



**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

LINHA DE TRANSMISSÃO URBANA COMPACTA EXPERIMENTAL EM 230 KV

**João Nelson Hoffmann* - Rogério Laurindo de Souza - Nelson Prosdócimo - Ilmar da Silva Moreira
COPEL TRANSMISSÃO SA**

Vitoldo Swinka Filho - LACTEC

RESUMO

O trabalho tem por finalidade apresentar os estudos elétricos preliminares realizados para a concepção de uma linha de transmissão compacta em 230 kV, assim como o detalhamento, medições e resultados obtidos em um trecho construído de forma experimental. Foram utilizados postes de concreto de altura útil média da ordem de 22 m, com distância entre fases da ordem de 3,0 m, prevendo sua aplicação em trechos urbanos ou semi-urbanos.

Além das aplicações usuais em sistemas urbanos de 230 kV, esta nova concepção poderá ser também adequada para aplicação em Usinas Térmicas, por localizarem-se relativamente próximas de centros urbanos.

PALAVRAS-CHAVE:

Linha de transmissão, Compactação, Postes de Concreto, Feixes de Condutores, Corona, Ruído Audível

1.0 INTRODUÇÃO

Há mais de 20 anos a COPEL desenvolveu e vem construindo linhas aéreas de transmissão urbanas em 69 kV e 138 KV [1-4] num padrão compacto em postes de concreto, o qual já tem sido também utilizado por outras concessionárias.

Com o objetivo de estender o mesmo padrão para a tensão de 230 kV foi realizado um projeto preliminar do novo padrão. Para tanto foram solicitadas amostras de fabricantes (vide item 11.0 a seguir) de isoladores e postes o que permitiu assim a construção de um trecho experimental composto por 4 postes, conforme Figura 1 (2 postes de suspensão – Figura 2, 1 de ancoragem

em ângulo e 1 poste terminal), totalizando uma extensão de aproximadamente 200 m.

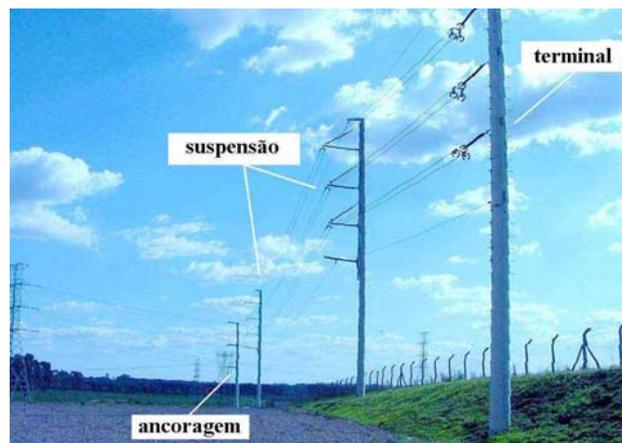


Figura 1 – Vista Geral da Instalação

Enquanto que em uma LT convencional de 230 kV a distância entre fases está entre 5,0 e 8,0 m, este trecho experimental está operando há cerca de 2 anos com distância entre fases da ordem de 3,0 metros. Está prevista ainda uma pequena redução neste valor em função dos resultados das medições de ruído audível, as quais estão sendo realizadas pelo LACTEC desde o início de sua operação.



Figura 2 – Estrutura de Suspensão

Para a definição da silhueta das estruturas os seguintes aspectos foram considerados:

2.0 FEIXE DE CONDUTORES

O objetivo inicial foi de que os cabos condutores propiciassem a mesma ampacidade de uma linha de 230 kV convencional, na qual utilizamos os cabos CAA 636 MCM ou 795 MCM. Em vista da compactação das fases, isto somente seria possível utilizando feixes de condutores.

Ensaio preliminares de Corona Visual, Tensão de Rádio-Interferência (TRI) e Ruído Audível, realizados no LACTEC com algumas combinações de cabos (2 ou 3 condutores/fase) e cadeias (Figura 3), também auxiliaram na definição do feixe.



