



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GLT/28

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHA DE TRANSMISSÃO - GLT

**CONSTRUÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL AUTOMATIZADA PARA
DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO VIBRACIONAL DE CABOS CONDUTORES**

Marcos José Mannala (*)
Institutos Lactec/PUCPR

André Manzolli
Institutos Lactec

Marcio Tonetti
COPEL G&T

Renato Arruda Penteadó Neto
Institutos Lactec

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados do projeto P&D ANEEL/COPEL "Aumento da capacidade de transmissão de linhas aéreas: novas técnicas de projeto com trações elevadas" que tem como objetivo principal reavaliar a metodologia atual, no que tange à tração dos cabos, e estabelecer novos critérios para o projeto de novas linhas ou recapacitação de linhas existentes com carregamentos mecânicos elevados e consequente aumento na potência de transmissão, com ênfase na segurança e na confiabilidade. Para alcançar este objetivo, foi construída uma Linha de Transmissão Experimental (LTE), com o objetivo de levantar o comportamento mecânico vibracional dos efeitos de trações elevadas em três cabos condutores compostos por diferentes materiais, torres e acessórios, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de novas técnicas e critérios para projetos ou recapacitação, que permitam o aumento da capacidade de linhas de transmissão com segurança.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão experimental, cabos condutores de alumínio, laboratório de testes, vibração eólica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A aplicação de trações axiais acima dos valores prescritos pela norma brasileira NBR 5422 pode ser a melhor alternativa para o aumento da capacidade de transmissão de energia em função de razões técnico-econômicas ou ambientais, reduzindo o tamanho da flecha desenvolvida pelo cabo, sem comprometer a distância de segurança mínima entre cabo e solo (1). No entanto são necessários estudos aprofundados para fundamentar a adoção de trações elevadas por razões operacionais e de segurança.

Para se levantar o comportamento mecânico vibracional de cabos condutores e acessórios, são utilizados laboratórios que simulam os elementos mecânicos e elétricos de linhas de transmissão e distribuição, com a finalidade de realizar ensaios e simulações diversas. No entanto, a disponibilidade de espaços para construção de laboratórios é limitado. Devido a este fato, a análise do desempenho das amostras nos testes de cabos e acessórios é aproximada à condição real de operação do componente.

Com o apoio da construção da LTE descrita neste artigo, almeja-se avaliar metodologias e técnicas a serem desenvolvidas com testes em campo, analisando-se a possibilidade de utilização de diferentes cabos condutores de linhas de transmissão de energia elétrica com tensões mecânicas mais elevadas em relação àquelas previstas pelas especificações de projetos atuais.

Outro ponto importante é verificar como se comportam as estruturas quando transferem as solicitações dos componentes da linha às fundações das torres, ao serem empregadas trações mais elevadas nestes cabos condutores. Os acessórios convencionais das linhas de transmissão também necessitam de avaliação e análise ao

(*) Prefeito Lothário Meissner, 01- Jardim Botânico – CEP 80210-170 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3361-6363 – Fax: (+55 41) 3361-6200 – Email: mannala@lactec.org.br

serem aplicados em linhas com trações mais elevadas. Essa análise dependerá de um elenco de ensaios em componentes que serão avaliados na referida LTE, que se encontra em fase final de comissionamento. O resultado destes testes possibilitará a reavaliação das metodologias e dos critérios atuais de projeto, com foco no aumento da capacidade de transporte de energia. Também será possível avaliar um reposicionamento dos acessórios que compõe a linha a partir das recomendações indicadas, porém, considerando-se os estudos e avaliações para trações elevadas.

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 Brasileiro regulamentado pela ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica).

2.0 - PARTES QUE COMPÕE A LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL

Com foco em estudar o comportamento das partes que compõe a linha de transmissão, a fim de se obter subsídios quanto a reavaliação das diretrizes operacionais, os três cabos condutores, para-raios, estrutura e as condições ambientais deverão ser monitorados. A operação da linha experimental também deve oferecer uma gama de condições para torná-la a mais flexível possível, permitindo o maior número de condições de testes e viabilizar o comportamento mecânico dos elementos testados na linha experimental.

A linha de transmissão experimental é composta por três torres para circuito simples à tensão de 230 kV, com comprimento total de 410 m. Possui dois vãos: o primeiro com 270 m, onde serão realizados os estudos, e o segundo com 140 m. É composta por duas torres de ancoragem e uma de suspensão, e está localizada ao lado da subestação de Campo Comprido, operada pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia), em Curitiba.

