidores e colocaria em risco a segurança de seres humanos e de equipamentos. Assim, além de uma relação

$R_t/R_c$  baixa (naturalmente alcançada no exemplo citado), recomenda-se que baixos valores de  $R_t$  sejam obtidos.

#### 4.2.4. Pára-raios de Baixa Tensão

Pára-raios de redes de baixa tensão (PRBT) vêm sendo gradativamente empregados por concessionárias brasileiras, mas ainda não há uma definição de critérios objetivos que balizem sua utilização. Quando instalados no secundário do transformador, os pára-raios asseguram a proteção deste equipamento contra surtos atmosféricos [13]. Entretanto, se forem consideradas as sobretensões transferidas, sua colocação nesta posição do circuito é capaz de amplificar as sobretensões nas cargas (em comparação com as sobretensões que seriam verificadas em sua ausência) [4]. No caso das redes de baixa tensão instaladas em áreas rurais em que o padrão de entrada do consumidor e o transformador compartilham o mesmo poste, por outro lado, a presença de pára-raios no secundário do transformador mostrou-se benéfica não só para o equipamento, mas também para as cargas [11].

A proteção das cargas contra surtos transferidos é assegurada se pára-raios corretamente dimensionados forem colocados diretamente em seus terminais. Entretanto, na maioria dos casos a empresa concessionária só pode atuar até o ponto de entrega de energia, usualmente junto ao padrão do consumidor. A instalação de pára-raios neste ponto pode ser eficiente na maioria dos casos de transferência de surtos via transformador de distribuição, especialmente naqueles em que não há aterramentos adicionais dedicados a cargas sensíveis. Se existirem tais aterramentos, é recomendável a utilização de dispositivos protetores também junto às cargas. Maiores detalhes a respeito do uso dos pára-raios de baixa tensão podem ser encontrados em [11].

## 5. SOBRETENSÕES TRANSFERIDAS EM REDES DE BAIXA TENSÃO QUE ALIMENTAM CARGAS DISTRIBUÍDAS

### 5.1. Sistema Avaliado

Em áreas urbanas, um único transformador é capaz de alimentar cargas distribuídas ao longo de redes que podem se estender por comprimentos que usualmente variam de 100 a 300 m. Neste caso, a presença de derivações, ramificações e a existência de um maior número de aterramentos em diversos pontos do circuito podem determinar um diferente comportamento do sistema frente às sobretensões transferidas (e também frente às descargas diretas e às sobretensões induzidas, que não estão sendo especificamente avaliadas neste trabalho). A fim de se compreender a influência de alguns parâmetros no desenvolvimento dos surtos transferidos em redes de baixa tensão instaladas em áreas urbanas, foi idealizado o circuito ilustrado na Figura 3.

Considerou-se nas simulações computacionais um comprimento máximo de 150 m para a rede de baixa tensão, que foi dividida em 5 vãos de 30 m. P0 a P5 indicam os postes a partir dos quais são derivados os ramais de ligação que alimentam os consumidores C0 a

C5. O transformador, cujo modelo é o mesmo utilizado em [12], foi conectado ao poste P0. Seus terminais de primário e secundário foram protegidos através de pára-raios. Todas as entradas de serviço dos consumidores foram aterradas através de um resistor com valor igual a  $R_c$ , enquanto o transformador foi aterrado através de  $R_t$ . Foi considerada uma RBT trifásica, de configuração variável (multiplexada ou convencional); em todos os casos, foram utilizados ramais de ligação multiplexados com 15 m de comprimento. Não foi considerada a presença da rede de média tensão nas simulações realizadas, tampouco a ocorrência de disrupções na RBT e nas cargas consumidoras.

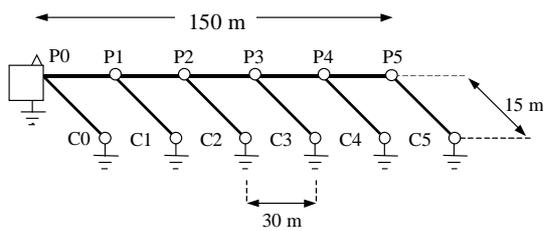


Figura 3 – Diagrama esquemático do circuito simulado.