Figura 3 – Ensaio de Corona Visual e TRI

Além dos aspectos elétricos o estudo do feixe levou em consideração o fato de que os esforços mecânicos transmitidos aos postes não resultassem em postes de grandes diâmetros, visto tratar-se de aplicação em regiões urbanas, nas quais a estética é fundamental.

Como resultado, adotou-se inicialmente um feixe de condutores com 2 cabos CAA 397,5 MCM (Ibis), com tração de 500 kgf/cabo. Assim, foi possível obter postes de suspensão, ancoragem e fim de linha com aproximadamente o mesmo porte dos postes utilizados nas linhas compactas urbanas de 138 kV da COPEL. O diâmetro máximo dos postes de suspensão é da ordem de 0,6-0,7 m, e os postes de ancoragem e terminal, 0,7-0,8 m. Os valores de campo elétrico superficial sob tensão máxima de operação, considerando distância de 25 cm entre os cabos do feixe, constam na Tabela 1:

Embora a área de alumínio dos condutores (2 x 397,5 MCM) seja igual à área de alumínio de uma linha convencional com 1 cabo 795 MCM, a compactação levou a um aumento de cerca de 50% no valor da potência característica (SIL) da linha de transmissão, conforme Tabela 2:

Fase	Con- dutor	Campo Elétrico		Campo Elétrico	
		Máximo (kV/cm)		Médio (kV/cm)	
Inferior	1	18,06	86,0*	16,75	79,8*
	2	18,11	86,2*	16,79	80,0*
Central	1	19,00	90,5*	17,61	83,9*
	2	18,99	90,4*	17,61	83,9*
Superior	1	17,50	83,3*	16,23	77,3*
	2	17,54	83,5*	16,26	77,4*

* Percentual do Gradiente Crítico Visual (21 kV/cm).

Tipo	Condutor	Distância Entre Fases (m)	SIL (MW)
230 kV Conven- cional	1 x 636 MCM	7,5 m	132
	1 x 795 MCM	7,5 m	134
230 kV Com- pacta	2 x 397,5 MCM, sem cabo auxiliar	3,0 m	202
	2 x 397,5 MCM, com cabo auxiliar	3,0 m	203
	2 x 397,5 MCM, com cabo auxiliar	3,5 m	196

3.0 RÁDIO-INTERFERÊNCIA

Os aspectos da rádio-interferência já foram bastante explorados e encontram-se satisfatoriamente equacionados para o caso de linhas de Extra-Alta Tensão (ref. [6]). Porém, a literatura é escassa para linhas de transmissão compactas curtas e de menor nível de tensão.

Ao aplicar-se as metodologias já aceitas para o caso de linhas compactas curtas, pode-se estar incorrendo em imprecisões adicionais como por exemplo, a eventual ocorrência de ondas estacionárias e/ou refletidas nos extremos. Outro aspecto que torna a questão complexa é o fato de que a geração de rádio-interferência não é pontual, ou seja, toda a extensão da linha de transmissão é fonte geradora da interferência, sendo que os estudos existentes sempre tem considerado uma linha de transmissão hipotética de comprimento infinito.

Assim, o estudo computacional baseado na referência [6], tem a intenção de indicar a ordem de grandeza dos valores de rádio-interferência, sendo que apenas com medições após a construção poderá ser possível a obtenção de valores mais precisos.

O requisito usualmente considerado é de que a relação sinal/ruído no limite da faixa de servidão, indicadora do nível de imunidade dos sinais de rádio

(RI), deverá ser no mínimo igual a 24 dB, considerando nível mínimo de sinal referido nas normas do DENTEL, para 50 % das condições atmosféricas do ano. Assim, para a frequência de 1 MHz, o nível de rádio-interferência para a condição de 50% de todos os tempos do ano será de 42 dB (66 dB - 24 dB). Utilizando a metodologia estatística apresentada em [6], conclui-se que o requisito acima é atendido a uma distância de 6,0 m dos condutores, conforme gráfico da Figura 6.

