



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/28
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

**REISOLAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPACTAS DE 69 KV PARA 138 KV (LT
SUPERCOMPACTA)**

**Muryllo Amalio de Souza (*)
COPEL DIS**

**João Nelson Hoffmann
COPEL GET**

RESUMO

Este informe técnico tem por objetivo apresentar os estudos elétricos preliminares realizados para a concepção de uma linha de transmissão em padrão urbano de 69 kV reisolada para 138 kV. Serão apresentados os testes realizados para verificação do efeito corona, os testes realizados para determinação da suportabilidade elétrica do conjunto, avaliações dos campos elétrico e magnético bem como análise do desempenho das linhas reisoladas. O objetivo deste estudo é verificar a viabilidade técnica da repotencialização por aumento de tensão, mantendo-se a infra estrutura instalada em quase sua totalidade, sendo necessária a substituição somente dos isoladores.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Compactação, reisolamento, campo elétrico, campo magnético.

1.0 - INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 30 anos a Copel vem desenvolvendo e construindo linhas de transmissão aéreas em padrão urbano para aplicação em áreas onde o padrão convencional de torres metálicas não pode ser utilizado. O padrão urbano de LT's da Copel é construído em postes de concreto, para operação em 69 kV, 138 kV (1)(2) e 230 kV (3).

Em função da crescente demanda por energia em Curitiba, as linhas de transmissão em padrão urbano de 69 kV da Copel tem sido operadas próximas ao limite térmico dos condutores, o que motivou os primeiros estudos de reisolamento para 138 kV, como uma das soluções alternativas para suprir a demanda, futuramente, aproveitando-se a estrutura suporte já existente.

Enquanto que uma linha em padrão urbano de 69 kV apresenta a distância entre fases de 1,20 m, na linha de padrão urbano de 138 kV é de 1,7 m. Assim, a linha urbana *supercompacta* de 138 kV é essencialmente uma linha de transmissão com isolamento para essa tensão mas com distância entre fases da ordem de 1,2 m apenas.

(*) José Isidoro Biazetto, n° 158 – sala 173 - Bloco A – CEP 81.200-240
Curitiba, PR, – Brasil, Tel: (+55 41) 3331-2278 – Email: muryllo@copel.com

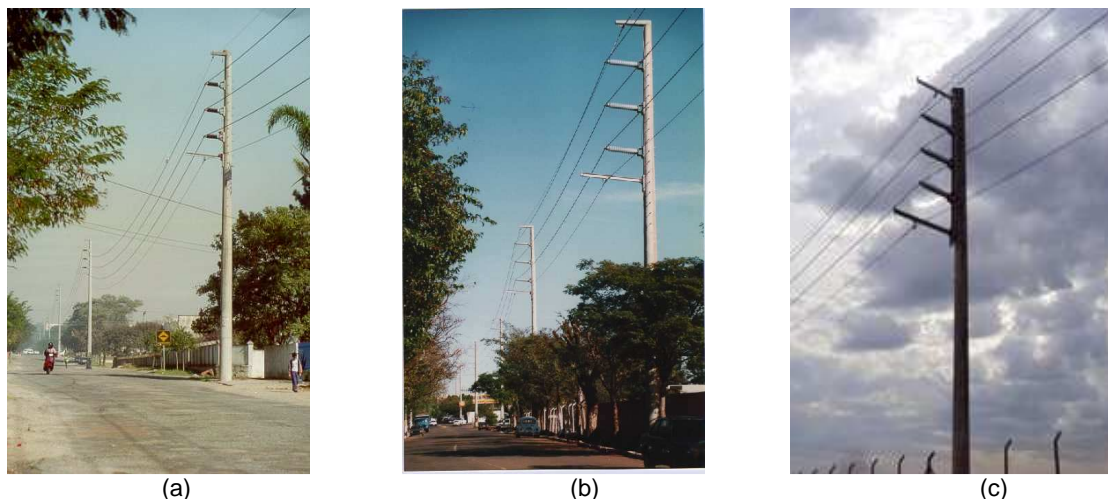


Figura 1 - Linhas de transmissão em padrão urbano da Copel: (a) 69 kV, (b) 138 kV e (c) experimental 69 kV reisolada para 138 kV.

2.0 - CONDUTORES

O padrão urbano de linhas de transmissão 69 e 138 kV da Copel utilizam condutores do tipo CAA, 636 MCM ou 795 MCM. Um dos objetivos principais do estudo é procurar manter a infra-estrutura já construída, inclusive utilizando o mesmo condutor. Dessa forma, se mantem as mesmas condições de tração mecânica axial e transversal nas estruturas, além das mesmas condições mecânicas transmitidas aos postes. Os condutores foram avaliados em relação ao Corona visual, Ruído Audível e Rádio Interferência.

2.1 Corona Visual

Considerando-se o critério usual de que as linhas de transmissão devem apresentar gradiente máximo igual ou inferior a 90 % do gradiente crítico visual, utilizou-se a expressão de Miller apresentada em (5) para a determinação deste parâmetro, obtendo-se, para o cabo 636 MCM Grosbeak, um gradiente crítico visual de $E_{crv} = 19,7 \text{ kVef/cm}$.

Calculando-se os campos eletroestáticos superficiais em condutores utilizando as novas características requeridas pela linha de transmissão em padrão urbano reisolada (i.e Operando em 138 kV com distância entre fases de 1,2 m), tensão máxima de 145 kV, obtém-se os seguintes resultados de campo elétrico Superficial:

Tabela 1 - Campo Elétrico Superficial no condutor Grosbeak para LT reisolada

Fase	Gradiente máximo (kVef/cm)	Percentual do Gradiente crítico visual (%)
1	14,00	71,1
2	15,01	76,2
3	13,86	70,3

Conforme é possível verificar, o percentual da fase mais crítica é menor do que 90% do gradiente crítico visual, atendendo o requisito mencionado acima.

Visto que os gradientes apresentados na tabela 1 são resultado da contribuição das 3 fases e que no laboratório os ensaios estão limitados à aplicação monofásica, e foi necessária determinação da tensão fase-terra a ser aplicada no condutor para obtenção de gradiente superficial de 15,01 kVef/cm. A tensão monofásica calculada foi de 118 kVef. A seguinte avaliação qualitativa, tabela 2, foi obtida no ensaio realizado no Lactec, incluindo ensaio com condutor Grosbeak de tentos trapezoidais para comparação:

Tabela 2 - Pontos de corona visual nos condutores convencional e trapezoidal

Tensão de Ensaio (fase-terra, kVef)	Corona Visual – Grosbeak convencional. (nº de pontos observados)	Corona Visual – Grosbeak trapezoidal. (nº de pontos observados)
300	20+	9

250	7	4
200	3	2
190	2	2
180	2	1
170	1	1
160	1	0
150	1	0
140	0	0

Observa-se que o condutor trapezoidal tem desempenho melhor que o convencional. A tensão de extinção de corona visual do condutor trapezoidal obtida foi 160 kVef, enquanto que no caso do condutor convencional, a extinção foi obtida somente na tensão de 100 kVef.

Dessa forma, conclui-se que os condutores já utilizados no padrão construtivo das linhas de 69 kV urbanas da Copel poderão ser mantidos no reisolamento para 138 kV, já que não se observa a formação de corona nos condutores, na faixa de tensão de operação requerida.

2.2 Ruído audível

Sobre as mesmas amostras de cabos foi realizada a medição do ruído audível, onde foram obtidos os valores apresentados na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3 - Ruído Audível nos condutores convencional e trapezoidal

Tensão de Ensaio (fase-terra, kVef)	Ruído Audível - Grosbeak convencional. (dBA)	Ruído Audível - Grosbeak trapezoidal. (dBA)
300	59,4	58,6
250	56,2	53,7
200	49,3	48,8
150	49,3	45,7

Pode-se observar que os valores de ruído audível para o cabo trapezoidal são menores do que os valores obtidos pelo condutor convencional, sendo, então, mais adequados para aplicação em áreas com densidade populacional elevada. Também observa-se que não há mudanças de emissão de ruído audível para tensões menores do que 180 kVef fase-terra, e, considerando-se que a tensão fase terra para Tensão superficial equivalente é de 118 kVef, conclui-se que o ruído audível emitido pelos condutores estará dentro do nível de conforto indicado na tabela 1 da referência (4), onde são indicados valores abaixo de 50 dBA para conforto acústico em residências.

Todas as medições foram realizadas com o decibelímetro instalado à aproximadamente 10 m de altura e aproximadamente 6 m de distância dos cabos ensaiados, em função das limitações físicas do laboratório.

Em complemento, a avaliação de ruído audível dos condutores e ferragens será feita em um trecho experimental construído para este fim e que está pronto para energização, seguindo-se a metodologia adotada em (3).

2.3 Rádio Interferência

O requisito usualmente utilizado para rádio interferência (RI) é de relação sinal/ruído no limite da faixa de servidão a qual deverá ser no mínimo igual a 24 dB, considerando o nível mínimo de sinal indicado pela Aneel, para 50% das condições atmosféricas do ano. Assim, para a frequência de 1 MHz, o nível de RI 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 (7), é possível determinar a distância em relação aos condutores que o requisito será atendido.

Um estudo computacional de rádio interferência foi realizado com programa específico para este fim, desenvolvido pelo Lactec (6), baseado na metodologia apresentada em (7). Como resultado, verifica-se que o requisito de RI será atendido a 5,0 m de distância dos condutores, conforme pode ser verificado na Figura 2, abaixo.

Porém, deve-se observar que, de acordo com (12) a aplicação de metodologias clássicas para predição de Rádio Interferência (RI) em linhas de transmissão de classe de tensão 69 e 138 kV curtas, pode incorrer em imprecisões, sobretudo levando-se em consideração de que a geração de rádio interferência não é pontual, ou seja, ocorre em toda a extensão da linha de transmissão, sendo que os estudos em geral consideram a linha de transmissão com comprimento infinito.

Assim, somente medições após a LT operando poderão confirmar o valor calculado, tomando-se em conta ainda que as LT's de padrão urbano são predominantemente curtas, com grande número de vértices e ângulos, além de

ferragens não usuais em LT convencionais e que possivelmente provocarão alterações nos valores finais.

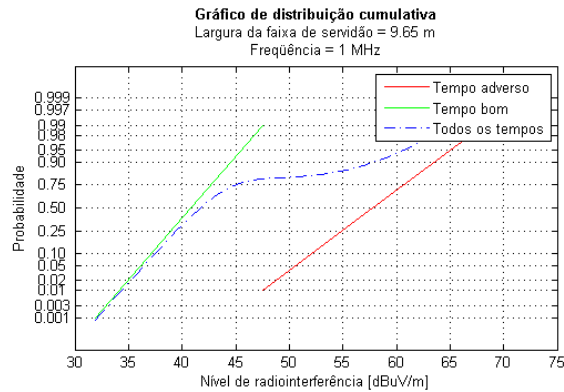


Figura 2 – Rádio interferência calculada para a LT reisolada.

Os cálculos foram realizados com tensão máxima de 145 kV e resistividade do solo de 500 ohm.m.

3.0 - CAMPO ELÉTRICO E CAMPO MAGNÉTICO DE 60 HZ

Os limites atualmente aceitos para campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão são de 4,17 kV/m e 83,3 μ T, respectivamente, no limite da faixa de segurança, ou seja, para o público em geral (8) e (9). Os valores calculados são mostrados nas Figura 3 e Figura 4 abaixo, onde são mostrados a distribuição espacial (a) e a distribuições de campo calculados a 1,5 m de acordo com (11).

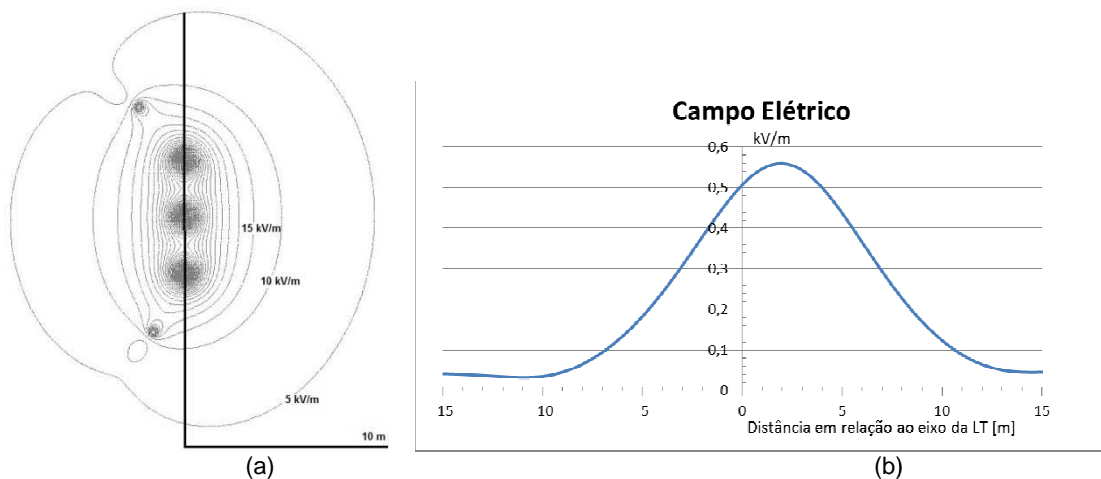


Figura 3 - Campo elétrico - distribuição espacial (a) e valores calculados a 1,5 m do solo (b) - Vff = 145 kV.

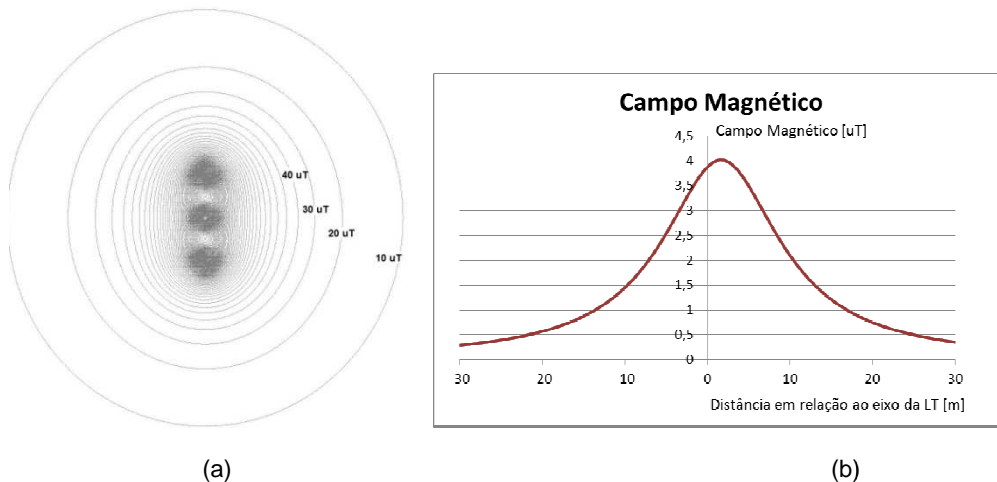


Figura 4 - Campo magnético – Distribuição espacial (a) e valores calculados a 1,5 m do solo (b) - 750 A/fase.

Conclui-se que os valores máximos de campo elétrico e campo magnético estão de acordo com os limites estabelecidos para exposição humana, uma vez que, mesmo sob o eixo da LT, encontramos os valores de 0,56 kV/m e 4,2 μ T, respectivamente, obtidos à 1,5 m do solo.

4.0 - IMPULSO ATMOSFÉRICO E SURTO DE MANOBRA

Com o alto grau de compactação desta LT, espera-se que haja uma redução na suportabilidade à impulsos atmosféricos por descargas no meio do vão, e por surtos de manobra fase-fase.

Para a verificação do impacto da compactação, foram realizados os seguintes ensaios para determinação da suportabilidade dos gaps fases-fase:

- Tensão disruptiva sob impulso atmosférico;
- Tensão disruptiva sob impulso de manobra a seco;
- Tensão disruptiva sob impulso de manobra sob chuva.

A Figura 5 abaixo mostra o arranjo utilizado para a realização dos ensaios.

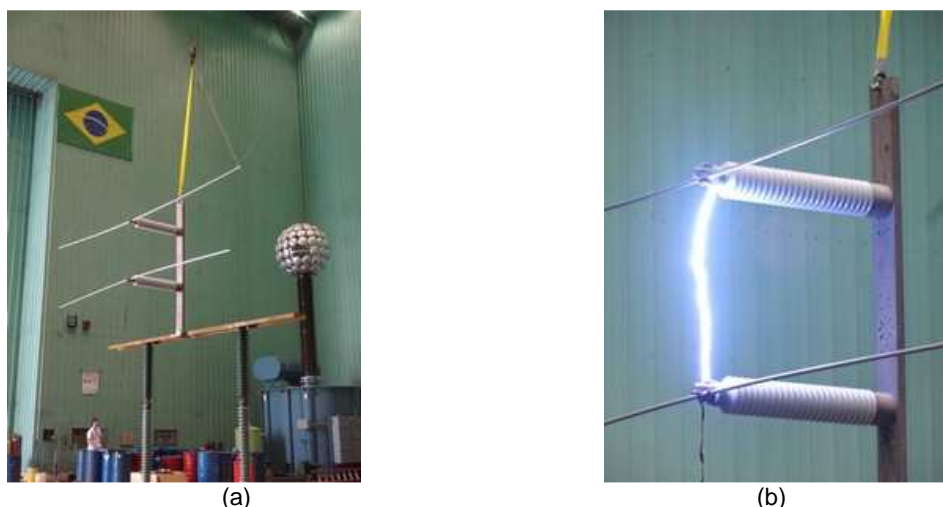


Figura 5 – (a) Arranjo para ensaios de determinação de tensões disruptivas e (b) localização da descarga disruptiva.

4.1 Tensão disruptiva sob impulso atmosférico

Os seguintes valores de suportabilidade, tensão fase-fase de crista (Vcr) foram obtidos, em condições atmosféricas normalizadas:

Tabela 4 – Tensões disruptiva e suportável do espaçamento sob impulso atmosférico

Tensão	Polaridade Positiva	Polaridade Negativa
Disruptiva (U50%)	676,9 kVcr	746,9 kVcr
Suportável (U10%)	650,5 kVcr	717,8 kVcr

4.2 Tensão disruptiva sob impulso de manobra a seco

Tabela 5 - Tensões disruptiva e suportável do espaçamento sob impulso de manobra a seco

Tensão	Polaridade Positiva	Polaridade Negativa
Disruptiva (U50%)	622,1 kVcr	691,0 kVcr
Suportável (U10%)	597,8 kVcr	664,1 kVcr

4.3 Tensão disruptiva sob impulso de manobra sob chuva

Neste ensaio, o gap foi submetido a ensaio de chuva artificial com parâmetros normalizados de precipitação de 1 a 2 mm/min e resistividade da água de $100 \pm 15 \Omega.m$.

Tabela 6 - Tensões disruptiva e suportável do espaçamento sob impulso de manobra sob chuva

Tensão	Polaridade Positiva	Polaridade Negativa
Disruptiva (U50%)	634,7 kVcr	718,5 kVcr
Suportável (U10%)	609,9 kVcr	609,5 kVcr

Os resultados podem ser resumidos como seguem:

Impulso atmosférico suportável (NBI) do isolador utilizado: 550 kV
 Impulso atmosférico suportável do espaçamento em ar: 650 kV
 Impulso de manobra suportável do espaçamento do ar, a seco: 598 kV
 Impulso de manobra suportável do espaçamento do ar, sob chuva: 610 kV

5.0 - SURTO DE MANOBRA

Considerando que as linhas de padrão urbano de 69 kV que poderão ser reisoladas para 138 kV são muito curtas (cerca de até 4 km), possuindo cerca de até 50 postes (considerados gaps), e admitindo-se um risco de falha de 1%, obtém-se da referência (12):

$$V_{ws} = CFO \times (1 - 3,5 \sigma) = 495 \text{ kV},$$

Este valor é equivalente a 4,4 p.u. em relação à base fase-terra, e assim, conforme (12) ele não será excedido em linhas que apresentem surto fase-fase igual ou menor do que 2,8 p.u.

