

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS ORIENTADOS A OBJETOS PARA ANÁLISE ESTÁTICA E PARA AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO DE CABOS CONDUTORES DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

André Maués Brabo Pereira

andre.pereira@TUGraz.at

Institute for Structural Analysis, Graz University of Technology, Graz, Austria

Tiago Rodrigues da Silva

Remo Magalhães de Souza

tiago_pa@zipmail.com.br

remo@ufpa.br

Department of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém, Brazil

***Abstract.** Este trabalho consiste no estudo do comportamento estático e dinâmico de cabos de linhas aéreas de transmissão, fazendo parte de uma pesquisa que tem como objetivo desenvolver um programa para prognóstico, monitoração e controle de vibração dos condutores de linhas aéreas de transmissão localizadas na Região Amazônica. O estudo matemático do problema foi realizado considerando-se as devidas hipóteses e demonstrando-se todas as equações que governam o seu comportamento, fazendo-se um comparativo entre os dois modelos admitidos para a forma do cabo: catenária e parábola. Na fase de implementação das equações que governam o comportamento estático e dinâmico dos cabos, utilizou-se a linguagem de programação Java, ferramentas e técnicas de programação orientadas a objeto, que possibilitaram a geração de diagramas que representassem e descrevessem graficamente os sistemas computacionais desenvolvidos. Para validar os programas, os resultados obtidos através destes foram comparados com os extraídos da bibliografia. Nestes testes de validação e exemplos, a eficácia e aplicabilidade dos algoritmos implementados foram comprovadas, além de sua praticidade quanto ao acesso, pois é possível utilizar os programas de qualquer computador através da Internet.*

***Keywords:** Linhas aéreas de transmissão, Vibrações em cabos, Rigidez à flexão, Catenária, Programação orientada a objetos, Java*

1. INTRODUÇÃO

A teoria da transmissão relata que os agentes do transporte de energia elétrica são os campos elétricos e os campos magnéticos, para os quais os cabos condutores constituem “guias”. Segundo Labegalini et al. (1992) a escolha e dimensionamento correto desses condutores são decisivos devido aos problemas de natureza mecânica que podem ocorrer, em casos de solicitações excessivas.

Diversos problemas de natureza mecânica são encontrados em cabos condutores de Linhas aéreas de Transmissão (LT), sendo alguns destes de fundamental importância, como a ocorrência de vibração, resultado da ação do vento. Em virtude disso, é necessário que a vibração seja controlada através de medidas apropriadas, pois a mesma pode levar a ruptura total ou parcial dos cabos. Em todo o mundo são realizados estudos para evitar tais danos. Porém, existem poucos trabalhos desenvolvidos nessa área, que abordam e que propõem

soluções para os problemas ocorridos na região Norte do Brasil, sendo então um tema bastante rico e com uma grande necessidade de ser explorado (De Souza, 2002).

Além disso, para avaliar adequadamente o nível de vibração em cabos, assim como para efeito de projeto e verificações, é importante conhecer como os mesmos se comportam estaticamente. Portanto, realizou-se um estudo detalhado das equações que governam o comportamento estático de cabos, comparando-se os dois principais modelos admitidos para a forma do cabo: catenária e parábola.

Já a avaliação do nível de vibração dos cabos é realizada tanto considerando-se como não considerando-se a influência da rigidez à flexão no comportamento mecânico dos mesmos, e utilizando-se o Princípio do Balanço de Energia para determinar a amplitude dos cabos, pois a partir dessa informação é possível obter as outras grandezas importantes para estimar o tempo de vida do cabo, como deformação e tensão (CIGRE, 1989).

Para a determinação das frequências naturais faz-se uma analogia entre o comportamento de um cabo condutor e uma corda vibrante, considerando-se uma formulação analítica que considera simultaneamente a rigidez geométrica e a rigidez à flexão. Demonstra-se, a partir de testes de validação que a consideração desses efeitos fornecem resultados mais precisos para as frequências naturais e modos de vibração dos cabos.

Todos os estudos realizados foram implementadas fundamentando-se na abordagem orientada a objetos, utilizando-se as ferramentas e técnicas mais avançadas disponíveis atualmente para o desenvolvimento de sistemas computacionais, tais como a Linguagem de Modelagem Unificada (UML) e os Padrões de Projetos, respectivamente (Booch, Rumbaugh, Jacobson, 1999). A utilização de uma abordagem orientada a objeto na criação de um programa, simplifica o processo de desenvolvimento deste, e permite que o programa seja atualizado com novos recursos posteriormente sem grandes alterações no código existente.

Para aplicar da melhor forma possível os recursos da abordagem orientada a objetos utilizou-se a linguagem de programação Java (Sun Microsystems, 2005), desenvolvendo-se assim dois aplicativos, um abordando o comportamento estático e o outro o comportamento dinâmico de cabos de LT. A linguagem de programação Java é uma linguagem de alto nível e orientada a objetos, e devido a sua portabilidade, permite o desenvolvimento de programas que podem ser executados a partir um *web browser*, sendo estes programas denominados de *applets*.

Finalmente, para testar os programas desenvolvidos, foram simulados exemplos clássicos e compararam-se os resultados obtidos através destes com os extraídos da bibliografia. Nos testes e exemplos, comprovam-se a eficácia e aplicabilidade dos algoritmos implementados para as análises em questão, e a praticidade quanto ao acesso dos mesmos, pois como os aplicativos foram desenvolvidos utilizando-se os recursos da linguagem Java, em forma de *applet*, então é possível utilizá-los por qualquer computador que tenha acesso à Internet.

2. FORMULAÇÃO TEÓRICA DOS PROBLEMAS

O cabo flexível é um importante elemento estrutural empregado em pontes suspensas (pênseis ou estaiadas), linhas de transmissão e suporte de teleféricos, como exemplo das suas diversas aplicações. Conforme Meriam e Kraige (1999), para o projeto dessas estruturas é necessário o conhecimento das relações entre os esforços, o vão, a flecha e o comprimento dos cabos. Tais relações podem ser obtidas através da análise do cabo como um corpo inextensível. Em geral, assume-se que o cabo apresenta resistência à flexão desprezível, hipótese que implica que a força no cabo atua na sua direção tangencial.

Os cabos flexíveis podem suportar tanto cargas concentradas distintas como podem suportar carregamentos que são distribuídos de forma contínua ao longo do cabo. Em algumas situações, o peso próprio do cabo é desprezível quando comparado com as cargas suportadas;

em outros casos, o peso próprio do cabo pode ser uma carga de valor apreciável; e em certas ocasiões é a única carga vertical atuante, não podendo, portanto, ser negligenciada nos dois últimos casos.

O estudo dos cabos flexíveis está também intimamente relacionado com o problema de vibração de uma corda. Conforme relata Irvine (1981) a vibração de uma corda foi estudada extensivamente no princípio do século XVIII. A importância desse estudo é observada pelo interesse de grandes matemáticos como D’Alembert, Euler, Daniel Bernoulli e Lagrange, que com o estudo do problema, conseguiram expressivos avanços na teoria das equações diferenciais parciais.

