



Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on  
Computational Methods in Engineering  
September 3 to 6, 2006 - Belém, Pará - BRAZIL.

## DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE CONDUTORES DE LINHAS AÉREAS

**Adriana Lima Rolim**  
**Francisco Vicente de Souza Neto**  
**Tiago Rodrigues da Silva**  
**José Perilo da Rosa Neto**  
**Remo Magalhães**  
**André Maués Brabo Pereira**  
**Gisele Couto Anholeti**  
**Regina Sampaio**  
[alrolim@gmail.com](mailto:alrolim@gmail.com)  
[vicente@ufpa.br](mailto:vicente@ufpa.br)  
[tiago\\_pa@zipmail.com.br](mailto:tiago_pa@zipmail.com.br)  
[perilo@ufpa.br](mailto:perilo@ufpa.br)  
[remo@ufpa.br](mailto:remo@ufpa.br)  
[maues.pereira@poli.usp.br](mailto:maues.pereira@poli.usp.br)  
[anholeti@ufpa.br](mailto:anholeti@ufpa.br)  
[rsampaio@ufpa.br](mailto:rsampaio@ufpa.br)

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará  
Av. Augusto Corrêa, n.01, 66075-110, Belém - PA – Brasil

**Resumo.** *Um dos problemas de fundamental importância na operação e manutenção de Linhas de transmissão são os devidos à ocorrência de vibração nos condutores como resultado da ação do vento. Se estes efeitos não forem controlados através de medidas apropriadas, estas vibrações podem levar à destruição dos condutores por fadiga ou abrasão durante a vida útil destes. Com o objetivo de estimar a vida útil dos cabos condutores, instalou-se de um vibrógrafo PAVICA na linha Guamá-Vila do Conde sobre o Rio Guamá. Após a coleta de frequências e amplitudes do cabo, pôde-se, por meio da equação de Poffenberger-Swart, calcular as tensões atuantes no mesmo e construir a curva de tensão acumulada. A partir das curvas obtidas foi realizada uma comparação com a curva limite de segurança prescrita pela formulação do CIGRE e a curva de Wöhler para o cabo GROSBEAK 636 obtida em laboratório. O PAVICA não fornece a estimativa de vida útil quando se utiliza armadura pré-formada no condutor. Logo, houve a necessidade da elaboração de um software para verificar a expectativa de vida do condutor utilizando a formulação do CIGRÉ para avaliação dos dados de medição. As implementações fundamentaram-se na abordagem orientada a objetos, utilizando a Linguagem de Modelagem Unificada (UML) e os Padrões de Projetos. Para aplicar esses recursos da melhor forma utilizou-se a linguagem de programação Java. Nos testes, comprovam-se a aplicabilidade dos algoritmos implementados para as análises em questão.*

**Palavras-chaves:** *Vibrações eólicas, Fadiga, Vida útil e Linhas de Transmissão.*

## 1. INTRODUÇÃO

A fadiga de cabos causa enormes prejuízos econômicos para as empresas transmissoras de energia e para terceiros. Ela é decorrente das vibrações eólicas incidentes nos cabos, os quais devido ao comportamento dinâmico provocado pelas vibrações costumam sofrer abrasão em pontos de ligação, pontos que apresentem restrições. Segundo Hardy (2001) este fenômeno é complexo, tendo em vista que a abrasão não ocorre somente nos pontos de contato da camada externa do condutor com as restrições, mas também entre os fios do condutor.

As vibrações devido a ventos das linhas aéreas de transmissão sempre foram um dos principais problemas mecânicos das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Em caso de falha do cabo por ruptura a fadiga, grandes investimentos se fazem necessários.

A fim de evitar futuros problemas nas linhas de transmissão é que se realiza análises para previsão da vida útil do cabo (Comitê de Estudos N<sup>o</sup>. B2, 2003). Para elaboração desta análise foi selecionado um trecho da travessia do Rio Guamá em Belém do Pará, um terreno sem obstáculos, que permite ventos de maior intensidade e em sua maioria perpendiculares à linha, que seria mais susceptível à vibração, caracterizando um caso severo.

A investigação do dano é importante para saber se o dano é devido ao alto nível de vibração eólica. Uma medição pode ser feita no local onde o dano ocorreu e pode ser feito adicionalmente em outros locais recomendados.

