

## **SIMULAÇÕES DOS ESFORÇOS VIBRACIONAIS DO CABO CAA 795 MCM (TERN) ATRAVÉS DE MÉTODOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS DE VIBRAÇÃO**

JHONATTAN DIAS<sup>1</sup>, RODRIGO CANESTRARO QUADROS<sup>2</sup>; MARCOS JOSE MANNALA<sup>3</sup>;  
MARCIO TONETTI<sup>4</sup>;

<sup>1</sup>Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba-PR, jhonattan.dias@lactec.org.br

<sup>2</sup>Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba-PR, rodrigo.quadros@lactec.org.br

<sup>3</sup>Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba-PR, mannala@lactec.org.br

<sup>4</sup>Copel Geração e Transmissão S.A., Curitiba-PR, marcio.tonetti@copel.com

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016  
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** Como resultado do projeto de P&D do convênio Institutos Lactec e Copel, a construção de uma linha experimental, em campo, tem como um de seus principais objetivos o estudo de vibrações eólicas em diversos condutores e para diversas condições de tracionamento de seus cabos. Problemas com vibrações eólicas são extensivamente trabalhados no estudo de torres e cabos de linhas de transmissão. Visando encontrar métodos analíticos que modelassem a resposta mecânica a fim de se obter a força de excitação, uma vasta pesquisa foi feita. Entretanto, foram encontrados apenas equacionamentos para calcular as frequências naturais do cabo. Dessa forma, partiu-se para simulações numéricas no software comercial ANSYS® utilizando as frequências naturais calculadas de forma analítica pela bibliografia, de forma a validar o modelo numérico. A aplicabilidade do estudo desenvolvido nesse projeto não se restringe apenas ao desenvolvimento de um excitador mecânico, pois a pesquisa permitiu desenvolver um método de se obter as respostas do cabo quando excitado pelo vento, viabilizando o projeto de linhas de transmissão mais confiáveis. Isto é, ao se conhecer como o condutor responde às excitações nele impostas, pode-se dimensionar vãos, trações de esticamento, fixações e amortecedores, com maior confiabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** vibração eólica, método numérico e analítico, confiabilidade

### **SIMULATION OF VIBRATIONAL LOADINGS OF CAA 795 MCM (TERN) CABLE THROUGH ANALYTICAL AND NUMERICAL VIBRATION METHODS**

**ABSTRACT:** As a result of R&D partnership between Institutos Lactec and Copel, the construction of an experimental powerline on field has the main objective to study the wind vibrations on the conductor cables under a variety of tension conditions. Problems with wind vibrations are extensive studied in the field of transmission towers and power cables. Aiming to find analytical methods to model a mechanical response to obtain the strength responsible for the excitation of the cable, a large research was made. Although, there were found only equations to obtain the natural frequencies of the cable. Therefore, numerical simulations was made in the software ANSYS® using the natural frequencies calculated analytically from the bibliography aiming to validate the numerical model. The applicability of this study does not narrow only to the development of one mechanical exciter equipment, since this research allowed the development of a method to obtain the responses of the cable when it is excited by wind, allowing the project of more reliable powerlines. It means that, when it is known the behavior of the conduction line to the excitations that it is exposed, you can size gaps, stretch tensions, anchoring and dampers with more reliability.

**KEYWORDS:** aeolian vibration, analytical and numerical methods, reliability

## **INTRODUÇÃO**

Em um projeto de P&D, fruto de uma parceria dos Institutos LACTEC com a Copel, um dos objetos de estudo é uma torre experimental visando realizar um levantamento do comportamento do cabo quando sujeito a diferentes trações de esticamento. Buscando-se um melhor aproveitamento da LTE, projetou-se um excitador mecânico para simular vibrações eólicas na linha a fim de realizar ensaios em regimes de vento insuficiente ou para uma demanda específica.

Para que fosse possível o projeto desse excitador, realizou-se uma pesquisa em busca de estudos semelhantes ou a existência de métodos analíticos que modelassem a resposta mecânica do cabo, de maneira a se obter a força de excitação em que o condutor está submetido. Entretanto, não foram encontrados equacionamentos que descrevessem essa resposta, optando-se no trabalho por utilizar simulações numéricas no software comercial ANSYS®, na plataforma APDL.

A fim de se obter resultados mais confiáveis modelou-se um vão segundo uma catenária, pois esse é o formato que um fio/cabo assume quando sujeito apenas ao peso próprio. Além disso, essa curva guarda dentro do equacionamento dela a tração de esticamento que o cabo está sujeito.