2.1 Estudo do comportamento estático de cabos de LT

Quando o cabo suspenso pelas torres atinge o equilíbrio, fica sob ação de três forças: o seu peso p , a tração T_0 no ponto mais baixo, e a tração T no ponto mais alto. Podem-se calcular alguns dados que são importantes para o entendimento do comportamento estático do cabo e o efeito deste nas torres. Essas características mais importantes e as equações utilizadas para calculá-las serão relacionadas a seguir, tanto para a catenária quanto para a parábola (Figura 1).

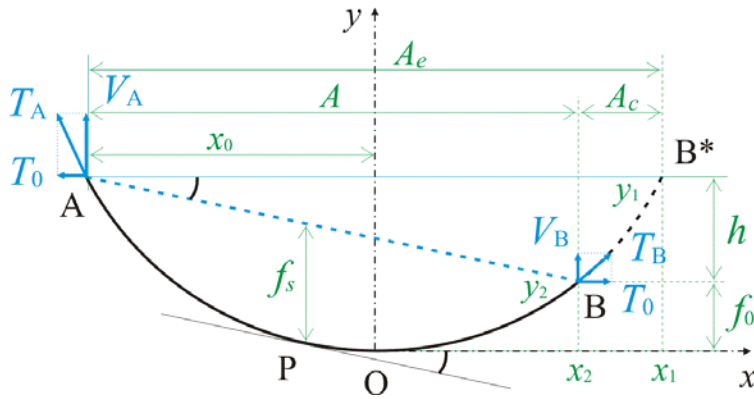


Figura 1 - Cabo suspenso em vãos em desnível.

Forma do cabo. A forma que um cabo inextensível assume quando está suspenso é bem característica e chamada de catenária. Por muitos anos, cientistas tentaram descobrir a equação que descreve esta forma. A equação foi obtida por Leibniz, Huygens e Johann Bernoulli em 1691. Em alguns casos, para facilitar o cálculo dos dados do cabo, este tem a forma admitida como uma parábola (Irvine, 1992). A equação que representa matematicamente a forma do cabo por meio de uma catenária é dada por

$$y = \frac{T_0}{p} \left[\cosh \left(\frac{x - x_0}{\frac{T_0}{p}} \right) - \cosh \left(\frac{x_0}{\frac{T_0}{p}} \right) \right] \quad (1)$$

e por meio de uma parábola por

$$y = \frac{x^2}{2T_0} - \frac{x x_0}{T_0} \quad (2)$$

Vão equivalente (A_e). A Figura 1 ilustra um cabo estendido entre dois suportes rígidos, cujas alturas “A” e “B” são diferentes entre si, sendo o vão medido na horizontal igual a A , e h sendo a diferença de altura entre “A” e “B”. Prolongando-se a curva AB até o ponto “B*”, situado a uma mesma altura que o ponto “A”, obtém-se um vão nivelado A_e , também chamado de vão equivalente. O valor de A_e é obtido somando-se o valor do vão real A com o prolongamento do vão A_c , isto é,

$$A_e = A + A_c \quad (3)$$

onde para a equação da catenária

$$A_c = 2C \left[\operatorname{arcsenh} \left(\frac{h}{2C} \frac{1}{\operatorname{senh} \left(\frac{A}{2C} \right)} \right) \right] \quad (4)$$

e para a equação da parábola

$$A_c = \frac{2hC}{A} \quad (5)$$

Comprimento do cabo (L). Conhecendo-se a equação que representa a curva descrita pelo cabo, pode-se calcular o comprimento do cabo entre as torres. Este dado é muito importante para o estudo, pois dependendo deste comprimento é possível calcular os esforços no cabo e as ações nas torres, já que o cabo possui massa, dentre outros fatores. Portanto, para a equação da catenária

$$L = C \left(\operatorname{senh} \frac{A-x_0}{C} + \operatorname{senh} \frac{x_0}{C} \right) \quad (6)$$

e para a equação da parábola

$$L = 2C \left[\frac{A-x_0}{2C} \sqrt{1 + \left(\frac{A-x_0}{C} \right)^2} + \frac{1}{2} \ln \left| \sqrt{1 + \left(\frac{A-x_0}{C} \right)^2} + \frac{A-x_0}{C} \right| \right] \quad (7)$$

Carga vertical nos suportes (V). A carga vertical exercida pelos cabos nos suportes é uma importante característica para o estudo do comportamento das linhas de transmissão, pois dependendo da combinação de alguns fatores (peso do cabo, tensão horizontal, desnível entre as torres e comprimento), o sentido e a intensidade da carga vertical podem sofrer grandes variações. A carga vertical em um suporte é igual à parcela do peso do cabo que este suporte sustenta, ou seja,

$$V = sp \quad (8)$$

onde s é a parcela do comprimento do cabo que o suporte sustenta e p é o peso por metro do cabo. Para a equação da catenária, o valor de s é dado, respectivamente, para o cálculo dos esforços verticais nos suportes “A” e “B”, por

$$s = C \left(\operatorname{senh} \frac{A_e}{2C} \right) \text{ trecho AO} \quad (9)$$

e

$$s = C \left(\sinh \left(\frac{A_e}{2C} - \frac{A}{C} \right) \right) \text{ trecho OB.} \quad (10)$$

Já para a equação da parábola, esses valores são dados respectivamente por

$$s = C \left[\frac{A_e}{4C} \sqrt{1 + \left(\frac{A_e}{2C} \right)^2} + \frac{1}{2} \ln \left| \sqrt{1 + \left(\frac{A_e}{2C} \right)^2} + \frac{A_e}{2C} \right| \right] \text{ trecho AO} \quad (11)$$

e

$$s = C \left[\left(\frac{A_e - 2A}{4C} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{A_e - 2A}{2C} \right)^2} + \frac{1}{2} \ln \left| \sqrt{1 + \left(\frac{A_e - 2A}{2C} \right)^2} + \frac{A_e - 2A}{2C} \right| \right] \text{ trecho OB.} \quad (12)$$

Carga axial no cabo (T). A carga axial é uma força de tração cuja direção é tangente à curva no ponto em que se deseja avaliá-la. O seu valor pode ser determinado pela soma vetorial entre T_0 (componente horizontal desta carga, constante em todo cabo) e V (carga vertical no ponto considerado). Logo, o valor da carga axial nos suportes pode ser encontrado pela soma vetorial de T_0 com as componentes V_A ou V_B (carga vertical no suporte “A” ou “B”, respectivamente).

$$T = \sqrt{T_0^2 + V^2} \quad (13)$$

Flechas (f_0 e f_s). A flecha f_0 é a medida entre uma linha horizontal que passa pelo apoio inferior e o ponto mais baixo da curva do cabo (observar a Fig. 1). Há situações em que ela é importante, pois define o afastamento dos cabos a obstáculos que a linha cruza nesse ponto mais baixo. Para catenária, essa flecha pode ser obtida por

$$f_0 = C \left[\cosh \left(\frac{A_e}{2C} \right) - 1 \right] - h \quad (14)$$

e para parábola por

$$f_0 = \frac{A_e^2 p}{8T_0} - h \quad (15)$$

Já a flecha f_s é representada pela maior distância vertical entre a linha que liga os pontos de apoio do cabo e um ponto “P” da curva (Figura 1). Esta flecha é importante quando o perfil do terreno é mais ou menos paralelo à linha entre os apoios. Para catenária, essa flecha pode ser obtida por

$$f_s = y_p + \frac{x_p h}{A} \quad (16)$$

e para parábola por

$$f_s = y_p + \frac{x_p h}{A} \quad (17)$$

2.2 Estudo do comportamento dinâmico de cabos de LT

Devido o alto custo e as inconveniências de resolver o problema de vibração após a LT ter sido colocada em operação, é de grande interesse que se esteja apto a antecipar as vibrações, tomando as medidas necessárias antecipadamente à ocorrência do problema. Portanto, nesta seção serão discutidos os principais fatores que devem ser considerados durante a realização de uma avaliação de forma precisa e eficiente do nível de vibrações em

cabos condutores de LT, com a apresentação dos respectivos procedimentos de cálculo dos mesmos.

