

# Sistema para Análise de Segurança e Monitoração Estrutural de Torres de Linhas de Transmissão

R.M. de Souza, S.D.R. Amador, M.B.C. Rosa, E.M.L. Silva, L.A.C.M. Veloso, R.A.C. Sampaio, J.P.Rosa Neto, A. Castro, M. J. Sousa, B. Bastos, M. Cabral, J.C.W.A. Costa, A.B.R. Klautau Jr, N.S. Soeiro - UFPA, P. E. D. Almeida, J. C. L. Freitas - ELETRONORTE

**Resumo** – Apresentam-se os resultados de um projeto de P&D realizado pela UFPA e Eletronorte, tendo como objetivo o desenvolvimento de um sistema para análise de segurança e monitoração para previsão de falhas estruturais de torres de linhas de transmissão (LT). Como protótipo para teste, foi escolhido um trecho da LT de 230 kV Vila do Conde – Guamá, referente à travessia sobre o Rio Guamá, localizado em Belém-PA. O estudo abrangeu diversas atividades, dentre as quais se podem destacar: a) desenvolvimento de software para pré-processamento gráfico das torres; b) criação de modelos de elementos finitos; c) determinação do carregamento do vento; d) análise estrutural dos modelos; e) verificação da segurança através de critérios normativos; f) monitoração da estrutura; g) monitoração dos cabos; h) desenvolvimento do protótipo de sistema de monitoração on-line; i) desenvolvimento de *software* para extração de parâmetros modais. Os resultados obtidos mostram que o sistema é bastante viável e apropriado para a finalidade proposta.

**Palavras-chave** — Linhas de Transmissão, Análise de Segurança, Monitoração Estrutural, Método dos Elementos Finitos, Vento

## I. INTRODUÇÃO

Diversas pesquisas têm sido realizadas recentemente a nível internacional sobre o comportamento estrutural de torres de Linhas de Transmissão (LT) de energia elétrica [1]-[7].

Devido às grandes dimensões geográficas do Brasil, e a grande quantidade de Linhas de Transmissão, totalizando milhares de quilômetros no país, uma forte preocupação das empresas concessionárias de energia diz respeito ao estado de manutenção das estruturas das LT's no país. Existe uma preocupação especial atualmente com as torres e cabos que já apresentam sinais de envelhecimento, em função do longo período de operação.

Um dos fatores mais importantes que devem ser considerados na análise de segurança de uma torre de LT, refere-se à solicitação provocada pelo vento [8], [9]. Já se observou a ocorrência de vários casos de queda (destruição total) de torres de LT's no Brasil [10]-[12], trazendo diversos trans-

tornos e prejuízos de ordem econômica às empresas concessionárias.

Como exemplo deste tipo de acidente destaca-se o ocorrido em 23 de setembro de 2004, no estado do Mato Grosso. Nesta ocorrência, ventos da ordem de 100 Km/h derrubaram quatro torres componentes da LT 230 KV Caxipó-Sinop, localizadas entre Nova Muntum e Lucas do Rio Verde, no norte do estado [12]. A Figura 1 mostra uma das quatro torres colapsadas.



Figura 1 - Torre colapsada, componente da LT de 230 KV Caxipó-Sinop no Estado do Mato Grosso [12].

Como uma das causas mais comuns para colapsos desta natureza, tem-se o carregamento dinâmico do vento, atuando na estrutura e nos cabos. Este é um problema de fundamental importância no projeto de estruturas das torres das LT's.

Na ocorrência de falhas dessa natureza, além do custo de reparo dos condutores, dispositivos de fixação, e reconstrução de toda a estrutura das torres, existem também os prejuízos decorrentes da interrupção de transmissão de energia elétrica, além das pesadas multas impostas à empresa responsável pela transmissão.

Neste contexto, em especial, destacam-se as características importantes dos vãos das linhas de transmissão nas travessias de grandes rios na Amazônia, tal como os rios Guamá, Tocantins e Tapajós, onde devido à falta de proteção proporcionada pela vegetação e o grande corredor formado pelos rios, podem ocorrer elevados níveis de vibração nos condutores [13] e nas estruturas de suporte. Estudos de vibrações das estruturas e em condutores induzidos pelo vento, especificamente direcionados às condições climáticas, de relevo e vegetação típicos nas travessias de grandes rios da Região Amazônica eram praticamente inexistentes, sendo o presente estudo um passo importante na busca de um maior desenvolvimento científico e tecnológico sobre este assunto

Este trabalho foi financiado pela Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil, com apoio também do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico.

R. M. de Souza é professor adjunto do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, e é o coordenador do projeto de P&D referente a este artigo (e-mail: [remo@ufpa.br](mailto:remo@ufpa.br)).

P.E.D. Almeida é engenheiro da Eletronorte – CPAE – Divisão de Engenharia de Equip. LTs e Apoio Logístico, e é o gerente deste projeto de P&D (e-mail: [peda@eln.gov.br](mailto:peda@eln.gov.br)).

[11]. Com o desenvolvimento do presente projeto de pesquisa, vários trabalhos desenvolvidos na Região Norte, referentes à análise de torres de Linhas de Transmissão foram publicados [14]-[22].

## II. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do trabalho foi realizar uma análise de segurança e desenvolver um sistema de monitoração de torres de transmissão de grande altura (em especial em travessias de grandes rios da Amazônia), a fim de serem previstas falhas estruturais. Foi previsto um estudo piloto em um trecho da LT 230 kV Vila do Conde-Guamá, referente à travessia do Rio Guamá.

Dentre os diversos objetivos específicos do presente trabalho, destacam-se:

- 1) Identificar estruturas das LT's com problemas potenciais de vibração e possíveis falhas mecânicas.
- 2) Avaliar no campo a resposta de vibração dos condutores, e elementos estruturais das torres, permitindo uma análise do nível de segurança mecânica das LT's.
- 3) Elaborar modelos computacionais apropriados para a simulação por elementos finitos do problema de vibração do sistema.
- 5) Estabelecer um sistema de monitoração on-line das estruturas das torres, baseada na verificação periódica das assinaturas dinâmicas dos sistemas estruturais, a fim de se detectar possíveis danos e fragilizações destas estruturas.

## III. DESCRIÇÃO DO TRECHO DE LT EM ESTUDO

A Linha de Transmissão em estudo liga a Subestação de Vila do Conde, no município de Barcarena-PA, à Subestação do Guamá, no município de Belém-PA (Figura 2).

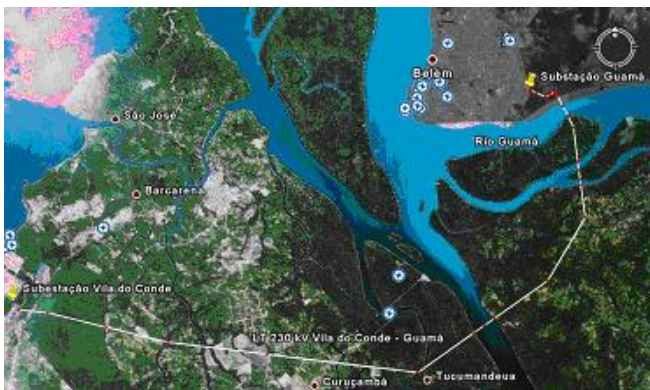


Figura 2 - Vista Geral da LT 230kV Vila do Conde – Guamá  
(Fonte: Google-Earth)

O Rio Guamá possui aproximadamente 1.300m de largura na região de travessia LT 230 kV Vila do Conde – Guamá. O trecho sob estudo dessa linha é formado por três torres autoportantes de suspensão que suportam seis feixes duplos de cabos condutores de energia e dois cabos pára-raios. As torres estão dispostas na travessia do rio da seguinte forma: uma torre situada no meio do rio e as outras duas localizadas em cada uma das margens (formando dois vãos de aproximadamente 650m). Estas torres possuem altura de, aproximadamente, 75m a 80m, sendo em estrutura metálica treliçada constituídas de barras de perfil de aço laminado e galvanizado tipo cantoneira (seção “L”). A Figura 3 mostra

uma vista de duas das três torres principais da travessia.