A seguir são descritas, sucintamente, as partes que compõe o sistema de aquisição e controle da LTE.

2.1 Monitoramento dos pés e fundação da estrutura de ancoragem

O objetivo do sistema é monitorar os esforços a que a fundação da torre 1 está submetida através das solicitações impostas, devido aos esforços aos quais é sujeita quando alteram-se os valores de carga nos cabos condutores, além da ação de ventos, variação da temperatura e vibrações impostas pelo vibrador de cabos.

Para atingir o objetivo, foram instrumentados os quatro montantes que compõe os pés da torre, na parte ligeiramente acima da fundação de concreto, utilizando extensômetros e condicionadores de sinais em cada um dos quatro pés (vide Figura 1).

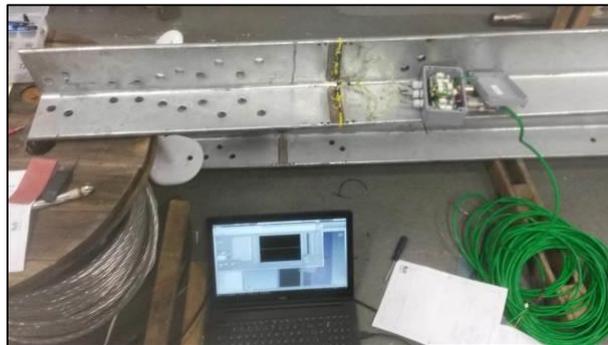


FIGURA 1 – Detalhes do monitoramento de um dos quatro montantes da torre 1, modelo PDF 60.

Os montantes dos 4 pés da estrutura são instrumentados para a medição das tensões mecânicas impostas, utilizando extensômetros dispostos nas duas faces dos montantes, próximo à fundação. Os dados fornecidos pelos extensômetros devem traduzir os valores de tração, compressão e flexão transmitidas para as fundações de cada um dos pés da torre. Os cabos condutores e para-raios são monitorados por células de carga, com o objetivo de medir a tração. A capacidade das unidades instaladas nos condutores é de 5 tf, e nos para-raios é de 2 tf. O processo consiste na aquisição dos sinais das 5 células de carga para controlar o carregamento dos cabos condutores. Na Figura 2 é apresentada a montagem da torre incluindo as peças instrumentadas.



FIGURA 2 – Montagem das ferragens dos pés da torre, incluindo as peças instrumentadas.

2.2 Tracionador dos cabos condutores

Como o objetivo é de analisar o comportamento vibracional de cada um dos três condutores sob diversas trações, foram projetados e construídos pela equipe do projeto três sistemas que tem a capacidade de controlar independentemente o valor de tração de cada um dos cabos condutores dentro da faixa de interesse. Os sistemas de tracionamento dos cabos estão instalados em cada uma das três mísulas da torre 1 (estrutura de ancoragem). A seguir são apresentadas as especificações de cada um dos sistemas de tração:

- Capacidade de carregamento de até 40 kN;
- Comando de posicionamento local e remoto;
- Fins de curso lógicos e físicos;
- Posicionamento do ponto de ancoragem do cabo no sistema de tração;
- Proteção do sistema contra chuva e poeira (IP 65);
- Medição da força aplicada nos condutores;
- Medição da posição dos três carros de tração.

Além do carregamento axial dos cabos, foram levadas em consideração no projeto a influência dos esforços devida ao peso do cabo e ação dos ventos nos condutores. Na Figura 3 é mostrada a instalação de um dos braços da torre com o tracionador previamente montado no solo.



FIGURA 3 – Fixação da mísula com um dos sistemas de tracionamento de cabos na torre.

Esse sistema utiliza células de carga nos condutores para o controle em malha fechada da tração dos cabos condutores. A taxa de aquisição do valor da tração a 2 Hz se mostrou suficiente para o controle do carregamento dos cabos. Visando a segurança, dois tipos de fins de curso foram instalados, sendo um lógico e outro físico. O lógico baseia-se na medição da posição do carro e atua caso se excedam os limites pré-definidos. O fim de curso físico é acionado mecanicamente, quando por qualquer motivo a primeira camada de segurança vier a falhar, desligando a alimentação dos motores.

2.3 Sistema de excitação mecânica (vibrador)

Para gerar as tensões dinâmicas de vibração controladas, para a torre 1 foi projetado e desenvolvido também pela equipe do projeto, um vibrador específico para esta função. Foram construídos três vibradores e instalados em cada uma das três mísulas da torre 1. Os equipamentos possuem controladores independentes, realimentados para atingir a amplitude e frequência de ressonância de cada cabo condutor da linha de transmissão experimental.