Existem várias maneiras de detectar a fadiga dos cabos das LT's, neste estudo foi feita uma medição das intensidades de vibração. Apesar de não ser a maneira mais eficiente de detectar os problemas relacionados com a vibração, é a mais factível e econômica técnica de análise preditiva de manutenção e fonte de dados para os projetos de LT's.

Para medir as intensidades de vibração foi utilizado um vibrógrafo, modelo PAVICA, todavia ele não fornece a estimativa de vida útil quando se utiliza armadura pré-formada no condutor. Logo, houve a necessidade da elaboração de um software para verificar a expectativa de vida do condutor utilizando a formulação do CIGRÉ (1979) para avaliação dos dados de medição.

As implementações realizadas no software fundamentaram-se na abordagem orientada a objetos, utilizando a Linguagem de Modelagem Unificada (UML) e os Padrões de Projetos. Utilizou-se a linguagem de programação Java. Nos testes realizados, comprovam-se a aplicabilidade dos algoritmos implementados para as análises em questão, sendo possível avaliar a vida útil do condutor, considerando a rigidez da armadura pré-formada.

## 2. MÉTODO DE MEDIÇÃO

A medição de vibração de cabos condutores de linha e transmissão segue uma padronização implementada pelo IEEE (Institute of Electrical & Electronic Engineers), em 1965, baseada no deslocamento diferencial vertical ( $Y_b$ ) definido como método de “amplitude a flexão”, pico a pico do condutor em relação ao grampo de suspensão no ponto distante 89 mm do último ponto de contato entre grampo e o cabo. Em 1979 o método de determinação da vida útil do cabo sofreu uma nova implementação na “*International Conference on Large High Voltage Electric Systems*” (CIGRÉ, 1979). Este novo método de medição utiliza a Lei de Miner que considera um acúmulo linear do dano no condutor.

### 2.1 Características do local de medição

Nesse estudo, o vibrógrafo (PAVICA) foi instalado no trecho sobre o Rio Guamá, Fig. 1, em Belém do Pará, no condutor modelo Grosbeak 636 do vão da LT-230 kV Vila do

Conde - Guamá, que inclui as torres de linha de transmissão 102 e 103 e apresenta extensão de 678 m. A torre 102 situa-se no meio do Rio Guamá com altura de 79.65 m e a 103 na margem direita com altura de 73.65 m (Fig. 2).



Figura 1- Trecho da Linha de Transmissão 230 kV Vila do Conde-Guamá



Figura 2- Torre 103 do vão da Linha de Transmissão 230 kV Vila do Conde-Guamá.

Este trecho foi escolhido, pois apresentava características favoráveis à medição. A travessia do rio é, naturalmente, livre de obstáculos. Além disso, o rio guia o fluxo do vento submetendo os cabos condutores a ventos predominantemente perpendiculares. A margem onde se situa a torre 103 é uma área plana, sem árvores de altura elevada ou outros obstáculos.

Caracteriza-se, portanto, uma região de grande exposição aos ventos, e como consequência os condutores deste vão estão mais sujeitos a vibração eólica.

O aparelho foi instalado a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão do condutor da torre 103, segundo as normas do CIGRÉ (1979).

## 2.2 Instrumento de medição

O aparelho utilizado na medição foi um vibrógrafo modelo PAVICA, Fig. 3, que armazena os dados de amplitude e frequência do condutor e número de ciclos pico a pico para realizar uma análise de predição do tempo de vida restante para o condutor.



Figura 3 – PAVICA sendo instalado na linha do trecho Vila do Conde – Guamá.

Estes dados são transferidos a um computador através de uma placa RC 232 para leitura das medições acumuladas, Fig. 4. Este equipamento acompanha um software para análise dos dados coletados, assim como definição dos parâmetros de medição.



Figura 4 – PAVICA durante transferência de dados via placa RC 232.

O cálculo da amplitude de flexão determinada pelo PAVICA consiste num procedimento de conversão da amplitude de flexão reversa medida pelo aparelho. Conhecida a rigidez efetiva à flexão EIE do cabo condutor, que pode ser um dado de entrada na programação ou calculada pelo próprio equipamento, e o valor da força de tração atuante no cabo, calcula-se o parâmetro  $p$ , conforme a Eq. (1).

$$p = \left( \frac{T}{EIE} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Também como dado de entrada na programação do PAVICA fornece-se a distância  $s = a + c$ , sendo  $a = 89 \text{ mm}$ , comprimento padrão da lâmina correspondente a distância do ponto de medição até o último ponto de contato do condutor com o grampo. O valor de  $c$ , em geral igual a zero, deve ser considerado quando a distância do centro da antena sensora do aparelho ficar afastada do último ponto de contato do condutor com o grampo.