Freqüências e modos naturais de vibração. Entre todos os fatores relacionados com a vibração em cabos, tem-se como um dos principais as freqüências e modos naturais de vibração. Portanto, estes são parâmetros que devem ser considerados imprescindivelmente nas avaliações.

Sabe-se que essas freqüências e modos podem ser determinados por diversos meios. As alternativas mais comuns são por meio teórico, utilizando-se modelos analíticos ou numéricos. Um modelo analítico que é bastante utilizado e que fornece uma boa estimativa para as freqüências naturais é o modelo contínuo de uma corda vibrante.

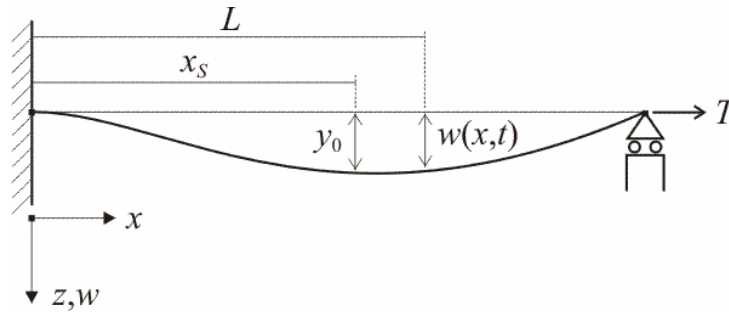


Figura 2 - Cabo condutor (engastado-apoiado).

O sistema ilustrado na Figura 2 será utilizado como referência no decorrer deste artigo, sempre que houver a necessidade de estimativa de algum parâmetro relacionado com a avaliação de vibração em cabos. Este sistema, considerando-se o feito da rigidez à flexão do cabo, pode ser representado matematicamente por

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (18)$$

onde EI é a rigidez à flexão do cabo, T é a tração no cabo e m é a massa por unidade de comprimento do cabo.

Impondo-se as condições de contorno expressas na Figura 2, pode-se obter uma solução para a Eq. (18), que é dada por

$$w(x,t) = q(t)W(x) \quad (19)$$

com

$$q(t) = \hat{q} \cos(\omega t + \varphi) \quad (20)$$

onde \hat{q} e φ são constantes de integração, e

$$W(x) = y_0 \left[\text{sen} \beta x - \frac{\beta}{\alpha} \left[\text{senh} \alpha x + \text{tgh} \alpha L (\cos \beta x - \cosh \alpha x) \right] \right] \quad (21)$$

onde y_0 é a amplitude de vão livre, L é o comprimento do vão e

$$\alpha = \sqrt{\frac{T}{2EI} + \sqrt{\frac{m\omega^2}{EI} + \left(\frac{T}{2EI}\right)^2}} \quad \text{e} \quad \beta = \sqrt{-\frac{T}{2EI} + \sqrt{\frac{m\omega^2}{EI} + \left(\frac{T}{2EI}\right)^2}} \quad (22)$$

Conseqüentemente, as freqüências naturais do sistema podem ser obtidas por

$$\omega = 2\pi f = \frac{n\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \sqrt{1 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{EI}{T}} \quad (23)$$

É imprescindível o conhecimento dessas frequências naturais, pois possibilitam identificar com que frequências as estruturas podem entrar em ressonância, em função das frequências das excitações. Portanto, além das frequências naturais das estruturas é também importante o conhecimento das frequências das excitações, que no estudo em questão tem como fonte principal o vento. Os tipos de vibrações mais comuns em LT devido à ação do vento são: vibrações eólicas, vibrações por esteira e galope.

Como o escopo do projeto (De Souza, 2002) do qual esta pesquisa faz parte está intimamente relacionado com as vibrações eólicas, então este será o tipo de vibração induzida pelo vento utilizada como referência para a avaliação do nível de vibrações dos cabos, neste artigo. Segundo CIGRE (1989) as vibrações eólicas podem ocorrer em qualquer LT e em qualquer tempo, com ventos baixos a moderados, podendo a amplitude de deslocamento chegar até uma vez o diâmetro do condutor.

Frequências do vento. As frequências, para o caso de vibrações eólicas, podem ser determinadas aproximadamente utilizando-se a fórmula de Strouhal (CIGRE, 1989)

$$f_s = S \frac{V}{D} \quad (24)$$

onde S é o número de Strouhal (0.18–0.22), V é a velocidade do vento, e D é o diâmetro do cabo.

Pode-se notar a partir da Eq. (24) que a frequência de excitação devido o vento f_s é função de um outro importante parâmetro que é a velocidade do vento, e que portanto deve ser também levado em consideração nas análises.

Uma observação interessante analisando-se a Eq. (24) é que as frequências mais baixas serão obtidas para cabos com grandes diâmetros e para baixas velocidades de vento, por sua vez as frequências mais altas serão obtidas para cabos com pequenos diâmetros e para velocidades de vento relativamente altas.

A partir da determinação das frequências naturais dos cabos, obtidas pela Eq. (23), torna-se simples a obtenção de diversas grandezas importantes para avaliar de forma mais precisa, completa e eficiente o nível de vibração dos cabos. Entre essas grandezas, é importante citar: o comprimento de onda, a velocidade da onda e o ângulo de vibração do vão livre. Todas as grandezas citadas anteriormente podem ser obtidas considerando ou não a influência da rigidez à flexão do cabo, simplesmente impondo o termo EI da Eq. (23) como sendo nulo ou não, respectivamente.

Amplitude de flexão. Já outro fator de grande importância para a avaliação do nível de vibrações em cabos de LT é a amplitude de flexão, que é convencionalmente definida como a amplitude medida a 89 mm do último ponto de contato com o grampo (IEEE Committee Report, 1966). Este dado importante, pode ser calculado com auxílio da Eq. (21), fazendo

$$W(x_b) = y_b = y_0 \left[\sin \beta x_b - \frac{\beta}{\alpha} \left[\sinh \alpha x_b + \operatorname{tgh} \alpha L (\cos \beta x_b - \cosh \alpha x_b) \right] \right] \quad (25)$$

onde y_b é a amplitude de flexão e $x_b = 89\text{mm}$.

Porém, pode-se observar na Eq. (25), que para se obter a amplitude de flexão é preciso determinar inicialmente a amplitude de vão livre (y_0) do cabo. Para determinar essa variável, utiliza-se o Princípio do Balanço de Energia (PBE), pois para os casos de vento laminar ou vento com uma turbulência definida (ambos presentes no fenômeno de vibração eólica), essa ferramenta fornece resultados muito satisfatórios para estimar o nível de vibração.