## 5.2. Desenvolvimentos

Foram injetadas correntes com 1 kA e 10kA (5/60  $\mu$ s) de intensidade diretamente no primário do transformador, de acordo com os pressupostos assumidos em [11]. Diversas análises de sensibilidade foram realizadas, tomando como parâmetro de interesse as sobretensões fase-neutro máximas verificadas nas cargas. Tendo em vista que a injeção de correntes com amplitude de 1 kA gerou sobretensões sempre inferiores a 1 kV em todos os casos avaliados, serão apresentados apenas resultados referentes à injeção de correntes de 10 kA. Estas correntes possuem ordem de grandeza similar às correntes geradas por descargas diretas em redes de média tensão. Os itens a seguir ilustram alguns resultados obtidos.

### 5.2.1. Comprimento da RBT

Com o intuito de se avaliar o comportamento das sobretensões transferidas máximas nas cargas com o aumento do comprimento do circuito de baixa tensão, foram assumidos três diferentes níveis de aterramento para os consumidores:  $R_c=20 \Omega$ ,  $R_c=80 \Omega$  e  $R_c=320 \Omega$ , para  $R_t=80 \Omega$  em todos os casos. Inicialmente, foi simulado um circuito idêntico ao da Figura 3, para a injeção de  $I=10\text{kA}$  (5/60  $\mu$ s). Em seguida, foi retirado o consumidor C5, juntamente com o todo o trecho de rede existente a partir de P4. Posteriormente, o trecho entre P3 e C4 foi removido, juntamente com o consumidor C4, e assim por diante, até a condição em que o transformador alimentasse apenas o consumidor C0. Os resultados obtidos são ilustrados a seguir, nas Figuras 4.a-c para uma RBT multiplexada.

Analisando-se as figuras, percebe-se que os resultados obtidos dependem não apenas do comprimento do

circuito mas também da presença de mais ou menos pontos de conexão à terra em função do número de consumidores considerados e também da qualidade dos aterramentos existentes.

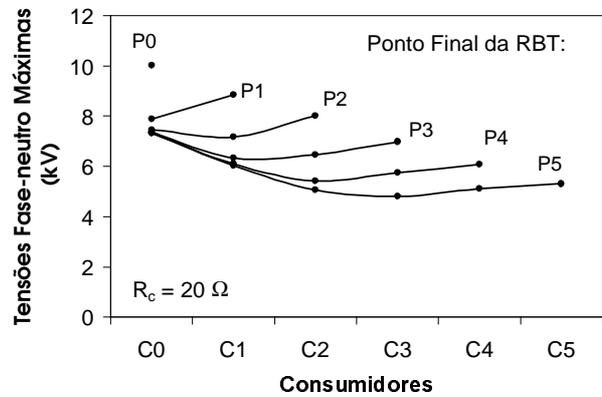


Figura 4.a – Tensões máximas nas cargas em função da extensão da RBT.  $R_c=20 \Omega$  e  $R_t=80 \Omega$ .  $I=10 \text{ kA}$  (5/60  $\mu$ s). PRBT em P0.

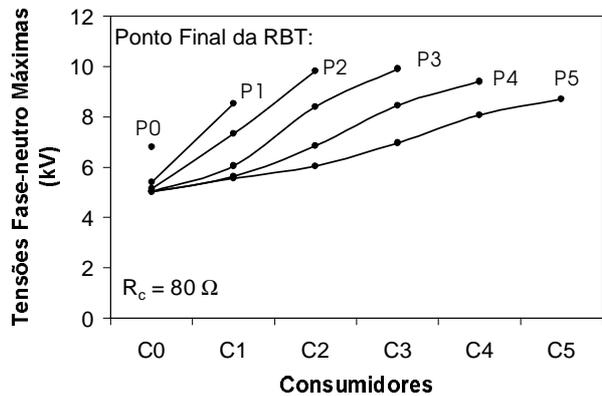


Figura 4.b – Tensões máximas nas cargas em função da extensão da RBT.  $R_c=R_t=80 \Omega$ .  $I=10 \text{ kA}$  (5/60 $\mu$ s). PRBT em P0.

