



GLT III

**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT

METODOLOGIA PARA ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO E FADIGA EM AMORTECEDOR STOCKBRIDGE

Mannala, Marcos J.
LACTEC

Souza Jr., Oswaldo H.
LACTEC/UTFPR

Hatashita, L. Seiti
COPEL GET

RESUMO

A metodologia proposta faz parte do desenvolvimento de um sistema automatizado, com controle em malha fechada para a velocidade e varredura automática de frequência. A análise do gráfico se faz em tempo real, podendo-se em pouco tempo levantar a curva de impedância do amortecedor.

A qualidade do ensaio é bem maior, pois a resolução da frequência de varredura pode ser bem menor do que a mencionada em norma. O ganho de tempo pode ser ainda maior, pois caso ocorra variação da frequência de ressonância acima do previsto em norma, o ensaio pode ser interrompido.

PALAVRAS-CHAVE

Amortecedores, metodologia de ensaio, ensaios automatizados, fadiga.

1.0 - INTRODUÇÃO

Vibrações excitadas pelo vento através de ar sobre o cabo são muito comuns em linhas de transmissão de alta tensão. Embora tais vibrações sejam raramente perceptíveis devido às baixas amplitudes (menor do que um diâmetro do condutor), elas são, contudo, extremamente importantes devido ao fato que podem levar o condutor a processos de fadiga (1).

Isso levou as concessionárias a selecionar melhor seus fornecedores de amortecedores do tipo "stockbridge" e para isso foram utilizadas normas como a IEC 61897 – "Requirements and tests for Stockbridge type aeolian vibration dampers" (2) e a IEEE 664 – "IEEE Guide on the laboratory measurement of the Power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductor" (3).

O objetivo é determinar a impedância (força / velocidade) do amortecedor na faixa de frequência de trabalho, antes e após ser submetido a 10 milhões de ciclos na última frequência de ressonância da faixa recomendada. A metodologia proposta foi automatizada, com análise em tempo real, não somente melhorando a qualidade do ensaio mais também reduzindo o tempo do mesmo.

2.0 - DESCRIÇÃO DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO E FADIGA DE AMORTECEDORES

Esse ensaio é baseado na norma IEC – 61897 (1) seções 7.11.2 (Damper characteristic test) e 7.12 (Damper fatigue test). O ensaio consiste em submeter três amostras do amortecedor à vibração em 10 milhões de ciclos na sua maior frequência de ressonância na faixa determinada pela norma. Para a obtenção da frequência de ressonância, é realizado o ensaio de caracterização de cada uma das amostras. Este ensaio consiste na varredura

no intervalo de frequência a uma velocidade constante. São medidos neste ensaio além da velocidade, a força e o ângulo de fase entre a elas.

2.1 Descrição do sistema de controle e aquisição do ensaio

O sistema foi projetado para atender e superar os requisitos da norma IEC 61897 e é composto pelas seguintes partes:

- A. Monitor: com tecnologia LCD, *wide screen* de 22 polegadas, destinado a programa gráfico em LabVIEW®, controle e acompanhamento do ensaio através de gráficos e indicadores;
- b. Computador tipo *desktop*: equipamento com processador com quatro núcleos e placa de vídeo dedicada para trabalhos de programação gráfica e intenso tráfego de dados;
- c. Placa PCI com 32 canais diferenciais de 16 bits +/-10 V, capacidade de até 1×10^6 de amostras distribuídas pelos 32 canais;
- d. Condicionador de sinais: possui 4 placas para aquisição e controle, destinadas para: aquisição dos sensores de aceleração, força e velocidade;
- e. Amplificador de potência: destinado para o acionamento do vibrador eletromecânico. Recebe sinal senoidal do condicionador na frequência desejada e fornece o sinal amplificado para o vibrador;
- f. Célula de carga: transdutor do tipo ponte completa, com ganho de 2mV/V, do tipo resistiva, com capacidade de 25 kgf p-p;
- g. Amortecedor: amostra a ser ensaiada com descrição adiante no item 3.3.1;
- h. Acelerômetro: do tipo ICP (*integrated Circuit Piezoelectric*), destinado a medição de velocidade;

As partes montadas do sistema podem ser vista na figura 1 a seguir.