Princípio do Balanço de Energia (PBE). O PBE se fundamenta no conhecimento presuposto da energia transmitida para o condutor devido o vento e da energia dissipada pela LT (principalmente pelo condutor). Pois neste caso, o problema de avaliação do nível de vibração pode ser considerado basicamente como sendo um problema determinístico, já que as energias envolvidas são estimadas utilizando-se dados obtidos por experimentos reproduzíveis (CIGRE, 1989). Baseando-se nesse pressuposto, a energia do vento pode ser representada por

$$P_w = f^3 D^4 \text{fnc} \left(\frac{y_0}{D} \right) \quad (26)$$

onde P_w é a potência do vento transmitida para uma unidade de comprimento do condutor, f é a frequência, D é o diâmetro do condutor, y_0 é a amplitude do anti-nó e y_0/D é frequentemente definida como a amplitude adimensional (η).

Na utilização do PBE, precisa-se obter informações sobre o auto amortecimento do condutor. Tais informações são possíveis de serem obtidas para a maioria dos tipos de condutores. E atualmente, diversos laboratórios no mundo são capazes de mensurar o auto amortecimento do condutor. Uma forma bastante comum de representar a energia devido o auto amortecimento do condutor é por

$$P_c = C_1 f^{n_2} \eta^m \quad (27)$$

onde P_c é a potência devido o auto amortecimento do condutor por unidade de comprimento, e C_1 , n_2 e m são parâmetros obtidos em laboratórios referentes ao tipo de cabo e ao nível de tensão que o mesmo está submetido.

A partir das informações das energias atuantes no sistema, Eqs. (26) e (27) e fazendo-se $P_w = P_c$, é possível determinar a amplitude do anti-nó y_0 . Obtém-se geralmente um curva para cada uma das energias apresentadas anteriormente e por meio de diversas técnicas é possível determinar o valor da amplitude para o ponto onde as curvas se interceptam.

Consecutivamente, a partir da determinação da amplitude y_0 pode-se então determinar a amplitude de flexão y_b do sistema. Segundo informações obtidas no IEEE Committee Report (1966), tem-se provado que a amplitude de flexão, para todos os propósitos práticos, é relacionada linearmente com a deformação de vibração do condutor, o fator considerado mais próximo relacionado com a fadiga, e cujo relacionamento é essencialmente independente da frequência de vibração, tração no condutor, e vibração nos vãos adjacentes.

Finalmente, a partir de todos os dados obtidos anteriormente é possível determinar a deformação e a tensão no cabo, possuindo assim um conjunto de dados suficiente e bastante abrangente para avaliar o nível de vibração nos cabos condutores de LT, podendo assim antecipar as vibrações além de ter todos os recursos para estimar o tempo de vida útil das LTs.

3. DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS ORIENTADOS A OBJETO

Nesta seção do artigo, apresenta-se inicialmente uma síntese dos principais conceitos e conhecimentos da abordagem orientada a objetos voltados para o desenvolvimento de sistemas computacionais para aplicações científicas e tecnológicas, com uma atenção especial para uma linguagem de representação gráfica para modelagem de sistemas, tal como a UML. Em seguida, descrevem-se as fases e etapas que envolveram o desenvolvimento dos sistemas computacionais orientados a objetos, desde a descrição do problema até a implementação do código na linguagem Java, além de uma breve introdução a esta linguagem de programação que atualmente vem ganhando bastante espaço no desenvolvimento de aplicações científicas.

3.1 Revisão de alguns recursos da abordagem Orientada a Objetos

A compreensão dos conceitos da Orientação a Objeto (OO) e a utilização correta dos elementos que compõem um sistema OO são as condições necessárias para a criação de sistemas computacionais bem estruturados. Além disso, a utilização de uma linguagem de modelagem para representação gráfica de um sistema orientado a objeto, tal como a UML (Linguagem de Modelagem Unificada), facilita bastante o processo de desenvolvimento e a compreensão deste sistema.

Orientação a Objetos (OO). As linguagens de programação têm evoluído na procura de ferramentas cada vez mais próximas da percepção humana, e que permitam lidar com problemas de maior dimensão e complexidade.

Da evolução das linguagens de programação surgiu finalmente o conceito de Orientação a Objetos. A idéia foi tornar o programa mais flexível, permitindo que seja progressivamente especializado, redefinindo ou incrementando sua funcionalidade. Pretende-se poder reutilizar o software já desenvolvido e testado, adicionando-lhe o comportamento que as novas aplicações necessitem.

Um conceito comum a todas as linguagens que se reclamam “Orientadas a Objeto” é o de encapsulamento. O encapsulamento é tradicionalmente importante em computação, na medida em que permite decompor grandes sistemas em sub-sistemas autônomos menores que podem ser mais facilmente desenvolvidos e mantidos (Almeida, Darolt, 2001). A OO formaliza o encapsulamento, permitindo descrever um sistema como um conjunto de entidades ou objetos autônomos, no sentido de que o funcionamento de um objeto não depende da estrutura interna de outros objetos.

Um outro conceito importante em OO é o de herança. Através de mecanismos de herança é possível criar novos tipos de objetos partindo dos já existentes através da especificação de como o novo difere do original. Encapsulamento e herança vão permitir a reutilização dos objetos já definidos, sem modificação, para resolver os novos problemas.

Unified Modeling Language (UML). A UML é atualmente o esquema de representação gráfica mais amplamente utilizado para modelagem de sistemas orientados a objetos. Ela unificou os diversos esquemas de notação mais populares. Aqueles que projetam sistemas usam a linguagem (sob a forma de diagramas gráficos) para modelar seus sistemas.

O vocabulário e regras de uma linguagem, tal como a UML, indicam como criar e ler modelos bem formados, porém não fornecem informações sobre que modelos podem ser criados e quando criá-los. Segundo Booch, Rumbaugh and Jacobson (1999), o vocabulário da UML engloba três tipos de blocos de construção: os elementos, que são abstrações, como as primeiras classes habitantes em um modelo; as relações, que relacionam esses elementos; e os diagramas, que agrupam coleções interessantes de elementos.

Existem quatro tipos de elementos em UML: elementos estruturais, elementos comportamentais, elementos de agrupamento e elementos de anotação. Esses elementos são usados para escrever modelos bem formados (Figura 3).

Os elementos estruturais são as principais partes estáticas de um modelo, representando elementos que são conceituais ou físicos. No total, existem sete tipos de elementos estruturais: a classe, a interface, a colaboração, o caso de uso, a classe ativa, o componente e o nó (Figura 3a).

Os elementos comportamentais são as partes dinâmicas dos modelos UML, ou seja, são os verbos da descrição de um modelo, representando comportamento durante tempo e espaço. Existem dois tipos primários de elementos comportamentais: a interação, ou mensagem, e o estado de máquina (Figura 3b).

Os elementos de agrupamento são as partes organizacionais dos modelos UML, ou seja, são compartimentos onde modelos podem ser decompostos. Existe apenas um tipo primário de elementos de agrupamento: o pacote (Figura 3c).

Os elementos de anotação são as partes explicativas de modelos UML, ou seja, são os comentários que se pode aplicar para descrever, explicar e comentar sobre algum elemento num modelo. Existe apenas um tipo primário de elemento de anotação, conhecido como nota (Figura 3d).

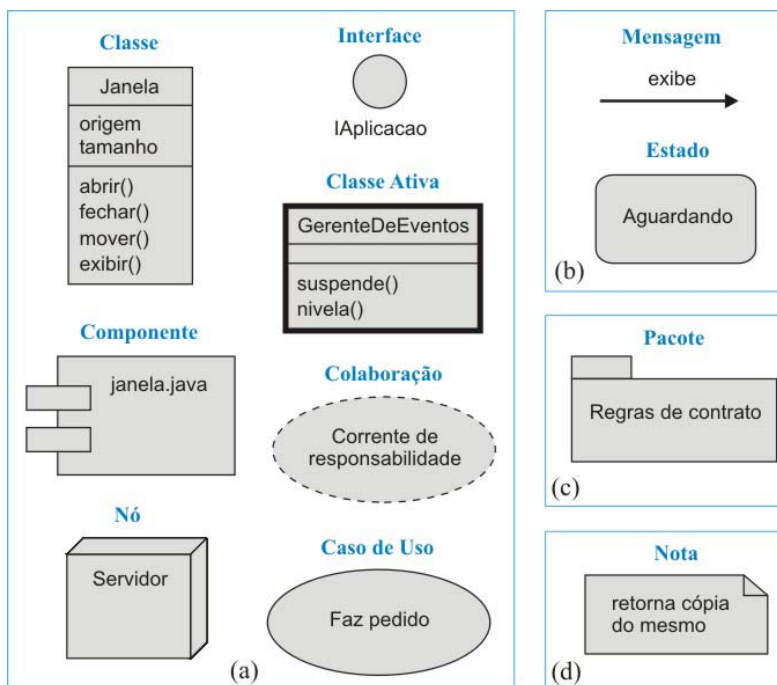


Figura 3 - Elementos em UML.

Deitel & Deitel (2002) ressalta uma característica atraente da UML como sendo a sua flexibilidade. A UML é extensível e independente dos muitos processos de análise e projeto orientados a objeto. Os desenvolvedores que utilizam a UML ficam livres para desenvolver sistemas com diversos processos, mas podem agora expressar tais sistemas com um conjunto-padrão de notações.

3.2 Desenvolvimento do sistema (*applet*) para análise estática de cabos de LT

A seguir, serão apresentadas as fases do desenvolvimento deste sistema que modela o comportamento estático de cabos de LT. Aplicam-se os conceitos e recursos da OO, apresentados na seção anterior, utilizando-se a linguagem de programação Java para a implementação do sistema modelado.

Como os sistemas orientados a objetos desenvolvidos nesta pesquisa foram implementados na forma de *applet*, então os mesmos serão também referidos no decorrer do artigo como *applet*. *Applet* são programas Java que podem ser inseridos em documentos *HiperText Markup Language* (HTML), em outras palavras, em páginas da *Web*. Quando um navegador carrega uma página da Internet que contém um *applet*, o mesmo é também carregado pelo navegador e começa a ser executado. O navegador que executa um *applet* é denominado genericamente contêiner do *applet*.

Processo de desenvolvimento do sistema. É importante ressaltar que a UML é uma ferramenta independente do processo de desenvolvimento do sistema. Apesar da UML ter se demonstrado como uma técnica de grande auxílio no projeto de sistemas de médio e grande porte, para se obter o máximo de benefício proveniente da mesma, no que diz respeito ao desenvolvimento de sistemas computacionais, deve-se considerar algum padrão de processo de desenvolvimento (Booch, Rumbaugh, Jacobson, 1999).

Um processo de desenvolvimento de sistemas computacionais é um conjunto de atividades necessárias para transformar exigências de um usuário em um sistema computacional. Entre alguns dos processos que podem ser aplicados no desenvolvimento de sistemas computacionais orientados a objetos, encontra-se: o iterativo e incremental.

Os processos modernos de desenvolvimento de sistemas computacionais são iterativos e incrementais, repetindo-se sobre uma série de iterações criando o ciclo de vida de um sistema. Cada iteração ocorre sobre um tempo definido e consiste em passar através das exigências, da análise, do projeto, da implementação e atividades de testes, construindo um número de diferentes modelos. Estes modelos estão relacionados uns aos outros e são semanticamente sobrepostos, onde juntos representam o sistema como um todo.

O processo utilizado no desenvolvimento do *applet* foi baseado em algumas idéias e fundamentos do processo iterativo e incremental. Para se compreender melhor esse processo de desenvolvimento, faz-se necessário definir alguns termos importantes.

A vida de um sistema computacional pode ser representada como uma série de ciclos. Um ciclo termina com a liberação de uma versão do sistema para os clientes. O ciclo de vida do desenvolvimento de um sistema computacional abrange as fases que um desenvolvedor de sistema vai percorrer para alcançar o resultado desejado (Booch, Rumbaugh, Jacobson, 1999).

Um ciclo de vida, Figura 4, é constituído basicamente por cinco fases: planejamento do sistema, que inclui as exigências e investigações iniciais; análise do sistema, que inclui a captura e elucidação das exigências; projeto do sistema; construção e implementação do sistema, que inclui os testes; e distribuição do sistema.



Figura 4 - Fases essenciais do processo de desenvolvimento do *applet*.

Descrição das exigências do problema. Pretende-se desenvolver um *applet* orientado a objetos que simule o comportamento de um cabo de LT. O *applet* consiste em três partes. A primeira e mais substancial é o simulador, que possui as equações que modelam o comportamento do cabo. A segunda é a exibição do modelo na tela, de modo que o usuário possa visualizar o cabo graficamente. A parte final é a interface gráfica com o usuário, ou a GUI, que permite ao usuário controlar a simulação do cabo.

Análise e projeto orientados a objetos. Denomina-se processo de Análise e Projeto Orientados a Objetos (OOAD) o processo destinado a analisar e projetar um sistema de um ponto de vista orientado a objetos. OOAD é um termo genérico para as idéias por trás do processo que é empregado para analisar um problema e desenvolver uma abordagem para resolvê-lo. A primeira etapa desse processo consiste na identificação das classes do sistema.

Para identificar os elementos que constituem o *applet*, adota-se uma seqüência-padrão de OOAD, que contém duas técnicas principais: 1. Identificação dos objetos modelando o mundo real e traduzindo os objetos encontrados durante a análise; e 2. Identificação dos objetos focando nas suas responsabilidades e colaborações (análise CRC – Classe/Responsabilidade/Colaboração).

O ponto de partida de análise foi a identificação dos objetos modelando-se o mundo real. Optou-se por essa técnica porque diversos componentes podem ser facilmente identificados a partir de croquis desse subsistema. Para se obter uma interface simples, agradável, completa, e multifuncional, esboçou-se um croqui de uma interface gráfica específica para o *applet* em questão. A partir deste croqui (Figura 5), pode-se extrair e identificar diversos objetos que pertencem ao sistema, identificando assim as classes que são abstrações desses objetos.