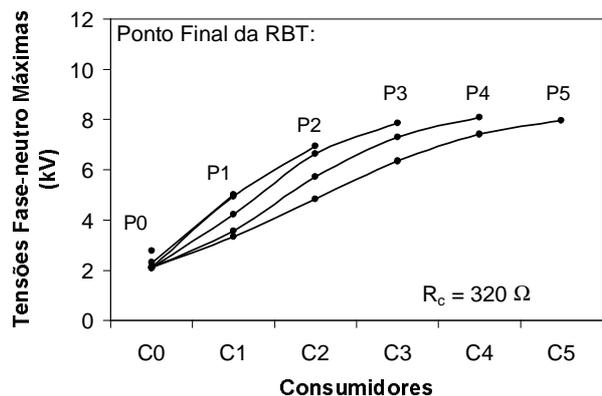


Figura 4.c – Tensões máximas nas cargas em função da extensão da RBT.  $R_c=320 \Omega$  e  $R_t=80 \Omega$ .  $I=10 \text{ kA}$  (5/60 $\mu$ s). PRBT em P0.

Se  $R_c \ll R_t$ , a inclusão de mais pontos de aterramento no circuito à medida que consumidores são adicionados passa a influenciar sensivelmente no perfil das sobretensões máximas nas cargas. Neste caso, a inclusão

gradativa de consumidores e o aumento da extensão do circuito é acompanhada de reduções nas sobretensões no final da RBT. Isto ocorre porque os consumidores mais próximos do transformador tendem a captar parcelas significativas da corrente total, devido ao baixo valor de suas resistências de aterramento. Assim, se  $R_c \ll R_t$ , o comprimento do circuito não é a variável dominante no estabelecimento das sobretensões transferidas nas cargas consumidoras instaladas em redes longas e ramificadas.

Quando  $R_c \gg R_t$ , à medida que consumidores são adicionados à RBT um gradativo aumento nas sobretensões ocorre no ponto final da rede. Este comportamento está diretamente associado ao aumento do comprimento do circuito. Assim, se apenas dois consumidores são conectados, o que sofre a maior sobretensão é aquele mais afastado do transformador (C2). Se agora três consumidores são conectados, o mais afetado é aquele conectado a P3, e assim por diante. Deve ser notado, entretanto, que os acréscimos nas sobretensões no final da RBT tendem a sofrer uma saturação para comprimentos de rede além de P2, não fazendo tanta diferença para o último consumidor o fato de a rede ter 60 m de comprimento (RBT terminando em P2) ou 150 m de comprimento (RBT terminando em P5). Por outro lado, ao se analisar um consumidor específico (C2, conectado ao ponto P2, por exemplo), as sobretensões em seus terminais tendem a ser reduzidas com a inclusão progressiva de C3, C4 e C5. Este fato sugere que, em redes urbanas, a adoção de comprimentos de rede mais longos (a partir de um determinado limite) pode ser interessante para uma redução nos valores máximos das sobretensões nas cargas originadas por sobretensões transferidas, devido ao maior número de aterramentos presentes nesta situação. No caso em que  $R_t = R_c$ , o comportamento do sistema é intermediário ao apresentado para os casos em que  $R_c \ll R_t$  e  $R_c \gg R_t$ .

### 5.2.2. Aterramentos

As Figuras 5 e 6 comparam o desempenho do circuito da Figura 3 para três diferentes condições de aterramento ( $R_c = 20 \Omega$ ,  $R_c = 80 \Omega$  e  $R_c = 320 \Omega$ , para  $R_t = 80 \Omega$ ), considerando a injeção de correntes de 10 kA (5/60  $\mu$ s). Na Figura 5 avaliou-se o desempenho de uma RBT multiplexada, enquanto na Figura 6 foi considerada uma RBT do tipo convencional.