As três torres da travessia são do mesmo tipo básico (S03D), sendo que a torre localizada no meio do rio possui perna de 13,5m de altura, e as torres situadas nas margens possuem pernas de 7,5m de altura.



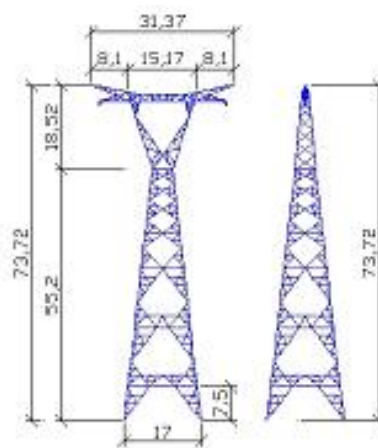
Figura 3 - Vista geral de torres da travessia sobre o rio Guamá

## IV. ANÁLISE ESTRUTURAL

Uma das etapas principais do projeto refere-se à análise estrutural das torres da travessia. Este estudo consistiu na simulação computacional através do Método dos Elementos Finitos (MEF) [23] do comportamento estático e dinâmico das estruturas, envolvendo as atividades descritas a seguir.

### A. Modelos geométricos da estrutura das torres

Inicialmente foram desenvolvidos modelos geométricos tridimensionais da estrutura das torres no programa AutoCAD, a partir dos projetos estruturais (plantas). Os modelos criados possuem cerca de 3.000 barras, as quais são representadas por linhas simples (entidade *line* do AutoCAD), e 1.500 nós. Uma vista da estrutura real, e o modelo geométrico da torre situada na margem direita do rio são mostrados na Figura 4, com indicação das principais dimensões.



(a) (b)

Figura 4 – Torre situada na margem direita. (a) Estrutura real. (b) Modelo geométrico, com vista frontal e lateral

A Figura 5 mostra os modelos geométricos das torres S0D3 estudadas.

### B. Programa para pré-processamento gráfico

Como um dos objetivos do trabalho foi a realização de análises estruturais precisas, optou-se por utilizar programas

avançados de análise estrutural baseados no MEF, tais como os programas *SAP-2000*, *Ansys* e *OpenSees* [24], sendo que este último consiste em um programa de código fonte aberto, desenvolvido Universidade da Califórnia-Berkeley. Entretanto, como o programa *OpenSees* não dispõe de uma interface gráfica para pré-processamento, foi desenvolvido como atividade do projeto, um pré-processador gráfico interativo (PPG) de estruturas aperticadas tridimensionais, implementado através da linguagem *Visual Basic for Application* (VBA), disponível no ambiente do programa *AutoCAD*. A seguir é feita uma breve apresentação deste programa, sendo que uma descrição detalhada é feita em [16].

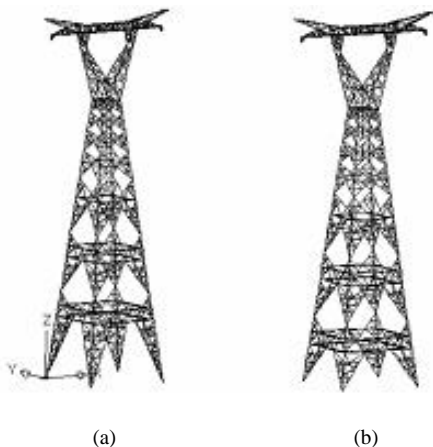


Figura 5 – Modelos geométricos das torres S0D3 analisadas. (a) torre com perna de 13,5m de altura. (b) torre com perna de 7,5m.

No PPG, a partir do modelo geométrico das torres criado convencionalmente no *AutoCAD*, são definidas as propriedades necessárias para as análises estruturais, tais como propriedades do material, dados das seções, posição das seções em relação ao sistema de coordenadas globais, carregamentos devido ao vento e restrições nodais.

O PPG possui várias caixas de diálogo através das quais o usuário pode interagir facilmente com o programa. Para facilitar a interação com o usuário, foi criada uma barra de ferramentas (*toolbar*) no *AutoCAD*, através da qual o usuário executa as rotinas responsáveis pelo processamento de estrutura, edição de barras, edição de nós, renumeração de barras, renumeração de nós, atualização de modelos processados e copiados (*refresh*), cálculo da carga devido ao vento, e geração de arquivos de dados para o *OpenSees* [24] ou *Ansys*. A Figura 6 mostra uma vista geral do ambiente *AutoCAD* com uma das janelas do PPG ativas.

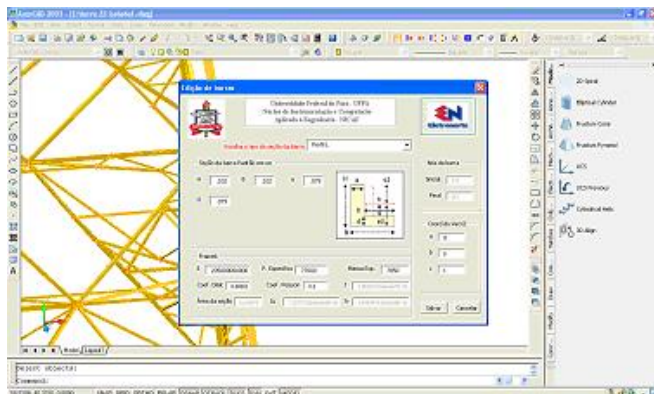


Figura 6 – Janela do Pré-Processador Gráfico no ambiente *AutoCAD*.

A Figura 7 mostra a barra de ferramentas do PPG, com os botões disponíveis, e com uma breve descrição da função associada a cada um destes botões.



Figura 7 – Barra de ferramentas do Pré-Processador Gráfico.

Antes das barras da estrutura serem geradas, o programa permite ao usuário definir valores padrão (*default*) que serão utilizados para todas as barras, tais como módulo de elasticidade, massa específica, tipo de perfil, etc.

Um dos principais aspectos a serem considerados na análise de estruturas aperticadas, e tratado de forma apropriada pelo PPG, diz respeito à definição do sistema de eixos locais adotado para cada barra, o qual estabelece a orientação da seção da barra em relação ao sistema de eixos cartesianos globais da estrutura.

Depois que as barras são criadas, as propriedades da seção podem ser editadas utilizando-se a janela de edição do PPG mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Janela de edição de barras do Pré-Processador Gráfico.

Após a correta definição das propriedades da seção das barras, estas podem ser visualizadas como objetos tridimensionais sólidos no espaço (ao invés de simples linhas), conforme ilustra a Figura 9, a qual mostra também a numeração de barras e nós.

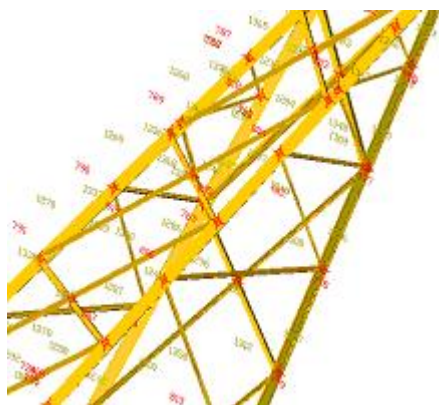


Figura 9 – Detalhe de parte da estrutura, mostrando as barras da treliça como objetos sólidos (com a forma apropriada da seção).

### C. Determinação do carregamento do vento

Com base nos modelos geométricos desenvolvidos na etapa anterior, o programa PPG desenvolvido permite a determinação automática dos carregamentos do vento de acordo com a norma NBR 6123/88 [25], considerando o vento atuando a 0, 45 e 90 graus com a direção principal da linha. Para isso, são realizados os seguintes passos:

- Definição dos parâmetros básicos;
- Divisão da estrutura em módulos;
- Determinação da pressão, índices de área exposta, das forças de arrasto, em cada módulo;
- Determinação das cargas nodais referentes às forças de arrasto.