O equipamento determina automaticamente a razão  $R$  entre as amplitudes de flexão  $Y_b$  e a amplitude de flexão reversa  $Y_a$  usando a Eq. (2):

$$R = \frac{[p \times a - 1 + e^{-pa}]}{[e^{-pc} - e^{-ps}(1 + p \times a)]} \quad (2)$$

A amplitude de flexão é dado pela Eq. (3).

$$Y_b = R \times Y_a \quad (3)$$

A determinação da vida útil de um condutor usando o PAVICA é feita considerando a teoria de dano total acumulado de Palmgren-Miner seguindo os passos:

Cálculo da tensão dinâmica, Eq. (4), correspondente à amplitude  $Y_{bi}$  do  $i$ -ésimo ciclo de vibração da  $f$ -ésima amostra:

$$\sigma_{fi} = Q \times Y_{bi} \quad (4)$$

$$Q = \frac{(q^2 \times E_e \times d_e)}{4 \times (q \times a - 1 + e^{-qa})} \quad (5)$$

Onde  $d_e$  equivale ao diâmetro do condutor;

$$q = \left( \frac{T}{EIP} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Sendo o valor de  $a = 89 \text{ mm}$ ;

Onde o valor EIP (Rigidez à flexão mínima do condutor) foi calculado de acordo com os parâmetros estabelecidos no manual do PAVICA, (Roctest, 1997):

A seguir é calculado o dano parcial de fadiga devido ao  $i$ -ésimo ciclo de vibração da  $f$ -ésima amostra, Eq. (7):

$$D_{fi} = \left( \frac{\sigma_{fi}}{k} \right)^\alpha \quad (7)$$

### 2.3 Parâmetros de medição

O período de teste adotado foi de 27 dias. A primeira instalação do PAVICA foi efetuada no dia 03 de janeiro de 2006, na linha situada entre as torres 101 – 102 – 103 da linha Vila do Conde – Guamá. O vibrógrafo foi instalado a 89 mm do último ponto de contato entre o grampo e o condutor, Fig. 5, como previsto nas normas. Sendo retirado dia 30 de janeiro de 2006.



Figura 5 – PAVICA instalado na LT-230 KV, Vila do Conde – Guamá.

O vibrógrafo PAVICA coletou os dados realizando medições durante um período de 10 segundos a cada 15 minutos, durante 648 horas. Resultando numa amostragem final de 25920 segundos.

### 2.4 Análise dos dados coletados

As amplitudes  $Y_{bi}$  são convertidas em tensões dinâmicas ( $\sigma_i$ ) utilizando a fórmula de Poffenberger Swart (1965). Neste ponto da análise, tem-se o número de ciclos ( $n$ ) extrapolados para 1 ano da vida do condutor para cada par de valores de tensões ( $\sigma_i$ ) e frequência ( $f_j$ ) do condutor, organizados em uma matriz de resultados. A extrapolação foi realizada da seguinte forma:

Considerando um tempo de 27 dias

Duração de cada medição: 10s

Duração do ciclo de medição: 900s (15min)

Número de medições efetuadas:  $27 \times 24 \times 4 = 2592$

O tempo total de medição foi:  $2592 \times 10s = 25920s = 7,2$  horas.

Considerando-se cada registro de 10 s com o representativo de cada período de medição de 15 min., os resultados da medição podem ser extrapolados para um ano.

Lembrando que o ano tem 8760 horas, o fator de extrapolação será:  $8760/7,2 = 1216,67$ .

A matriz interna do PAVICA contém o número de ciclos registrado em cada faixa de amplitude (Ybi) e frequência (fj) conforme a Tabela 1. São mostradas apenas algumas colunas e linhas das 64x64 contidas no vibrógrafo, referentes a esta medição, com valores ainda não extrapolados.

