



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Aprimoramento do Desempenho de LT's Através de Aplicação de Para-Raios Associados ao Sistema de Aterramento Impulsivo – Metodologia de Implementação

Marcos Telló	Guilherme A. D. Dias	Daniel da S. Gazzana	Virgílio T. D. B. Filho
CEEE-D	Impulse Engenharia	UFRGS	Impulse Engenharia
marcost@ceee.com.br	gaddias@impulse.eng.br	dgazzana@terra.com.br	vbranco@impulse.eng.br

Vicente M. Canalli	Flávio R. P. Martins Jr	Roberto P. Homrich	Daniel S. Roso
PUCRS	PUCRS	UFRGS	PUCRS
vicente.canalli@pucrs.br	fjrmartins@yahoo.com.br	roberto.homrich@ufrgs.br	danieletrics@yahoo.com.br

Palavras-chave: Aterramento, descarga atmosférica, linha de transmissão, pára-raios, trabalho em linha energizada

Resumo: Este artigo descreve a metodologia desenvolvida, a qual é caracterizada por estudos de engenharia e conseqüente implementação de soluções, através de projeto de P&D, para melhorar o desempenho de linhas de transmissão (LT's) frente a surtos atmosféricos. O critério de escolha da LT objeto de estudo, baseou-se na escolha daquela que, no âmbito da área de concessão da empresa (CEEE-D), apresentasse um elevado número de desligamentos devido à descargas atmosféricas. A região de implantação da LT apresenta uma densidade de descargas atmosféricas por km por ano da ordem de 5. A LT eleita com tensão de 69 kV apresenta uma taxa de falha normalizada de 133,33 falhas/100 km ao ano. A referida linha de transmissão atende indústrias de grande porte na região sul do país (indústrias de celulose e produção de oxigênio, entre outras). Fato importante é a de que a extensão da linha é de apenas 3 km, possuindo 26 estruturas ao longo de seu comprimento.

1. Introdução

Um dos critérios que pode ser utilizado para avaliar o desempenho de uma linha de transmissão é o número de desligamentos da mesma por ano devido a fatores associados a descargas atmosféricas. No estudo realizado, escolheu-se uma LT dentro na área de concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica CEEE a qual possuísse uma alta taxa de desligamento e estivesse dentro de uma área de grande densidade de descargas atmosféricas. Desta forma, prima-se por relatar neste trabalho os procedimentos utilizados na implantação de melhorias na LT, linha piloto, realizados dentro de projeto de P&D (ANEEL) de modo a aprimorar a performance da mesma.

Para levar a bom termo a meta proposta, a qual corresponde a garantir um desempenho adequado da linha de transmissão, foram utilizados os seguintes aspectos:

- levantamento das características elétricas e geométricas ao longo de toda a LT;
- elaboração de critérios de medição da resistividade elétrica do solo;
- elaboração de critérios de medição da resistência de aterramento de cada estrutura;

- medição da resistividade elétrica do solo, ao longo da LT, a partir dos critérios de medição elaborados. Para as medições referidas a LT não foi desligada;
- medição da resistência de aterramento em todas as estruturas que compõem a LT, a partir dos critérios de medição elaborados. Para as medições referidas a LT não foi desligada;
- determinação, através de estudos de descargas atmosféricas (blindagem) e para a configuração existente de condutores (fase e blindagem) da corrente crítica de descarga. A corrente referida é aquele valor de corrente crítica do raio que provoca ruptura do isolamento na torre e conseqüente desligamento;
- utilização do software ATP, para a avaliação do desempenho da LT, frente a surtos atmosféricos, sem a utilização de pára-raios ao longo da LT e considerando os parâmetros elétricos advindos das medições de campo, considerando os parâmetros de resistência de aterramento impulsivo (e frequência industrial);
- a quantidade de Pára-raios a serem utilizados ao longo da LT, foi de 15 pára-raios, posicionados em 05 estruturas. Tal critério deveu-se, fundamentalmente, aos recursos financeiros disponíveis para a realização do projeto de P&D;
- utilização do software ATP, para a determinação da influência do posicionamento dos pára-raios, em 05 torres específicas ao longo da LT, considerando-se os valores da resistência de aterramento impulsiva (e a medida frequência industrial) em cada estrutura da LT, com o objetivo de escolher novas posições (estruturas) para os pára-raios. Ou seja, procedeu-se ao estudo específico buscando-se a “melhor” localização dos pára-raios;
- utilização de software de aterramento impulsivo, para a determinação da melhor geometria de condutores de aterramento, frente a surtos atmosféricos (bem como para a frequência industrial), a serem instalados em cada estrutura ao longo da LT;
- a partir dos resultados dos estudos de engenharia, contratou-se o serviço de instalação dos pára-raios utilizando, para a instalação citada, a técnica ao potencial o que permite a execução dos serviços sem a necessidade de desligamento da LT.