Comparando as curvas em que  $R_c = 80 \Omega$  e  $R_c = 320 \Omega$ , é possível ver que, no último caso, as sobretensões fase-neutro máximas nas cargas são menores do que aquelas verificadas quando  $R_t = 80 \Omega$ . Isto já era esperado, uma vez que a relação  $R_t/R_c$  geral torna-se menor. Entretanto, ao se considerar  $R_c = 20 \Omega$ , seria possível supor um acréscimo proporcional nas sobretensões máximas nas cargas devido a um acréscimo no valor da relação  $R_t/R_c$ , o que não corresponde à realidade. Na verdade, baixos valores de  $R_c$  determinam que uma parte significativa da corrente seja compartilhada entre o aterramento do transformador e o aterramento dos consumidores C0 e C1. Portanto, para  $R_c \ll R_t$ , consumidores conectados ao longo da RBT tendem a sofrer reduções significativas

enquanto as maiores solicitações são sentidas pelos consumidores instalados em pontos próximos ao transformador. Deve ser observado que, em um sistema real, seriam esperadas interrupções em pontos mais frágeis do circuito em alguns dos casos avaliados.

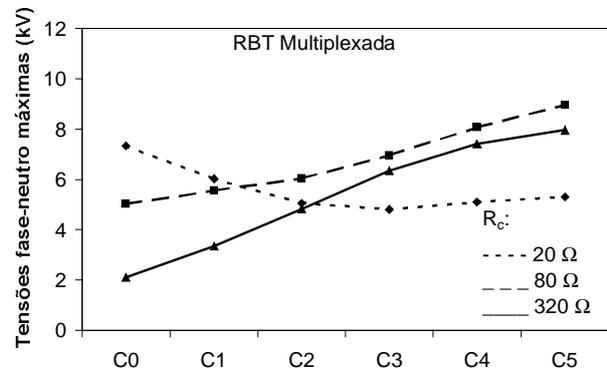


Figura 5 - Perfil das sobretensões máximas nas cargas instaladas nos pontos C0 a C5.  $R_t = 80 \Omega$ , comprimento da RBT multiplexada de 150 m. PRBT em P0.  $I = 10$  kA (5/60  $\mu$ s).

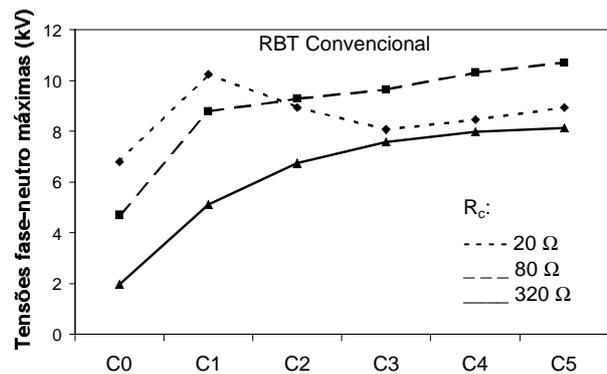


Figura 6 - Perfil das sobretensões máximas nas cargas instaladas nos pontos C0 a C5.  $R_t = 80 \Omega$ , comprimento da RBT convencional de 150 m. PRBT em P0.  $I = 10$  kA (5/60  $\mu$ s).

### 5.2.3. Configuração de Rede

Através das figuras 5 e 6 é possível comparar o desempenho das redes multiplexadas e convencionais em um sistema longo e ramificado. Percebe-se que as menores sobretensões continuam a se manifestar nas redes multiplexadas, mas a diferença entre o comportamento de ambas as configurações é menor do que o verificado em redes em que apenas um conjunto concentrado de cargas é alimentado (como em áreas rurais, por exemplo).

### 5.2.4. Pára-raios de Baixa Tensão

Os altos níveis de sobretensões nas cargas apresentados para a injeção de 10 kA no primário do transformador sugerem a necessidade de avaliações que contemplem o uso de pára-raios ao longo da rede de baixa tensão. A Figura 8 ilustra os efeitos de se instalar pára-raios nos pontos P1 a P5 (um de cada vez) no perfil das sobretensões máximas nas cargas. Em todos os casos também foi considerada a presença de pára-raios no

secundário do transformador de distribuição (P0). São apresentados apenas os resultados obtidos para uma configuração de rede multiplexada e  $R_t=R_c=80 \Omega$ , sendo indicados junto às curvas os pontos onde foram instalados os pára-raios.