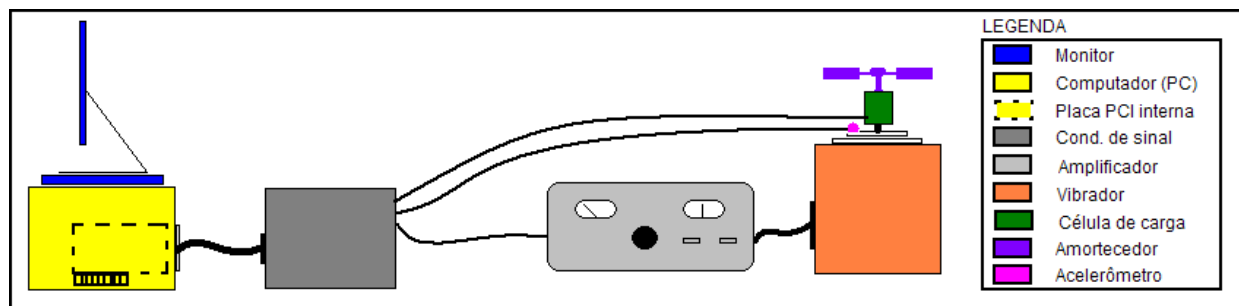


FIGURA 1 – Sistema de aquisição e controle do ensaio proposto.

2.2 Descrição do ensaio

O amortecedor deverá ser conectado mecanicamente ao vibrador senoidal através do seu terminal. A faixa de frequência de ensaio deve ser de:

$$f_i = \frac{0,18}{D} \quad \text{equação (1)}$$

$$f_f = \frac{1,4}{d} \quad \text{equação (2)}$$

sendo:

f_i - frequência inicial (Hz);

f_f - frequência final (Hz);

D – maior diâmetro da faixa abrangida pelo amortecedor (m);

d – menor diâmetro da faixa abrangida pelo amortecedor (m).

Esta faixa deverá ser coberta com uma varredura linear em torno de 0,5 Hz/s ou menor. No caso de varredura logaritmica, 0,2 década/minuto também poderá ser adotada, isto é, $10^{0,2}$ vezes a frequência inicial e 10 vezes a frequência inicial após 5 minutos. A mesa do excitado (vibrador) deverá ter velocidade constante de 100 mm/s pico. Abaixo da frequência de 5 Hz pode-se ter problemas (com a excitação mecânica devido a maior amplitude) para manter a velocidade de 100 mm/s pico e também a forma de onda senoidal, que pode ficar distorcida.

2.3 Execução do ensaio

Para que haja repetibilidade do resultado de um determinado amortecedor, a norma IEC (2) pede que sejam ensaiadas três amostras. O ensaio é dividido em três partes descritas a seguir:

- a. Primeira caracterização do amortecedor: Nessa etapa o amortecedor será submetido a um varredura de frequência, dentro da faixa mencionada no item anterior. Baseado no ângulo da força e velocidade aplicada pelo sistema de excitação mecânica obtém-se a potência e as frequências de ressonância da amostra;

- b. Fadiga do amortecedor: Após o amortecedor ser submetido a varredura de frequências e determinadas as frequências de ressonância, será usado o valor da última frequência da amostra no intervalo estipulado. Nessa frequência, a amostra deverá ser submetida a vibração especificada, com 0,5 mm de amplitude pico;
- c. Segunda caracterização do amortecedor: repete-se o item “a”, onde a segunda curva de caracterização é comparada com a primeira.

Os resultados a serem exibidos graficamente, pedidos pela norma, para o ensaio de caracterização são: impedância mecânica do amortecedor, ângulo de fase entre força e velocidade e a potência de dissipação, todos *versus* frequência.

2.4 Critério de aprovação do amortecedor

De acordo com a norma IEC 61897 (2), os critérios para aprovação da amostra de amortecedor e para cada amostra são:

- As frequências de ressonância antes e depois do teste de fadiga não poderão variar mais do que 20%;
- A variação de potência na frequência de ressonância utilizada no ensaio de fadiga não poderá variar mais do que 20% após o término do teste;
- Não poderá ocorrer avarias no cabo mensageiro da amostra;
- O torque residual no parafuso da garra, após o teste de fadiga, deverá ser superior que 50% do inicial.

O método utilizado neste trabalho enfoca os primeiros dois critérios especificados no item 7.12.4 da norma IEC 64897 (2).

3.0 - ANÁLISE E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E FADIGA ATRAVÉS DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA PELO LACTEC

Neste item apresenta-se um exemplo de ensaio de caracterização e fadiga em amortecedor através do método de norma automatizado pelo LACTEC. O ensaio determina o comportamento do amortecedor antes e depois do ensaio de fadiga com base na norma IEC 61987 (2). Para a aplicação do método, utilizamos de uma amostra de amortecedor tipo *dogbone* (osso de cachorro) ao invés de três para utilização no escopo do trabalho.