Visando verificar se o modelo numérico condizia com a realidade, fez-se uma análise modal para se obter as frequências naturais. A partir delas, comparou-se com os resultados fornecidos pela bibliografia. Após a validação, partiu-se para análises harmônicas do conjunto coletando as respostas em frequência do cabo quando aplicada uma força num ponto próximo da fixação (local onde seria alocado o excitador). Sabendo a amplitude necessária no vão, os modos de vibrar da linha e a função resposta em frequência (FRF) do ponto de excitação, obteve-se a força necessária para simular uma excitação eólica.

Sendo assim, esse estudo permitiu não apenas gerar dados para a construção de um excitador mecânico, mas, também, compreender como o cabo responde quando excitado eolicamente. Ou seja, criou-se um método para se obter a resposta vibratória de condutores longos suspensos, permitindo o projeto de linhas de transmissão, distância entre torres, amortecedores e fixações mais confiáveis. Além disso, essa metodologia desenvolvida e parte dos resultados obtidos foram feitos 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).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Vibrações eólicas são aquelas de baixa amplitude (no máximo uma vez o diâmetro do cabo) e frequência elevada (de 3 a 150 Hz) resultantes de ventos de baixas velocidades, sendo causadas pelo desprendimento alternado de vórtices de Karman. Elas afetam todas as linhas de transmissão, sendo responsáveis pela diminuição da vida útil, pois ocasionam um processo cumulativo de fadiga levantando a ruptura do cabo.

Devido ao grande comprimento do vão e do baixo amortecimento interno, as vibrações atuantes são de ordem "n" muito alta ( $30 < n < 500$ , aproximadamente). Isto é, as frequências naturais são separadas geralmente de 0,1 Hz a 0,2 Hz. Ou seja, o cabo irá oscilar em qualquer velocidade de vento na faixa de 1 a 7 m/s, devido ao efeito de sincronização. Analisando a bibliografia, percebe-se alguns equacionamentos para a obtenção das frequências naturais, sendo eles utilizados para a validação do modelo numérico desse trabalho.

Para se obter a força a partir da análise harmônica foram aplicados conhecimentos da área de vibrações mecânicas. Segundo eles, sabe-se que quando se aplica um pulso unitário num ponto A e se aplica a transformada de Fourier à resposta de um ponto B, obtém-se a relação entre a amplitude de entrada e de saída de um sinal no domínio da frequência. Ou seja, encontra-se qual seria a amplitude da resposta para uma dada frequência quando um sistema é excitado por uma força harmônica unitária nesta frequência. A partir disso, devido a linearidade estimulada do problema, tendo a informação da amplitude necessária no ponto B e receptância na frequência desejada, bastaria dividir aquela por esta para se obter a amplitude da força harmônica de excitação em A.

No quesito malhas construídas, foram utilizados 2 elementos de viga (BEAM188 e BEAM189) e 1 de tubo (PIPE288) com refinamentos diferentes na análise modal e comparados os resultados com a bibliografia a fim de se encontrar o melhor par refino e elemento para as simulações harmônicas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando o procedimento anteriormente descrito a um cabo TERN com 3 toneladas de tração de esticamento percebeu-se que utilizar o elemento de tubo com malha uniforme e 100 partições (ANSYS 100K P288 MAT23) produz resultado semelhante quando se utiliza malha não uniforme com o dobro de elementos para a primeira das 159 partições (ANSYS 159K P288 MAT23 NÃO UNIFORME REFINO2). Além disso, o aumento de 100 divisões (ANSYS 100K P288 MAT23) para 150 (ANSYS 150K P288 MAT23) com a mesma malha para o elemento de tubo não gerou variações significativas nas frequências naturais obtidas. Ou seja, mudar a quantidade de divisões do cabo, o estilo da malha ou o refino não gerou mudanças significativas no resultado para esse tipo de elemento. Já para os elementos de viga nota-se que os resultados foram semelhantes mesmo quando se varia a quantidade de nós do elemento (de dois nós do B188 para três do B189), número de partições ou estilo da malha.

Analisando o erro absoluto em relação a bibliografia observou-se que o elemento de tubo produz a maior quantidade de erro. Além disso, para o de viga percebeu-se que se mantiver o mesmo número de partições e estilo de malha, mas aumentar o número de nós calculados em cada elemento, as frequências naturais se afastam da teórica. O motivo disso pode ser o fato de que o acréscimo de um nó em todos os elementos aumentou a quantidade de cálculos, aumentando os erros de aproximação.

