

## Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

### Ensaio de Determinação do Comportamento Vibracional de Cabos Condutores em Linha de Transmissão Experimental

MARCOS JOSE MANNALÁ (1); GABRIEL RUGGIERO DO AMARAL (1,3); ANDRÉ MANZOLLI (1); MARCIO TONETTI (2); ILMAR DA SILVA MOREIRA (2).  
LACTEC (1); COPEL GET (2); UniOpet (3)

#### RESUMO

Neste artigo é apresentado o trabalho desenvolvido para determinar a redução na vida à fadiga de três cabos condutores constituídos de diferentes materiais sob o efeito do aumento da tração de projeto para valores acima dos níveis normalmente utilizados. A determinação da resistência a fadiga dos cabos foi feita por meio de ensaios para a obtenção da curva de Wöhler em laboratório *indoor*, ao passo que a medição das tensões alternadas e a contabilização do número de ciclos de vibração se deram em linha de transmissão experimental (laboratório *outdoor*). A partir dos dados obtidos, foi possível estimar, qualitativamente, a redução da vida útil de cada cabo com o aumento da tração, bem como comparar o desempenho a fadiga de cabos distintos lançados em linha com o mesmo parâmetro  $H/w$ .

#### PALAVRAS-CHAVE

laboratório de ensaios em cabos condutores, vibração eólica, cabos nus de alumínio, linha de transmissão de energia, fadiga de condutores.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os ensaios mecânicos realizados em cabos e amortecedores destinados a linhas de distribuição e transmissão são em sua maioria realizados em bancadas de testes e equipamentos situados em laboratórios prediais. A finalidade desses ensaios é a obtenção de informações a respeito do desempenho do cabo ou do conjunto cabo-amortecedor quando submetidos a condições próximas às de projeto. A disponibilidade de uma linha de transmissão experimental possibilita a validação e a complementação dos resultados obtidos em laboratório.

O comportamento vibracional de cabos aéreos de transmissão é função do comprimento do vão e do nível de tração aplicada. Por isso, foi projetada e construída uma linha de transmissão experimental automatizada, com vão ativo de 270 m, adequada para testes dos cabos e acessórios. Esse vão foi instrumentado para tornar possível o monitoramento de vibrações com ventos reais, além de ter sido equipado com um sistema de tração instalado em cada uma das três mísulas de uma das torres de ancoragem.

Este artigo apresenta parte dos resultados obtidos durante a execução do projeto de P&D de número PD-6491-0243/2011, intitulado "AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE LINHAS AÉREAS: NOVAS TÉCNICAS DE PROJETO COM TRAÇÕES ELEVADAS" da COPEL Geração e Transmissão S.A., executado pelos Institutos LACTEC e integrante do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiros regulamentado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

## 2.0 - LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM CABOS E ACESSÓRIOS - LECA

Para tornar possível a análise dos dados levantados na LTE, foi necessário o aporte dos parâmetros mecânicos dos condutores utilizados na LTE através de dois testes realizados no Laboratório de Ensaio em Cabos e Acessórios (LECA), situados no Lactec, tensão - deformação e curva S-N (ciclo de Wöhler). O banco a seguir descreve o ensaio para o levantamento da curva S-N.

### 2.1 Banco de ensaio de vibração

O banco de ensaios vibracionais possui um vão ativo de comprimento ajustável na faixa de 13 a 54 m, conforme mostra na Figura 1.

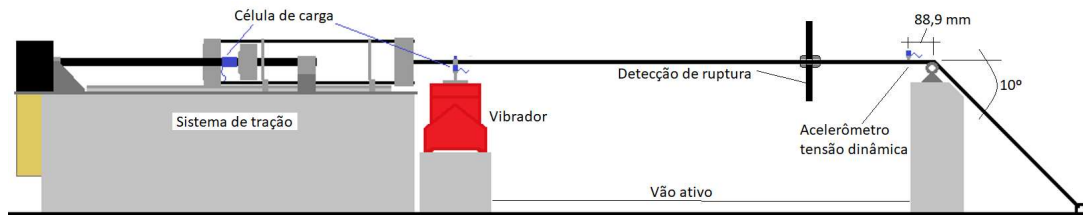


Figura 1. Bancada ensaio de vibrações, com a disposição para o ensaio de S-N.