3.1 Descrição da amostra do amortecedor ensaiado

O amortecedor testado é destinado a cabos com pequenas bitolas, normalmente cabos para-raios. Possui duas massas com forma característica de um osso com tamanhos e simetria iguais. Foi projetado para conter duas frequências principais de ressonância na faixa de frequência especificada em norma.

A seguir a Figura 2 mostra o amortecedor tipo Dogbone:



Figura 2 – Amortecedor tipo dogbone ensaiado

3.2 Programa utilizado para realização do ensaio

O programa utilizado foi o LabVIEW®, *software* com linguagem gráfica. Todo o desenvolvimento foi realizado pela equipe do LACTEC. O programa desenvolvido com este *software* permite o controle total nas etapas de caracterização e fadiga com aquisição de dados e controle do sistema de excitação. Para melhor visualização desses dados, eles são tratados e apresentados de forma gráfica para melhor interpretação dos resultados. Ao final do ensaio todos os resultados são apresentados em cumprimento aos requisitos da norma IEC 61897 (2). Para tanto, os seguintes gráficos são fornecidos:

- Ensaio de caracterização antes e depois do ensaio de fadiga: frequência de ressonância, potência dissipada e ângulo de fase antes, todos no domínio da frequência;
- Ensaio de fadiga: gráfico da força, potência dissipada e ângulo de fase, todos em relação ao nº de ciclos;

Para a informação do operador, apresenta-se também gráfico do histórico do sinal de controle durante o processo de fadiga. Uma tabela mostra os dados de forma resumida visando a verificação do atendimento aos critérios de aprovação do amortecedor previsto na norma.

3.2.1. Etapas necessárias que compõe o programa

A seguir descreve-se sucintamente as etapas utilizadas para a programação e operação do *software* do ensaio de caracterização e fadiga em amortecedores para linhas de transmissão e distribuição.

Etapas de preparação/montagem do ensaio:

- a. Colocação da célula de carga na mesa do vibrador, aplicando o torque nominal na base do amortecedor;
- b. Instalação da amostra de amortecedor sobre a célula de carga e esta a mesa do vibrador;
- c. Fixação do acelerômetro na mesa do vibrador;
- d. Conferir/realizar ligação elétrica do vibrador ao amplificador de potência;
- e. Conferir/realizar ligação elétrica do amplificador de potência a tomada de alimentação;
- f. Energizar o condicionador de sinais;
- g. Instalar a cablagem de controle e aquisição de dados a partir do condicionador para o amplificador e transdutores;
- h. Ligar o computador e abrir o programa;
- i. Verificar cada canal de aquisição e controle;
- j. Definir os ganhos dos transdutores (célula de carga e acelerômetro);
- k. Preencher os dados do ensaio como: faixa de frequência, velocidade, dados da amostra a ser ensaiado, nome do arquivo eletrônico;
- l. Inicializar o programa.

Etapas realizadas pelo programa e operador:

- a. Preencher dados do ensaio como: frequência inicial, frequência final, velocidade, ganhos dos transdutores, nome do arquivo de dados entre outras informações de menos importância;
- b. Varredura para realização da caracterização inicial da amostra, com acompanhamento gráfico em tempo real e gravação de dados;
- c. Conferir se a varredura esta foi realizada dentro do esperado;
- d. Se sim passa para o ensaio de fadiga, se não repete o item "b";
- e. Definir a frequência de ressonância para a próxima etapa (equações 1 e 2);
- f. Realizar a etapa de fadiga, controlando em malha fechada a frequência de ressonância e velocidade, com acompanhamento gráfico em tempo real e com gravação de dados;
- g. Segunda varredura pós-fadiga, nos mesmos moldes da primeira, com gravação de dados;
- h. Ao final verificar se a varredura está correta;
- i. Se não, repetir item "g", se sim, próxima etapa;
- j. Traçar os gráficos e apresentar as tabelas definitivas para relatório, com os dados que foram salvos no arquivo;
- k. Final do ensaio, o programa desabilita toda a parte de controle e fica em estado de espera para o próximo ensaio;

3.3 Resultados do ensaio realizado pelo método utilizado

O ensaio foi realizado através do programa desenvolvido, obedecendo a sequência descrita anteriormente. Os gráficos gerados pelo programa foram acompanhados em tempo real no decorrer do ensaio. A norma pede a realização dos ensaios em três amostras do mesmo tipo de amortecedores, no entanto, para efeito de demonstração, a realização em uma amostra foi o bastante para demonstrar a funcionalidade do sistema desenvolvido.