Os parâmetros básicos fornecidos pelo usuário são: a velocidade básica do vento  $V_0$ ; os fatores topográficos  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ ; o fator de rajada  $F_r$ ; o expoente  $p$  da lei potencial de variação de  $S_2$ ; e o menor lado da estrutura  $b$ . Todos estes parâmetros são definidos de acordo com a NBR 6123/88 [25].

Depois das edições necessárias, pode-se gerar o arquivo de entrada de dados para os programas *OpenSees* ou *Ansys*.

### D. Análises desenvolvidas no programa SAP2000

Após a criação do modelo geométrico e da determinação do carregamento do vento, as estruturas das torres foram analisadas primeiramente no programa *SAP2000*. Na modelagem das estruturas foram utilizados elementos de pórtico espacial. Foram desenvolvidas diversas simulações computacionais das torres [19].

Realizou-se inicialmente uma análise estática, levando em conta o carregamento permanente (peso próprio da estrutura, dos cabos condutores, pára-raios, cadeias de isoladores, e demais acessórios), além da pressão do vento como um carregamento estático, de acordo com prescrições normativas.

Na Figura 10 são mostrados os carregamentos aplicados em todos os nós da estrutura da torre situada nas margens (com perna de 7,5m), correspondentes ao vento atuando a 0, 45 e 90 graus.

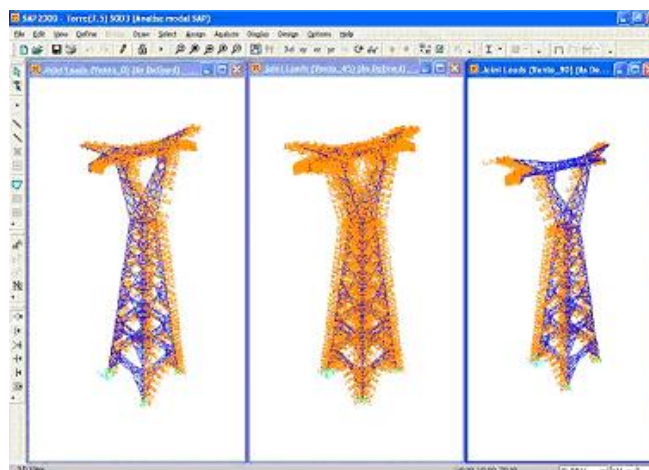


Figura 10 – Cargas de vento aplicadas no modelo computacional

Foi realizada também uma análise modal para determinação das frequências naturais e respectivos modos de vibração. As primeiras quatro formas modais e as respectivas frequências naturais são apresentados na Figura 11.

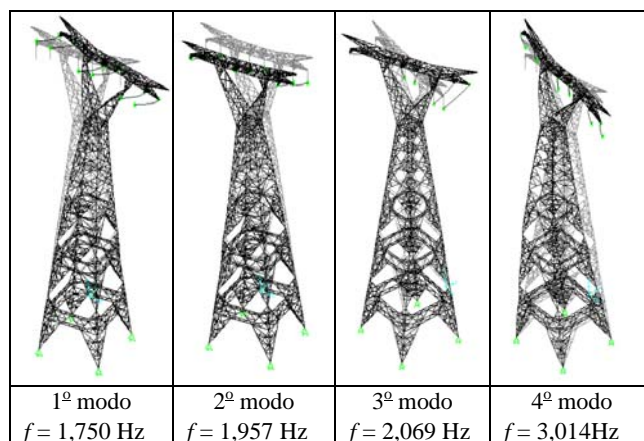


Figura 11 – Resultados da análise modal computacional obtidas com o Programa SAP2000.

A influência da rigidez da cadeia de isoladores também foi considerada na análise, com elementos de barra.

De acordo com a norma NBR 8850/2003 [26], “Uma análise dinâmica torna-se necessária para suportes não usuais, muito esbeltos, cuja frequência natural seja menor que 2 Hz. Não se recomendam os suportes com frequência natural inferior a 1 Hz”.

Deve-se observar o fato da frequência fundamental estar justamente na faixa entre 1 e 2Hz (Figura 11), ou seja, acima do valor considerado mínimo, mas abaixo do valor necessário para que a análise dinâmica da estrutura seja dispensada.

Assim, foi realizada também uma simulação no domínio do tempo do comportamento dinâmico estrutural dos trechos de interesse, utilizando-se o método do vento sintético [27], com a finalidade de determinação das amplitudes de aceleração e deslocamentos, assim como dos esforços atuantes nos elementos estruturais das torres. Mais detalhes sobre a aplicação deste método nas torres da LT em estudo são apresentados em [20]. A título de ilustração dos resultados, apresenta-se na Figura 12, a configuração deformada correspondente a um determinado passo de tempo da análise

dinâmica, considerando o vento incidindo a  $0^\circ$ .

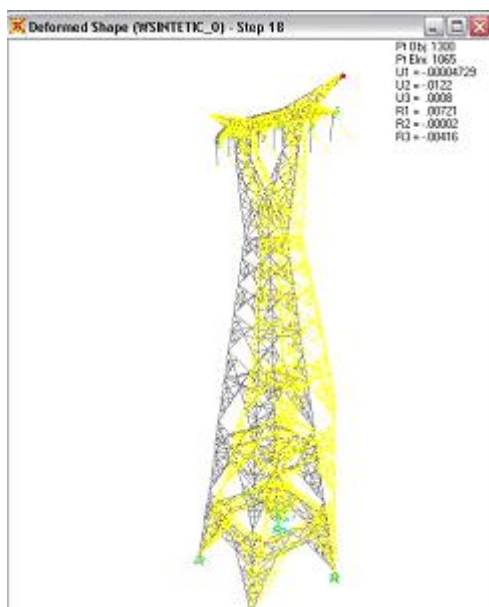


Figura 12 – Configuração deformada correspondente à análise dinâmica no domínio do tempo.

#### E. Análises desenvolvidas no programa OpenSees

Foram realizadas simulações do comportamento não linear estrutural considerando a interação entre os cabos e as torres. Para isso foi utilizado um elemento de barra espacial, baseado na formulação co-rotacional [28], para consideração da não linearidade geométrica dos elementos das torres e dos cabos.

Através do programa OpenSees foi possível determinar os efeitos de não linearidade geométrica nas estruturas das torres. Para isso, foram estudadas combinações de ações, levando em conta a carga permanente (peso próprio da torre, cabos e isoladores), e vento a  $0$  e  $45$  graus, por serem considerados os mais críticos.

A Tabela I apresenta o deslocamento horizontal no sentido longitudinal em um nó no topo das estruturas (para os dois tipos de torres) para as diversas combinações de carregamento (com fatores de majoração de carga iguais a 1).

TABELA I  
RESULTADOS REFERENTES À INFLUÊNCIA DA NÃO LINEARIDADE GEOMÉTRICA NOS DESLOCAMENTOS

Torre	Carregamento	Deslocamento no topo da torre (mm)	
		Análise Linear	Análise Não-Linear
Com perna de 7,5m	Perman. + $V0^\circ$	55,12	55,26
	Perman. + $V45^\circ$	38,28	38,38
Com perna de 13,5m	Perman. + $V0^\circ$	49,61	49,73
	Perman. + $V45^\circ$	28,83	28,89

Foi realizada também uma análise não linear aumentando-se gradativamente o valor da carga. Os resultados para a torre com perna de 13,5m (situada no meio do rio) são mostrados na Figura 13. Observa-se que o efeito não linear nesta estrutura não é considerável. Isto se justifica pelo fato do peso próprio da estrutura ser pequeno comparado com o carregamento devido ao vento.