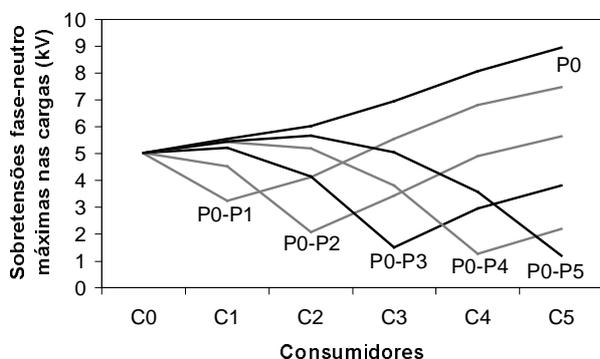


Figura 8 – Perfil das sobretensões máximas nas cargas consumidoras para a aplicação de pára-raios adicionais ao longo de uma rede de baixa tensão multiplexada.  $R_t=R_c=80 \Omega$ .  $I=10 \text{ kA}$  ( $5/60 \mu\text{s}$ ).

Pode ser visto, através da figura, que a melhor condição para as cargas é aquela em que pára-raios são instalados no transformador e em pontos próximos ao final da RBT (em P4 ou P5). Entretanto, mesmo neste melhor caso as sobretensões nos pontos centrais da rede ainda podem ser suficientemente elevadas para danificar as cargas conectadas. A conexão de pára-raios em todos os padrões de entrada dos consumidores poderia ser uma solução, mas fatores técnicos e econômicos devem ser considerados.

Se a rede de baixa tensão possuir comprimentos mais curtos (em torno de 2 vãos a partir do transformador), os resultados associados à utilização de pára-raios adicionais tendem a ser melhores. Isto ocorre porque um único conjunto de dispositivos protetores posicionado em local estratégico poderia propiciar significativas reduções nas sobretensões em toda a RBT (já considerando PRBT's em P0). Esta análise contrapõe a aparente vantagem de se instalar redes com longos comprimentos em áreas urbanas.

Uma observação relevante pode ser feita a respeito dos consumidores cujo ramal de ligação é derivado diretamente a partir do secundário do transformador (C0). A Figura 8 indica que a colocação de pára-raios ao longo do vão principal da RBT não é capaz de trazer benefício algum a estes consumidores. Sua proteção poderia ser obtida através de melhorias em  $R_t$  aliadas ao emprego de pára-raios em sua entrada de serviço.

## 6. CONCLUSÕES

Diversas avaliações foram realizadas contemplando o impacto das sobretensões transferidas da média para a baixa tensão através de transformadores instalados em redes de distribuição. Entre as principais conclusões obtidas, podem citadas as seguintes:

- Em áreas urbanas, a existência de diversas conexões à terra e de múltiplas ramificações tende a reduzir a

importância de cada parâmetro do circuito na determinação das sobretensões transferidas nas cargas. Assim, neste tipo de rede, ações integradas sobre diversos elementos do sistema podem ser necessárias para a proteção dos consumidores conectados.