3.3.1. Realização do ensaio de caracterização

O ensaio foi realizado em amostra de amortecedor do tipo *Dogbone* (osso de cachorro), destinado para cabos do tipo cabo de alumínio com alma de aço (CAA), cabo de alumínio liga (CAL), cabo de alumínio com alma de alumínio liga (CALA) e cabos para raios (aço). A faixa de diâmetro coberta pelo amortecedor vai de 12,47 a 15,24 mm (vide Figura 3). O peso da amostra é de 1,350 kg.



Figura 3 – Foto do amortecedor testado.

3.3.2. Realização do ensaio de caracterização

Para determinar a faixa de varredura, utilizam-se as equações 1 e 2. Como o amortecedor atende cabos com bitolas de 12,47 a 15,24mm, a menor frequência foi calculada com o diâmetro maior, e a maior frequência com o menor diâmetro. Com isso obtemos a faixa de 11,8 a 112,3 Hz. Para a execução da varredura, foi dado um incremento na faixa, que vai de 8 a 130 Hz. Esta faixa de frequência foi dividida em 762 passos de 160,2 mHz, menor que os 500 mHz sugerido pela norma. Cada registro de dado foi realizado quando a velocidade de 0,5 mm/s pico estava dentro da faixa de $\pm 1\%$. O tempo total do ensaio foi de cinquenta e seis minutos, perfazendo uma média de 4,41s para a execução de cada variação de frequência. Este período de tempo do passo não é constante, pois a amostra tem comportamento diferente para os diversos pontos de varredura para manter a velocidade de 0,5 mm/s $\pm 1\%$.

A seguir segue o gráfico (Figura 4) obtido durante a caracterização da amostra do amortecedor:

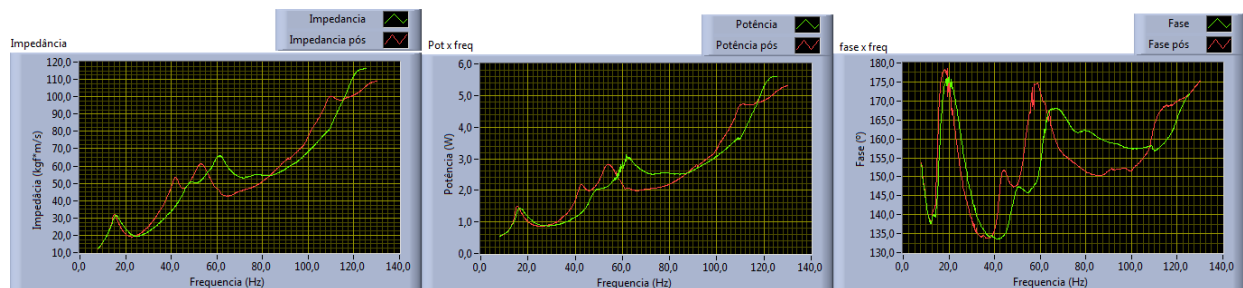


Figura 4 – Gráficos de obtidos no ensaio de caracterização antes e depois da fadiga.

3.3.3. Realização do ensaio de fadiga

Após a realização do primeiro ensaio de caracterização na amostra, foram levantadas as frequências de ressonância da amostra. Essas frequências são reconhecidas pelos picos registrados graficamente, quando se analisam determinadas faixas da varredura executada. Para a realização da fadiga, foi selecionada a segunda frequência de ressonância, com valor de 61,54 Hz.

Um ponto importante, que pode gerar dúvida, é a determinação da segunda ressonância, a maior frequência na qual o amortecedor foi projetado. O amortecedor tem massas simétricas em forma de osso de cachorro, formato característico contendo duas partes distintas, uma parte maior e outra menor. Essas massas podem entrar em ressonância em frequências pouco diferentes, por exemplo, na segunda ressonância do conjunto as massas apresentam picos diferentes (tanto antes quanto depois da fadiga) na faixa entre 40 e 60 Hz, sendo considerado para a fadiga o segundo pico da curva de impedância. Quando se coloca o conjunto para vibrar, acabam aparecendo outros pontos como o mostrado na Figura 4 no gráfico da impedância mecânica a 112 Hz. Isto pode ocorrer devido a componentes torcionais do conjunto composto pelas duas massas e o cabo mensageiro.