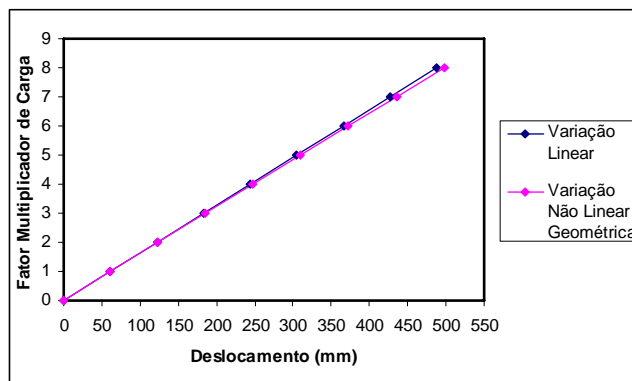


Figura 13 – Trajetórias de equilíbrio considerando comportamento linear e não linear, para a torre com perna de 13,5m.

#### V. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS ATRAVÉS DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

A partir dos resultados das análises estruturais apresentados na seção anterior, foi realizada a verificação de segurança da estrutura das torres, tendo como base os critérios normativos das normas NBR 8850 [26], e NBR 5422 [29].

Para a verificação do dimensionamento dos elementos estruturais foram implementadas diversas planilhas no programa Excell, conforme apresentado em [17] e [18].

Além das normas citadas acima, também foi utilizada a norma americana AISC - LRFD a qual é empregada no programa computacional SAP2000 para verificação de projeto.

A Figura 14 mostra esquematicamente, através de uma escala de cores, um resultado intermediário do processo de verificação de dimensionamento das barras no programa SAP2000. Percebeu-se inicialmente que existiam discrepâncias nos resultados de verificação obtidos em função dos comprimentos de flambagem adotados pelo programa. Quando estes comprimentos foram ajustados, foi verificado que a capacidade resistente de todas as barras é maior do que as respectivas solicitações.

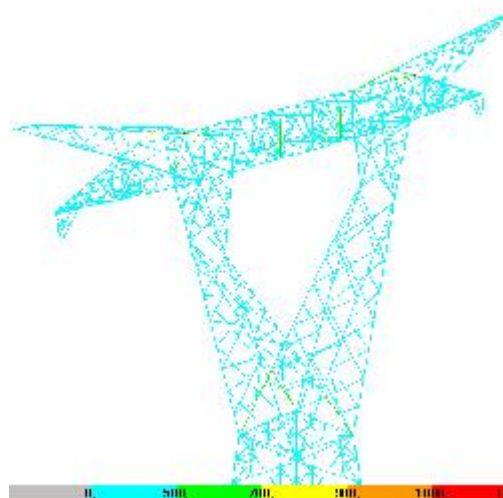


Figura 14 – Resultados da verificação do dimensionamento das barras da torre, através do programa SAP2000.

#### VI. LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Essa atividade consistiu em visitas às torres da travessia de interesse, e monitoramento da estrutura e cabos através de equipamentos específicos para esta finalidade.

### A. Instrumentação da estrutura da torre com extensômetros elétricos

Devido à maior facilidade de acesso, a torre localizada na margem direita do rio foi escolhida para ser instrumentada primeiro. Foram utilizados extensômetros elétricos acoplados a um sistema de aquisição de sinais, modelo spider 8, marca HBM, conforme apresentado na Figura 15;

Os extensômetros foram posicionados nos montantes da torre, a cerca de 1,5m acima do ponto de fixação com as fundações em concreto (Figura 15.a).



Figura 15 – Instrumentação dos montantes da torre com extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*)

Os resultados da instrumentação realizada com os extensômetros (*strain gages*) são apresentados na Figura 16.

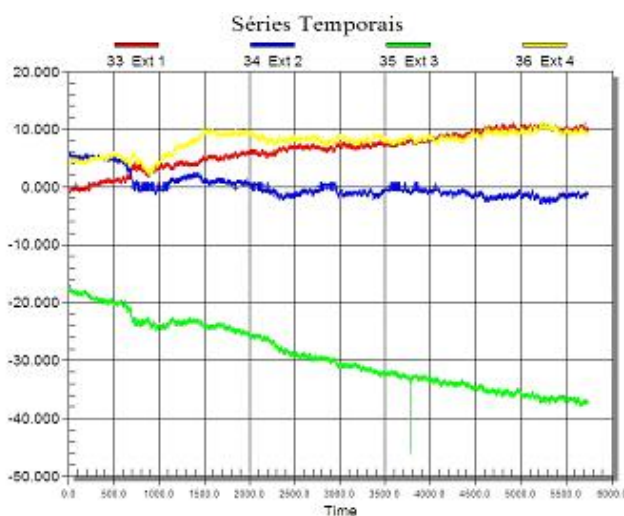


Figura 16 – Variação das deformações nos montantes da torre avaliadas com os extensômetros elétricos

É importante destacar que como os extensômetros foram instalados com a estrutura já em serviço, os valores médios correspondem apenas às variações de deformações causadas pelo vento e variações de temperatura. Portanto, o peso próprio não pode ser levado em conta nesta análise.

### B. Instrumentação da estrutura da torre com acelerômetros piezo elétricos

Em uma etapa posterior, foi realizada a monitoração da torre com acelerômetros piezoelétricos de baixa frequência, marca Wilcoxon, conectados a um sistema de aquisição de dados ADS 1000, marca Lynx. Foram instrumentadas duas seções (com diafragmas) posicionadas ao longo da altura da torre, sendo cada seção monitorada por três acelerômetros, a

fim de se determinar as duas translações e a rotação destas seções, conforme ilustrado na Figura 17.

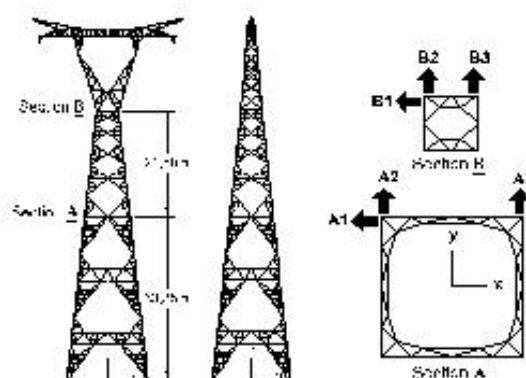


Figura 17 – Arranjo para posicionamento dos acelerômetros

A Figura 18 mostra os acelerômetros instalados nas posições A1 e A2.

A título de ilustração, a Figura 19 mostra a série temporal obtida a partir do sinal do acelerômetro referente à posição A3, após a redução dos erros de tendência e de ganho. A Figura 20 apresenta o espectro correspondente ao sinal temporal [14].



Figura 18 – Acelerômetros instalados nas posições A1 e A2.

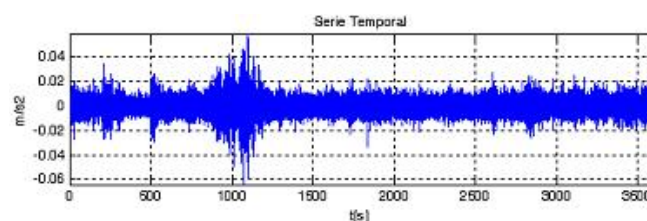


Figura 19 – Série temporal do acelerômetro referente à posição A3.

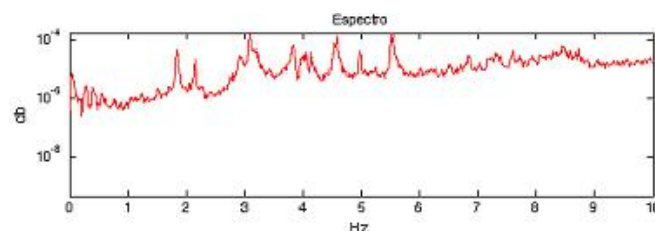


Figura 20 – Espectro referente a série temporal do acelerômetro A3.