Outro ponto é que utilizar o mesmo número de partições e de nós por elemento, mas modificar as características da malha aproxima o resultado numérico do teórico. Isso fez com que para a análise harmônica inicial escolhe-se utilizar uma malha com 100 partições, elemento BEAM188 e refino de 10(dez) elementos para primeira partição (próxima da fixação) e 3(três) para as demais. Isso porque ela foi a que apresentou um erro absoluto menor.

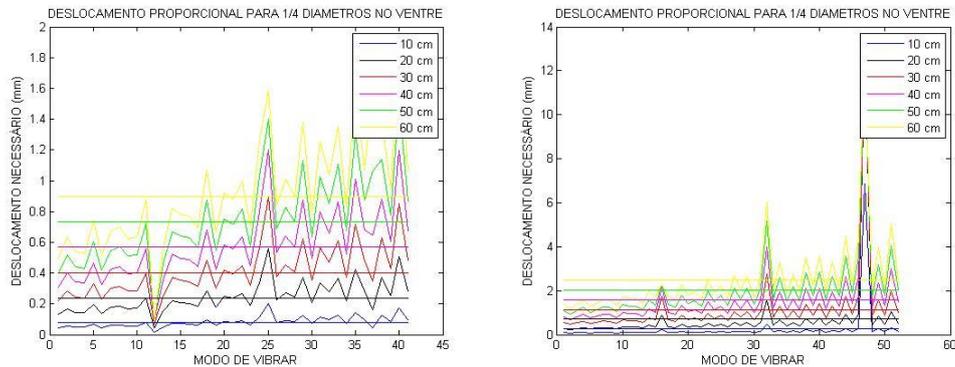
Como primeiro teste da metodologia, baixou o diâmetro de 27.03 mm (aproximadamente) para 10 mm, mantendo as demais propriedades das simulações anteriores. Isso visando diminuir a quantidade de cálculos para o diâmetro, visto que a análise harmônica requer maior poder computacional e por ser um teste da metodologia apenas. O ponto de aplicação de força unitária foi a 30 cm do ponto de fixação do cabo (o mais próximo da extremidade do cabo, para a malha ANSYS 100K B188 MAT1 NÃO UNIFORME 10.3). A faixa de frequência analisada foi de 0 a 100 Hz, utilizando discretização de 1000, 1500, 2000 e 3000 pontos nesse domínio.

A partir da análise, obteve-se a receptância para o cabo na faixa de frequência escolhida e através dela foi possível estimar a força máxima necessária, dividindo o deslocamento máximo do excitador (12.7 mm) por essa FRF. Para se evitar o problema ocasionado pelos nós dos modos de vibrar (frequências nas quais o ponto de aplicação de força tem rigidez infinita) considerou que neles o deslocamento é de  $10^{-5}$  m ao invés de nulo. Isso fez que a força máxima ocorresse nos nós (de acordo com o esperado) com um valor de 1270 N, sendo nos pontos fora deles menor.

Analisando o gráfico de força em função da frequência notou-se que ela tinha valores maiores nos primeiros 25 Hz, diminuindo com o aumento da frequência. Além disso, os mínimos ocorrem nas frequências naturais, pois uma pequena excitação gera um grande deslocamento (quando não se está trabalhando no nó do modo de vibrar).

Como a metodologia se mostrou consistente realizou-se novas simulações variando o ponto de aplicação da carga de 10 cm até 60 cm do ponto de fixação do cabo. Além disso, foi obtido o valor de deslocamento do excitador necessário para que no meio do vão a amplitude de vibração fosse de 25% do diâmetro do cabo. A nova faixa de análise foi de 20 a 40 Hz sendo consideradas trações de 2, 3 e 4 toneladas. Também foram consideradas as propriedades corretas do cabo (densidade linear, módulo de elasticidade médio e diâmetro). Na figura 1 são apresentados os resultados para o deslocamento necessário quando a tração é de 2 toneladas (à esquerda) e 4 toneladas (à direita).

Figura 1. Deslocamento necessário do excitador para gerar uma amplitude de 1/4 de diâmetro no meio do vão quando o cabo está esticado com uma tração de 2 e 4 toneladas (à esquerda e à direita, respectivamente). O ponto de aplicação do deslocamento foi variado de 10 cm até 60 cm, com passo de 10 cm.



Fonte: Institutos Lactec (2016)

Analisando os gráficos percebe-se que quanto maior a tração, maior é o deslocamento necessário, visto que o sistema enrijece com o aumento do esticamento. Além disso, quanto mais distante da fixação, mais deslocamento é necessário, pois mais flexível é as proximidades do ponto de aplicação da carga.