- Com relação ao fenômeno de transferência de surtos através de transformadores de distribuição, a elevação de potencial em  $R_t$  é, na maioria dos casos, amplamente predominante sobre a parcela de transferência associada ao acoplamento eletromagnético entre os terminais de primário e secundário do transformador.
- O uso de RBT's com comprimentos curtos é recomendado tanto em áreas rurais como urbanas. Neste último caso, esta prática é justificada principalmente pelo melhor desempenho da proteção quando da aplicação de pára-raios de baixa tensão.
- A utilização de redes multiplexadas indicou melhores resultados do que os obtidos com o uso de redes convencionais. Em redes urbanas, a diferença entre o desempenho de ambas é menor do que a verificada em redes rurais.
- A melhor condição para a proteção das cargas exige baixos valores para a relação  $R_t/R_c$ , preferivelmente para os menores valores possíveis de  $R_t$  e  $R_c$ . Em redes rurais, ações dedicadas à melhoria de  $R_t$  são recomendadas, principalmente nos casos em que transformador e medidor forem instalados no mesmo poste. Em redes urbanas em que os aterramentos dos consumidores são de boa qualidade (como aqueles normalmente encontrados em edifícios, por exemplo), cargas mais próximas ao transformador tendem a sofrer maiores sobretensões do que aquelas conectadas em pontos mais afastados.
- Do ponto de vista da redução global das sobretensões no sistema, a instalação de pára-raios adicionais ao longo de RBT's em áreas urbanas apresenta melhores resultados se for realizada em estruturas próximas ao final de rede. As sobretensões máximas em consumidores próximos ao transformador, entretanto, ainda poderiam alcançar valores elevados. O desempenho destes dispositivos pode ser melhorado se forem consideradas redes com comprimentos mais curtos.
- Em redes instaladas em áreas urbanas, a colocação de pára-raios ao longo do vão principal da RBT não traz benefícios a consumidores cujo ramal de ligação é derivado diretamente a partir do secundário do transformador. Sua proteção poderia ser obtida através de melhorias em  $R_t$  aliadas ao emprego de pára-raios em seu padrão de entrada.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., Silveira, F. H., "Effects Of Transferred Lightning Surges on Consumer Loads for Typical Brazilian Low Voltage Networks", Proceedings of

- 25<sup>th</sup> ICLP – International Conference on Lightning Protection, Cracow, Polônia, Setembro de 2002.
- [2] De Conti, A. R., Visacro, S. F., “Lightning Overvoltage in Low Voltage Distribution Lines: Multiplexed Versus Conventional Configuration”, Proceedings of 1<sup>st</sup> Transmission and Distribution Conference – PES Latin America, São Paulo, Março, 2002.
- [3] De Conti, A. R., Visacro, S. F., “Consumer Power Quality: The Effect of Multiplexed Conductors on the Reduction of Lightning-Related Surges”, Proceedings of SICEL – 1<sup>o</sup> Simpósio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica, Bogotá, Colômbia, Novembro, 2001.
- [4] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., “Lightning and Consumer Power Quality”, Proceedings of VI SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, Santos, Novembro, 2001.
- [5] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., “A Influência das Descargas Atmosféricas na Qualidade da Energia Oferecida aos Consumidores”, Anais do XVI SNPTEE, Campinas, Outubro, 2001.
- [6] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., “Qualidade de Energia: Práticas de Proteção dos Consumidores”, Anais do IX Erlac – Encontro Latino Americano do Cigré, Foz do Iguaçu, Maio, 2001.
- [7] Mirra, C., Porrino, A., Ardito, A., Nucci, C. A., “Lightning Overvoltages in Low Voltage Networks”, CIRED - Conferência Internacional de Redes Elétricas de Distribuição, Junho, 1997.
- [8] Silveira, F. H., “Aplicação de um Novo Modelo para o Cálculo de Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Julho, 2001. Orientador: Silvério Visacro Filho.
- [9] Nucci, C. A., Rachidi, F., “Lightning-Induced Overvoltages”, IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session “Distribution Lightning Protection”, New Orleans, April 14, 1999.
- [10] Mansoor, A., Martzloff, F., “The Effect of Neutral Earthing Practices on Lightning Current Dispersion in a Low-Voltage Installation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No.3, Julho, 1998.
- [11] De Conti, A. R., “Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas: Transferência de Surtos Através de Transformadores de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Dezembro, 2001. Orientador: Silvério Visacro Filho.
- [12] Piantini A., Bassi, W, “Voltages and Currents on Secondary Lines Caused by Direct Lightning Hits on Medium Voltage Lines,” Anais do GROUND’2000 – 2nd International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte, Brasil, Junho de 2000.
- [13] EPRI FINAL REPORT EL-3385, “Surge Characteristics and Protection of Distribution Transformers”, EPRI - Electric Power Research Institute, Estados Unidos, Janeiro, 1984.