### C. Monitoração dos condutores através de vibrógrafo

Os cabos condutores foram monitorados através do método padrão de amplitude de flexão do IEEE [30], utilizando-

se um vibrógrafo marca Rocrest, modelo PAVICA, para medição do deslocamento vertical do condutor a 89 mm do último ponto de contato no grampo de suspensão. A Figura 21 mostra o vibrógrafo PAVICA sendo testado na bancada de vibração de cabos condutores construída no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, a qual possui comprimento aproximado de 22m [31]. Esta bancada foi construída visando reproduzir as condições análogas às encontradas na linha real, sendo que a excitação é provocada por um gerador de vibrações (*shaker*), conforme ilustra a Figura 22 (arranjo geral) e a Figura 23 (arranjo dos equipamentos, mostrando apenas um vão).



Figura 21 – Vibrógrafo Pavica sendo testado na bancada de vibração de cabos do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA [31].

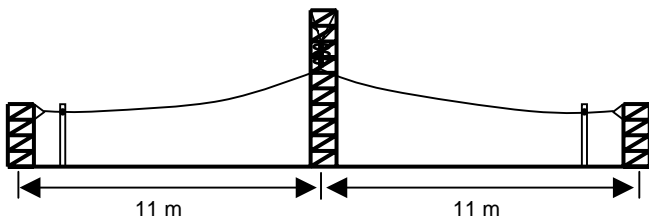


Figura 22 – Bancada de vibração de cabos condutores do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA [31].

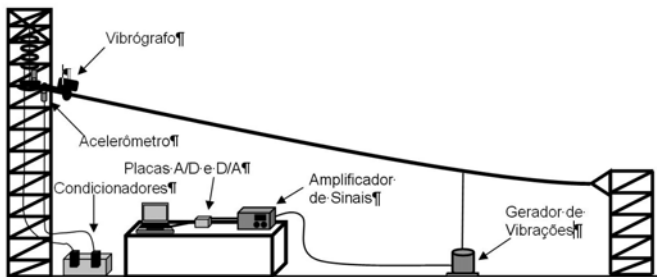


Figura 23 – Arranjo dos equipamentos na bancada de testes de vibração de cabos condutores do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA [31].

A Figura 24 mostra o vibrógrafo PAVICA sendo instalado no cabo condutor do ponto de suspensão na torre situada na margem direita da travessia do Rio Guamá.



Figura 24 – Vibrógrafo Pavica sendo instalado em um cabo condutor do trecho de travessia em estudo.

Com este equipamento, foi possível realizar as seguintes tarefas: medir e armazenar as frequências e amplitudes dos ciclos de vibração; processar estatisticamente os resultados, e obter uma estimativa da vida útil dos condutores em estudo de acordo com a recomendação da CIGRÉ [32]. Os resultados destas análises são apresentados em [31].

## VII. SISTEMA DE MONITORAÇÃO ON-LINE

Foi montado um projeto piloto do sistema de monitoração on-line, compondo-se uma rede de comunicação interligando os sensores utilizados. A monitoração constitui-se basicamente na aquisição e transmissão de dados que são fornecidos por uma rede de sensores instalados em pontos estratégicos das torres, abrangendo acelerômetros, extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) e anemômetros.

### A. Implementação do Sistema de Monitoração On-line

A rede de sensores é gerenciada por um módulo de controle responsável pelo sincronismo das medidas de vibração e também pelo envio dos dados dos sensores para a estação de tratamento dos dados. Para a comunicação do módulo de controle com os sensores foi implementada a comunicação serial utilizando-se o padrão RS485, de modo que uma eventual falha em um dos módulos, não prejudica a comunicação dos demais. A Figura 25 apresenta a configuração do sistema de aquisição e transmissão de dados.

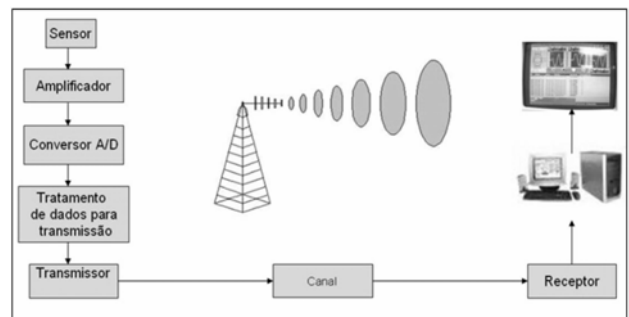


Figura 25 – Configuração do sistema de transmissão de dados sem fio.

A transmissão dos dados do módulo de controle para a estação de tratamento dos dados ocorre através de uma rede sem fio padrão IEEE 802.11b operando na frequência de 2.4GHz e com capacidade de 11Mbps. A topologia da rede sem fio é ilustrada na Figura 26, onde as torres representadas correspondem às três torres da travessia do Rio Guamá.



Figura 26 – Configuração do sistema de transmissão de dados sem fio.

Conforme mostra a Figura 26, a comunicação sem fio se dá através de antenas instaladas nas torres que são direcionadas para uma antena omnidirecional instalada no alto de uma caixa d'água no campus da UFPA. Uma outra antena omnidirecional recolhe os dados recebidos e os envia para o prédio do Laboratório de Engenharia Elétrica e Computação (LEEC). No LEEC, os dados são analisados através de um software desenvolvido em Java. Na estação de tratamento dos dados, são geradas informações para análise do nível de segurança estrutural das torres. A Figura 27 mostra as distâncias entre as antenas do sistema de transmissão de dados.



Figura 27 – Distância entre as antenas do sistema de comunicação.

## B. Arquitetura do Hardware para Captura de Sinais

A arquitetura do *hardware* para a captura de sinais é descrita nos itens seguintes.

### B.1. Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados abrange os seguintes dispositivos:

- Sensor: dispositivo utilizado para capturar as informações de interesse em determinados pontos da torre. A ideia básica de um sensor (no problema em questão) é transformar uma grandeza mecânica ou térmica em um sinal elétrico. Os sensores considerados no sistema são utilizados para medir aceleração (acelerômetros), deformação (extensômetros elétricos de resistência), temperatura (termômetros), e direção e velocidade do vento (anemômetros);
- Condicionador de sinal: dispositivo que tem a função de alimentar os sensores, assim como de adaptar (filtrar e amplificar) os sinais obtidos através dos sensores. Devido à situação especial do sistema de monitoração *on-line* em discussão, foram necessários o projeto e construção deste

condicionador de sinais pela própria equipe da UFPA. A Figura 28 mostra uma imagem deste módulo condicionador desenvolvido na UFPA;

- Conversor Analógico-Digital (A/D): dispositivo utilizado para converter o sinal analógico obtido pelo condicionador em um sinal digital. Para esta finalidade foi utilizado o conversor do microcontrolador PIC16F88.

Além da função de digitalização, o PIC16F88 recebe comandos e se comunica com o módulo de controle da rede de sensores.

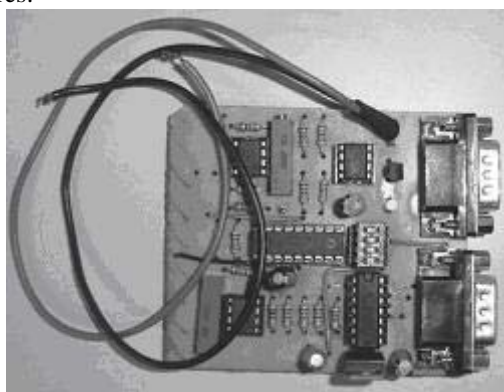


Figura 28 – Módulo condicionador de sinal.

### B.2. Firmware

Para o desenvolvimento do *Firmware* do microcontrolador PIC, foi utilizada a linguagem de programação *Assembly* e bibliotecas específicas para o microcontrolador. A lógica de funcionamento do *Firmware* está descrita no fluxograma apresentado na Figura 29.

Para coletar os dados dos microcontroladores PIC foi utilizado o RCM 2200 da marca Z-World. O RCM 2200 é um módulo avançado de controle embarcado que contém um poderoso microprocessador Rabbit 2000, além de uma memória flash de 56KB, 128KB de memória RAM, portas digitais de entrada e uma porta Ethernet 10Base-T.