Aplicando o mesmo procedimento para a obtenção de força percebe-se que a reação do cabo é quase constante tendo picos onde se localizam as frequências naturais. Sendo assim, a força se aproxima muito da média, sendo ela um valor bom para estimativa nessa faixa de frequência (considerando que não se trabalhará nas frequências onde o ponto de aplicação de carga está num nó). As médias obtidas são apresentadas na figura 2.

Figura 2. Força média em cada ponto de aplicação de carga quando o cabo está tracionado com 2, 3 e 4 toneladas-força.

FORÇA MÉDIA UTILIZANDO 500 PONTOS 10cm - 20cm - 30cm - 40cm - 50cm - 60cm						FORÇA MÉDIA UTILIZANDO 500 PONTOS 10cm - 20cm - 30cm - 40cm - 50cm - 60cm					
FMED500 =						FMED500 =					
1.0e+03 *						1.0e+03 *					
1.1174	0.7434	0.6916	0.6794	0.6766	0.6803	1.4723	1.3032	1.1218	1.0402	0.9963	0.9663
FORÇA MÉDIA UTILIZANDO 500 PONTOS 10cm - 20cm - 30cm - 40cm - 50cm - 60cm						FORÇA MÉDIA UTILIZANDO 500 PONTOS 10cm - 20cm - 30cm - 40cm - 50cm - 60cm					
FMED500 =						FMED500 =					
		1.0e+03 *									
		1.4893	1.4540	1.3021	1.1322	1.0337	0.9729				

Fonte: Institutos Lactec, 2016.

Analisando essas forças percebe-se que quanto mais distante do ponto de fixação mais força é necessária para vibrar o cabo. Isso se deve ao fato de que quanto mais longe, mais flexível é a região em torno do ponto de aplicação de carga sendo necessária mais força para mover todo o conjunto. Outro ponto é que quanto maior a tração no cabo mais força é necessária, isso ocorre, pois, o conjunto por completo começa a ficar rígido demais sendo necessário maior carga para tirá-lo da posição de equilíbrio. Ou seja, a força aumenta com o aumento da distância de aplicação de carga da fixação e com o aumento do tracionamento do cabo.

## **CONCLUSÃO**

Através das simulações realizadas e da revisão bibliográfica, foi possível montar uma metodologia para a obtenção da força gerada pela vibração eólica em condutores elétricos. Pelo método apresentado nesse documento, podem-se realizar estudos acerca da força necessária para excitar um condutor em uma frequência específica ou de forma contrária, com uma dada frequência, calcular os esforços da resposta de um cabo com uma tração conhecida. Isto é, a metodologia desenvolvida pode ser utilizada como ferramenta auxiliar para o projeto de torres de transmissão, pois permite ter conhecimento do comportamento de um condutor, e como ele reage com as alterações nos carregamentos de tração e para variados comprimentos do vão. Dessa forma, com tal metodologia, equipamentos de medição como vibrógrafos, e também amortecedores, podem ser melhor distribuídos, otimizando suas funções, com base em um melhor conhecimento do comportamento dos condutores.

Vale ressaltar que o método desenvolvido leva em consideração apenas simulações numéricas e equacionamentos de frequências naturais obtidos através de bibliografia, não considerando regimes de vento oscilantes. Isto é, não prevê o comportamento do cabo nem as reações quando excitado por rajadas de ventos, por exemplo. Outro ponto é que seriam necessárias medições para verificar se o modelo traduz a realidade do problema. Isto porque, o método fornece subsídios para possibilitar uma simulação de um sistema real e, portanto, uma estimativa, sendo necessárias validações experimentais e possíveis calibrações do modelo, com base nos resultados que serão obtidos com a LTE.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho apresenta parte dos resultados obtidos durante a execução do projeto 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 (Agência Nacional de Energia Elétrica).

## **REFERÊNCIAS**

- TALAVERA, L. M. B. Parábola e catenária: história e aplicação. 97 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Educação. Área de Concentração: Ensino de Ciências e Matemática) – Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- FREIRE, D. G. Vibrações Eólicas de condutores singelos em linhas aéreas de transmissão. 99 p. Dissertação (Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Ciências em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio Janeiro, 1997.
- SANTOS, A. S. D. Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão 195 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – UFPA, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- NASCIMENTO, C. A. M. Modelagem numérica de vibrações em cabos de transmissão de energia elétrica 71 p. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- BAVASTRI, C. A. Introdução às vibrações em linhas de transmissão 61 p. Conjunto de slides (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PG-Mec), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.