2. Levantamento e Medições

Na etapa inicial do Projeto de P&D foi realizado o levantamento documental e físico da Linha de transmissão selecionada. Todas as atividades realizadas, por mais simples que fossem, foram registradas através de Relatório específico.

2.1 Levantamento documental

O levantamento documental foi realizado com base no projeto executivo da linha de transmissão avaliando-se as estruturas existentes, as medições da resistividade do solo, o sistema de aterramento previsto (composto por duas hastes de aterramento), entre outros os aspectos. A Figura 1 apresenta o percurso da linha de transmissão, os pontos importantes e os problemas encontrados.

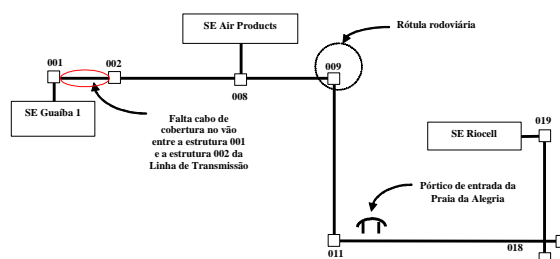


Figura 1: Percurso da linha de transmissão, pontos importantes e problemas encontrados.

2.2 Levantamento físico

O levantamento físico foi realizado com comprovação fotográfica de todas as estruturas que fazem parte da LT 69 kV GUA1-RIO. Dado adicional, a LT é compartilhada com alimentadores no nível de tensão de 25 kV.

2.3 Medições de resistividade do solo e resistência de aterramento

Para realizar a avaliação do sistema de aterramento associado a linha de transmissão, foram conduzidas duas medições preliminares:

- medição da resistência do sistema de aterramento (NBR5410:2004) composto por duas hastes de 2,5 m;
- medição da resistividade do solo (NBR 7117:1981)

O resultado da medição da resistência do sistema de aterramento apresentou valores da ordem de dezenas de k Ω verificando-se a total deterioração do aterramento da LT. Tal resultado é um dos fatores do mau desempenho da linha de transmissão às descargas atmosféricas.

Para permitir a revisão do projeto do aterramento da linha de transmissão foi realizada a medição de resistividade empregando-se o método de Wenner e obtendo-se a seguinte estratificação do solo em duas camadas:

- $\rho_1 = 137,41 \text{ } \Omega\text{m}$ - resistividade da camada superficial do solo
- $h_1 = 0,79 \text{ m}$ - profundidade da camada superficial do solo
- $\rho_2 = 35,53 \text{ } \Omega\text{m}$ - resistividade da camada profunda do solo

A partir da medição da resistividade do solo, foi determinado um modelo do solo variante com a frequência, como detalhado a seguir, no item aterramento impulsivo.