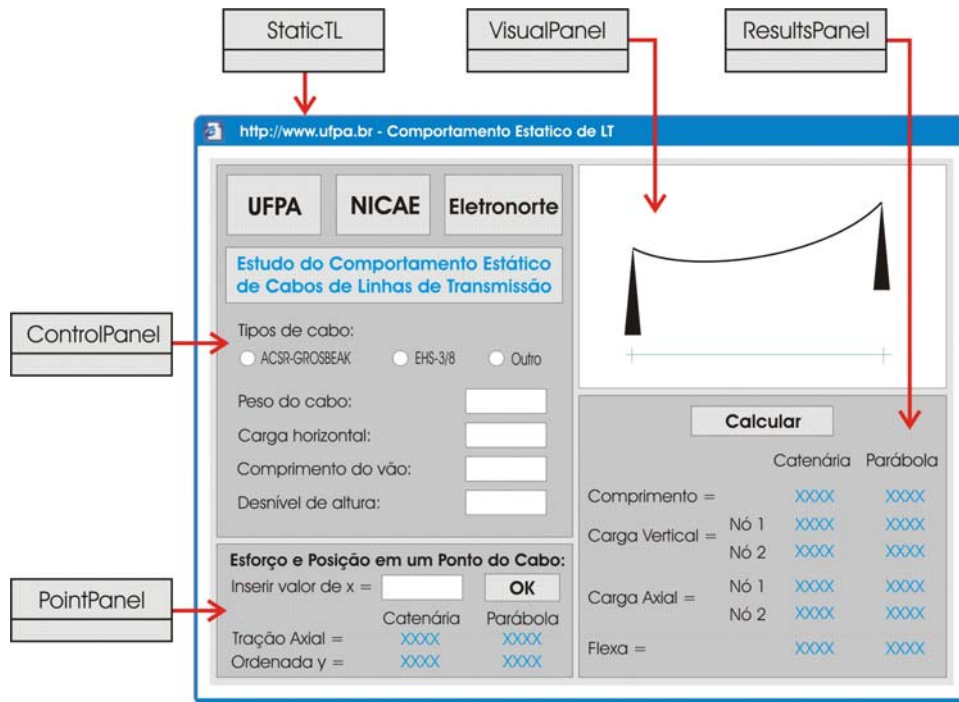


Figura 5 - Identificação das classes a partir de croqui da interface.

Analisando-se a Figura 5, pode-se chegar a uma primeira relação entre as classes previamente identificadas: *VisualPanel*, *ControlPanel*, *PointPanel*, *ResultsPanel* e *StaticTL* (Figura 6).

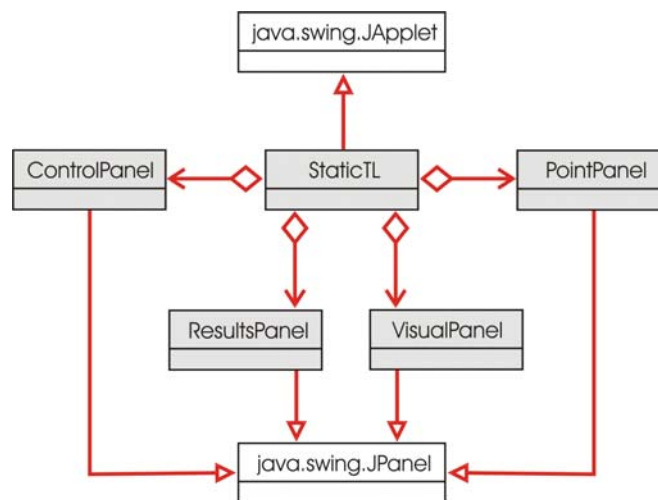


Figura 6 - Diagrama de classes do sistema desenvolvido para análise estática de cabos de LT.

Para identificar as classes restantes, aplicou-se a técnica de cartões CRC. A Figura 7 apresenta um cartão CRC para este sistema que foi denominado por *stl*.

stl	
1. Realizar os cálculos para obtenção do comportamento estático de um cabo de LT em diversas situações.	1. Receber os dados de entrada, para realizar os cálculos.
2. Realizar os cálculos para o cabo, assumindo tanto a forma da catenária, como a forma da parábola.	2. Retornar os cálculos, que expressão o comportamento estático do cabo.

Figura 7 - Cartão CRC do sistema (*stl*).

A partir do modelo de análise CRC, pôde-se identificar três novas classes (Figura 8). Uma classe abstrata chamada *Cable*, e duas classes concretas chamadas *Catenary* e *Parabola*. Utilizando os conceitos de herança e polimorfismo, solucionou-se o problema de forma eficiente, precisa e elegante.

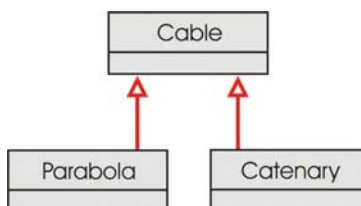


Figura 8 - Relação de herança entre as classes.

Utilizou-se também o Padrão de Projeto de criação *Singleton*, para que fosse criado somente um objeto das classes: *ResultsPanel*, *ControlPanel*, *VisualPanel* e *PointPanel*.

Programação orientada a objetos. O sistema foi implementado 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).

Uma idéia básica utilizada pela linguagem Java é a de que um programa desenvolvido com essa linguagem pode ser executado em qualquer tipo de computador sem precisar ser alterado ou compilado novamente. Como já discutido anteriormente, *applet* são porções de código Java não executáveis por si próprio, requerem a existência de um *browser* que incorpore e execute a JVM (*Java Virtual Machine*).

Para implementar o sistema na linguagem Java foram utilizados, além dos diagramas de classes (Figuras 6 e 8), também diagramas de interação e diagramas de transição de estados. A criação dos diagramas de interação auxiliaram bastante na percepção da construção dos objetos e nas relações entre os mesmos, como ilustrado na Figura 9. Já os diagramas de transição de estados foram imprescindíveis durante a definição dos eventos entre o usuário, os painéis e os procedimentos de cálculo.

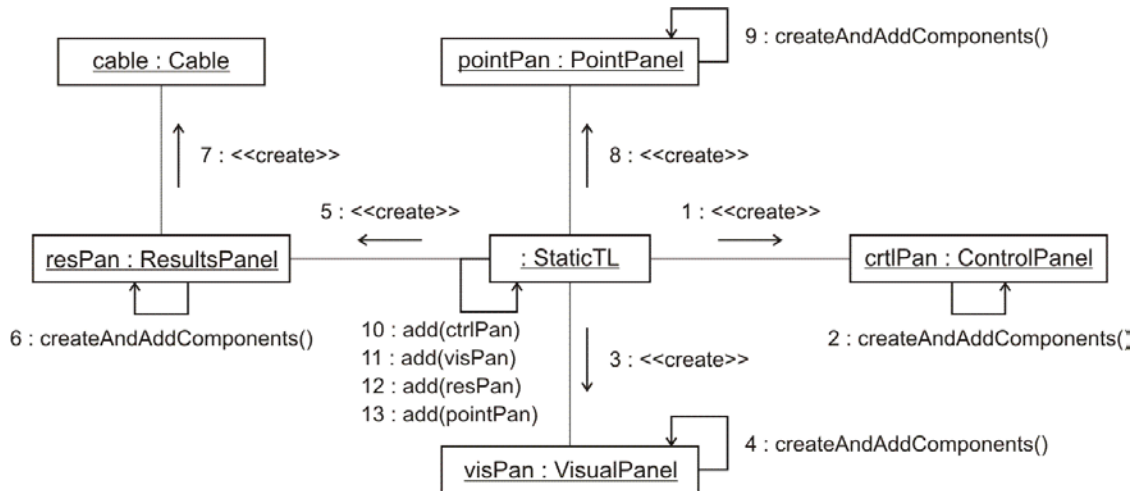


Figura 9 - Diagrama de interação do sistema focando na construção dos objetos.