Depois de enviar um comando para captura dos sinais, o módulo RCM 2200 recebe, através de uma de suas portas digitais, paralelamente os bits correspondentes aos sinais enviados pelos microcontroladores. Somente após o recebimento da informação atual em todos os sensores que fazem parte do sistema, os dados são empacotados e enviados via TCP/IP para o ponto de acesso localizado nas antenas instaladas nas torres. Esse processo de captura de dados acontece periodicamente, obedecendo à frequência de amostragem na captura dos sinais.



Figura 29 – Fluxograma do *Firmware*.



A programação do sistema de monitoração *on-line* foi desenvolvida na linguagem Dynamic C, uma adaptação da linguagem C usada em controladores e sistemas baseados em microprocessadores Rabbit da companhia Z-World. O Dynamic C provê extensões em relação à linguagem C, tais como variáveis compartilhadas e protegidas, além de dar suporte às operações multitarefa. Para a utilização do módulo foi usado um kit de desenvolvimento para o Rabbit 2000.

### B.3. Software

O *software* responsável pelo processamento dos sinais dos sensores instalados nas torres foi feito em Java, utilizando conexão via *socket* para receber os dados oriundos dos sensores. É fornecido um endereço e uma porta para conexão com o RCM 2200. Posteriormente a solicitação é feita e espera-se a resposta. Após a conexão ter sido estabelecida, os pacotes que guardam as informações dos sensores são enviados pelo módulo RCM 2200 via rede sem fio, o *software* os recebe, e finalmente os desempacota.

Os dados recebidos são divididos em quadros específicos para cada sensor, os cabeçalhos de informação contidos nos quadros são processados e retirados e os sinais correspondentes aos sensores individualmente são desenhados, mostrando a situação em tempo real das grandezas medidas pelos sensores instalados nas torres. No *software*, o usuário pode visualizar o gráfico de todos os sensores, bastando selecionar o sensor o qual deseja verificar o comportamento naquele momento. Para desenho dos gráficos foi utilizado o pacote *JFreeChart* (para mais detalhes, ver [33]).

## VIII. EXTRAÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS

Na determinação experimental dos parâmetros modais de estruturas de pequeno porte, geralmente são utilizados dados de entrada (carregamento de excitação) e saída (deslocamentos, acelerações, etc). Entretanto, como a determinação precisa do carregamento dinâmico induzido pelo vento em estruturas civis de grandes dimensões é virtualmente impossível, neste tipo de situação devem ser utilizados métodos baseados nas medições das respostas dinâmicas apenas.

Diante dessas dificuldades, os métodos de identificação modal aplicados somente sobre as respostas (*output-only*) determinadas com auxílio de transdutores de deslocamento, velocidade, e/ou ainda aceleração surgem como uma ferramenta importante para extração de parâmetros modais experimental de estruturas civis sujeitas a vibrações ambientes (causadas por exemplo, pelo vento ou tráfego de veículos). Dentre os vários métodos com essa finalidade existentes na literatura, pode-se destacar os métodos de Identificação por Subespaços Estocásticos (*Stochastic Subspace Identification* - SSI). O emprego destes métodos na identificação de estruturas complexas como pontes e torres mostraram-se bastante eficientes na extração dos parâmetros dessas estruturas, como mostram os estudos realizados em [34] e [35].

### A. Desenvolvimento de software para identificação de parâmetros modais

Os estudos apresentados em [34] e [35] mostram que os métodos estocásticos como de Identificação por Subespaços Estocásticos Baseados nas Covariâncias das Respostas de

Referência - SSI-COV (*Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification*) – e o de Identificação por Subespaços Estocásticos Baseados nos Dados de Resposta de Referência - SSI-DATA (*Data Driven Stochastic Subspace Identification*) - são bastante robustos e adequados para identificação modal de estruturas civis onde, geralmente, a natureza das forças de excitação é de difícil determinação. Pode-se dizer, que os métodos SSI-DATA e SSI-COV representam o estado da arte no que diz respeito à identificação modal de estruturas civis submetidas a vibrações ambientes.

Por esses motivos, os métodos SSI-DATA e SSI-COV juntamente com o MEF foram utilizados nesta pesquisa. Com essas ferramentas avaliaram-se os níveis de vibração nas estruturas através dos ensaios experimentais de vibração realizados com emprego de transdutores de aceleração (acelerômetros) e de sistemas de aquisição de dados apropriados para os ensaios de estruturas civis. Como já visto na seção IV. D., nas análises teóricas realizadas com o MEF foram criados modelos computacionais visando simular e reproduzir o comportamento dinâmico dessas estruturas.

Entre as várias atividades envolvidas nesse projeto, destaca-se o desenvolvimento de um programa computacional na MATLAB destinado à identificação modal de estruturas civis utilizando os métodos SSI-DATA e SSI-COV. O programa desenvolvido possui uma interface gráfica amigável que foi criada com os recursos do *Graphical User Interface* (GUI) do MATLAB. Com esse programa, foi possível realizar todas as análises experimentais e também identificar os parâmetros modais das estruturas estudadas.

Uma descrição detalhada do desenvolvimento teórico dos métodos SSI-DATA e SSI-COV é apresentada em [14].

O programa desenvolvido é composto de três módulos: **a)** o primeiro é destinado ao pré-processamento dos sinais de respostas coletados nos ensaios de vibração; **b)** o segundo é usado para incluir as informações do posicionamento dos sensores (acelerômetros) nos arquivos pré-processados no primeiro módulo; **c)** o terceiro módulo é constituído das ferramentas de identificação propriamente ditas onde os sinais processados no primeiro e no segundo módulos são identificados com auxílio de um diagrama de estabilidade a partir do qual é possível identificar as frequências naturais, os fatores de amortecimento e os respectivos modos de vibração.

Uma descrição mais detalhada de cada um desses módulos é apresentada a seguir.

#### A.1. Módulo para pré-processamento dos sinais respostas

A Figura 30 mostra o primeiro módulo destinado ao tratamento das séries temporais obtidas como respostas pelos acelerômetros instalados nas torres. A finalidade desse módulo é preparar os sinais para serem submetidos ao processo de identificação. Ele possui uma interface gráfica amigável, criada com recursos do *MATLAB* (*Graphical User Interface* – GUI), através da qual o usuário pode realizar operações visando reduzir as perturbações e imprecisões existentes nos sinais que possam comprometer ou, até mesmo, inviabilizar a estimação dos parâmetros modais da estrutura.

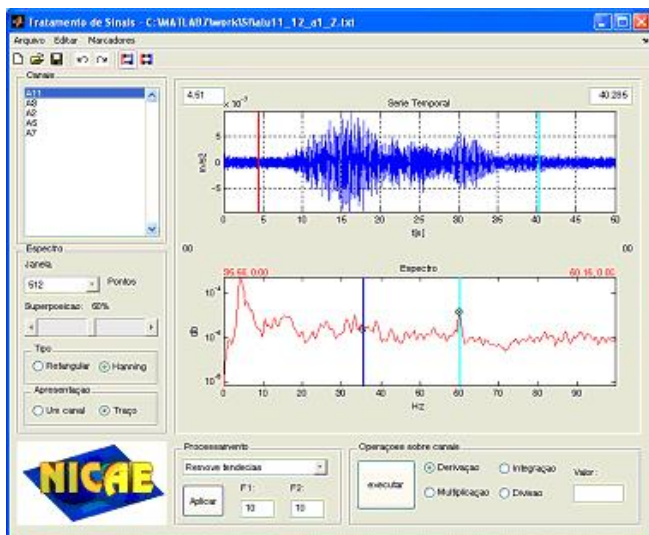


Figura 30 – Interface gráfica criada para tratamento dos sinais obtidos nos ensaios de vibração.