O banco é composto por um sistema de tração com capacidade de até 300 kN em tração. O vibrador (*shaker*) fica posicionado próximo ao sistema de tração, proporcionando a tensão dinâmica necessária para o levantamento da curva S-N, conforme a brochura CIGRE WG 22-04 (1). Para determinar quando (em que ciclo N) é rompido um fio durante o ensaio, um sensor de torção é instalado em um dos nós de vibração (pontos de amplitude mínima).

Na ancoragem fixa, a amostra passa por um grampo monoarticulado com inclinação de 10° em relação à horizontal, e depois é preso a um terminal de ancoragem, fixado ao piso. A 88,9 mm de distância do último ponto de contato entre o cabo e o grampo, é realizada a medição da amplitude de vibração, a partir da qual é estimada a tensão alternada a que o condutor é submetida pelo vibrador (*shaker*).

## 3.0 - LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL (LTE)

A LTE é uma linha de transmissão automatizada, composta por três torres para circuito simples, projetada para tensão de 230 kV, com comprimento total de 410 m. Nela, há dois vãos, o primeiro com 270 m de comprimento, onde são feitas as medições, e o segundo com 140 m de comprimento. Os ensaios são feitos com a linha desenergizada, com foco no monitoramento de grandezas ambientais e mecânicas. A linha é composta por duas torres de ancoragem e uma de suspensão, e é localizada ao lado da subestação de Campo Comprido, operada pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia), em Curitiba.

Os principais sistemas que compõem a linha, desenvolvidos no âmbito do projeto, são: sistema de aquisição e controle, sistema de tração dos cabos condutores, sistema de excitação mecânica, vibrógrafos e sistema de monitoramento dos esforços nas fundações da torre instrumentada. Das cinco partes mencionadas, três delas foram efetivamente utilizadas para realização dos testes mencionados neste artigo, com suas funcionalidades descritas na próxima seção. A figura 2 mostra, à direita, a torre 1 (ou seja, a torre instrumentada), e, à esquerda, a sala de controle e o painel de controle.



Figura 2 - Torre 1 com equipamentos instalados nas mísulas e sala de controle.

### 3.1 Sistema de Aquisição e Controle

O sistema de aquisição e controle utilizado realiza o ensaio de forma automática, tracionando e realizando medições automaticamente. Os parâmetros medidos em cada uma das três fases são: temperatura, tração, posição do carro de tração, nível de vibração, e o vento incidente (direção e intensidade). O sistema de aquisição e controle utilizado realiza ensaios de forma autônoma, mantendo a tração constante dos cabos, e fazendo o registro de forma contínua das vibrações, temperatura e ventos através de dois anemômetros e de um vibrógrafo por fase. Em cada fase, foi instalado um condutor distinto, analisado neste artigo.

### 3.2 Tracionador dos Cabos Condutores Sistema de Aquisição da LTE

O sistema de tração foi construído para permitir a variação da tração nos três cabos condutores, proporcionando a análise do comportamento vibracional em relação à fadiga dos cabos para diferentes trações. Foi projetado para ser instalado em cada um dos pontos de ancoragem dos cabos em uma das torres de ancoragem. Todos os três sistemas de tração foram instalados nas mísulas da torre 1, sendo iguais em termos de componentes e de capacidade de carregamento.

### 3.3 Vibrógrafo

Para a predição da vida remanescente de um cabo, é necessário o histórico que permita estimar o dano acumulado incorrido pela amostra. Para tanto, foram instalados três equipamentos, um em cada fase, com o objetivo de registrar a oscilação vertical do cabo derivando-se dessas medições as seguintes grandezas: frequência, amplitude de vibração e número de ciclos.