Portanto, pode-se concluir que o NBI do espaçamento em ar obtido nos ensaios de laboratório entre os isoladores é apropriado sob o ponto de vista dos impulsos de manobra fase-fase para uma linha com até 50 gaps paralelos (ou vãos) operando em 138 kV, com distância entre fases de 1,2 m e admitindo-se risco de falha de 1% com todos os surtos de manobra iguais a 2,8 p.u.

O cálculo simplificado acima tem a intenção apenas de apresentar uma noção dos valores envolvidos no estudo, sendo sugeridos cálculos específicos para cada projeto.

6.0 - DESEMPENHO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os NBI determinados no item 4 permitem a análise do desempenho da LT frente a impulsos atmosféricos, os quais podem gerar desligamentos de duas formas principais:

6.1) por backflashover geram curto-circuitos fase-terra através do isolador, e correspondem à quase totalidade dos desligamentos por raios. Como o isolador é o mesmo das LTs padrão de 138 kV, não haverá incremento neste tipo de desligamento.

6.2) por shielding failure ou seja, descargas diretas nos condutores (falha de blindagem) - Neste caso, como obviamente esta distância de 1,20 m tem NBI menor do que a distância padrão do 138 kV que é 1,70 m, pode-se esperar um número maior de desligamentos por falha de blindagem.

No estudo teórico realizado (13) verificou-se que os desligamentos por descargas diretas representa um percentual pequeno dos desligamentos totais de uma LT, menos de 2%.

Tabela 7 – Índices de desligamento (desligamento / 100 km / ano) de linhas de padrão urbano da Copel comparadas à LT 138 kV reisolada.

	69 kV convencional	138 kV convencional	138 kV reisolada
<i>Backflashover</i>	20,17	3,49	4,26
<i>Shielding failure</i>	0	0	0,04
<i>Flashover rate</i>	20,17	3,94	4,30

Verifica-se, portanto, que espera-se um aumento muito pequeno nos desligamentos da LT compacta com 1,2 m entre fases, se comparada com a LT 138 kV convencional, que possui 1,7m de distância entre fases.

Um levantamento de histórico de 5 anos (2008-2013) foi realizado para as linhas de transmissão de 69 kV da Copel, onde foi verificado que as linhas em padrão urbano tem menor índice de desligamentos / 100 km / ano do que as linhas em padrão "rural" (construídas com estruturas metálicas). Os seguintes dados foram observados:

Tabela 8 – Índices de desligamento (desligamento / 100 km / ano) de linhas 69 kV da Copel em 5 anos.

69 kV padrão urbano	69 kV em torres metálicas
6,7	10,1

Conforme (12), a compactação de linhas de transmissão traz melhoria de desempenho frente a descargas atmosféricas. Em complemento, há como acima demonstrado há menor incidência de descargas sobre as LTs urbanas, em função das suas dimensões reduzidas e dos demais obstáculos presentes em suas proximidades.

Desta forma, apesar de que a compactação possa resultar em um número maior de desligamentos por descargas diretas no meio do vão, fica evidente pela análise acima que no cômputo geral este tipo de linha de transmissão apresentará um índice de desligamentos bastante inferior (da ordem da metade) em relação a uma LT tradicional.

7.0 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS

As linhas de transmissão em padrão urbano de 69 kV da Copel utilizam isoladores tipo pilar de porcelana, sendo estes os únicos componentes a serem substituídos no reisolamento pretendido para 138 kV.

Já o cabo condutor aplicado nas linhas de 69 kV, de bitola 636 ou 795 MCM, poderá ser mantido no reisolamento para 138 kV, sem que sejam observados problemas de corona visual.

A análise dos dados de desligamento mostra que o posicionamento, bem como a bitola, dos cabos para raios não requer modificações, mantendo-se a mesma das linhas de 69 kV.

O aterramento das estruturas permanece como descrito detalhadamente em (2) e (3). Os níveis de curto circuito das linhas de 69 kV na Copel são de aproximadamente 31,5 kA enquanto as linhas de 138 kV atualmente apresentam níveis de 20 kA. Assim, o arranjo constituído de 3 hastes de 6 m de comprimento e cabo auxiliar aterrado sob as fases permanece inalterado, já que os níveis para 138 kV são menores do que os níveis para 69 kV.