Uma vez que os dados da monitoração são acessados, o programa exibe as séries temporais e também os auto-espectros correspondentes a cada um dos canais. Um outro recurso importante disponibilizado nesse módulo corresponde às ferramentas de edição das séries temporais. Utilizando essas ferramentas é possível, por exemplo, excluir um canal, derivar e integrar os sinais no tempo e ainda multiplicá-los ou dividi-los por um valor escalar. O módulo possui outros recursos de edição que possibilitam, por exemplo, selecionar apenas um trecho das séries temporais e também selecionar a banda de frequência de interesse para posterior identificação. Para seleção dessa banda o módulo dispõe de um filtro Chebychev passa baixa do tipo I [14].

### A.2. Módulo para posicionamento dos acelerômetros

A finalidade do módulo de posicionamento dos acelerômetros é introduzir nos arquivos dos sinais de resposta as informações sobre o posicionamento, direção e sentido dos transdutores de aceleração utilizados nos ensaios de vibração. Essas informações são necessárias para viabilizar a identificação da forma modal associadas às frequências naturais que serão posteriormente identificadas no módulo de identificação de parâmetros.

A Figura 31 ilustra o procedimento de posicionamento dos acelerômetros ao longo da estrutura no qual são utilizados tanto os arquivos de respostas de todos os canais utilizados no arranjo, como também um arquivo esquemático da estrutura ensaiada. Na realidade, as informações contidas nesse segundo arquivo definem um modelo em elemento finitos simplificado da estrutura que é utilizado na construção da forma modal da estrutura.

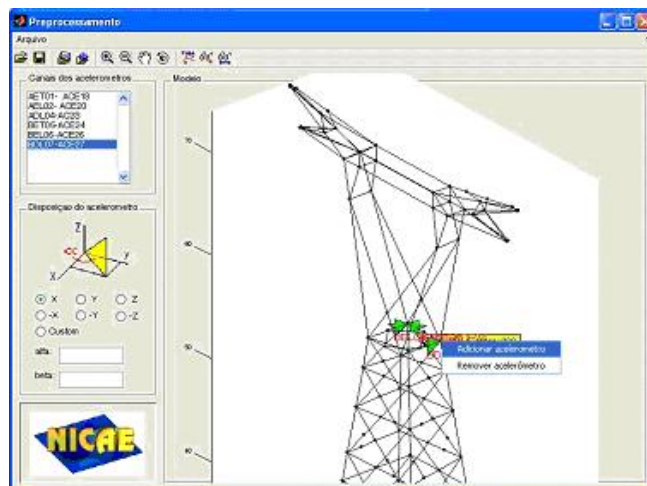


Figura 31 – Interface gráfica do módulo de posicionamento de acelerômetros.

Após a abertura de ambos os arquivos, basta o usuário do programa selecionar apropriadamente as opções mostradas no lado esquerdo da Figura 31. Após a seleção do canal desejado e também da direção e do sentido dos acelerômetros é necessário, em seguida, selecionar o nó da estrutura no qual o sensor correspondente ao canal anteriormente selecionado foi, de fato, instalado. Para selecionar esse nó, basta aproximar o cursor do mouse do nó desejado e, em seguida, pressionar o botão direito e escolher a opção “adicionar acelerômetro”, como mostra a Figura 31. Seguindo um procedimento semelhante ao anteriormente descrito, pode-se também remover um acelerômetro existente. Finalmente, quando todos os sensores são adicionados à estrutura, o operador do programa pode, então, salvar os sinais processados com as informações dos acelerômetros para que eles possam ser identificados no terceiro módulo do programa.

### A.3. Módulo para extração dos parâmetros modais

Após a etapa de tratamento realizado no primeiro módulo, os sinais de resposta tratados são recuperados no módulo de identificação. Este módulo é destinado à determinação dos parâmetros através dos métodos de identificação SSI-COV e SSI-DATA. Para tanto é necessário definir os sensores de referência, a ordem do modelo (número de graus de liberdade considerados) e os critérios de estabilidade, que serão utilizados na elaboração de um dígrama de estabilidade como o mostrado na Figura 32. O programa disponibiliza critérios de estabilidade que são inicialmente definidos em 1% para as frequências naturais, 2% para os fatores de amortecimento, e 1% para correlação entre os vetores modais. Esses critérios podem ser modificados pelo usuário dependendo da qualidade dos sinais de respostas obtidos na monitoração. Quanto melhor for a qualidade do sinal, mais restritos esses critérios poderão ser considerados.

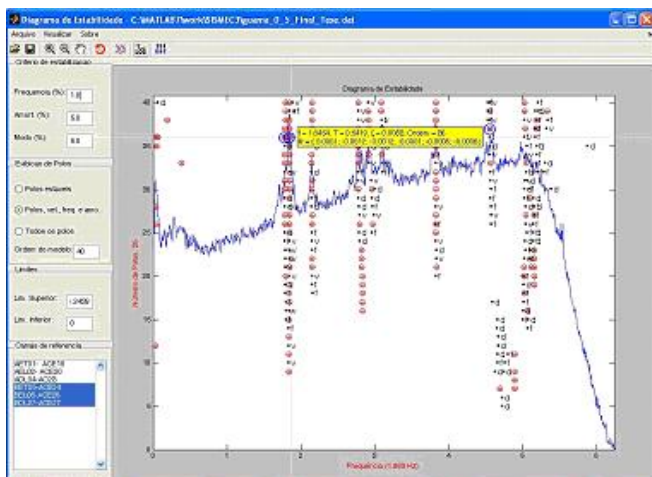


Figura 32 – Módulo de extração de parâmetros modais - interface gráfica apresentando diagrama de estabilidade.

No diagrama de estabilidade mostrado na Figura 32, as frequências são rotuladas de acordo com a seguinte convenção: “⊕” - pólo estável; “•v” – pólo com frequência e vetores modais estáveis; “•d” – pólo com amortecimento e frequência estáveis; “•f” – pólos somente com frequências estáveis; “•” – pólos não estáveis. Uma vez definidos os critérios de estabilidade e selecionados os canais de referência entre os canais disponíveis, o digrama pode ser traçado ou atualizado a qualquer momento. Como pode ser observado na Figura 32, o diagrama é traçado sobre o espectro de potência anteriormente estimado no módulo de tratamento de sinais para facilitar a identificação visual dos parâmetros modais.

Para visualizar as formas modais é necessário marcar os pólos estáveis identificados no diagrama com o símbolo “⊕”. Isso é realizado pressionando o botão esquerdo do mouse e, em seguida, selecionando a opção “adicionar marcador”. Quando o marcador for adicionado ao pólo, será exibido o símbolo “⊗” indicando que o pólo estável marcado é um modo de vibração identificado pelo usuário. Quando todos os pólos identificados forem marcados com “⊗”, então o operador pode visualizar as formas modais pressionando o botão destacado na Figura 33. Após pressionar o referido botão, as formas modais associadas aos pólos marcados no diagrama são exibidas, como mostra a Figura 34. O aspecto deformado da estrutura referente à forma modal é determinado impondo-se as amplitudes de deslocamentos referentes aos pontos onde os acelerômetros foram instalados, em um modelo (simplificado ou completo) da estrutura. No presente trabalho optou-se por utilizar um modelo simplificado da estrutura (sem todas as barras de travejamento) apenas para permitir uma visualização qualitativa das formas modais.



Figura 33 – Botão para visualização das formas modais.

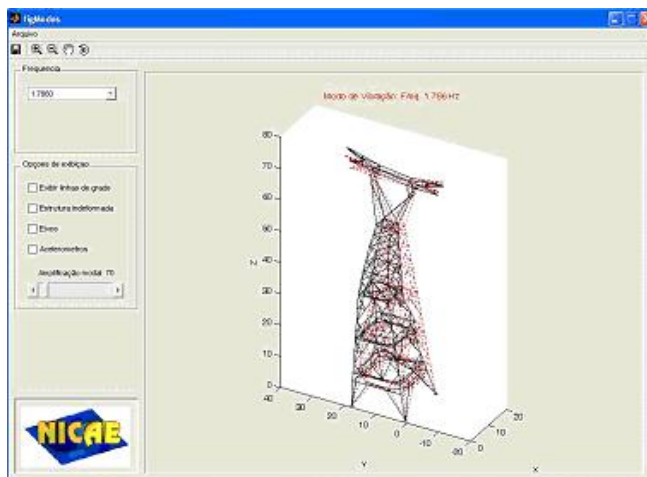


Figura 34 – Exibição das formas modais correspondentes aos pólos estáveis marcados no diagrama de estabilidade.