Tabela 1. Matriz interna do PAVICA

Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	Frequência (Hz)										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	16	36	3	5	35	6	0	2	5	0	5
65	177	240	207	169	78	45	0	61	166	1	170
91,5	38	41	67	59	1	13	0	26	76	83	299
118	0	0	1	1	0	0	0	0	0	31	6
144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
196	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
222,5	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0
249	0	0	0	0	0	0	107	0	0	0	0

É feita em seguida a comparação com os limites de resistência à fadiga, da CIGRE (2003), comparando-se a curva de Wöhler para o cabo Grosbeak 636 obtida em laboratório, com a curva de tensão acumulada.

## 2.5 Curva de tensão acumulada

As curvas de danos acumulados, traçadas a partir dos diagramas amplitude-frequência, podem servir para realizar previsão de vida útil dos cabos de outros trechos em condições semelhantes de topografia e rugosidade do terreno, de fixação nas extremidades, de quantidade de amortecedores e de condições climáticas, tais como citadas nas recomendações do CIGRÉ.

O comportamento do condutor sob efeito de vibrações eólicas é caracterizado pela curva de tensão acumulada, por meio dela é possível determinar a vida útil do condutor. Poffenberger e Swart (1965) formularam o campo de deflexão dinâmica na proximidade do grampo e forneceram equações para converter a amplitude em curva dinâmica e tensão de flexão na camada mais externa de fios.

Depois de calculadas as tensões atuantes no condutor, pode-se elaborar a curva de tensão acumulada, Fig. 6. Onde no eixo das ordenadas temos os valores de tensão, enquanto no das abscissas o número de ciclos (dados extrapolados) correspondentes a cada nível de tensão.



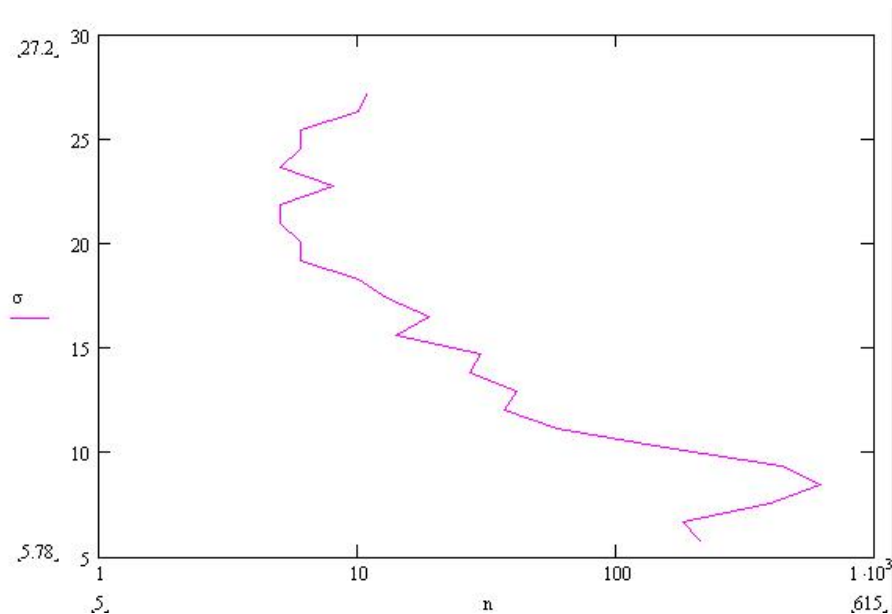


Figura 6 – Curva de tensão acumulada do condutor do trecho Guamá - Vila do Conde.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA PARA CALCULAR A VIDA ÚTIL

Nesta seção do artigo, apresenta-se a implementação da rotina responsável pelos cálculos da vida útil. Esta implementação foi incrementada ao código de um sistema computacional em forma de applet, orientado a objeto, para análise dinâmica de cabos. Na referência PEREIRA, A. M. B. (2005) estão explicados os detalhes de criação deste programa principal e os princípios de Orientação a Objeto.

#### 3.1. Evolução de software

Abstração pode ser definida como sendo o processo de formular conceitos gerais por extração de propriedades comuns de exemplos específicos. É um dos seus princípios é a evolução de software.

Em computação os requisitos de um sistema evoluem rapidamente. Segundo ALMEIDA e DAROLT (2001) pode-se considerar evolução como a necessidade de adicionar novas funcionalidades e de modificação das existentes, ou, para sistemas em que os objetivos finais não estejam bem definidos, a evolução pode consistir num desenvolvimento incremental, em que as várias entidades vão sendo sucessivamente especializadas até à solução completa.