Os mecanismos de acionamento dos excitadores utilizados são atuadores lineares eletromagnéticos, com capacidade de 500 N pico, com excitação senoidal e 1.800 N, com pulso.

Cada sistema de excitação dos cabos funciona independentemente, sendo que cada um deles é realimentado por uma célula de carga e acelerômetro, permitindo que o conjunto cabo-condutor possa ser controlado, por exemplo, na frequência natural de vibração (ressonância) de cada cabo condutor. De posse dos valores lidos nos sensores mencionados, poder-se-á calcular o valor da potência vibracional aos que os cabos condutores estão sendo submetidos.

Do outro lado do vão, na estrutura 2, de suspensão, os dados adquiridos de vibração dos cabos condutores são originados por seis sensores de vibração (acelerômetros ICP). Esses sensores foram distribuídos nos três cabos condutores, dois em cada fase. O sistema foi projetado para abranger frequências na faixa de vento de 1 a 7 m/s que, com base no diâmetro médio dos cabos adotados e substituindo na equação de Strouhal, atuam na faixa aproximada de 6,5 a 48 Hz, conforme demonstrado na equação 1.

$$f = \frac{StV}{d} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde St é o número de Strouhal adotado é de 0,185 (2), v é a velocidade do vento m/s e d o diâmetro médio dos três cabos condutores em m.

Para excitar os condutores conforme o almejado, foram adotados equacionamentos para calcular as frequências naturais. Sendo assim, decidiu-se realizar simulações numéricas no software comercial ANSYS®, na plataforma APDL (Ansys Parametric Design Language). Para saber se o modelo numérico estava de acordo com os ensaios realizados em laboratório, foi realizada uma análise modal a fim de comparar as frequências naturais da simulação com as obtidas na bibliografia.

Após isso, foram realizadas análises harmônicas com o objetivo de se obter a receptância do cabo. A partir dessa informação, foi possível aplicar conhecimentos de vibrações e estimar a força necessária para excitar o cabo nas frequências de interesse, que são geradas pelo vento na faixa de 1 a 7 m/s (vide figura 4).

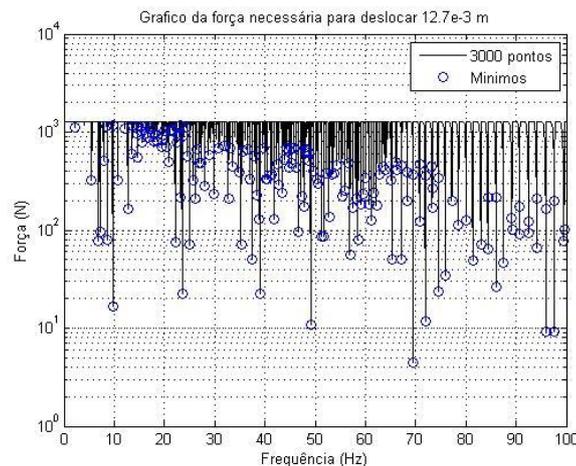


FIGURA 4 – Gráfico de força vs frequência necessária para movimentar o condutor 1/2" (12,7mm).

Após a determinação da faixa de frequência e força necessárias para a excitação dos cabos condutores, partiu-se para o projeto do chassi e do dimensionamento dos atuadores lineares eletromagnéticos (componente para realizar a vibração). O ponto de instalação do sistema de vibração é posicionado logo abaixo do sistema de tração do condutor, conforme é visto na Figura 5.



FIGURA 5 – Detalhe da instalação do sistema de vibração instalado na mísula da torre de ancoragem.

O sistema possui guias com o objetivo de que o vibrador acompanhe o deslocamento do carro de tração, que traz consigo o cabo condutor. Quando se aumenta e/ou diminui a tração do cabo, a coluna do êmbolo do excitador acompanha a variação longitudinal do condutor.

2.4 Vibrógrafo – medidor da amplitude de vibração

O vibrógrafo tem a função de medir o deslocamento de vibração do cabo condutor a 88,9 mm (3,5") do grampo de suspensão (3), na torre adjacente à estrutura de ancoragem. A Figura 6 apresenta a disposição do conjunto do sensor montado junto a cadeia de suspensão.