Embora tenha se buscado não alterar significativamente os elementos já instalados para uma LT de 69 kV, o reisolamento deverá ser precedido de análise rigorosa das condições físicas e de carregamento das estruturas de concreto, pontualmente em cada caso, de modo a garantir que a montagem da nova LT seja possível, sobretudo em pontos como ancoragens, jumpers, vértices, etc.

8.0 - INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para avaliação final do novo arranjo, foi construído um trecho experimental dentro de uma subestação da Copel, utilizando-se da infra estrutura montada para a avaliação da LT compacta 230 kV (3), sendo constituído de 5 vãos, sendo um de aproximadamente 87 metros, distância típica das linhas de padrão urbano da Copel e o qual será utilizado para a realização das medições de campo elétrico e ruído audível.

Dois postes novos foram instalados para viabilizar a energização em 138 kV, totalizando 6 postes, e no momento a etapa de energização está sob análise das áreas de manutenção e operação para ser concluída.

A Figura 6 abaixo mostra uma visão geral da montagem do vão a ser submetido às medições. Importante salientar que os postes utilizados, mostrados na figura, foram aproveitados da linha experimental de 230 kV, muito mais altos. Entretanto, a distância cabo-solo de linhas de 69 kV foi respeitada.



Figura 6 – Visão geral do vão experimental

9.0 - CONCLUSÃO

Conclui-se, a partir dos estudos iniciais desenvolvidos e apresentados neste IT, que o reisolamento das LTs compactas urbanas de 69 kV para 138 kV, com cabo 636 ou 795, é possível do ponto de vista de isolamento elétrico apenas com a troca do isolador. Outros detalhes construtivos deverão ser avaliados pontualmente, não sendo impeditivos a nosso ver.

Os dados e conclusões aqui apresentados serão comprovados com a energização de um trecho especialmente construído com este fim, dentro de uma subestação da Copel. Com essa energização serão analisados, entre outros pontos, o campo elétrico, ruído audível, etc.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FUJIWARA, A., et al, Experiência com uma LT 69 kV Urbana, VI SNPTEE, 1981, Camboriú/SC.
- (2) HOFFMANN, J. N. , Aterramento de linhas de transmissão em áreas urbanas. XI SNPTEE, 1991, Rio de Janeiro, RJ.
- (3) HOFFMANN, J. N. , Linha de transmissão urbana compacta experimental em 230 kV. XVII SNPTEE, 2003, Uberlândia, MG.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Níveis de ruído para conforto acústico. NBR 10152. Brasil.
- (5) FUCHS, R. D., Transmissão de Energia Elétrica. Vol. 2. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S.A. 1977.
- (6) QUOIRIN, N. S. R., et al. Cálculo e medição de rádio-interferência gerada pelas linhas de transmissão da Copel. XII ERIAC, 2007. Foz do Iguaçu, PR.
- (7) ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above. Palo Alto, 1975.
- (8) BRASIL. Lei n. 11.934, de 5 de maio de 2009. Dispõe sobre limites de exposição humana à campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos.
- (9) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Regulamenta a Lei n. 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz. Resolução n. 398 de 23 de março de 2010.
- (10) INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). Health Physics, 2010.
- (11) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz. NBR 15415. Brasil.
- (12) ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Transmission Line Reference Book – 115-345 kV Compact Line Design.
- (13) IEEE, FLASH, version 1.7., 1996.

11.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Muryllo Amalio de Souza nasceu em Curitiba, PR, Brasil, em 1978. Graduiu-se em Engenharia Industrial Elétrica, ênfase Eletrotécnica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2004. Desde 2006 atua no Setor de Estudos Eletromecânicos e Cíveis de Linhas de Transmissão da Companhia Paranaense de Energia, COPEL.



João Nelson Hoffmann é formado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná (1981), com mestrado em Matemática Aplicada e Computacional na UNICAMP (1993). Trabalha na COPEL – Companhia Paranaense de Energia - no Departamento de Engenharia de Linhas de Transmissão desde 1987, sendo autor de cerca de 40 artigos relacionados com estudos eletromecânicos.