Produto final e testes. Após as fases de análise, projeto e programação orientada a objetos, a interface final do *applet* desenvolvido para análise estática de cabos de LT ficou com a forma apresentada na Fig. 10. Este programa pode ser utilizado acessando-se a página da *Web* que possui o seguinte endereço:

http://www.ufpa.br/nicae/projetos/eletronorte_cabos/AppletStatic/StaticTL.html.

Estudo do Comportamento Estático de Cabos de Linhas de Transmissão

Tipos de Cabos:
 ACSR-GROSBEAK EHS 3/8 outro

Peso do cabo:
 $p = 0.7816$ N/m
 Carga horizontal:
 $T_0 = 1545$ N
 Comprimento do vão:
 $A = 350$ m
 Desnível de altura:
 $h = 40$ m

Esforço e Posição em um Ponto do Cabo
 Inserir valor de x (m) =

Modelo	Catenária	Parábola
Comprimento (m)	352,733	352,732
Carga Vertical (N)	Em I = -39,185	Em I = -39,791
	Em J = 314,880	Em J = 313,351
Carga Axial (N)	Em I = 1545,497	Em I = 1545,512
	Em J = 1576,761	Em J = 1576,456
Flecha (m)	Fs = 7,802	Fs = 7,746
	Fo = -0,636	Fo = -0,656

Autoria e Desenvolvimento: Tiago R. da Silva, André M. B. Pereira e Remo M. de Souza Copyright © 2005 - NICAE/UFPA - Todos os direitos

Figura 10 - Interface final do *applet* para análise estática de cabos de LT.

Para avaliar o programa, executaram-se diversos testes com os problemas propostos por Labegalini et al. (1992) que mostraram o *applet* bastante adequado e compatível com os fins para que o mesmo foi desenvolvido. Um dos exemplos pode ser conferido na própria Fig. 10.

3.3 Desenvolvimento do sistema (*applet*) para análise dinâmica de cabos de LT

Nesta seção, serão apresentadas as fases do desenvolvimento deste sistema que modela o comportamento dinâmico de cabos de LT. Aplicam-se os conceitos e recursos da OO de forma semelhante como foram aplicados no desenvolvimento do *applet* para análise estática de cabos de LT. Todavia, devido a estreita semelhança entre os dois processos de desenvolvimento e por razão de não repetição de informações, serão descritas apenas as etapas chaves e distintas do desenvolvimento.

Análise e projeto orientados a objetos. Como a primeira etapa deste processo consiste na identificação das classes do sistema, e adotando-se a mesma seqüência-padrão de OOAD utilizada no desenvolvimento do *applet* anterior, identificou-se inicialmente os objetos modelando-se o mundo real, a partir de croquis da interface gráfica. Extraindo-se os objetos a partir dos componentes desses croquis, e inserindo uma classe com a responsabilidade de processar os cálculos, chega-se a uma relação entre as classes (Figura 11).

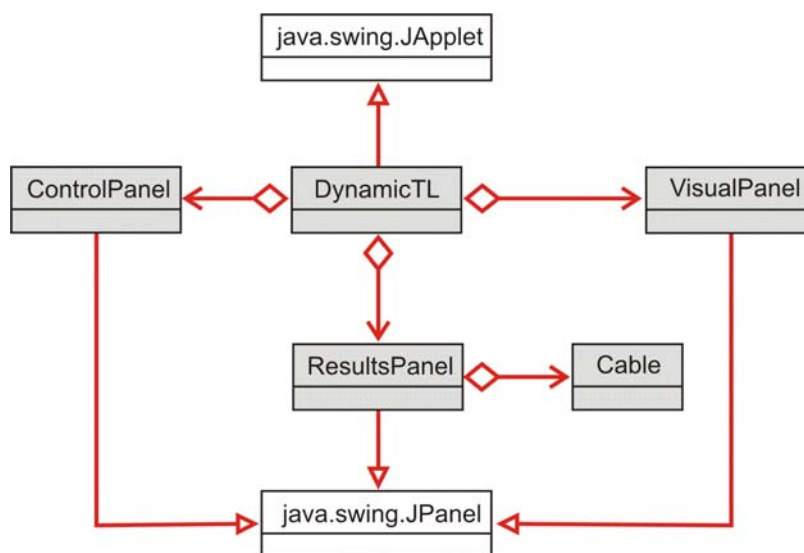


Figura 11 - Diagrama de classes do sistema para análise dinâmica de cabos de LT.

Programação orientada a objetos, produto final e testes. Para implementar este sistema na linguagem Java também foram utilizados diagramas de interação e diagramas de transição de estados, que auxiliaram bastante na construção e relação dos objetos e na definição dos eventos.

É importante mencionar, que assim como no desenvolvimento do *applet* anterior, onde utilizou-se a característica de polimorfismo para considerar propriedades semelhantes entre as classes responsáveis pela forma da catenária e parábola, aplicou-se também essa idéia para diferenciar a consideração ou não da influência da rigidez a flexão do cabo. Já na classe *Cable* para a implementação do PBE de forma mais eficiente e precisa, optou-se por interpolar as curvas das energias envolvidas no princípio (devido o vento e ao auto-amortecimento do cabo) por splines, mais especificamente por Bezier cúbicas, de tal forma que possa aplicar o método de Newton-Raphson de solução de equações não-lineares para a

determinação da amplitude do cabo. Além disso, o usuário fica livre para entrar com os dados do auto-amortecimento do cabo que ele julgar ser mais conveniente e adequado, caso não queira utilizar os dados previamente definidos pelo programa, no botão “Tipo de Cabo...” (ver Fig. 12).

Após as fases de análise, projeto e programação orientada a objetos, a interface final do *applet* desenvolvido para análise dinâmica de cabos de LT ficou com a forma apresentada na Fig. 12. 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.

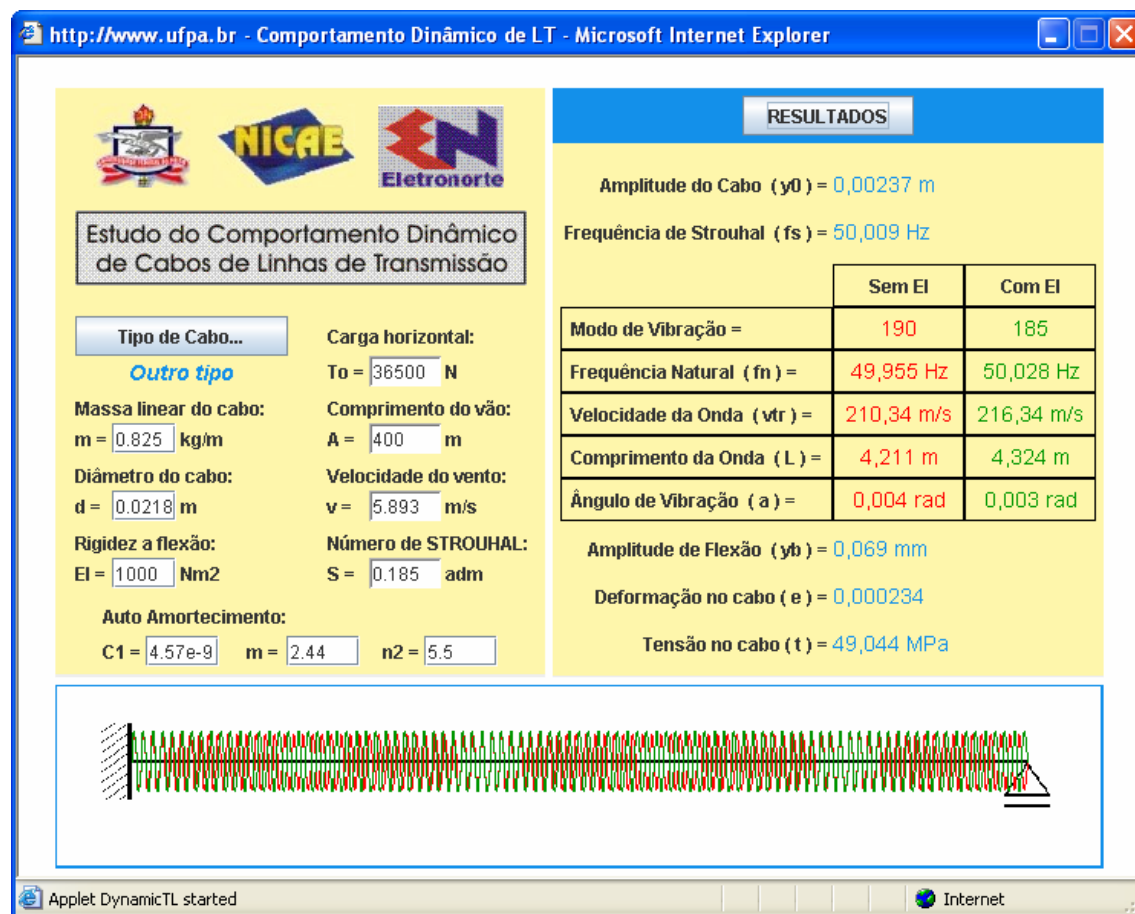


Figura 12 - Interface final do *applet* para análise dinâmica de cabos de LT.

Assim como no *applet* para análise estática, para avaliar o *applet* para análise dinâmica, executaram-se diversos testes com os problemas propostos pelo CIGRE SC-11 (1989), o qual apresenta situações de como avaliar o nível de vibração em problemas de vibração eólica, utilizando-se os mesmos fundamentos apresentados na seção 2.2, porém com procedimentos de cálculo diferentes. Também para esses casos o *applet* apresentou-se bastante adequado e compatível com os fins para que foi desenvolvido.

4. CONCLUSÕES

O trabalho teve como meta principal o desenvolvimento de sistemas computacionais orientados a objetos, em formato de *applet*, para simular o comportamento estático e dinâmico de cabos de LTs.

A utilização da linguagem de programação Java na implementação do programa, teve um caráter bastante positivo, pois é uma linguagem nova que vem sendo muito utilizada no meio científico e tecnológico, e comprovadamente muito eficiente e prática na criação de sistemas computacionais que tem como finalidade simulações da engenharia. Esta linguagem permitiu a aplicação de recursos muito modernos no programa, tais como, a utilização da abordagem orientada a objeto, de técnicas de modelagem orientada a objetos (UML), e a própria criação de *applet*. É muito interessante a construção de um programa em forma de *applet*, devido a facilidade de disponibilização deste na Internet, pois permite que engenheiros e pesquisadores de qualquer parte do mundo possam utilizar o programa.

A aplicação da abordagem orientada a objetos na criação do programa, traz também inúmeras vantagens, pois permite ao programador utilizar os recursos e conceitos modernos, como encapsulamento, herança, polimorfismo, reutilização de software, entre outros, para se desenvolver um sistema. O uso da UML na representação gráfica das classes do sistema e das relações entre as mesmas foi de grande importância para a rápida compreensão do sistema e implementação do código. Além destas vantagens, a utilização desta técnica moderna e muito difundida, permite que outros programadores entendam com facilidade o funcionamento do programa e o aperfeiçoem.

Em se tratando dos resultados obtidos, os mesmos mostraram que para a maioria dos casos o modelo da parábola pode ser usado para descrever a forma do cabo, pois a diferença entre os valores obtidos pelo programa para o modelo da parábola e para a catenária é muito pequena. Para efeito de exemplificação, em casos extremos analisados, esta diferença resultou em um erro de no máximo 2% na carga vertical. Já com relação à análise dinâmica é imprescindível a utilização de modelos que consideram a influência da rigidez à flexão para a avaliação do nível de vibração de forma mais precisa e realista. Observando-se o exemplo ilustrado na Fig. 12, é possível notar tanto por meio do painel de resultados como no painel de visualização a diferença entre os modos de vibração obtidos considerando ou não esse efeito.

Portanto, os programas são também muito úteis para quem esteja interessado em realizar os cálculos pela catenária (no caso estático) e considerando a influência da rigidez à flexão dos cabos (no caso dinâmico), obtendo assim maior precisão, pois a maioria das bibliografias pesquisadas não realizam os cálculos considerando este modelo e efeitos, respectivamente, devido a complexidade dos cálculos. Os programas são úteis também para serem utilizados como recursos didáticos.

Finalmente, conclui-se que os programas desenvolvidos mostraram-se bastante eficientes na obtenção de resultados em análises estática e dinâmica de cabos de LT, apresentando interfaces bastante amigáveis e de fácil utilização, requisitos imprescindíveis para todas as áreas da Engenharia (Civil, Mecânica, Elétrica e Computação) envolvidas nesta pesquisa.

Acknowledgements

Os autores agradecem a Eletronorte pelo apoio financeiro concedido para a execução do projeto de pesquisa que abrange o presente trabalho, e ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica do segundo autor.

REFERÊNCIAS

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

Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I., 1999. *The Unified Modeling Language: User Guide*. Addison Wesley, Boston. (Object Technology Series)

CIGRE SC-11, 1989. Report on aeolian vibration. *Electra*, n. 124, pp. 39–77.

De Souza, R. M., 2002. *Desenvolvimento de um Programa para Prognóstico, Monitoramento e Controle de Vibração em Condutores de LT's na Região Norte*. Projeto P&D, Convênio: UFPa/Eletronorte via ANEEL.

Deitel, H. M., Deitel, P. J., 2002. *Java Como Programar*. 40 ed., Prentice Hall.

IEEE Committee Report, 1966. Standardization of Conductor Vibration Measurements. *IEEE Trans.*, vol. PAS-85, n. 1, pp 10-22.

Irvine, M., 1992. *Cable Structures*. Dover Publications, New York.

Labegalini, P. R. et al., 1992. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. Edgard Blucher.

Meriam, J.L., Kraige, L.G., 1999. *Mecânica: Dinâmica*. (4 ed.). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

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