Cada um dos vibrógrafos é composto por três partes: o suporte, que tem a função de posicionar o sensor; o próprio sensor indutivo (Proximitor®), que possui a função de transformar o deslocamento de vibração do cabo em tensão ou corrente elétrica e o condicionador de sinais, com a função de tratar a tensão ou corrente elétrica, amplificando-a, atenuando-a, isolando-a, filtrando-a, além de prover excitação (alimentação elétrica) ao sensor instalado próximo ao cabo.

## 4.0 - MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EÓLICAS NA LTE

Neste capítulo é descrito o ensaio realizado para a determinação do comportamento dos três cabos condutores por excitação eólica.

### 4.1 Excitação por vibração eólica dos cabos condutores da LTE

O objetivo do monitoramento de vibrações nos cabos condutores é determinar o acúmulo de danos devido a tensão dinâmica imposta dos cabos condutores à distância de 88,9 mm do terminal de suspensão por meio de medições tomadas com os vibrógrafos desenvolvidos no projeto. O acúmulo de danos foi estimado com a regra de Palmgren-Miner (2).

Para tanto, foi desenvolvido um programa de monitoramento baseado na norma IEEE 1368 (3). A taxa de aquisição utilizada nos três vibrógrafos foi de 2 560 Hz, o que permite um tempo de gravação sem interrupção de 2:55 h, com intervalo de 5 min para transferência dos dados para o computador do supervisor, completando assim o ciclo de 3:00 h para a formação de cada um dos arquivos. Para conhecer o funcionamento do programa

LTE, é descrito a seguir um passo a passo, baseado no artigo (4). Os detalhes da descrição dos ensaios realizados são minuciados nas próximas seções.

#### 4.2 Preparativos para o monitoramento

A operação dos dispositivos da LTE é feita remotamente, comandando-se o tracionamento de cada um dos condutores entre os limites mínimo e máximo, sendo limitados pelos fins de cursos de segurança. Quanto ao programa, os dados informados aos controles no painel do supervisório consistem dos seguintes itens: os valores de tração desejada dos condutores e o tempo total do ensaio. No supervisório, pode-se acompanhar a manutenção automática da tração em cada condutor, dentro de uma faixa de  $\pm 2\%$  do alvo estipulado.

Foram adquiridos dados durante quatro meses, sendo que as trações selecionadas para cada condutor, em kN, baseadas no critério  $H/w$ , são dadas na Tabela Erro: Origem da referência não encontrada<sup>1</sup>.

Tabela 1 - Trações nos cabos quando do monitoramento de vibrações eólicas.

TRAÇÕES CABOS CONDUTORES		
% RMC	20%	26%
H/w	1496,71	1945,72
Tern (kN)	19,61	25,49
Greeley (kN)	19,01	24,71
Phosphorus (kN)	16,87	21,94

#### 4.3 Procedimentos para a gravação de dados dos períodos de monitoramento

Os dados gravados durante o monitoramento são selecionados no supervisório antes do início do ensaio. Em particular, para este trabalho, foram gravados dados dos seguintes equipamentos/sensores: três vibrógrafos instalados na torre 2; uma célula de carga instalada em cada um dos cabos condutores; as temperaturas de cada condutor e a intensidade e direção do vento incidente nos condutores.

Acionado o programa, as seguintes ações são realizadas de forma automática pelo sistema:

- o primeiro arquivo de dados é registrado primeiramente na controladora e, depois de 175 min (ou 2 h e 55 min), o arquivo é copiado para o disco rígido do supervisório;
- terminado o tempo determinado no início do ensaio pelo operador, o programa encerra o controle de tração, envia o último arquivo para o disco rígido do supervisório e finaliza o programa, caso esta opção tenha sido selecionada.