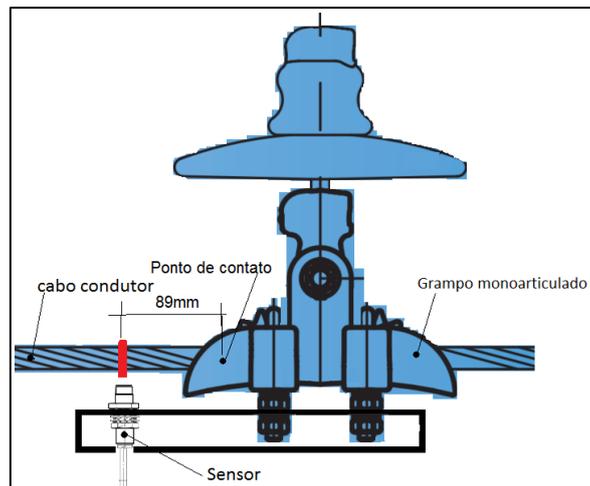


FIGURA 6 – Disposição do vibrógrafo na torre de suspensão.

O vibrógrafo é composto por um anel metálico instalado no cabo condutor com um sensor a 3 mm de distância de sua superfície. O sensor obedece aos requisitos mínimos de medição da norma (3). A Figura 7 apresenta a disposição dos equipamentos para calibração dos três sensores, conforme descrito pela referida norma.

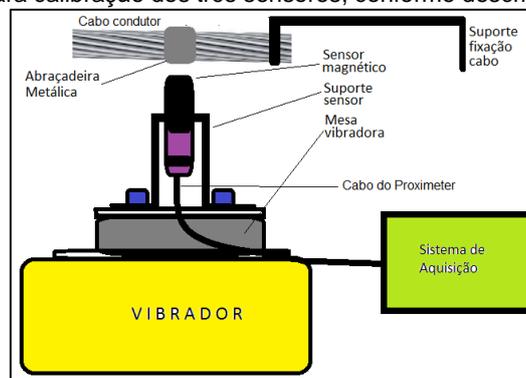


FIGURA 7 – Esboço do aparato para calibração do sensor magnético.

De posse do valor da amplitude de vibração e frequência, é determinada a tensão dinâmica no ponto mencionado. Assim, pode-se mensurar o comportamento à vibração de cada um dos três cabos, quando solicitados dentro de um mesmo critério de ensaio.

O cálculo do valor da tensão dinâmica, σ_{ad} , para cada amplitude de vibração, Y_{p-p} em mm, é feito aplicando a equação (2). O cálculo do valor da tensão dinâmica para cada amplitude de deslocamento pico a pico, Y_{p-p} , é feito pela teoria de Poffenberger-Swart (4). A equação 2 é utilizada no cálculo para determinação de σ_{ad} para o cabo de alumínio com alma de aço.

$$\sigma_{ad} = KY_{p-p}, \quad (2)$$

sendo K definido por:

$$K = \frac{E_a d_a p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)}, \quad (3)$$

onde E_a e d_a são respectivamente o módulo de elasticidade (módulo de Young), e o diâmetro dos fios de em alumínio mm; x é a distância ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo passante e o ponto de medição; e p mm^{-1} é dado obtido pela Equação (3):

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}}, \quad (4)$$

onde T é a tração N, no cabo durante o ensaio e EI é a rigidez à flexão do cabo, cujo valor mais conservador é calculado pela Equação (4):

$$EI_{min} = (n_a E_a d_a^4 + n_s E_s d_s^4), \quad (5)$$

onde n_a é o número de fios de alumínio do cabo e n_s , E_s e d_s são o número, o módulo de elasticidade final MPa e o diâmetro mm dos fios de aço do cabo (5).

3.0 - FUNCIONALIDADES DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL

No escopo do projeto, existem duas finalidades primárias para a Linha de Transmissão Experimental (LTE):

a. Análise da tensão vibracional dos cabos Tern (CAA 795 kcmil), Phosphorus (CAL 823 kcmil) e Greeley (CAL 927,2 kcmil) com e sem acessório para fins de atenuação da vibração, sob diversas trações, com foco nas mais altas, próximo do grampo armado da torre de suspensão (torre 2);

b. Levantamento do comportamento da fundação da torre quando sujeita aos vários esforços de ventos e dos testes previstos (torre 1, ancoragem).

A seguir são detalhadas estas funcionalidades.