Resumindo, a diferença importante da orientação a objeto em relação à programação convencional (imperativa ou procedural) consiste na capacidade de estender um sistema por simples adição de um novo código, em situações onde com as técnicas convencionais, seria necessário modificar o código anterior.

Enquanto a abstração de dados permite adicionar novos conceitos sem alterar o código existente, os mecanismos de partilha permitem usar o comportamento de um objeto, como parte de outro, também sem modificação do código já existente.

O princípio de evolução de software simplificou o processo de incrementação com as rotinas para calcular a vida útil dos cabos.



### 3.2. Implementação da rotina

As rotinas foram implementadas nas classes mostradas no diagrama de classes do sistema computacional, Fig. 7, na linguagem de programação Java, mais especificamente com a plataforma Java 2, versão de edição padrão (J2SE) 1.4.2, a qual fornece um ambiente completo para o desenvolvimento de aplicativos em computadores pessoais e em servidores (Sun Microsystems, 2005).

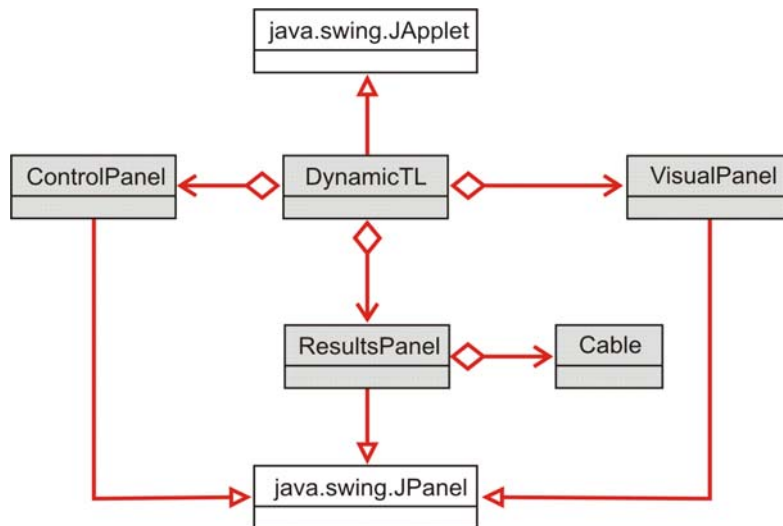


Figura 7 - Diagrama de classes do sistema para análise dinâmica de cabos de LT

### 3.4. Produto final e testes

Após as fases de análise, projeto e programação orientada a objetos, a interface final do *applet* desenvolvido para análise dinâmica de cabos de LT e com o cálculo de vida útil ficou com a forma apresentada na Fig. 7. Este programa pode ser utilizado acessando-se a página da *Web* que possui o seguinte endereço:

[http://www.ufpa.br/nicae/projetos/eletronorte\\_cabos/AppletDynamic/DynamicTL.html](http://www.ufpa.br/nicae/projetos/eletronorte_cabos/AppletDynamic/DynamicTL.html)