Todos esses dados adquiridos dos sensores mencionados geram até 3,5 GB/dia. Os dados gravados dos vibrógrafos permitem a determinação da forma de onda do sinal adquirido (os dados são espaçados por um tempo de 0,391 ms, portanto, com taxa de aquisição de 2 560 Hz).

#### 4.4 Tratamento dos dados

Nesta seção é mencionada a forma de como foram trabalhados os dados adquiridos dos vibrógrafos instalados na LTE mediante a excitação dos cabos condutores pelos ventos incidentes na linha.

##### 4.4.1 Critérios adotados para o cálculo do acúmulo de danos nos cabos

Os valores extraídos dos vibrógrafos são a amplitude pico a pico da vibração causada pelo vento. A tensão dinâmica correspondente é dada pela equação de Poffenberger-Swart (Equação 1).

$$\sigma_{ad} = K Y_{p-p} \quad (1)$$

São também obtidas as frequências correspondentes a cada nível de tensão, com o objetivo de comparar com as curvas S-N (tensão dinâmica-ciclos de fadiga), montados a partir dos dados obtidos pelos ensaios realizados em laboratório (ciclo de Wöhler), conforme demonstrado na Figura 3.

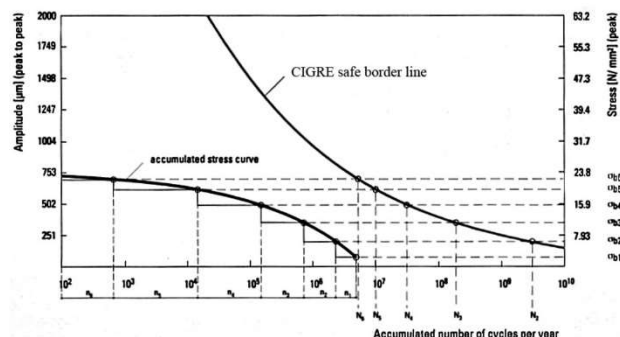


Figura 3. – Curvas de tensão acumulada e S/N

Fonte: EPRI Transmission Line Reference – Wind-induced conductor motion.

Com o gráfico da Figura 3, é possível ter uma ideia do comportamento a fadiga dos cabos condutores envolvidos, criando uma ligação entre os testes realizados em laboratório e campo (LTE). Para a obtenção do gráfico, foi necessário o armazenamento de resultados em tabela, em que as linhas representam a frequência, em Hz, e as colunas, a amplitude, em  $\mu\text{m}$ . Os resultados são dados na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo de tabela com dimensão 16 x 18

Freq. (Hz)	Amplitude ( $\mu\text{m}$ p-p)						Soma
	125	251	376	502	627	753	
2	113	7	0	0	0	0	120
5	634	31	2	0	0	0	667
10	1889	735	209	44	5	0	2882
15	3086	2211	871	184	20	0	6371
20	3381	2308	1029	294	45	3	7060
25	2698	1076	189	14	0	0	3977
30	828	183	9	0	0	0	1020
34	140	8	0	0	0	0	148
40	8	0	0	0	0	0	8
45	1	0	0	0	0	0	1
Soma amplitude							Total
ciclos	12778	6559	2309	536	70	3	22255

Fonte: EPRI Transmission Line Reference – Wind-induced conductor motion.

Para o cálculo do dano nos cabos condutores foi utilizada duas regras para estimativa da fadiga dos cabos: a primeira utilizada é a regra de Miner (2), equação 2. Origem da referência não encontrada, que estima o dano acumulado obtido pela soma dos danos parciais. Cada parcela do dano é obtida pela relação entre o número de ciclos  $n_i$  quando o condutor é submetido a uma tensão  $\sigma_i$  e a vida esperada  $N_i$ , obtida através da curva S-N determinada em laboratório. A correspondente vida estimada é dada pela Equação (3).

$$D_{\text{miner}} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{n_i}{N_i}} \quad (3)$$

#### 4.5 Cálculo da frequência média através da ponderação no acúmulo de danos nos condutores

A frequência média de vibração é dada pela ponderação representada pela Equação (4):

$$F_{\text{barra}} = \frac{N_1 * \sigma_1 * f_1 + N_2 * \sigma_2 * f_2 + \dots + f_n * \sigma_n * f_n}{N_1 * \sigma_1 + N_2 * \sigma_2 + \dots + N_n * \sigma_n} \quad (4)$$

onde  $F_{\text{barra}}$ ,  $f_n$ ,  $N_n$ , e  $\sigma_n$  são, respectivamente, a frequência ponderada, a frequência analisada, o número de ciclos na frequência analisada e a tensão dinâmica na frequência analisada.

#### 4.6 Programas utilizados para o tratamento dos dados obtidos com os testes de vibração eólica

O tratamento dos dados obtidos nos períodos de monitoramento nos três condutores foi feito por meio de dois programas desenvolvidos no projeto. O primeiro varre todos arquivos de um diretório, extraindo os ciclos com as respectivas frequências e amplitudes.

O segundo programa gera, a partir de um arquivo criado no primeiro, uma matriz de estratificação para o dano acumulado, gerando uma curva. Esse programa é dividido nas seguintes partes, conforme numerado na Figura 4:

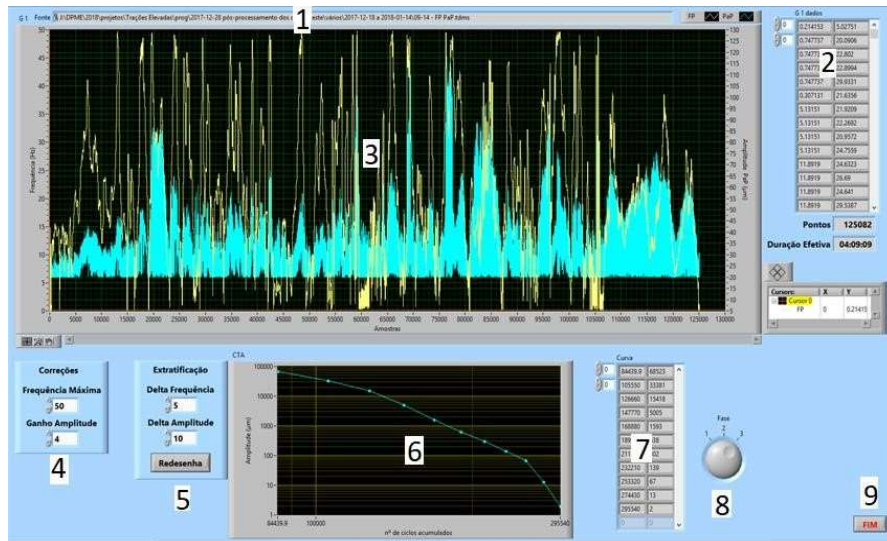


Figura 4 – Painel de controle do programa de processamento final dos dados “VibraLTE”

- (1) seleção do arquivo dos dados pré-processados;
- (2) indicador com os pares de dados lidos, frequência predominante e amplitude pico-a-pico;
- (3) gráfico formado pelos dados do item 2;
- (4) critério dos filtros e correção dos dados: frequência máxima e ganho da amplitude;
- (5) estratificação de dados para classificação: passos de amplitude e frequência para compor a tabela de danos de cada cabo condutor;
- (6) gráfico representando os dados estratificados dos diretórios selecionados;
- (7) matriz com os dados representados no item 6;
- (8) seletor de fases para análise de cada um dos três cabos condutores da LTE;
- (9) tecla “FIM” para finalização do programa.

Após a seleção do arquivo de dados pré processados, são executados os seguintes passos para a estratificação e geração dos gráficos das curvas de acúmulo de dano para cada cabo condutor:

- a. levantamento do histograma a partir dos dados pré processados, estratificando as amplitudes pico a pico registradas durante a análise de cada um dos ciclos de todos os arquivos dos três vibrógrafos. O passo dado para traçar o gráfico com o histograma deve ser informado pelo usuário na tela de operação do programa descrito anteriormente;
- b. de posse da melhor distribuição das amplitudes pico a pico, obtêm-se três gráficos compostos pelo número de ciclos *versus* a amplitude pico a pico. Assim pode-se comparar o comportamento vibracional com a vida à fadiga dos cabos testados no laboratório fechado do Lactec (LECA).

## 5.0 - RESULTADOS

Nesta seção são apurados os resultados obtidos nos ensaios de vibração eólica nos três cabos condutores em dois níveis de trações para cada um dos três condutores traduzido em um mesmo H/w para cada patamar de tração: 1497 e 2170,22 m. É importante mencionar que foram levantadas as curvas S-N nos cabos Phosphorus e Tern no laboratório LECA, enquanto no cabo Greeley foi adotado os coeficientes da curva SBL (*Safe Border Line*), que possui valores conservadores a favor da segurança.

Na tabela 3 é apresentado o resultado do processamento de 655 arquivos gerados pelos ensaios realizados na LTE.

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos através dos 655 arquivos registrados.

655 arquivos	Baixa			Alta		
Fase	Tern	Phosphorus	Greeley	Tern	Phosphorus	Greeley
Tração (kN)	19,61	19,01	16,87	25,49	24,71	21,94
H/w (m)	1496,71	1496,71	1496,71	1945,72	1945,72	1945,72
Ciclos ano (10 <sup>6</sup> )	23,31	19,67	97,15	94,50	87,33	117,07
Duração ef. (h:m:s)	50:13:12	148:55:01	154:00:27	31:43:08	113:06:45	107:39:4
F barra (Hz)	8,69	13,39	20,15	18,78	20,14	19,02
Vida Miner (ano)	222 063	15 668	* 2006	27 921	4012	* 668

\* adoção dos coeficientes da SBL.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios com dados dos vibrógrafos, utilizando a metodologia de medição constante adotada nos testes realizados na LTE, foram equivalentes a 142 e 364 dias equivalentes de dados, pior e melhor caso respectivamente, comparando-se com a norma IEEE 1368 (3), na qual o registro ocorre por 10 s, com intervalos de 15 min. O resultado da resistência à fadiga por vibração eólica, em anos, do condutor Tern (convencional) se mostrou muito superior em relação aos outros dois cabos, quando testado sem a instalação de acessório para amortecimento vibracional dos cabos condutores. Em relação aos ensaios da tração menor, o cabo Tern mostrou uma resistência à fadiga superior a 36,5 vezes em relação ao Greeley e a 185 vezes mais durável comparativamente ao Phosphorus, quando submetidos à mesma assinatura ambiental. Para a tração mais elevada, o cabo Tern mostrou ter uma resistência a fadiga 10 vezes maior em relação ao Greeley, quando utilizou-se os coeficientes da curva da SBL, e pouco menos que 23 vezes aos Phosphorus.

Para a determinação do posicionamento dos amortecedores, foi obtida com base nos dados dos ensaios eólicos realizados na LTE. Foram levantados através da ponderação dos danos acumulados, através de cálculos usando as variáveis de frequência e amplitude registradas pelos três vibrógrafos. O mais sensível à alteração da tração foi o cabo Tern (8,78 Hz na baixa e 18,78 Hz na alta), seguido pelo Greeley (13,39 Hz na baixa e 20,14 Hz na alta) e o Phosphorus (20,15 Hz na baixa e 19,02 Hz na alta). Este último cabo praticamente não acusou variação significativa da frequência  $F_{barra}$ .

A análise de vida do cabo foi baseada pela regra de Miner (2) que forneceu resultados muito próximos nos seis casos analisados, três cabos condutores, dois níveis de tração em cada.

## 7.0 - REFERÊNCIAS

- (1) CIGRE WG 22.04 – SC 22. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. Electra, Paris, France, p 78–86, 1985.
- (2) MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics, 1945. 159-164.
- (3) IEEE PES. IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors. IEEE. New York, p. 35. 2007.
- (4) GUERY, D. et al. Aeolian vibrations on high voltage lines comparative self damping as evaluated on the field. CIGRÉ B2-214 2008, Paris, 25-29 Agosto 2008.
- (5) CIGRE WG B2.11.04. "Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations." Technical Brochure. No. 273. Paris. June, 2005.
- (6) POFFENBERG, J. C.; SWART, R. L. Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 84, Abril 1965. 281-289. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4766192/>>.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Marcos José Mannala;** Curitiba PR, 1967; Técnico em eletrotécnica – CEFET, Curitiba, 1988; graduado em engenharia elétrica - UFPR, Curitiba, 2000; Mestrado em engenharia de produção e sistemas - PUCPR, Curitiba, 2004; doutorado na área de mecânica dos sólidos – PUC PR, 2018.

Experiência: atuação em P&D desde 1994 participando direta e indiretamente em 15 projetos

Apresentação de trabalho, elaboração de trabalhos técnicos, e outras publicações: 38.

Área de atuação: Ensaios e projetos em cabos e acessórios para linhas de transmissão e distribuição – Institutos Lactec, desde 1994;

**Gabriel Ruggiero do Amaral** é graduado em Engenharia Mecânica (UFPR, 2012), mestre em Engenharia Mecânica (UFPR, 2015) e doutorando na área de vibrações mecânicas. Desenvolve e executa projetos de Pesquisa & Desenvolvimento e ensaios em cabos e acessórios do Setor Elétrico, com ênfase em vibrações, e é docente dos cursos de Engenharia do Centro Universitário UniOpet.

**André Manzoli;** São Paulo – SP, 1966; graduado em engenharia Mecânica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 1991; Especialização em engenharia de Software e Processamento de Imagens na Universidade de Michigan – Dearborn (UMD), 1997.

Certificados e Títulos: Certified LabVIEW Developer, LabVIEW Champion.

Experiência: sendo 22 meses na UMD, experiência em programação abrangendo diversos sistemas operacionais, equipamentos e linguagens, desde 1980.

Área de Atuação: Desenvolvimento de sistemas de automação com ênfase nas áreas de medição e software. Coordenação e desenvolvimento de simuladores para treinamento de equipes de operação de usinas, responsável pelo programa Alliance Partner dos Institutos Lactec.

**Márcio Tonetti,** Curitiba, Paraná, Técnico em Eletrotécnica em 1994, pelo CEFET-PR. Graduiu-se em 2007 em Engenharia Industrial Elétrica, na UTFPR. Especialização em Gerência da Manutenção em 2008, pela UTFPR. Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia em 2017, nos Institutos Lactec. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais desde 2017, pela UFPR.

Experiência: Engenheiro eletricitista (projetos de LT) da COPEL desde 2010.

Artigos e trabalhos publicados: 04.

Apresentação de trabalho, elaboração de trabalhos técnicos, e outras publicações: 03.

Orientações acadêmicas: 07.

**Ilmar da Silva Moreira,** Londrina, Paraná, Engenheiro Eletricista, com Especialização em Finanças e Administração de Empresas, Especialização em Gestão de Concessionárias de Energia, Aperfeiçoamento em Ciências dos Materiais, possui mais de 30 anos de experiência como profissional nas áreas de projeto e construção de linhas de transmissão.

Especializações:

- Empreendimentos de transmissão de energia elétrica;
- Negociação envolvendo empreendimentos de infraestrutura;
- Participação em leilões de transmissão;
- Coordenação de equipes;
- Governança Corporativa