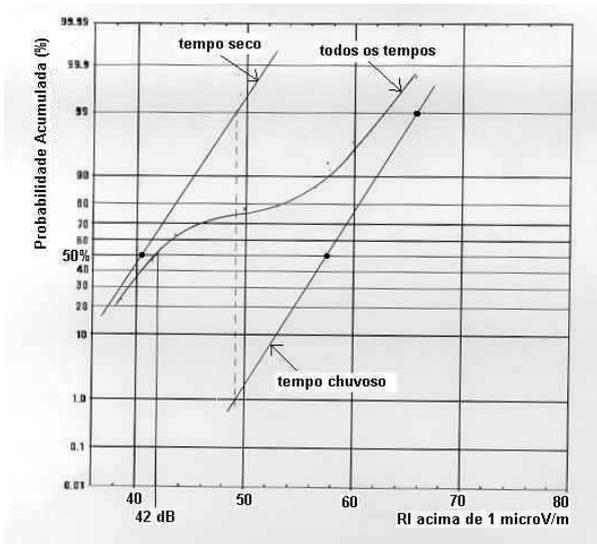


Figura 6 – Rádio-Interferência a 6,0 m dos condutores

4.0 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE 60 HZ

Os limites atualmente aceitos para campos elétricos e campos magnéticos gerados por linhas de transmissão, são de 4,17 kV/m e de 83 μ T [8], nos limites da faixa de segurança. Em vista de tratar-se de linha de transmissão urbana, foi feito um estudo da distribuição espacial destes valores, de modo que a configuração proposta atenda a esses limites. Os valores calculados estão mostrados nas Figuras 4 e 5.

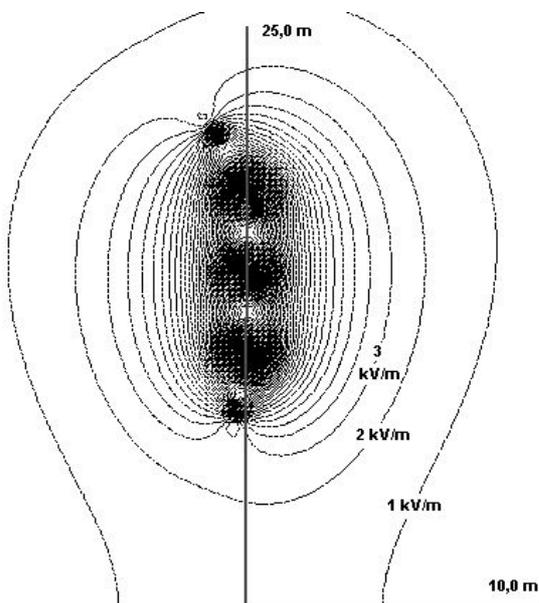


Figura 4 – Perfil de Campo Elétrico ($V_{FF} = 242$ kV)

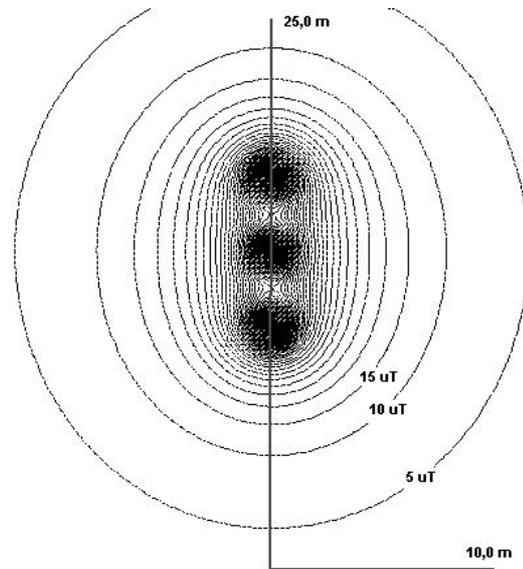


Figura 5 – Perfil de Campo Magnético (600 A/fase)

Conclui-se que os valores máximos de campo elétrico e campo magnético a 6,0 m de distância dos condutores (distância estabelecida pelo critério de rádio-interferência), que são de aproximadamente 2 kV/m e 15 μ T, são inferiores aos valores limites atualmente aceitos.