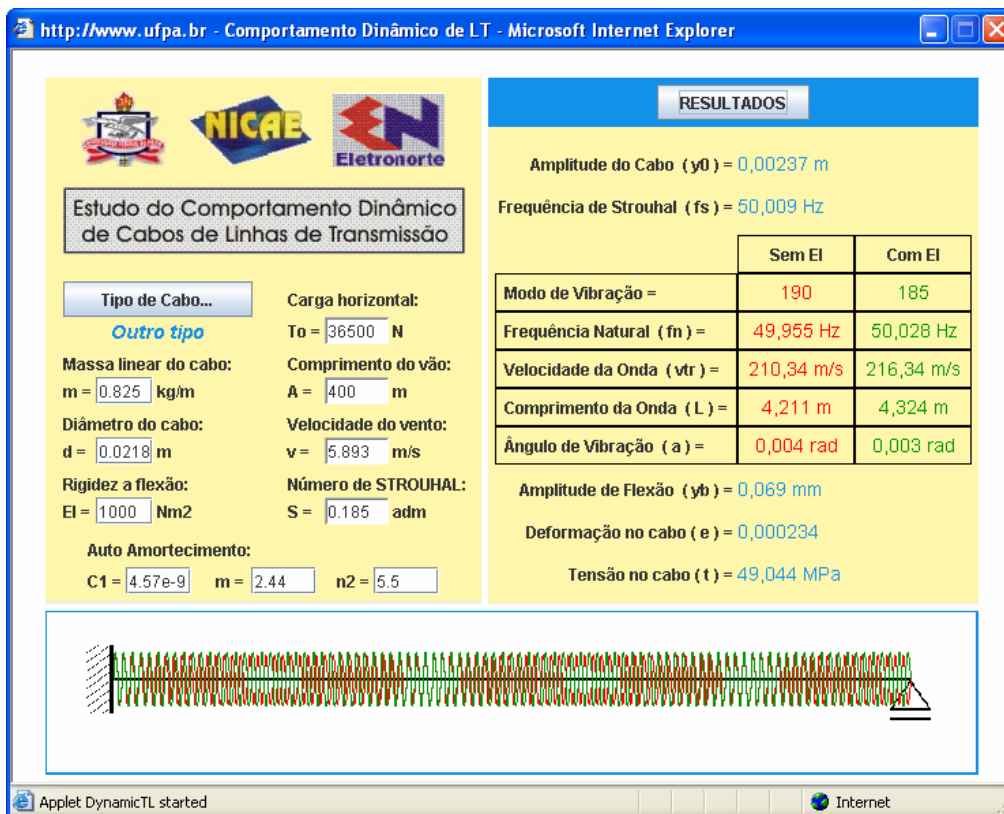


Figura 8 - Interface final do *applet* para análise dinâmica de cabos de LT.

Para avaliar as rotinas implementadas, executaram-se diversos testes, o qual apresenta situações para estimar a vida útil de cabos para diversos tipos de terreno. Para esses casos as rotinas apresentaram-se bastante adequadas e compatíveis com os fins para que foram desenvolvidas. Um dos exemplos pode ser conferido na própria Fig.8.

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados analisados indicam que o condutor trabalhou durante um período de 27 dias armazenando sinais de frequências de até 63 Hz e amplitudes de até 1535  $\mu\text{m}$ . Apresentou maior número de ciclos a uma frequência de 30 Hz e amplitude de 65  $\mu\text{m}$ .

Após implementações no *applet*, a fim de gerar resultados mais confiáveis, realizou-se uma análise considerando a rigidez do condutor com uso do pré-formado.

O *applet* realizou a comparação entre a curva de Wöhler e a curva de tensão acumulada, indicando uma expectativa de vida infinita para o condutor em estudo, Fig 9.