3. Simulações Utilizando ATP

Para assegurar o desempenho adequado da linha de transmissão, foram realizadas simulações com o software ATP - Alternative Transients Program (ATP 1987; László Prikler 2002) onde foram modeladas a fonte de tensão trifásica, a fonte impulsiva para simulação da descarga atmosférica, as torres, as três fases, o cabo de cobertura, o sistema de aterramento e os pará-raios em paralelo com as cadeias de isoladores (Gustavo Carrasco H. 2003; Martinez, L.A 2004).

Para cada caso simulado, avaliaram-se as tensões nas torres e as solicitações aos isolamentos dos diversos componentes da LT, bem como se procederam às análises de resultados. As tensões nas cadeias de isoladores com superposição da descarga atmosférica induzida foram, da ordem de 100 kV. A Figura 2 apresenta um dos diagramas adotados na simulação realizada.

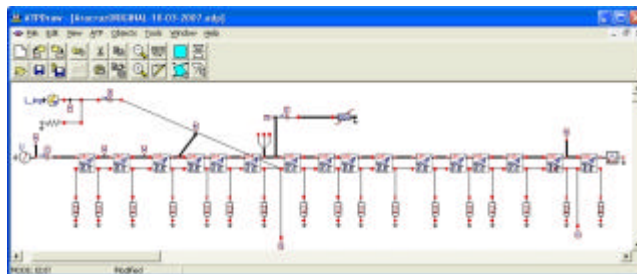


Figura 2: Exemplo de diagrama adotado nas simulações realizadas.

4. Aterramento Impulsivo

O aterramento impulsivo envolve, além dos eletrodos de aterramento, o solo no qual estes eletrodos estão enterrados. A caracterização do solo bem como do seu comportamento quando da passagem da

corrente elétrica são fatores importantes na análise de fenômenos ligados ao aterramento elétrico. Estes são os fatores mais críticos que afetam o projeto de um sistema de aterramento elétrico, tanto em baixa quanto em alta frequência.

Em baixas frequências os parâmetros elétricos do solo, tais como condutividade elétrica (σ), permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade elétrica (μ), são considerados invariantes no tempo. Contudo, é importante levar em conta a dependência dos referidos parâmetros elétricos com a frequência, quando da ocorrência de fenômenos transitórios nos sistemas de aterramento ou quando, mesmo em baixas frequências, a corrente de deslocamento não puder ser desprezada. É usual, em baixas frequências, utilizar somente como parâmetro característico que representa o solo, a condutividade elétrica (ou resistividade elétrica ρ , onde $\rho = 1/\sigma$), pois a corrente de deslocamento é considerada desprezível em relação à corrente de condução (admite-se, em baixas frequências, que $\omega\epsilon \ll \sigma$, o que nem sempre é uma verdade).

Os comentários feitos remetem à questão da necessidade de ter-se uma modelagem do solo a mais “correta e realista” possível, bem como à necessidade de uma adequada técnica de medição para poder definir a estrutura do solo onde será implantado um sistema de aterramento.

É comum modelar o solo em camadas horizontais superpostas, com cada camada possuindo parâmetros elétricos homogêneos. Tal modelo, em geral, é satisfatório para fenômenos à frequência industrial. Contudo, para utilizar o modelo citado é necessário um grande número de medições de resistividade elétrica do solo (Dart 1991). Sabe-se que quanto maior o número de dados provenientes de medições em campo, mais precisa será a interpretação e seleção do modelo de solo utilizado no projeto de um sistema de aterramento. Da mesma forma, mais precisa será a utilização de parâmetros, do solo, que permitirão a avaliação das tensões a que pessoas ou equipamentos eletrônicos sensíveis ficarão submetidos, quando de transitórios eletromagnéticos, ou não. O modelo com duas, ou várias camadas horizontais, despreza variações locais na condutividade elétrica do terreno onde será implantado ou é existente. A existência de rochas por exemplo, ou terreno arenoso de pequena extensão não é considerado.

Em (C.M. Portela 2006; Miranda 2002) pode ser encontrada a seguinte expressão para representar a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência:

$$W = s_0 + \Delta_i \left[\cot \text{ang} \left(\frac{\rho}{2} \alpha \right) + i \right] \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\alpha = s_0 + \Delta W \quad (1)$$

onde, s_0 , Δ_i e α são estatisticamente dependentes sendo que s_0 é a condutividade elétrica do solo a baixa frequência (100 Hz) e ΔW é a variação de W com a frequência. Portanto, ΔW é o aumento de W entre a baixa frequência e a frequência f .

(Miranda 2003) realizou avaliações em um grande número de amostras de solo com o objetivo de determinar a distribuição de densidade de probabilidade para os parâmetros Δ_i e α . Isto posto, de acordo com a referência citada, a máxima densidade de probabilidade para Δ_i dá-se em torno de 12 mS/m e, para α , em torno de 0,72.

A expressão (1) permite avaliar, matematicamente, o comportamento dos parâmetros elétricos do solo. Ou dito de outra forma: através da medição de s_0 utilizando o Método de Wenner, pode-se estimar o aumento de W entre a baixa frequência e a frequência f , ou seja: $\Delta W = \Re + i\Im$, utilizando a expressão (1), sendo s_0 , \Re e \Im , dados em mS/m e f em MHz.

De acordo com (Miranda 2003) a metodologia apresentada para a obtenção da variação dos parâmetros elétricos do solo, utilizando a expressão (1), é válida pois não foi encontrada correlação entre os pares de parâmetros $[s_0, \Delta_i]$, $[s_0, \alpha]$ para todas as amostras analisadas.

Utilizando a expressão (1) na linha de transmissão 69 kV GUA1 – RIO, obteve-se para a parte real e parte imaginária da expressão indicada, a curva conforme ilustra a Figura 3.

A Figura 4 representa a amostra de solo que foi avaliada em termos do comportamento de seus parâmetros elétricos (permissividade e condutividade elétricas). A amostra foi obtida do local onde a LT 69 kV está construída sendo submetida a uma onda impulsiva (semelhante a de uma descarga atmosférica). Aplicou-se a onda impulsiva nas extremidades da cuba medindo-se a tensão produzida através de eletrodos cilíndricos colocados no centro da cuba (parte superior da cuba), quando da aplicação da onda impulsiva. Através do procedimento de medição apresentado nas referências acima citadas, é possível determinar a relação $s + i\omega e$, que representa o comportamento do solo quando submetido a ondas impulsivas, semelhantes às descargas atmosféricas.

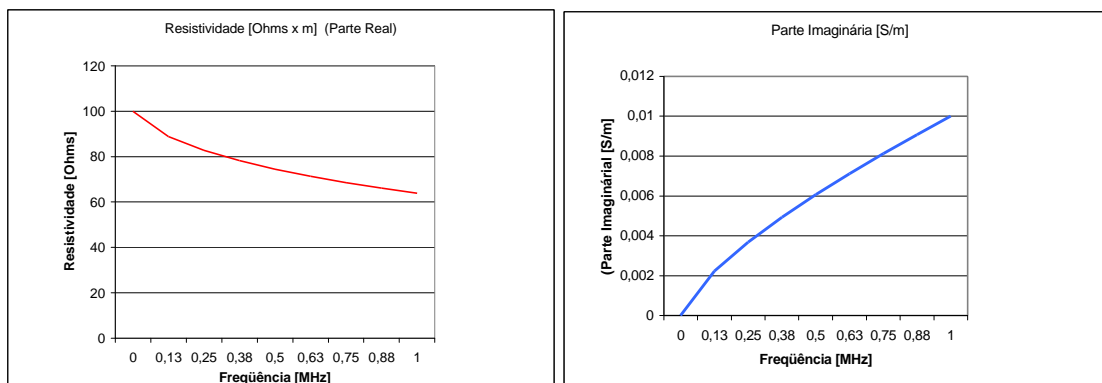


Figura 3: Resistividade elétrica do solo função da frequência.



Figura 4: Ensaio para a obtenção dos parâmetros elétricos de amostra de solo.

Para a determinação da impedância de surto do sistema de aterramento da LT 69 kV GUA1-RIO, utilizou-se o conjunto de expressões analíticas abaixo, onde para o caso de contrapesos radiais (tipo “crow foot”), enterrados diretamente no solo, a partir da seguinte expressão pode-se determinar a resistência de aterramento (Lobo, A. R. 1987) válida para frequência industrial e para frequências, da ordem, de 1 MHz.

$$R(n) = \frac{r}{n\pi l} \left[\ln\left(\frac{2l}{a'}\right) - 1 + N(n) \right] \quad (2)$$

onde:

- n : número de contrapesos
- a' : raio efetivo do contrapeso, $[a' = \sqrt{2ah} \text{ (m)}]$, com a o raio do contrapeso (m) e h profundidade em que o eletrodo está enterrado no solo (m)

- $$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left[\frac{1 + \operatorname{sen}\left(\frac{m\mathbf{p}}{n}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{m\mathbf{p}}{n}\right)} \right]$$
- $R(n) = Z(0, \infty), t \rightarrow \infty$

A partir da expressão (2), pode-se determinar a impedância de surto de contrapesos radiais, Z_0 , a qual é dada por (Dart 1991; László Prikler 2002).

$$Z_0 = \left\{ \frac{\mathbf{m}_0 \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 + N(n) \right] \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 + N_1(n) \right]}{2(n\mathbf{p})^2 \mathbf{e}_0 (\mathbf{e}_{r1} + 1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3a)$$

$$N_1(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \left[\ln \left(\frac{1 + \operatorname{sen}\left(\frac{m\mathbf{p}}{n}\right)}{\operatorname{sen}\left(\frac{m\mathbf{p}}{n}\right)} \right) \right] \cos\left(\frac{m\mathbf{p}}{n}\right) \quad (3b)$$

$$\mathbf{e}_r = 35 + 37,5 \left\{ e^{-0,008(r-180)} + e^{-0,0022(r-80)} \right\} \quad (3c)$$

Utilizando as expressões indicadas na referência citada obteve-se $5,90 \Omega$ para a impedância de surto de cada torre da LT 69 kV GUA1-RIO.

Adicionalmente, fez-se avaliação numérica do sistema de aterramento de cada torre da LT. A Figura 5 apresenta a superfície de potencial parametrizada na superfície do solo sobre e nas imediações dos eletrodos de aterramento, considerando que pela estrutura flui uma corrente de defeito à terra.

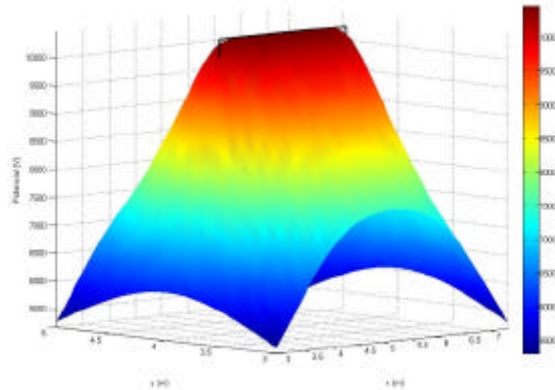


Figura 5 Superfície de potencial na superfície do solo no e ao redor do eletrodo de aterramento da LT.

Ainda, as simulações realizadas indicaram que os potenciais de passo e toque toleráveis pelo ser humano, foram excedidos no caso de defeito a terra em estruturas ao longo da LT. Ou seja, medidas corretivas deverão ser realizadas para tornar tais estruturas seguras aos seres humano, quando da ocorrência de defeitos à terra ao longo das estruturas da LT.

5. Implementação

Considerando que as descidas dos cabos de guarda da linha de transmissão eram feitas pelas superestruturas da torres de concreto, para implantar os pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores foi necessário instalar descidas externas às torres de concreto para ligação do terminal de terra.

Adicionalmente, para garantir a segurança do pessoal de implantação do sistema, foram realizados ensaios de tensão aplicada – 1 minuto nos pára-raios, visando assegurar o seu perfeito desempenho..

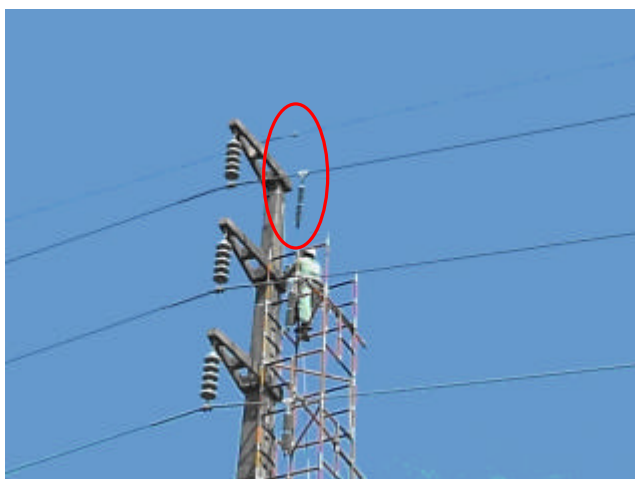


Figura 6: Atividades realizadas em proximidade e ao potencial para implantação das descidas e dos pára-raios.

Outro problema foi a impossibilidade de desligar a linha de transmissão devido ao suprimento de duas grandes empresas com regime de trabalho de 24 h. Esta impossibilidade direcionou a instalação a ser realizada “em proximidade do potencial” ou mesmo “ao potencial” (ANSI / IEEE 1987). A Figura 6 ilustra as atividades realizadas em proximidade e ao potencial para implantação das descidas e dos pára-raios

6. Conclusões

Com base nas descrições realizadas anteriormente, puderam ser preparadas as conclusões apresentadas a seguir:

A análise do desempenho da LT, sem pára-raios colocados em paralelo com as cadeias de isoladores, confirma o mau índice de desempenho (~ 120 desligamentos/100 km ano) da LT frente às descargas atmosféricas diretas.

A nova estimativa do desempenho da LT, após as alterações realizadas e as respectivas implementações foi avaliada como sendo da ordem de 2 a 3 desligamentos/100 km ano.

Houve muita controvérsia quanto a instalação dos pára-raios com isolamento externo polimérico, por se tratarem de elementos ativos com possibilidade de explosão, o que foi minimizado através dos ensaios em fábrica, ensaios de tensão aplicada a 60 Hz na CEEE e instalação cuidadosa. Tal instalação foi conduzida de acordo com os seguintes procedimentos:

- ligação do terminal de terra do pára-raios na descida aterrada;
- instalação de grampo tri-articulado no cabo condutor da LT;
- aproximação do pára-raios da fase da LT a distância, com vara de manobra, durante cerca de 15 min;
- ligação do pára-raios ao grampo tri-articulado, ao potencial.

Observe-se que também foram tentadas avaliações dos resultados técnico-econômicos da utilização de pára-raios ativos para a proteção da LT, o que não foi implementado por falta de recursos.

7. Referências Bibliográficas

ANSI / IEEE Std 516:1987 IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines.

ATP – Alternative Transients Program – RULE BOOK, 1987.

- C.M. Portela, J.B. Gertrudes, M.C. Tavares, J. Pissolato, Earth conductivity and permittivity data measurements: Influence in transmission line transient performance, *Electric Power Systems Research* 76 (2006) 907–915.
- Dart, F. C.; Fernandes, C.; Portela, C., “Sistemas de Aterramento – Discussão de Aspectos Básicos para Concepção e Dimensionamento Adequados”, XI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 1991, RJ/GSU/06.
- Devgan, S. S. and Whitehead, E. R., "Analytical models for distributed grounding systems", paper T 73 182-3, apresentado no IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, January 28, February 2, 1973, pp. 1763-1769.
- Gustavo Carrasco H., Alessandro Villa R. - Lightning Performance of Transmission Line Las Claritas - Santa Elena up 230 kV - International Conference on Power Transients - IPST 2003 in New Orleans, USA.
- László Prikler, Hans Kristian Høidalen - ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP - Users' Manual - Preliminary Release No. 1.0 August 2002.
- Lobo, A. R., Cherchiglia, L. C. L., “Malhas de Terra para Estações Remotas de Telecomunicações”, anais do IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão.
- Martinez, L.A.; Castro-Aranda, F. - Modeling overhead transmission lines for line arrester studies - Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE Volume Issue , 6-10 June 2 004 Page(s): 1125 - 1130 Vol.1.
- Miranda, J. A., “Simulação de Fenômenos Transitórios em Sistemas de Aterramento”, Dissertação de Mestrado apresentada à COPPE/UFRJ, Março 2003.
- NBR 7117:1981 Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner).
- NBR5410:2004 Instalações elétricas de baixa tensão.

Agradecimentos

Os pesquisadores agradecem a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul PUCRS pelo apoio técnico e a Companhia Estadual de Energia Elétrica CEEE por ter financiado este projeto de pesquisa e desenvolvimento .

Biografia

Marcos Telló: Nascido em Ijuí, RS, em 25 de novembro de 1956; Mestrado em Engenharia Elétrica: UFSC (1991); Doutorado em Engenharia UFRGS (2000); Empresa: CEEE-D Companhia Estadual de Energia Elétrica - Distribuição (1982 – atual); Professor de Engenharia Elétrica da PUCRS (1984 – atual).

Guilherme Alfredo Dentzien Dias: Nascido em Porto Alegre, RS, em 28 de abril de 1950; Graduação em Engenharia Elétrica (1975): Mestrado UFRGS (1996); Doutorado UFRGS (2000), Engenheiro de Segurança: PUCRS (2006); Empresas: Engenheiro da CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica (1975-1997); Professor de Engenharia Elétrica da PUCRS (1975-2006); Responsável Técnico da IMPULSE Engenharia (2006 – atual).

Daniel da Silva Gazzana: Nascido em Veranópolis, RS, em 06 de dezembro de 1977; Graduação em Engenharia de Controle e Automação PUCRS (2002); Mestrado em Engenharia Elétrica PUCRS (2004);. Estudante de Doutorado em Engenharia Elétrica UFRGS (2005-Atual); Consultor de Projetos de P&D PUC-RS (2004 - Atual).

Virgílio Teixeira Durão Branco Filho: Nascido em Porto Alegre - RS em 21 de março de 1960; Graduação em Eletrotécnica: Escola Técnica Parobé de Porto Alegre (1981); Empresas: RIOCELL S.A. (atualmente ARACRUZ Celulose de Guaíba) (1980 a 1991); IMPULSE Engenharia Ltda (1981 – atual).

Vicente M. Canalli: Graduação PUCRS (1984); Mestrado UFSC (1988); Doutorado Universidad Politécnica de Madrid, U.P.MADRID (1997); Professor de Engenharia Elétrica da PUCRS (1984 – atual).

Flávio Roberto Pereira Martins Júnior: Nascido em Osório, RS, em 16 de janeiro de 1983; Estudante de Graduação: Engenharia Elétrica PUCRS; Bolsista do P & D CEEE – PUCRS (2006 – 2007)

Roberto Petry Homrich: Nascido em Pelotas, RS, em 21 de abril de 1961; Graduação em Engenharia Elétrica UFPel (1985); Mestrado UFRGS (1990), Doutorado UNICAMP (2001); Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFRGS.

Daniel Signori Roso: Nascido em Porto Alegre, RS, em 18 de abril de 1986; Estudante de Graduação: Engenharia Elétrica PUCRS; Bolsista do P & D CEEE – PUCRS (2006 – 2007).