5.0 SURTO DE MANOBRA FASE-FASE

A influência dos surtos de manobras resultantes da energização ou religamento de linhas compactas sobre os isolamentos em ar está bem equacionada em [9] e [10], dentre outros.

Considerando a distância entre fases de 3,0 m no meio do vão, verifica-se que a distância do grupo de suspensão do cabo condutor ao anel do isolador está da fase inferior é da ordem de 2,3 m. Assim, conforme [6], teríamos CFO = 1400 kV (gap tipo anel-anel, distância de 2,3 m, $\alpha = 0,33$), e CFO = 1250 kV (gap condutor-condutor, distância de 3,0 m e $\alpha = 0,33$).

Considerando-se um risco de falha de 10^{-4} , desvio padrão do surto de manobra igual a 10 %, obtém-se de [6], para 100 gaps em paralelo (que equivalente a uma linha com cerca de 10 km de extensão):

$$S_2 = 1250 / 1,24 \cong 1008 \text{ kV, e assim:}$$

$$U_{50\%} = 1008 / (1 + 2,05 \times 0,10) \cong 836 \text{ kV .}$$

Este valor corresponde a um surto de manobra fase-fase de $836 / (230 \times 1,41) \cong 2,5$ pu .

Conclui-se que a geometria considerada é apropriada para aplicação em linhas de transmissão curtas (até cerca de 10 km), cujo valor médio do surto

de manobra fase-fase seja inferior a 2,5 pu, com desvio padrão inferior a 10% .

6.0 RUÍDO AUDÍVEL

Os níveis de ruído audível devem atender às legislações municipais onde a linha é instalada. Para o atendimento deste requisito, foram realizadas medições pelo LACTEC, ao longo de cerca de 6 meses e em diversas condições climáticas, visando a comparação com os valores estabelecidos por leis municipais de Curitiba.

Os procedimentos para as medidas foram feitos de acordo com [11], que estabelece procedimentos padronizados para medidas de ruído audível em linhas de transmissão aéreas. De acordo com esta norma, o medidor de ruído deve ser posicionado a 1,5 m de altura em relação ao solo, a uma distância de 15 m medidos horizontalmente em relação ao condutor mais externo da linha, na direção perpendicular em relação a distância média da linha (vão central). O microfone com incidência frontal deve ser direcionado ao condutor central da linha trifásica.

As medidas de ruído audível foram realizadas utilizando-se um medidor marca Bruel & Kajer, Modelo 2231, com um filtro de frequências BZ7117 acoplado. O medidor foi programado para executar três varreduras na faixa audível de 20 Hz a 20 kHz, com passos de 1/3 de oitava e largura de banda de 1/3 de oitava. Ao final de cada medida, são listados os resultados com o valor médio para cada uma das bandas de frequência e o valor médio com o filtro aberto para a faixa total de 20 Hz a 20 kHz. As medidas são realizadas inicialmente com filtro de ponderação curva A e em seguida repetidas sem o filtro de ponderação (curva linear).

As condições climáticas foram registradas com o instrumento Weather Monitor II, marca Davis Instruments. Este instrumento recebe sinais de um anemômetro, de um indicador de direção do vento, de um sensor de temperatura e de um sensor interno de umidade relativa do ar. Durante cada medida foram registradas a velocidade máxima e a velocidade mínima do vento. O nível de precipitação pluviométrica foi também avaliado, de forma qualitativa. Em complemento, a tensão elétrica na linha de transmissão foi também anotada, relativa às datas e horas das medidas, com base em dados fornecidos pelo setor de operação do sistema.