O amortecedor foi submetido a 10 milhões de ciclos, com a frequência inicial de 61,54 Hz a velocidade de 0,5 mm/s pico. Essa frequência de excitação varia no decorrer do ensaio, pois as características mecânicas do cabo mensageiro se alteram devido à fadiga e ao aquecimento. Para isso, o programa mantém a frequência de ressonância da amostra durante o ensaio. Durante a realização do ensaio de fadiga, são fornecidos os seguintes

gráficos: potência, força e fase, todos *versus* o número de ciclos. A seguir a Figura 5 mostra o comportamento da potência e da fase durante o ensaio de fadiga.

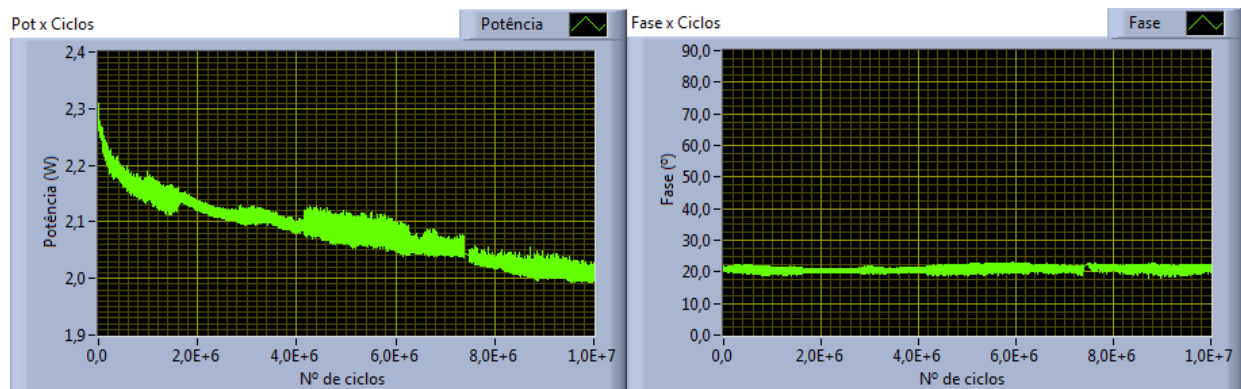


Figura 5 – Gráficos de potência e fase em relação ao número de ciclos durante a fadiga.

3.3.4. Análise da amostra após a conclusão do ensaio de fadiga

O critério da norma avalia o amortecedor, levando em conta os valores de frequência e potência dissipada pela amostra no ensaio de caracterização antes e depois da realização da fadiga. Na Tabela 1 são apresentados estes valores.

	1ª frequência		2ª frequência	
	Valor (Hz)	Potência Dissipada (W)	Valor (Hz)	Potência Dissipada (W)
Antes	15,72	1,436	61,09	2,927
Depois	15,40	1,502	54,03	2,825

Tabela 1 – Levantamento de dados para avaliação do amortecedor.

4.0 - ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS

Após o término dos ensaios e de posse dos gráficos e tabelas e segundo o critério da norma IEC 61897 (2), a amostra é aprovada. Para tornar completa a avaliação da amostra seria necessário repetir todo o processo mais duas vezes, no entanto, para fins de demonstração esse procedimento foi o bastante. A metodologia utilizando os recursos do sistema desenvolvido mostrou-se eficaz. Na sequência apresentam-se os resultados finais alcançados:

- A potência da amostra variou 4,57 % após o ensaio de fadiga, portanto dentro do especificado pela norma;
- A frequência de ressonância variou 11,57 %, dentro do especificado pela norma;

O sistema adotado pode melhorar em relação ao controle em malha fechada de velocidade e amplitude. Na amostra testada a oscilação foi maior na faixa de 55 a 62 %, ocasionando maior demora para a aquisição de dados. Pode-se aprimorar o sistema de controle com algoritmos de auto-sintonia PID, lógica Fuzzy entre outros;

O resultado provido pelo sistema desenvolvido facilitou em muito o processo de caracterização e fadiga, fornecendo subsídios como gráficos e um banco de dados, que facilitam a análise do produto;

O ensaio mostra a necessidade de se reavaliar os critérios de classificação dos pontos de ressonância. Os gráficos revelam outros pontos de ressonância, que devem ser avaliados se podem ou não serem considerados dentro do escopo de norma. No caso da aplicação do valor da segunda frequência de ressonância para executar a fadiga, por exemplo, desprezou-se a última frequência de 112 Hz por se tratar de uma frequência de ressonância gerada por outros parâmetros de projeto do amortecedor.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) SOUZA JR., O. H. Vibrações em cabos aéreos de linhas de transmissão – Estudo Teórico e Experimental por meio de Modelos Lineares e não Lineares; tese de doutorado, dez / 2010.