3.1 Medição da tensão vibracional do cabo condutor

A medição da tensão vibracional do cabo condutor é realizada a 88,9 mm (3,5"), a partir do contato do grampo de suspensão, também denominada posição "vibrógrafo". A excitação do condutor, obtendo-se a tensão vibracional e o deslocamento vertical, ocorrerá em dois modos distintos de ensaio: excitação pelo vento (natural) e induzida (vibrador), conforme descrito a seguir:

a. Excitação natural: O sistema faz registros das tensões e deslocamentos vibracionais gerados por ventos, quando a velocidade do vento for superior a um valor definido pelo usuário por um determinado período de tempo. Serão registrados os dados relativos ao vento e tração nos cabos, e deslocamentos vibracionais no vibrógrafo;

b. Excitação induzida: Os cabos condutores são sujeitos a vibrações nos modos harmônicos (ressonância) através dos vibradores mecânicos, adquirindo seus dados de esforços gerados na excitação (força, fase, frequência e temperatura), além de tensão e deslocamento vibracional no vibrógrafo.

3.2 Reação vibracional e estática da fundação da torre de ancoragem

Com as diversas trações a que a torre de ancoragem será sujeita, faz-se necessário medir as solicitações sofridas nos pés da torre 1, a saber:

a. Através dos esforços estáticos devido à tração dos três cabos condutores. Esses esforços podem ser tanto

com uma distribuição uniforme da tração das três fases ou não;

b. Por meio do registro de rajadas de vento que incidam sobre a LTE. Os registros específicos a serem obtidos nas duas modalidades são: esforços de tração, compressão e flexão nos quatro pés da torre.

O sistema é capaz de fazer registros dos dados das solicitações quando os ventos provocarem uma vibração significativa nas torres.

3.3 Modos de operação da linha de transmissão experimental

A linha de transmissão experimental possui três modos de operação, conforme descrito a seguir:

a. Automático: Aguarda, em tração mínima do cabo (flecha máxima e iguais para todos os cabos), obedecendo o critério H/w, até que a componente transversal do vento nos cabos supere um determinado valor por um certo tempo mínimo, para evitar que eventuais rajadas de vento disparem um ensaio. Quando houver um vento estável dentro da faixa estipulada, realiza-se um ensaio varrendo a tração em patamares, de um valor inicial a um final. Ao final, os dados são calculados, empacotados, gravados e enviados ao servidor local. Posteriormente outro programa, realiza uma análise qualitativa dos dados no sentido de verificar a estabilidade do vento e temperatura durante o ensaio. Caso se encaixe dentro do padrão de qualidade, é incrementado o valor da célula da matriz relativa à temperatura e velocidade do vento médio durante o ensaio. Isto servirá para priorizar os ensaios nas condições menos frequentes. Os arquivos relativos a cada ensaio são enviados para a central de armazenamento, conforme disponibilidade de conexão.

b. Manual: Inicia uma aquisição contínua e abre um painel com controles que permitem ao operador modificar parâmetros tais como tração nos cabos condutores, amplitude e frequência de vibração. Essa condição é útil para os testes dos componentes do sistema e também pode ser utilizada para ensaios que envolvem combinações não previstas. Haverá a possibilidade de forçar um ensaio, como descrito no modo automático, independente da velocidade do vento; e

c. Hibernação: adquire sinais (temperatura, vento, tração nos cabos, etc.) e os envia constantemente numa frequência baixa (até 1 Hz), para visualização das condições ambientais e do sistema a qualquer momento.

A seguir a Figura 8 apresenta a imagem do painel que serve de interface para a operação da linha de transmissão experimental

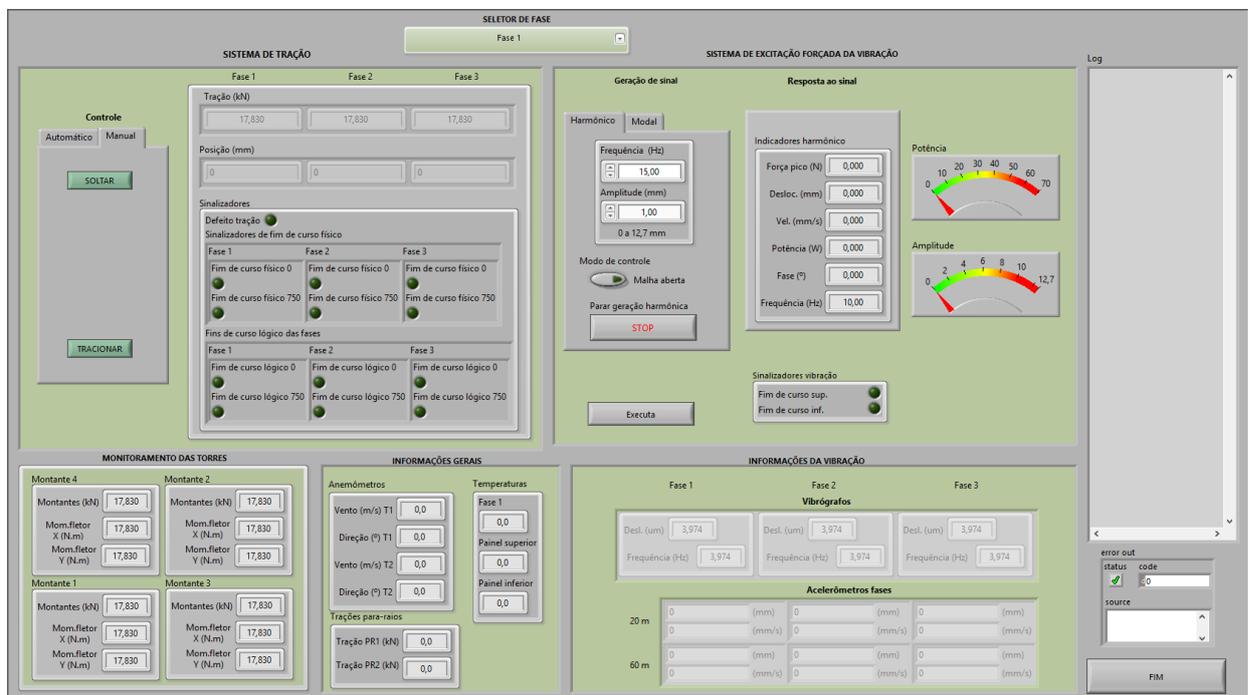


FIGURA 8 – Painel de controle da linha de transmissão experimental.

4.0 - CONCLUSÃO

Espera-se que com todos os recursos expostos nas seções anteriores, que a implantação da linha de transmissão experimental possa trazer contribuições significativas em relação à descrição do comportamento vibracional dos cabos, estrutura e acessórios nela testados.

Será possível obter um volume considerável de dados de campo e compará-los aos dados obtidos em laboratório. Outro fator positivo é que, devido à instalação de vibradores na LTE, independentemente de estar ventando ou não, poder-se-á analisar o comportamento do condutor sujeito à vibração. Sem ventos, o condutor poderá ser exposto a vibrações, com a intensidade e frequência desejadas. O sistema de automação foi projetado com capacidade de aquisição, processamento e armazenamento suficientes para que, se necessário, a LTE forneça dados ininterruptamente. Por esta razão, o sistema permite que a operação seja realizada remotamente, assistida por câmeras.

Com a LTE espera-se que sejam obtidos resultados mais próximos da realidade das linhas de transmissão, por ser um laboratório em campo.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Tonetti, M. Modelo de análise da resistência à fadiga sob o efeito de tensionamento acima do nível EDS para cabo condutor em liga de alumínio para linhas de transmissão. Dissertação de mestrado, 2017;
- (2) Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, IEEE Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors, IEEE Std 664-1993;
- (3) IEEE Power Engineering Society. (2006). IEEE Guide for aeolian vibration field measurements of overhead conductors. 35. New York, NY, USA;
- (4) Poffenberger, J.C., and Swart, R. L., Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, 1965, pp. 281-289;
- (5) Fadel, A. A. et al., 2012. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. International Journal of Fatigue, Issue 42, pp. 24-34.

6.0 - 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; Doutorando na área de mecânica dos sólidos – PUC PR. Experiência: atuação em P&D desde 1994 participando direta e indiretamente em 10 projetos Apresentação de trabalho, elaboração de trabalhos técnicos, e outras publicações: 35. Área de atuação: Ensaio e projetos em cabos e acessórios para linhas de transmissão e distribuição – Institutos Lactec, desde 1994;



André Manzolli; 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.



Renato de Arruda Penteado Neto, Curitiba, Paraná, graduou-se em 1977 em Engenharia Elétrica, na Universidade Federal do Paraná. Mestrado em Física no ano de 2003, na Universidade Federal do Paraná. Doutorado em Engenharia de Materiais no ano de 2005 na Universidade Federal do Paraná. Artigos, trabalhos publicados, resumos em anais de eventos e capítulos de livros: 11. Apresentação de trabalho, elaboração de trabalhos técnicos, e outras publicações: 70. Orientações acadêmicas: 27. Total geral de documentos registrados: 211.



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.