O método de avaliação “Análise de Frequências”, recomendado em [12] e [14], foi adotado. Na análise de frequências podemos comparar os espectros sonoros medidos com as curvas de avaliação de ruído (NC), permitindo a identificação das bandas de frequência que ultrapassam os limites estabelecidos em cada curva NC. Na Figura 7 são mostradas as curvas de avaliação de ruído (NC) geradas a partir da tabela 2 de [13], e os espectros resultantes das medições realizadas na linha de transmissão.

As curvas (NC) estão relacionadas com os limites máximos permitidos para cada local de acordo com a

Tabela 1 de [13]. Para fins comparativos dos espectros medidos na linha de transmissão, utilizou-se os limites máximos permissíveis de ruídos para as diversas zonas de uso (residencial, industrial, etc) no período noturno, citados no Anexo I de [14]. Considerou-se os limites máximos para o período noturno porque estes são inferiores aos limites máximos para os demais períodos em suas respectivas zonas de uso. Os limites máximos permissíveis de ruído para o período noturno são de 45, 55 e 60 dB(A) para as diversas zonas de uso e correspondem as curvas NC40, NC50 e NC55, respectivamente.

Durante o período de medição do dia 28/08/2001, cujos resultados estão mostrados nos espectros da Figura 7, as condições climáticas apresentavam instabilidade. A primeira medida, de número 23, foi realizada com tempo nublado. A medida número 24 foi iniciada com garoa intermitente, percebendo-se o aumento do ruído audível gerado por efeito corona. Comparando-se os espectros resultantes destas duas medidas pode-se perceber um aumento significativo do nível de intensidade sonora na faixa de frequência de 2 kHz a 20 kHz. Na medida de número 26 ocorreu novamente mudanças das condições climáticas passando de garoa intermitente para chuva fraca e pode-se observar uma redução do nível sonoro na faixa de 2 kHz a 20 kHz.

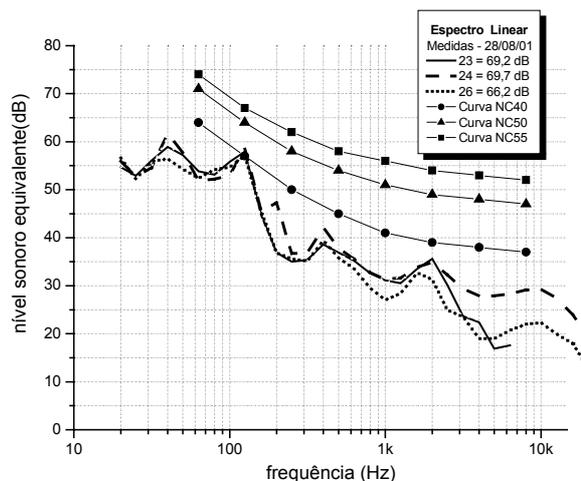


Figura 7 - Espectro de frequências das medidas realizadas em 28/08/01, e curvas NC40, NC50 e NC55.

Na análise dos espectros de frequência gerados em todas as medidas observou-se um pico característico correspondente à componente tonal de 120 Hz, citada na literatura como “hum” [6]. Esta componente tonal é em grande parte gerada pelos transformadores de potência da subestação, localizados a cerca de 100 m de distância, e que contribuem com o ruído ambiente. Em todos os espectros somente este pico da componente tonal ultrapassa a curva NC40, a qual corresponde ao limite máximo de nível sonoro no período noturno para zonas residenciais na região de Curitiba (Anexo I de [13]).

Desta forma, se o ruído ambiente for reduzido na faixa de baixas frequências próximas a esta componente tonal, podemos concluir que o ruído audível gerado pela linha em estudo atende aos limites estabelecidos pela legislação municipal.

Em complemento, foram feitas medições adicionais de ruído audível sob os cabos condutores (Figura 8) e a 5 m do eixo dos condutores, cujos resultados foram similares às conclusões acima relatadas.



Figura 8 – Medições de Ruído Audível Sob os Condutores

7.0 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Nas linhas urbanas de 69 kV e 138 kV são utilizados normalmente isoladores tipo pilar de porcelana ([1], [4]). Em 230 kV, isolamentos tipo V-Horizontal tem sido utilizados ([15]), compostos por um isolador superior (estai) polimérico (eventualmente cadeias com isoladores de disco) e isolador inferior de porcelana ou polimérico (Figura 9). Esta montagem permite significativa redução de peso em comparação com o isolador pilar de 230 kV, além de permitir movimentos do conjunto nos sentidos vertical e longitudinal.

Da mesma forma como nos padrões de 69 kV e 138 kV de linhas compactas da COPEL, foi considerado a utilização de um cabo aterrado localizado embaixo das fases (cabo auxiliar – Figura 2), o qual, além de fornecer proteção mecânica contra eventuais aproximações das fases, também reduz o campo elétrico ao nível do solo e reduz os valores de corrente de curto-circuito que fluem para o aterramento do poste.

Em complemento, nesta instalação experimental foi previsto um trilho de aço aparafusado ao poste (Figura 9) sob a base dos isoladores, com furações a intervalos regulares de 250 mm. O objetivo desta peça é permitir o deslocamento das fases, quando necessário, visando otimizar a separação entre os condutores.



Figura 9 – Isoladores e o Trilho para Deslocamento das Fases

8.0 ATERRAMENTO

O ocorrência de curto-circuitos fase-terra causa a injeção de altos valores de correntes elétricas no solo, e desta forma o sistema de aterramento deve ser projetado de modo a manter os níveis de potenciais de toque e passo dentro de valores toleráveis pelo ser humano.

Considerando que os níveis de potência de curto-circuito fase-terra no sistema de 230 kV são da ordem de 20 kA, similares aos valores máximos em 69 kV e 138 kV, o sistema de aterramento previsto é idêntico ao descrito em [3], composto basicamente por (Figura 10):

- 3 hastes de 6 m de comprimento, separadas por uma distância de 6 m,
- reconstituição da camada superficial do solo (calçadas) com material asfáltico, quando necessário,
- utilização de cabo pára-raios CAA e de um cabo aterrado localizado embaixo das fases (cabo auxiliar), reduzindo assim as correntes de curto-circuito injetadas no solo.

9.0 FUNDAÇÕES

As fundações para estruturas em postes de concreto diferem dos tipos mais comuns pelo modo em que são submetidas ao carregamento. Um poste de concreto, para uma LT de 230 kV é submetido a uma grande força horizontal resultante, aplicada a uma grande altura, produzindo um grande momento fletor ao nível do solo, também denominado momento tombador, além de grandes cargas horizontais de cisalhamento na fundação.

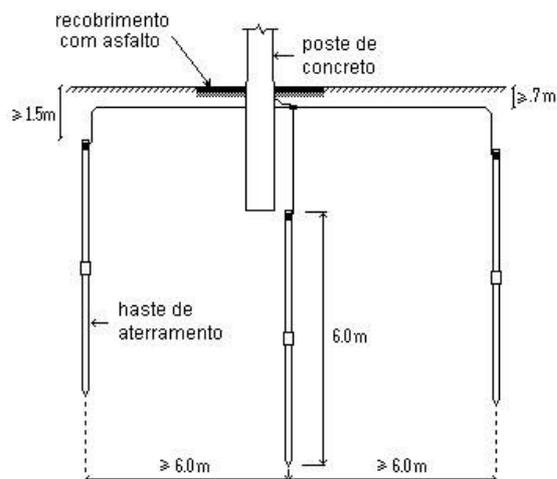


Figura 10 – Aterramento das Estruturas

Para equilibrar tais solicitações, evita-se utilizar sapata isolada, pois as dimensões para este tipo de fundação resultariam excessivas, não só aumentando consideravelmente o custo da linha de transmissão, mas com grandes restrições em regiões urbanas.

Tubulões escavados são amplamente utilizados como fundações de estruturas em poste. Os equipamentos para escavação tem sido bem utilizados tornando a escavação relativamente barata, mesmo quando o nível d'água está elevado. Para as estruturas de 230 kV, tubulões formados por escavações com diâmetro ligeiramente maior que o diâmetro do poste e reconstituídos com solo-cimento, concreto ou mistura de brita e areia são amplamente utilizados em estruturas de suspensão. Para estruturas de ancoragem, tubulões formados pelo revestimento externo com manilhas e reforçados com palas ao nível superior se aplicam com grande vantagem construtiva, além de grande economia no custo total da linha de transmissão.

10.0 CONCLUSÕES

Em função do bom funcionamento desta instalação experimental ao longo de 2 anos, e em face aos resultados das medições de ruído audível realizadas, pode-se prever com boas perspectivas a utilização deste novo padrão de linha de transmissão compacta para áreas urbanas ou semi-urbanas.

Este novo padrão poderá vir a ser uma boa solução para aplicação às futuras Usinas Térmicas que venham a ser instaladas nas proximidades de regiões urbanas, visto que a tensão das linhas provenientes destas usinas, para conexão ao sistema é, em geral, 230 kV.

11.0 AGRADECIMENTOS

Este projeto foi viabilizado com a colaboração dos seguintes fabricantes, que cederam amostras de materiais: CONPREM (1 poste de ancoragem e 1 poste de suspensão), CAVAN (1 poste de ancoragem), SCAC (1 poste de suspensão), SANTANA (3 conjuntos de isoladores "V" e 3 isoladores "linepost" para "jumper"), ISOELECTRIC (3 conjuntos de isoladores "V"), e CERAMTEC (3 isoladores "linepost" para os conjuntos "V").

12.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FUJIWARA, A. et al, Experiência Com Uma LT 69 kV Urbana, VI SNPTEE 1981, Camboriú/SC.
- [2] MARTIN, C. et al, RI e TVI em Decorrência de LT's 138 kV Urbanas Compactas da Copel, VII SNPTEE 1983, Brasília/DF
- [3] HOFFMANN, J. N., Aterramento de Linhas de Transmissão em Áreas Urbanas. XI SNPTEE. 1991, Rio de Janeiro/RJ
- [4] PROSDOCIMO, N., MARTIN, C., Diretrizes Para Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão Compactas Urbanas, XII SNPTEE 1993, Recife/PE
- [5] CHARTIER, V. L. et al, Corona Performance Of A Compact 230 kV Line, IEEE PD Vol. 10, no 1, Janeiro 1995
- [6] Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, EPRI, 1982
- [7] Transmission Line Reference Book, 115-138 kV Compact Line Design, EPRI Research Project 260, 1978
- [8] Guidelines For Limiting Exposure To Time-Varying Electric, Magnetic, And Electromagnetic Fields (ICNIRP Guidelines), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, 1998 April
- [9] VAISMAN, R. et al, Estudo do Isolamento de Estruturas Compactas; XI SNPTEE, 1991
- [10] Phase-to-Phase Switching Surge Design, addendum to Transmission Line Reference Book 115-138 kV Compact Line Design, EPRI Research Project EL-1550, 1980
- [11] ANSI/IEEE Std 656, Standard For The Measurement of Audible Noise From Overhead Lines, 1985
- [12] ABNT NBR 10151, Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade, Dezembro, 1987
- [13] PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Lei Municipal nº 8.583, de 10 de Janeiro de 1995 - Dispõe Sobre Ruídos Urbanos e Proteção do Bem Estar e do Sossego Público.
- [14] ABNT NBR 10152, Níveis de Ruído para Conforto Acústico, NBR 10152. Dezembro, 1987.
- [15] POKARIER, B. R., LEE, C.J., Compact Design 275 kV Lines Using Composite Horizontal Vee

Insulator Assemblies; Conference On Electric
Energy, Australia, Outubro, 1992