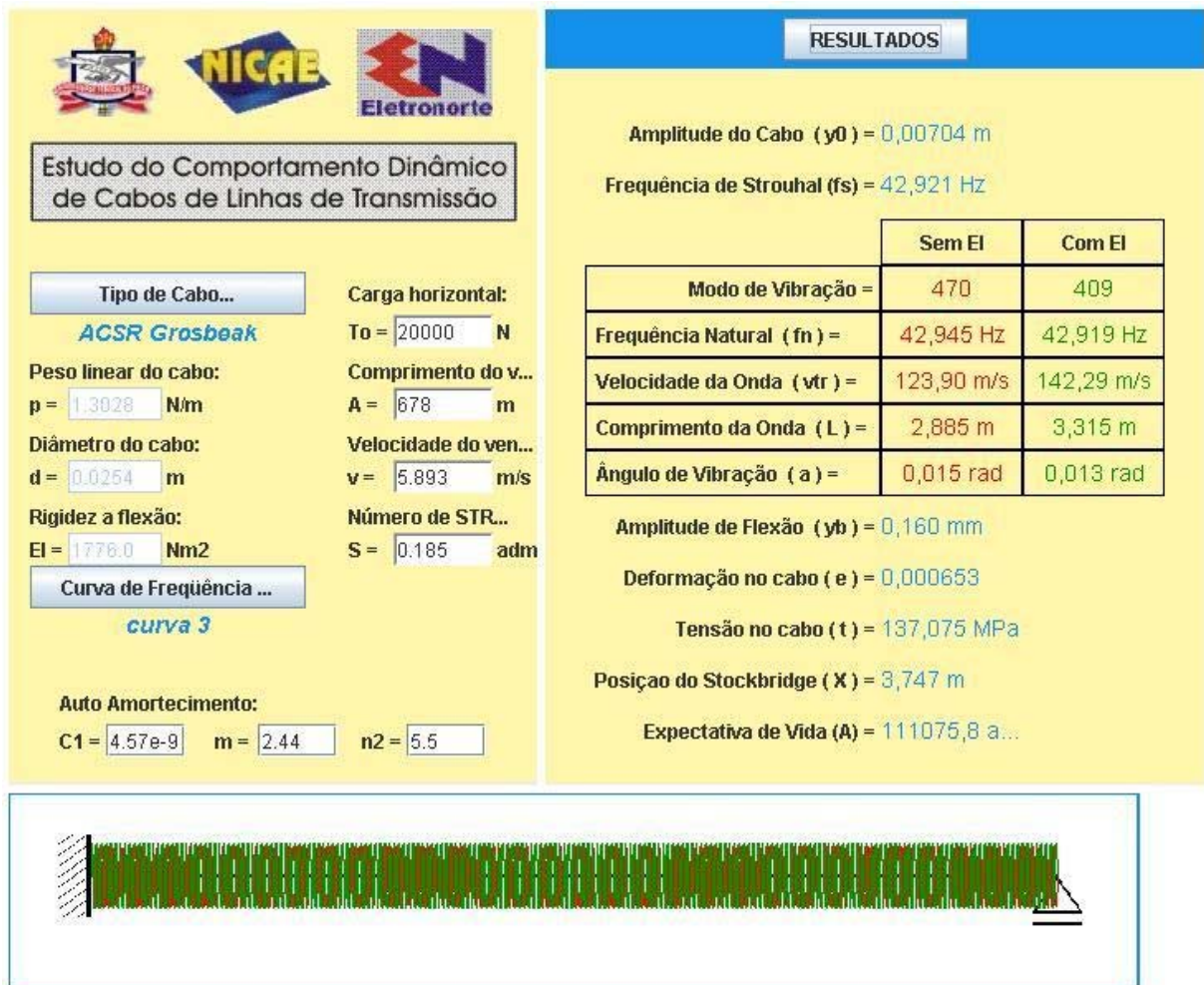


Figura 9 – Resultados finais do Applet.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise quanto à expectativa de vida útil de condutores de linhas de transmissão foi realizada com êxito. O applet apresentou resultados satisfatórios após a implementação da rotina de cálculo, possibilitando o estudo mais confiável de condutores que utilizam armadura pré-formada.

Todavia, é necessária a realização de uma gama maior de testes de campo, tendo em vista que a curva de tensão acumulada não se apresentou satisfatória, definindo um comportamento que pouco se assemelha as curvas de tensão acumulada das referências bibliográficas.

Com novos dados seria possível realizar o traçado de novas curvas e assim submetê-las a comparações para aperfeiçoamento do applet.

## REFERÊNCIAS

Almeida, A., Darolt, R. (2001). “*Pesquisa e Desenvolvimento em UML.*” Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado), Universidade do Sul de Santa Catarina.

CIGRE Study Committee 22, Working Group 04 (1979) “*Recommendations for Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors*”, **Electra**.

**Comitê de Estudos Nº. B2 - Linhas Aéreas de Alta Tensão (2003)**, “ *Guia para Medição de Vibração em Linhas Aéreas de Transmissão*”, **Belo Horizonte**.

**IEEE Committee Report (1966)**, “ *Standardization of Conductor Vibration Measurements*, *IEEE Trans. Paper*, **Vol. PAS-85, Nº 1**.

**Hardy, C., Brunelle, C. (2001)**. “*Statistical Analyses of Stranded Conductor Fatigue Endurance Data*”, **International Symposium on Conductor Dynamics, Canada**.

**J.C Poffenberger & R.L. Swart (1965)**. “*Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*”, **IEEE Trans. Paper, Vol. PAS – 84, pp. 281 – 289**.

**PEREIRA, A. M. B. (2004)**. “*Avanços na Visualização, Análise Não-Linear e Programação com o Método dos Elementos de Contorno*.” **Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**.

**Roctest, 2003**. “*PAVICA Instruction Manual*”, **ROCTEST/TELEMAC**.

**Sun Microsystems, Java Technology**, “*The Source for Java Developers*.” **Disponível em: <http://www.java.sun.com>, 2005**.