(2) INTERNATIONAL ELETROTECNICAL COMMISSION. Requiriments and tests for stockbridge type aeolian vibration dampers – IEC 61897., Suíça.

(3) INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE Guide on the laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors – September, 1993

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcos José Mannala;

Curitiba PR, 1967;

Graduado em engenharia elétrica - UFPR, Curitiba, 2000;

Mestrado em engenharia de produção e sistemas - PUCPR, Curitiba, 2004;

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

Artigos publicados:

- Investigação dos Parâmetros Mecânicos de Cabos CAA em Temperaturas Elevadas - XVIII SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005;
- Metodologia de ensaio para determinação do coeficiente de dilatação térmica de cabos condutores para linhas de transmissão - LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2009;
- Medição de parâmetros elétricos em condutores de linhas de transmissão sob condições de tracionamento e temperatura nominais de operação - LATIN AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2009
- Medição de parâmetros elétricos em condutores de linhas de transmissão sob condições de tracionamento e temperatura nominais de operação - SEMINARIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSAO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2009;
- Nova metodologia para ensaio de fluência em cabos condutores com tempo reduzido e confiabilidade de resultados - SEMINARIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSAO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2009;

Oswaldo Honorato de Souza Júnior

Heliodora MG, 1957;

Graduado em engenharia mecânica – EFEI, Itajubá MG, 1978;

Mestrado em engenharia mecânica – EFEI, Itajubá MG, 1994;

Doutorado em engenharia mecânica – PUC PR, Curitiba, 2010;

Área de atuação: Ensaios e projetos de pesquisa em cabos e acessórios de linhas de transmissão e distribuição – LACTEC, desde 1993;

Artigos publicados:

- “Automated testing system for overhead Line cables” – In. XV COBEM, Águas de Lindóia, 1999.
- “Automated Testing System for Overhead Lines Cables”. Journal of Energy Engineering, v. 125, p. 43-47, 1999.
- “Structural damping estimation of transmission line cables”. In. V Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CLAGTEE, 2003.
- “Dynamical analysis of transmission line cables through nonlinear models” . In. V Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CLAGTEE, 2003.
- “Dynamical analysis of transmission line cables through linear and nonlinear models”. In. XXV – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, 2004.
- “Dynamical analysis of transmission line cables. Part 2 – Damping estimation”. Mechanical Systems and Signal Processing, v.18, p. 671-681, 2004
- “Validation of a mathematical model of stockbridge damper”. In Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, XXVII CILAMCE, Belém, PA, 2006
- “Validation of a mathematical model of stockbridge damper”. In XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, XIX COBEM, Brasília – DF, 2007.
- “Dynamical analysis of transmission line cables. Part 3 – Nonlinear theory”. Mechanical Systems and Signal Processing, v.22, p. 992-1007, 2008.

Luiz Seiti Hatashita

Pompéia SP, 1965;

Graduado em engenharia elétrica – UTFPR, Curitiba PR, 1985;

Graduado em engenharia mecânica – UTFPR, Curitiba PR, 2004;

Especialização em Gestão Técnica de Concessionárias de Energia – UFPR, Curitiba PR, 1998;

Mestrado em engenharia mecânica – PUCPR, Curitiba PR, 2007.

Área de atuação: Setor de estudos eletromecânicos e civis de linhas de transmissão

Artigos publicados:

- “Combined Use of PLS-CADD and TOWER Software’s for Transmission Line Design - The Experience and Methodology of COPEL for Tower Analysis” – New Orleans, EUA. IEEE 2010 PES Transmission and Distribution.
- “Análise de Confiabilidade de Torres Metálicas quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM” - Puerto Iguazú, Argentina, 2009. XIII Encuentro Regional Ibero americano de Cigré;
- “Uso Conjugado dos Softwares Pls-Cadd e Tower em Projetos de Linhas de Transmissão - Experiência e Metodologia da Copel na Avaliação Estrutural de Torres” - Puerto Iguazú, Argentina, 2009. XIII Encuentro Regional Ibero americano de Cigré;
- “Análise de Confiabilidade de Torres Metálicas quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Analítico FORM.” - Maceió – Al, 2009. XXIX Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia.