



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



www.asaaee.org.br

INFLUÊNCIA DOS CABOS CONDUTORES DE ENERGIA NAS ASSINATURAS DINÂMICAS DAS TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

EFFECTS OF CONDUCTOR BUNDLES ON THE DYNAMICAL BEHAVIOR OF OVERHEAD ELECTRICAL TRANSMISSION LINE TOWERS

Edilson M. L. e Silva (1); Sandro D. R. Amador (3); Remo M. de Souza (2); José P. da R. Neto (4); Marcelo B. C. Rosa (5); Luis A. C. M. Veloso (2); Regina Augusta C. Sampaio (2)

(1) Mestrando de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará - UFPA.

(2) Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil.

(3) Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFPA.

(4) Professor Mestre, Departamento de Engenharia Civil.

(5) Engenheiro Civil, Departamento de Engenharia Civil – UFPA.

Universidade Federal do Pará – UFPA, Instituto Tecnológico.

Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia

Avenida Augusto Corrêa, n.1, 66075-110, Belém - PA – Brasil.

Resumo

Este trabalho consistiu na análise modal computacional e experimental de uma torre de Linha de Transmissão situada na margem direita do Rio Guamá, na cidade de Belém, PA, Brasil. Trata-se de uma torre com 73,65 metros de altura, do tipo auto-portante que suporta os cabos condutores de energia elétrica. Foram realizadas análises computacionais da referida estrutura visando verificar a influência dos cabos condutores de energia no comportamento dinâmico da torre utilizando três modelos em elementos finitos. Foram criados modelos com elementos de pórtico espacial, e os cabos com elementos de cabo espacial. Os resultados obtidos através dos modelos numéricos foram comparados com resultados de uma análise modal experimental realizada na torre com emprego de acelerômetros piezo-elétricos (ICP). Como conclusão do estudo, verificou-se uma influência significativa dos cabos condutores no comportamento dinâmico da torre.
Palavra-chave: Elementos Finitos, Análise Dinâmica, Análise Modal.

Abstract

This paper consists of numerical and experimental modal analyses of an overhead transmission line tower placed at the right margin of Guamá River, located in the city Belém, PA, Brazil. The structure under study consists of a free-standing tower with 73,65 meter of height that supports three conductor bundles. The numerical analyses were performed to investigate the effects of conductor bundles on dynamical behavior of the tower using four finite elements models. These models were created using frame and beam elements for the tower structure, and spatial cable elements for the cables. The acquired results in these numerical analyses were compared to the results from an experimental modal analysis performed on the tower with the aid of a set of low frequency piezo-electric accelerometers (ICP). As conclusion of the study, an important influence of the conductor bundles on the dynamical behavior of the tower was verified.

Keywords: Finite Elements, Dynamic Analysis, Modal Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de acidentes com linhas aéreas de transmissão com interrupção do fornecimento de energia vem se tornando cada vez mais freqüente nas diversas regiões do Brasil [1]. Gera grande apreensão nas equipes e nas empresas responsáveis pelo fornecimento de energia o fato de que a infra-estrutura necessária para tal atividade seja vulnerável à ação do vento. Vários relatos de acidentes com este tipo de estrutura são encontrados na literatura científica como, por exemplo, em [2]. Na região amazônica, por exemplo, em que as linhas de transmissão atravessam grandes obstáculos, como a travessia de grandes rios, há relatos de acidentes, inclusive com colapso total, de torres devido à ocorrência de rajadas de vento excepcionalmente violentas [3, 1]. Sabe-se, com base em outros estudos realizados [4, 5], que os procedimentos estabelecidos nas normas de projeto de suporte metálicos (torres) nem sempre são suficientes para garantir a integridade dessas estruturas frente à ação do vento [5]. Neste trabalho são apresentados os resultados de um estudo de caso de uma torre auto-portante situada na travessia do rio Guamá, na cidade de Belém, PA, Brasil. O estudo procurou avaliar a influência do acoplamento entre a torre e os cabos condutores no comportamento dinâmico da torre. Para tanto foram realizados ensaios experimentais de vibração na estrutura da torre [6], assim como simulações computacionais tanto da torre isolada como também do conjunto formado pela torre e cabos condutores de energia. Nessas análises foram considerados três modelos computacionais cujos resultados foram comparados com os resultados dos ensaios experimentais realizados com emprego de transdutores de aceleração. Os resultados dessas análises mostraram uma considerável influência das cadeias de isoladores e dos cabos no comportamento dinâmico do sistema estrutural formado pela torre, isoladores e cabos.

2 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

O rio Guamá possui, aproximadamente, 1.300 metros de largura no ponto em que a linha de transmissão Vila do Conde – Guamá o cruza. Trata-se de uma linha de transmissão de 230 kV é responsável pelo fornecimento de energia para parte da região oeste do estado do Pará. No cruzamento dessa linha com o rio Guamá existem três torres que suportam seis feixes duplos de cabos condutores de energia e dois cabos pára-raios que cruzam dois vãos de aproximadamente 650 metros sobre o rio [7].

2.1 A torre

A torre em estudo corresponde a uma estrutura metálica treliçada com, aproximadamente, 75 metros de altura que está situada na margem direita do rio. Ela é constituída de barras de aço com perfil laminado tipo L (Cantoneira), como mostra a Figura 1.



(a) Detalhe da silhueta da torre



(a) Torre vista do rio Guamá

Figura 1 - Torre tipo auto-portante situada na margem direita do rio Guamá [2]

2.2 Cabos e Isoladores

Na torre analisada são empregados dois tipos de cabos: o Grosbeak 636 e o EHS 3/8". Esses tipos são usados, respectivamente, em cabos condutores de energia e em cabos pára-raios. Os dados e as propriedades relativas aos cabos utilizados são mostradas na TABELA 1.

TABELA 1– Propriedades dos cabos condutores e pára-raios

Cabo	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Massa Linear (kg/m)
Grossbeak 636	25,15	21,8	784,5	1,3
EHS 3/8"	9,15	374,7952	189,561	0,41

Os vãos e os comprimentos dos respectivos cabos podem ser visualizados na Figura 2. O isolamento elétrico entre torre e os cabos condutores de energia é obtido utilizando-se seis cadeias duplas de dezesseis isoladores cada.

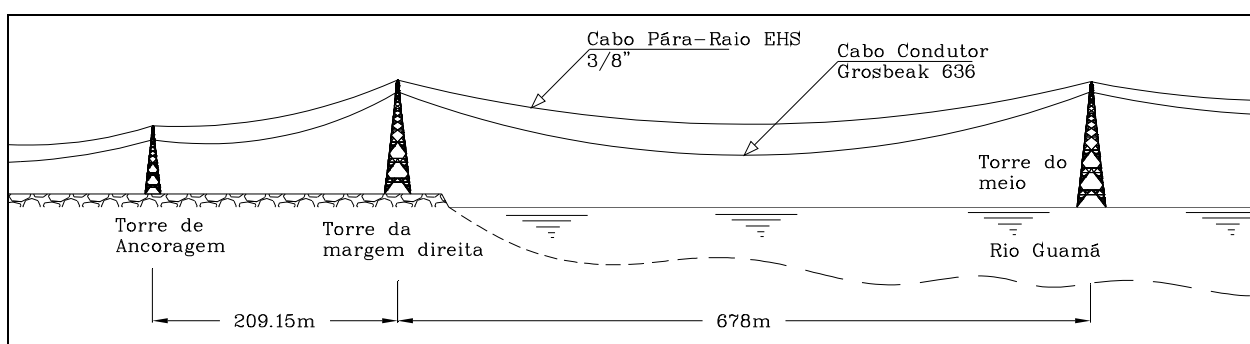


Figura 2 – Esquema da Torre em Conjunto com os Cabos.

3 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS

Entre as várias análises realizadas, pode-se destacar a análise modal experimental realizada com acelerômetros piezo-elétrico e a análise modal computacional realizada através do método dos elementos finitos (MEF).

3.1 Análise Modal Computacional

Em geral pode-se dizer que a aplicação da análise modal envolve um largo interesse em: identificar e avaliar o fenômeno de vibração; desenvolver modelos dinâmicos baseados experimentalmente; detectar danos estruturais. Para uma estrutura com múltiplos graus de liberdade, a equação que rege o equilíbrio dinâmico é dada pela expressão.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa da estrutura, \mathbf{C} a matriz de amortecimento, \mathbf{K} a matriz de Rigidez, $\mathbf{F}(t)$ o vetor de forças nodais definidas em função do tempo e, $\ddot{\mathbf{X}}$, $\dot{\mathbf{X}}$ e \mathbf{X} são respectivamente os vetores de deslocamentos, velocidades e acelerações dos n graus de liberdade.

Os modos de vibração e as frequências naturais são obtidos com o sistema estrutural vibrando livremente sem a influência do amortecimento, tendo como resultante a equação (2).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = 0 \quad (2)$$

A resposta para o sistema livre não amortecido é do tipo:

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\phi} \cdot \text{sen}(\omega_0 t - \alpha) \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = -\boldsymbol{\phi} \omega_0^2 \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (4)$$

onde t é a variável tempo e α é o ângulo de fase. Substituindo-se as equações (3) e (4) na equação (2), resulta em:

$$[\mathbf{K} - \omega_0^2 \mathbf{M}] \boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (5)$$

Trata-se, portanto, de um problema de autovetor e autovalor, em que os autovalores ω_0 representam as frequências naturais e os autovetores $\boldsymbol{\varphi}$ os respectivos modos de vibração [8].

3.2 Análise Modal Experimental

Neste trabalho a identificação experimental dos parâmetros modais da estrutura é feita através do método dos Subespaços Estocásticos Baseados nas Covariâncias das Respostas (SSI-COV) [9]. Uma vantagem desse método em relação aos métodos de análise modal experimental tradicionais como, por exemplo, os métodos SISO, SIMO, MIMO, etc. [10, 11], é que não há necessidade de se determinar a força de excitação da estrutura. Assim sendo, as séries temporais obtidas nos ensaios de vibração são suficientes para identificação de parâmetros da estrutura.

4 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS

4.1 Análise Modal Experimental

A análise modal experimental foi realizada com emprego de seis acelerômetros fixados em duas seções ao longo do comprimento da torre, utilizando o próprio vento como fonte excitação. Esses sensores foram conectados a um equipamento de aquisição de dados utilizado para coletar as séries temporais de aceleração. Posteriormente, esses dados foram processados no programa SISMEC (Sistema de Análise Modal de Estruturas Civas), desenvolvido na plataforma Matlab [1], através do qual foi possível determinar os parâmetros modais da torre. A Figura 3 indica o posicionamento das duas seções (A e B) instrumentadas ao longo da altura da torre.

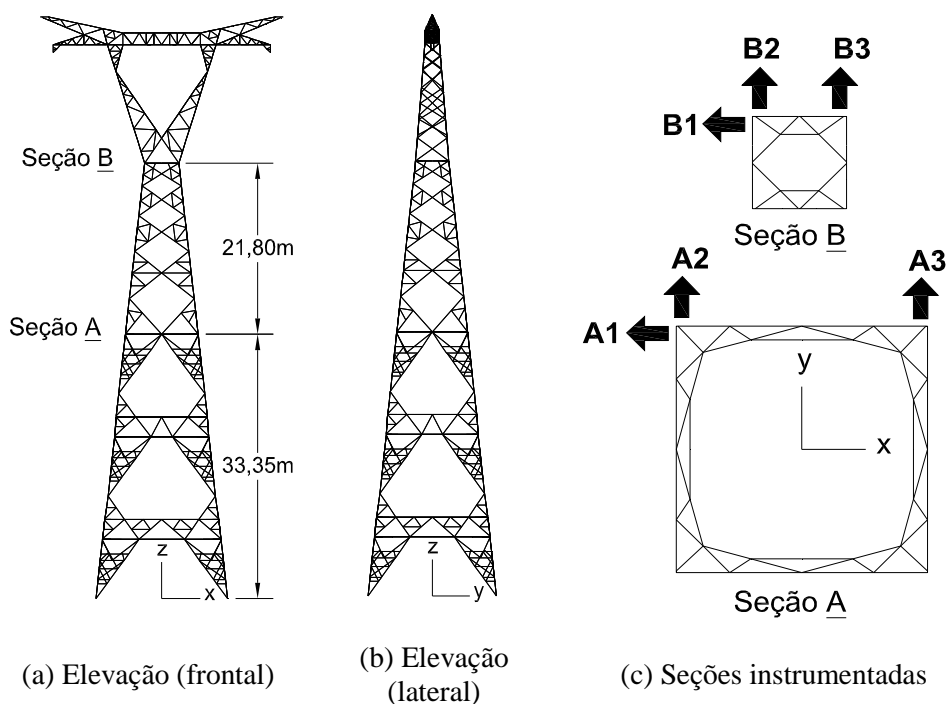


Figura 3 - Posição dos acelerômetros [2]

4.2 Análise Computacional

Um dos pontos chave deste trabalho foi a modelagem do acoplamento entre a torre e os cabos de condução de energia. Na estrutura real a cadeia de isoladores é o dispositivo responsável pela ancoragem desses à estrutura da torre. Portanto uma precisa idealização numérica da cadeia se faz necessário para que se possa determinar com precisão a influência dos cabos na assinatura dinâmica da torre.

4.3 Modelagem da Cadeia de Isoladores

A idealização das cadeias de isoladores consiste na atribuição de dados, tais como área, comprimento, peso específico, inércia e rigidez, ao elemento de pórtico espacial. Nota-se que a cadeia de isoladores é toda articulada, conforme mostra o desenho esquemático na Figura 4, logo se pode desprezar a rigidez material à flexão. Entretanto deve ser considerado o acréscimo de rigidez geométrica proporcionado pelo peso dos cabos condutores e dos isoladores que formam as cadeias de suspensão. Utiliza-se neste trabalho a idéia de se determinar as propriedades geométricas da seção de uma barra de pórtico espacial, cujas propriedades como a área e o momento de inércia, são obtidos a partir do peso e rigidez geométrica da cadeia de isoladores.

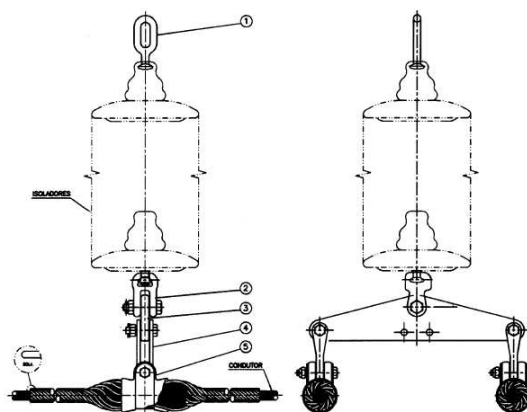


Figura 4 – Esquema de uma cadeia de isoladores

Sabe-se que a rigidez axial e a rigidez à flexão para uma barra engastada e livre são expressas, respectivamente, pelas equações (6) e (7).

$$K_{\text{axial}} = \frac{EA}{L} \quad (6)$$

$$K_{\text{flex}} = \frac{3EI}{L^3} \quad (7)$$

onde E o módulo de elasticidade, A a área, I o momento de inércia, e L o comprimento. Considerando o módulo de elasticidade (E) e o comprimento (L) constantes, deve-se apenas encontrar a área e o momento de inércia equivalentes de forma a obter as parcelas de rigidez geométrica. Para determinar a rigidez geométrica axial da cadeia de isoladores pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$A_{\text{eq}} = \frac{P_{\text{cadeia}}}{L\gamma_{\text{aço}}} \quad (8)$$

onde A_{eq} é a área equivalente da cadeia, P_{cadeia} é o peso da cadeia e $\gamma_{\text{aço}}$ é peso específico do material utilizado na modelagem da cadeia de isoladores. Como forma de obter a rigidez geométrica a flexão da cadeia de isoladores, foi feito e estabelecido uma equivalência entre uma barra engastada e livre e um pêndulo simples, como mostra a Figura 5.

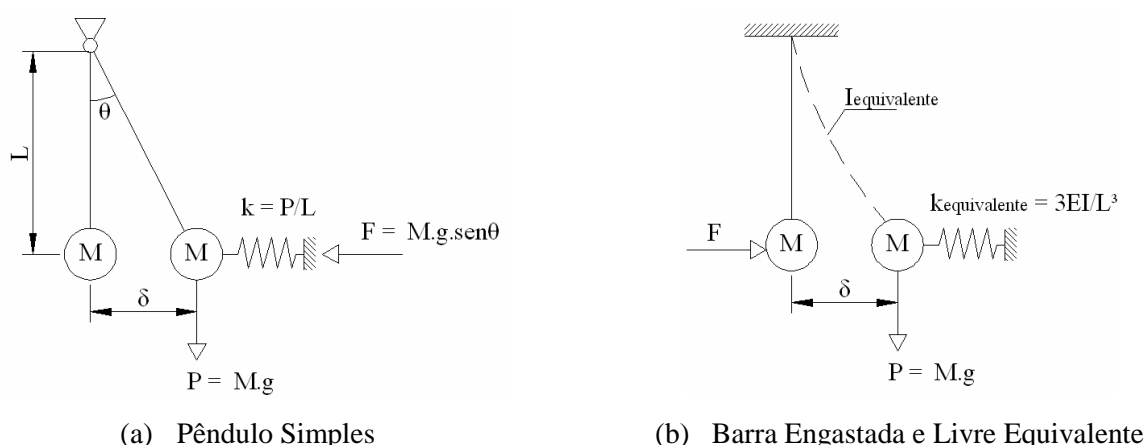


Figura 5 - Esquema de um Pêndulo Simples e de uma Barra engastada equivalente

Para obter uma rigidez de forma que uma barra engastada represente um pêndulo, inicialmente aplica-se a mesma força F que surge pelo movimento de um pêndulo simples a esta barra, conforme apresentado pelas figuras Figura 5(a) e Figura 5(b). Vale ressaltar que a mola que aparece na Figura 5(a) é fictícia e representa a força restauradora do pêndulo, da mesma forma a mola que aparece na Figura 5(b) é fictícia e representa a rigidez a flexão de uma barra engastada e livre.

Assim sendo, para o pêndulo mostrado na Figura 5(a) tem-se:

$$K = \frac{P}{L} \quad (9)$$

onde K é a rigidez do pêndulo simples, P é o peso do pêndulo e L é comprimento do pêndulo. Por outro lado a rigidez da barra engastada mostrada na Figura 5(b) é calculada pela equação (7). O momento de inércia equivalente ($I_{eq.}$) de uma barra engastada e livre é obtida igualando-se as equações (7) e (9), e assim temos.

$$I_{eq.} = \frac{PL^2}{3E} \quad (10)$$

É interessante ressaltar que quanto maior for a força peso nas cadeias de isoladores, maior será a parcela de rigidez geométrica. Para a cadeia de isoladores, considera-se que a força peso “ P ” utilizada para se obter a inércia equivalente é dada, de forma aproximada, pela soma das parcelas de peso dos cabos condutores e o peso do próprio isolador. Embora a modelagem dos isoladores seja razoavelmente simples, verificou-se que a influência desses elementos nas características modais da torre é bastante significativa.

4.4 Análise Numérica da Torre

As análises numéricas da torre em estudo foram realizadas com emprego do método dos elementos finitos, sendo utilizados elementos de cabo e de pórtico espacial. Foram criados três modelos da torre em estudo: no primeiro modelo foi considerado apenas a torre metálica com as massas nodais equivalentes dos cabos condutores e isoladores aplicados nos seus respectivos pontos de suspensão; no segundo modelo foi considerada a torre metálica, as barras de pórtico espacial representando a cadeia de isoladores e as massas nodais equivalentes dos cabos condutores e pára-raios. Os esboços de cada um desses modelos são mostrados nas Figuras 5 e 6.

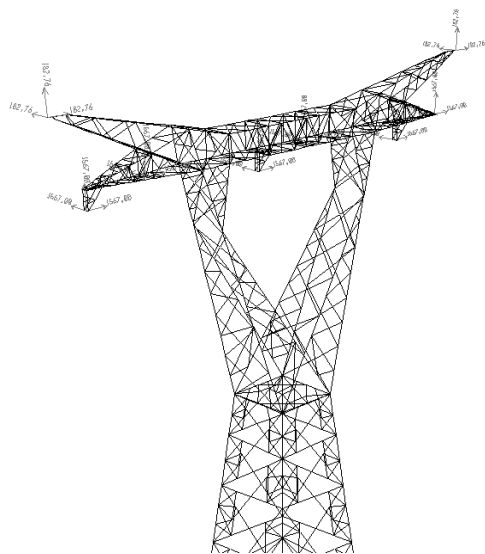
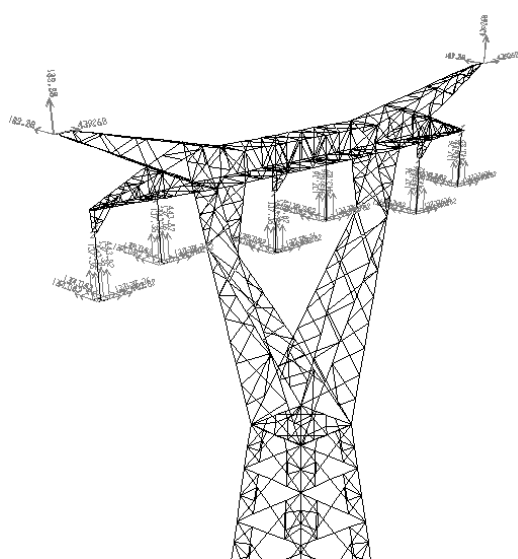
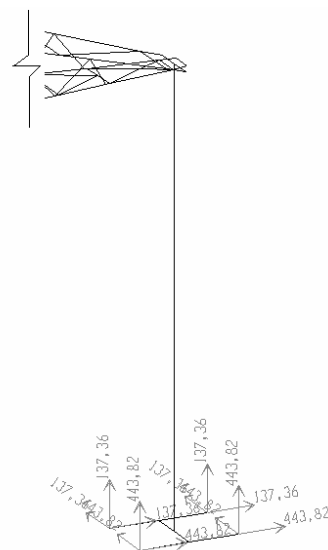


Figura 6 – Torre e massas dos cabos e isoladores (Modelo 1)



(a) Detalhe da parte superior da torre



(b) Detalhe modelo numérico da cadeia de isoladores e massas nodais dos cabos condutores e pára-raios

Figura 7 – Torre com cadeia de isoladores e massa nodais dos cabos condutores e pára-raios (Modelo 2)

No terceiro foram considerados a estrutura da torre, as cadeias de isoladores, os cabos condutores e as massas nodais equivalentes dos cabos pára-raios, conforme Figura 8. Optou-se por considerar os cabos pára-raios como massas nodais pelo fato de o sistema de ancoragem entre estes e a torre se assemelharem a uma roldana.

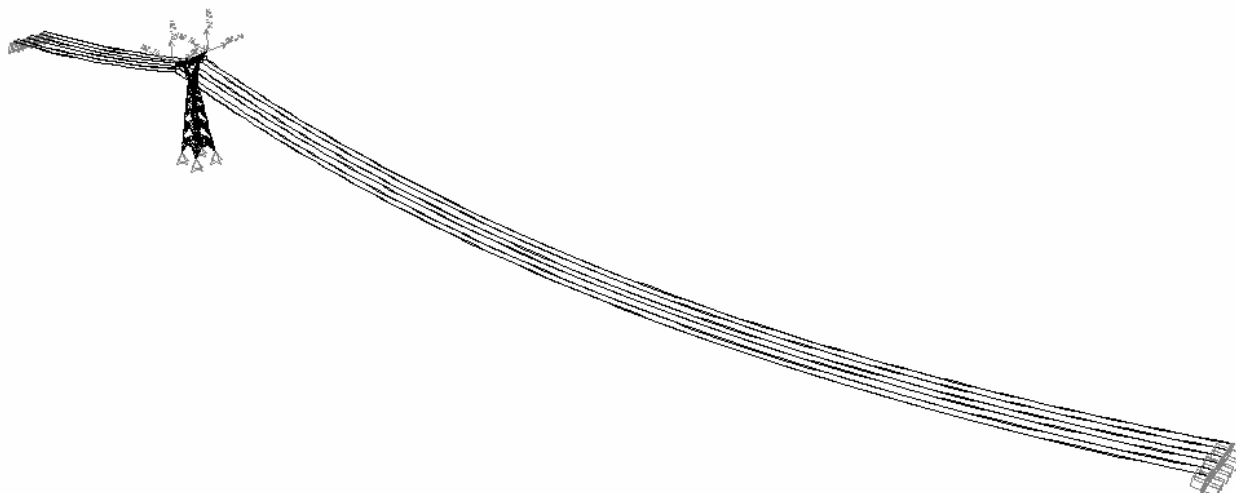


Figura 8 – Conjunto formado pela torre, cadeia de isoladores, cabos condutores e massas nodais equivalentes dos cabos pára-raios (Modelo 3)

A TABELA 2 resume as características adotadas nos três modelos numéricos criados para análise da torre em estudo.

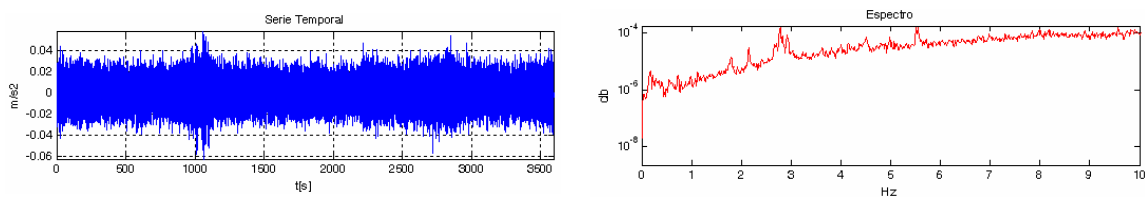
TABELA 2- Elemento Finito utilizado nos modelos criados para análise da torre

Modelo	Elemento Finito Utilizado		
	Torre	Isoladores	Cabos
1	Elemento de Pórtico Espacial	Massa equivalente	Massa equivalente
2	Elemento de Pórtico Espacial	Elemento de Pórtico Espacial	Massa equivalente
3	Elemento de Pórtico Espacial	Elemento de Pórtico Espacial	Elemento de Cabo Espacial

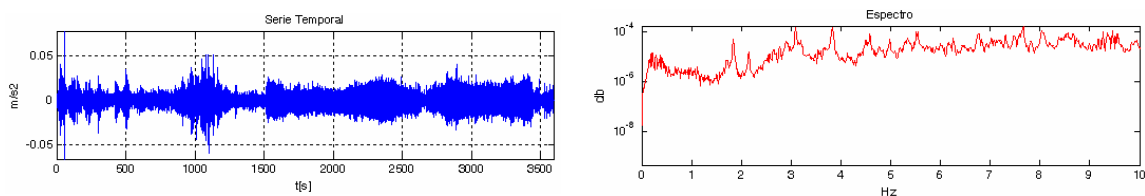
5 RESULTADOS

5.1 Análise dos Resultados

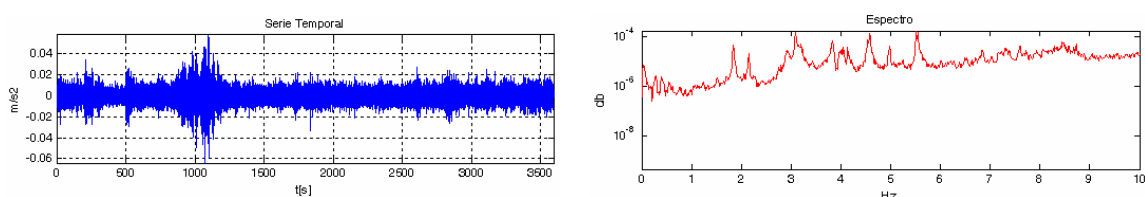
Nos ensaios experimentais de vibração foram utilizados seis acelerômetros piezo-elétricos (ICP) de baixa frequência. Os sensores foram instalados nas seções **A** e **B** nas posições indicadas na Figura 3. A estrutura foi monitorada através de um sistema de aquisição de dados durante três horas com uma taxa de amostragem de 100 Hz, e como fonte de excitação foi utilizado o próprio vento. Após a redução dos erros de tendência e de ganho, as séries temporais e os respectivos espectros apresentaram o aspecto mostrado na Figura 9. Na Figura 10 é mostrado o espectro resultante da soma dos espectros medidos em cada um dos canais, isto é, o traço da matriz de espectro.



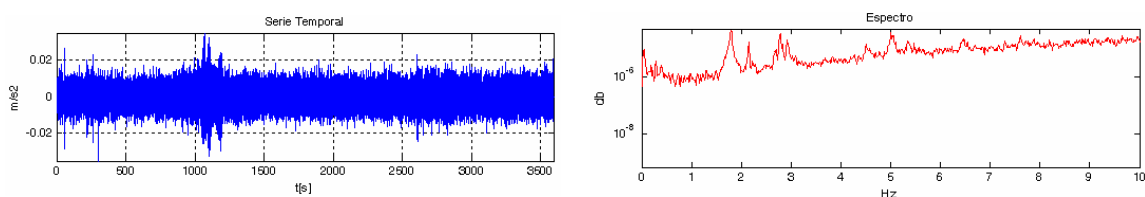
(a) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro A1



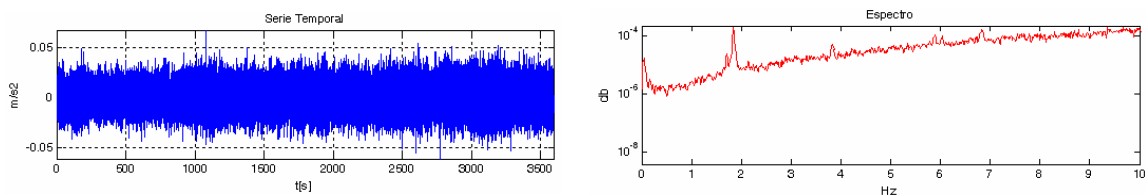
(b) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro A2



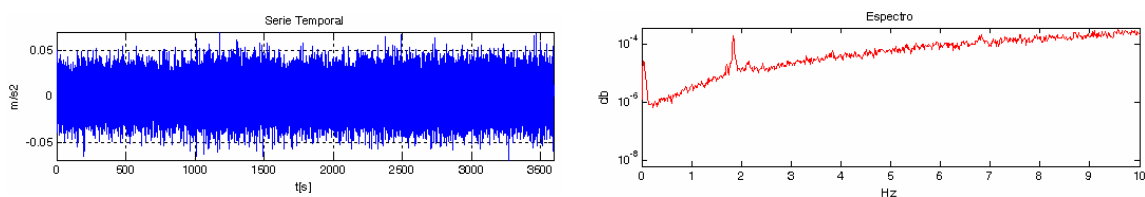
(c) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro A3



(d) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro B1



(e) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro B2



(f) Série temporal e espectro obtidos com acelerômetro B3

Figura 9 – Séries Temporais em Aceleração Coletadas nos Ensaios de Vibração, [7]

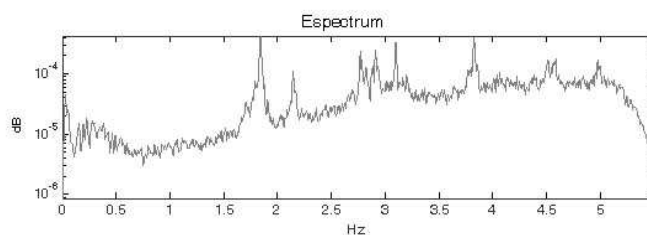


Figura 10 – Traço da Matriz de Espectro dos Sinais Medidos na Torre, [7]

A TABELA 3 mostra o resultado da identificação de parâmetros a partir somente das respostas medidas com emprego do método estocástico SSI-COV. A Figura 11 mostra o diagrama de estabilidade criado para identificação experimental dos parâmetros modais da torre com isoladores e cabos. Os símbolos utilizados no referido diagrama de estabilidade obedecem à seguinte convenção: \oplus - pólo estável; $\bullet v$ - frequência e vetores estáveis; $\bullet d$ - frequência e amortecimento estáveis; $\bullet f$ - frequência estável.

TABELA 3 – Modos experimentais identificados com o método SSI-COV

Modo	Resultados experimentais através do método SSI-COV	
	Frequências naturais (Hz)	Fatores de Amortecimento(%)
1°	1,789	1,580
2°	1,846	0,583
3°	2,150	1,018
4°	2,775	1,318
5°	2,917	1,054
6°	3,107	2,276

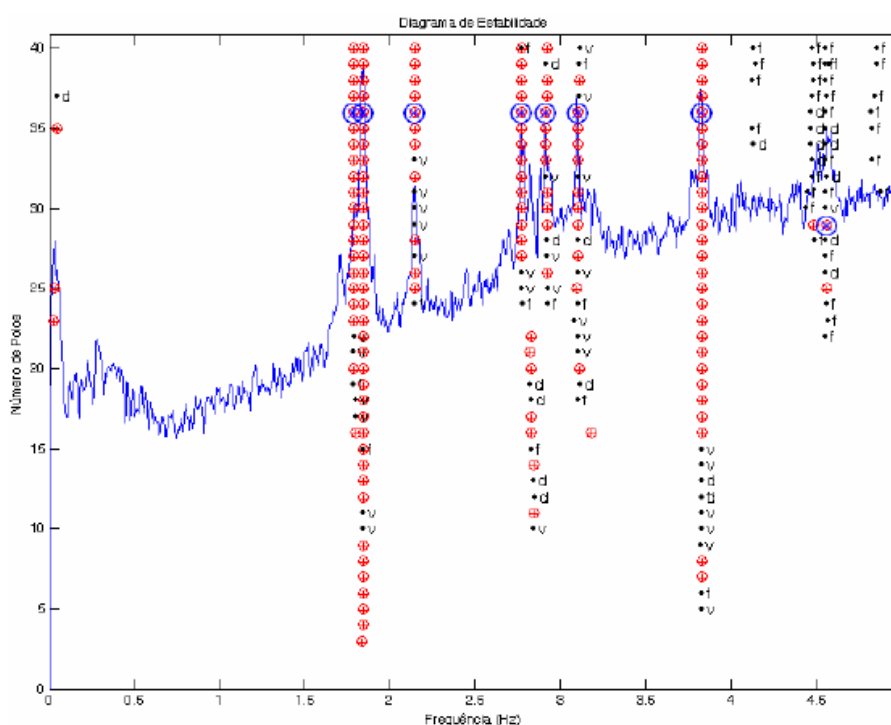


Figura 11 - Diagrama de estabilidade criado com método SSI-DATA para identificação das frequências da torre situadas na faixa de 0 a 5 Hz [1]

Os resultados da análise modal realizada nos três modelos numéricos assim como as frequências experimentais dos respectivos modos de vibração são apresentados na TABELA 4. De forma a verificar se os modos obtidos experimentalmente e numericamente estão bem correlacionados, os vetores modais obtidos foram comparados utilizando-se o Modal Assurance Criterion (MAC) [12].

$$MAC = \frac{|\varphi_n^T \varphi_e|^2}{(\varphi_n^T \varphi_e)(\varphi_n \varphi_e^T)} \quad (11)$$

onde φ_e é o vetor de deslocamentos modais experimentais e φ_n é o vetor de deslocamentos modais obtidos a partir dos modelos numéricos. Neste trabalho os vetores modais são representados por seis graus de liberdade da estrutura, ou seja, o número de acelerômetros fixados na torre para a realização da análise experimental.

TABELA 4 – Freqüência naturais e seus respectivos valores de MAC

Modo	Freqüência Natural (Hz)						
	SSI-COV	ELEMENTOS FINITOS					
		Modelo 1	MAC	Modelo 2	MAC	Modelo 3	MAC
1	1,786	1,368	0,9192	1,761	0,9290	1,804	0,9267
2	1,846	1,463	0,9746	1,985	0,9899	1,868	0,9555
3	2,148	1,382	0,9218	2,107	0,9623	2,186	0,9772
4	2,776	3,024	0,8608	2,957	0,8270	2,864	0,7763
5	2,914	-	-	-	-	2,864	0,7657
6	3,099	3,519	0,8816	3,638	0,9385	3,698	0,9518

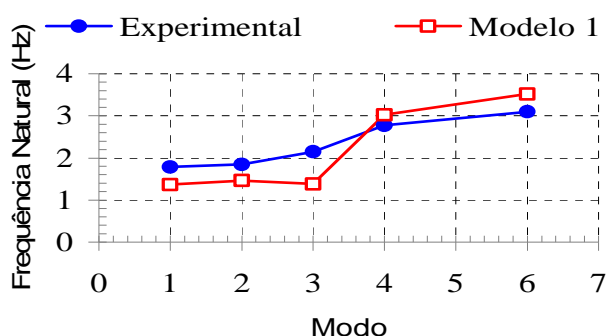
Comparando os resultados teóricos do Modelo 1 com os demais modelos e também com os resultados experimentais observa-se que, embora as freqüências naturais sejam bastante discrepantes, as formas modais dos três primeiros modos são bastante semelhantes. Por outro lado, ao se comparar os resultados do modelo 2 com os resultados experimentais, verifica-se que somente a incorporação do pêndulo conduz à resultados próximos dos experimentais. Isso indica que o efeito de pêndulo dos isoladores no comportamento modal da torre é bastante significativo.

Analisando os resultados obtidos com o modelo 3, verifica-se que tanto as freqüências naturais como as formas modais dos cinco primeiros modos de vibração são bastante próximos dos parâmetros experimentais. Isso se deve ao fato de que da rigidez geométrica proporcionada pelos cabos condutores nos isoladoras é bastante significativa, principalmente nos modos com freqüências acima de 2,15Hz. Diante dos resultados mostrados na TABELA 4 buscou-se avaliar o comportamento modal somente dos cabos. Como pode ser observado na TABELA 5, os parâmetros modais dos cabos predominam no sistema estrutural formado pelo conjunto torre-isoladores-cabos. Esse fato é confirmado pelo surgimento de vários modos com freqüências próximas entre si no modelo 3 (modelo com cabos).

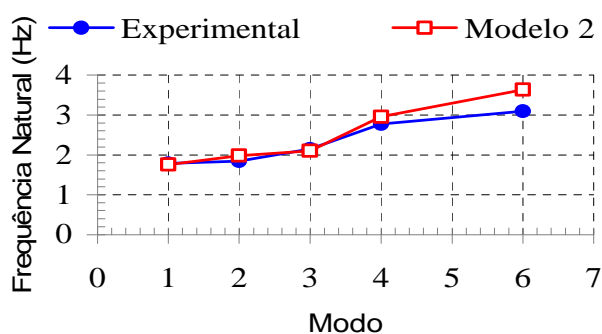
TABELA 5 – Freqüências experimentais da torre e freqüência analítica de um cabo isolado

Torre		Cabo Isolado	
Análise Experimental		Solução Analítica	
Modo	Freqüência Natural (Hz)	Modo	Freqüência Natural (Hz)
1	1,786	20	1,796
2	1,846	21	1,886
3	2,148	24	2,155
4	2,776	30	2,694
5	2,914	32	2,874
6	3,099	34	3,053

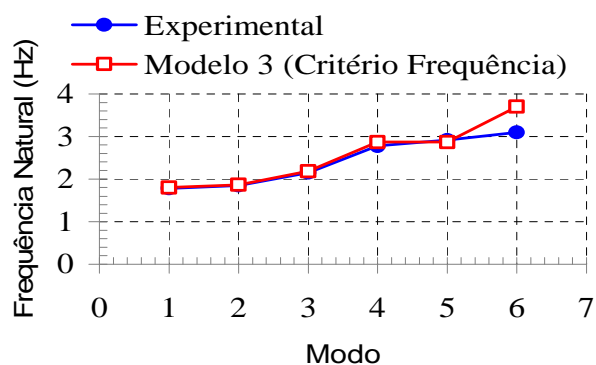
A Figura 12 apresenta a comparação entre os resultados dos modelos numéricos e o resultado da análise experimental.



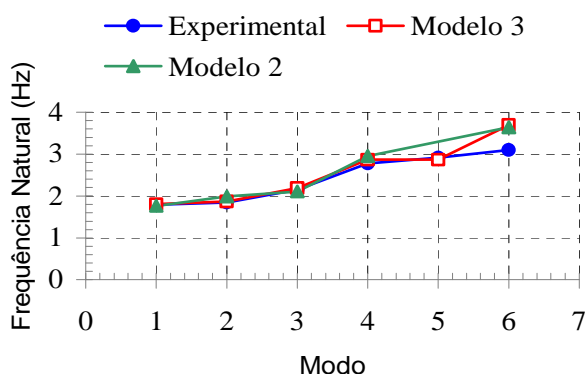
(a) Frequências Experimentais e Teóricas do Modelo 1



(b) Frequências Experimentais e Teóricas do Modelo 2



(b) Frequências Experimentais e Teóricas do Modelo 3

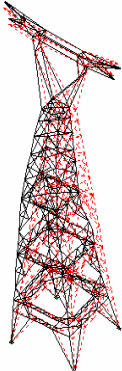
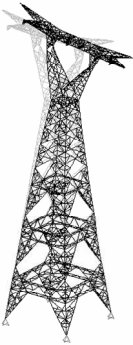
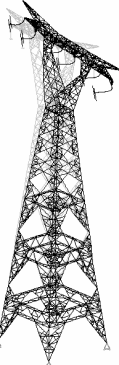
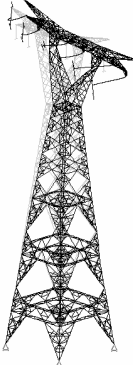
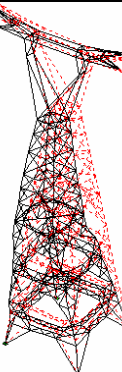
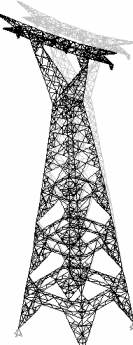
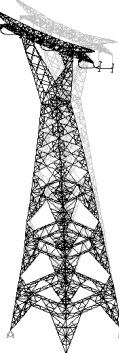
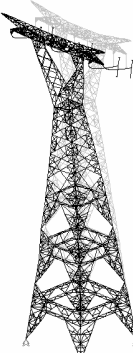
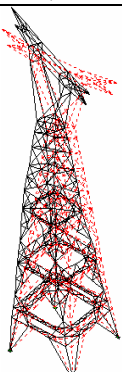
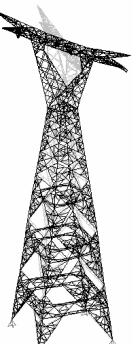
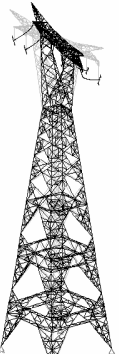

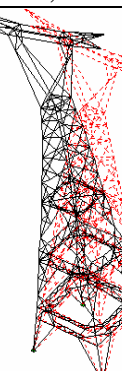
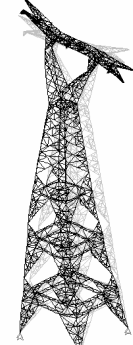

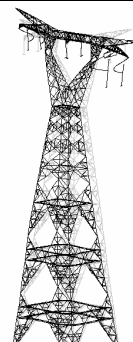


(c) Frequências Experimentais e Teóricas dos Modelos 2 e 3

Figura 12 - Comparação entre a Análise Computacional e experimental, considerando os modelos numéricos 1, 2 e 3.

As primeiras quatro formas modais obtidas nas análises numéricas e experimentais são apresentadas na TABELA 6. Diante dos resultados em ambas as análises deve-se destacar o fato de a quinta forma modal só aparecer bem definida no modelo numérico 3 que considera o acoplamento dos cabos condutores a torre. Assim sendo o modelo 3 reproduz, com maior precisão, o comportamento modal da torre em estudo até o quinto modo de vibração.

TABELA 6 – Comparação Entre as Formas Modais Experimentais (SSI-COV) e Teóricas (MEF)

Modos	Forma Modal Experimental (SSI-COV)	Formas Modais Teóricas (MEF)		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
1°				
	$f = 1,786\text{Hz}$	$f = 1,368\text{Hz}$	$f = 1,761\text{Hz}$	$f = 1,804\text{Hz}$
2°				
	$f = 1,846\text{Hz}$	$f = 1,463\text{Hz}$	$f = 1,985\text{Hz}$	$f = 1,868\text{Hz}$
3°				
	$f = 2,148\text{Hz}$	$f = 1,382\text{Hz}$	$f = 2,107\text{Hz}$	$f = 2,186\text{Hz}$
4°				

6 CONCLUSÕES

A inclusão da barra de pórtico espacial representando a cadeia de isoladores conduz a significativas alterações nos parâmetros modais da torre. Observou-se que a precisão na modelagem do acoplamento entre os cabos condutores e isoladores com a torre são fundamentais para reproduzir o comportamento da torre. Com base nos resultados das análises realizadas, verificou-se que os parâmetros modais dos cabos predominam no sistema estrutural formado pela torre-isoladores-cabos. Diante dessa constatação, pode-se inferir que o comportamento dinâmico de um ou mais cabos que vibrando isoladamente ou em conjunto podem, desta forma, excitar o sistema estrutural como um todo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletronorte S.A. e ao CNPQ pelo suporte financeiro dispensado para realização deste trabalho, e também ao engenheiro Jean Rodrigo Aguilera que ajudou no desenvolvimento deste trabalho, principalmente no que diz respeito aos ensaios experimentais realizados na torre de transmissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMADOR, S. D. R. Programa Computacional com Interface Gráfica para Identificação Estocástica de Parâmetros Modais de Estruturas Civas - Aplicação em Pontes e Torres de Linha de Transmissão. (Dissertação). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2007.
- [2] BLESSMANN, J. Acidentes Causados Pelo Vento. Rio Grande de Sul, RS, Brasil. 2003
- [3] SOUZA, R. M. D. Desenvolvimento de um sistema de Análise e Monitoração On-line para Previsão de Falhas Estruturais em Torres de Linhas Aéreas de Transmissão. Projeto de Pesquisa -. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, UFPA, Brasil, 2002.
- [4] RODRIGUES, R. S., R. C. BATTISTA, *et al.* Desvendando o Mecanismo Dinâmico de Colapso de Torres de Linhas de Transmissão sob Ação de Forças de Vento. XXIX Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Mendoza, Argentina, 2000.
- [5] LOREDO-SOUZA, A. M. e A. L. DAVENPORT. Resposta de Torres de Transmissão à Ação do Vento. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. Punta Del Este, Uruguai, 2000.
- [6] AMADOR, S. D. R., L. A. C. VELOSO, *et al.* Full-Scale Experimental Modal Analysis of an Overhead Transmission Line Tower Crossing Guamá River in The Amazon Region. Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV13). Vienna, Austria, 2006.
- [7] AMADOR, S. D. R., R. M. DE SOUZA, *et al.* Full-Scale Experimental Modal Analysis of an Overhead Transmission Line Tower Crossing Guamá River In The Amazon Region. The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration. Austria, 2006.
- [8] CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures: theory and applications to earthquake engineering. University of California At Berkeley, UCB, Estados Unidos. 1995
- [9] PEETERS, B. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. (Ph. D. thesis). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 2000.
- [10] MAIA, N., J. SILVA, *et al.* Theoretical and Experimental Modal Analysis. England: ed. Research Studies Press. 1996
- [11] EWINS, D. J. Modal Testing: Theory and Practice. England: Research Studies Press LTD. 1984
- [12] ALLEMANG, R. J. Vibrations: Experimental Modal Analysis, Course Notes. Structural Research Laboratory, University of Cincinnati, OH, USA., 1999.