**B. Resultados das análises modais experimentais**

Na etapa das análises experimentais, as séries temporais coletadas na monitoração das estruturas estudadas foram processadas visando reduzir as imprecisões contidas nesses sinais de resposta, e com emprego dos métodos SSI-DATA e SSI-COV a identificação de parâmetros das estruturas estudadas foi realizada.

Através do método de identificação por subespaços estocásticos foi determinada a assinatura dinâmica da estrutura, através do emprego de diagramas de estabilização. Através do emprego dos métodos SSI implementados, foi possível determinar as frequências naturais de vibração, e os respectivos vetores com as formas modais e fatores de amortecimento. As primeiras quatro formas modais e as respectivas frequências naturais são apresentadas na Figura 35.

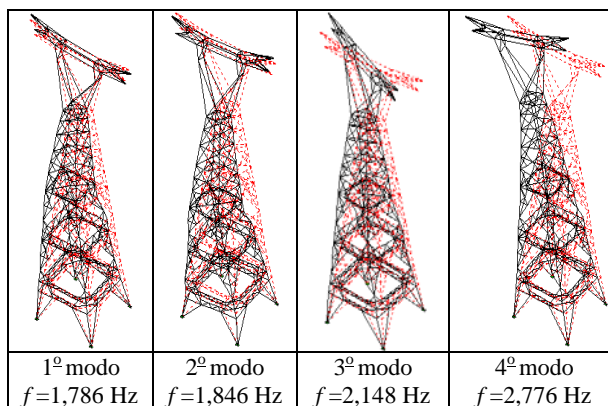


Figura 35 – Resultados da análise modal experimental obtidos com programa computacional baseado no método SSI-DATA.

**C. Comparação entre os resultados numéricos e experimentais**

Os resultados obtidos através da análise experimental foram comparados com os resultados numéricos, e utilizados na aferição dos modelos computacionais. Foram feitas correções no modelo numérico quanto à consideração das cadeias de isoladores e das massas dos cabos condutores e pára-raios.

Após este processo de aferição do modelo computacional obtiveram-se os resultados mostrados na Figura 11. A Tabe-

la III apresenta uma comparação entre os valores experimentais e computacionais referentes às frequências naturais de vibração da torre situada na margem direita do Rio Guamá. Para permitir uma avaliação mais qualitativa dos resultados, estes são apresentados na forma de gráfico, na Figura 34.

TABELA III  
COMPARAÇÃO ENTRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS OBTIDAS  
EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE

Modo	Frequências experimentais (Hz)	Frequências obtidas através do MEF (Hz)
1º	1,786	1,750
2º	1,846	1,957
3º	2,148	2,069
4º	2,776	3,014
5º	2,914	3,593

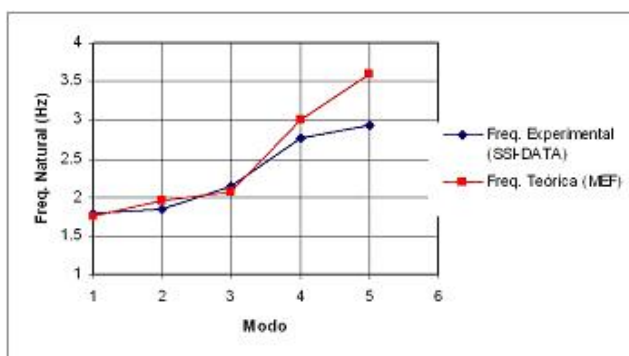


Figura 36 – Comparação entre as frequências obtidas experimentalmente e numericamente (MEF).

Observa-se que os resultados numéricos e experimentais são bem próximos para os modos iniciais, tendendo a se distanciarem para modos mais altos. Uma justificativa para isso pode ser a aproximação relativa à consideração dos efeitos dos cabos condutores e pára-raios, e os efeitos de acoplamento com as torres vizinhas.

Entretanto, como a simulação de estruturas de torres metálicas por elementos finitos pôde ser feita com elevada precisão, os resultados obtidos numericamente também foram importantes para validar os resultados obtidos com a instrumentação.

#### IX. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de monitoração de torres na Região Amazônica, em especial de travessias de grandes rios, é justificada principalmente pelos comprimentos dos vãos e pelas dimensões das torres, o que geralmente implica na presença de vibrações excessivas.

A monitoração de vibração de estruturas civis e mecânicas é um tópico de pesquisa muito importante na engenharia. Através da análise de medidas de vibração, pode-se obter a “assinatura dinâmica” da estrutura, que consiste na caracterização da estrutura através de parâmetros dinâmicos, quais sejam as frequências naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento. É importante ressaltar que modificações na situação da estrutura (danos) causam modificações nestes parâmetros modais da estrutura.

Em relação à metodologia proposta, pôde-se concluir que as

ferramentas utilizadas e desenvolvidas neste sistema mostraram-se muito úteis para a avaliação do nível de segurança e integridade estrutural das torres em estudo. Verificou-se também que os projetos estruturais das torres atendem às prescrições normativas vigentes.

Observou-se que os métodos SSI-COV e SSI-DATA mostraram-se bastante precisos para extração dos parâmetros modais das estruturas das torres, e que os resultados obtidos são coerentes com os resultados teóricos obtidos com as simulações realizadas através do MEF.

No que se refere ao protótipo de sistema de monitoração on-line, pode-se dizer que a configuração desenvolvida se mostrou como uma boa solução, possuindo aspectos inovadores no que se refere ao sistema automático de aquisição, transmissão e processamento de dados. Em resumo, o sistema captura os sinais dos sensores utilizando microcontroladores que os digitalizam e, usando um módulo controle embarcado, os envia por uma rede sem fio para uma estação de monitoração remota. Este sistema é uma alternativa eficiente para monitorar e prever falhas em torres, antecipando ações que visam evitar prejuízos, caso alguma falha grave seja detectada.

#### X. AGRADECIMENTOS

Vários alunos do curso de engenharia Civil da UFPA colaboraram, de diversas formas, com a execução deste projeto. Os autores agradecem, especialmente, a participação de Adriana L. Rolim, Alécio Patrick L. do Rosário, Cristiane L. Vasconcellos, Giselle C. Anholeti, Helna Louise S. da Silva, Igor G. Dias, Jean Rodrigo F. Aguilera, Lílian Danielly A. de Oliveira e Rodrigo N. de Oliveira, pelo grande auxílio com a realização deste estudo. Os autores agradecem também aos membros da equipe de manutenção de LT's da Eletronorte que colaboraram com as atividades do projeto.

#### XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Yasui, H. Marukaua, H. Momomura, Y. T. Ohkuma, “Analytical study on wind-induced vibrations of power transmission towers”, *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, vol. 83 431-441, 1999.
- [2] M. J. Alam, A. R. Santhakumar, “Reliability analysis and full-scale testing of transmission tower”, *J. of Struct. Eng.*, pp. 338-344, 1996.
- [3] R. K. Mathur, P. S. G. Trainor, N. Popplewell, A. H. Shah, “Dynamics of a guyed transmission tower system”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, vol. PWRD-2, No. 3, 908-917, 1995.
- [4] P. S. G. Trainor, N. Popplewell, A. H. Shah, C. K. Wong, “Estimation of fundamental dynamic characteristics of transmission line towers”, *IEEE Trans. Power Appar. System*, PAS-104, N. 3, 681 - 689, 1995.
- [5] F. G. A. Al-Bermani, S. Kitipornchai, “Nonlinear analysis of transmission line towers”, *Eng. Structs*, vol. 14, No. 3, pp. 139-151, 1992.
- [6] S. Ozono, J. Maeda, “In plane dynamic interaction between a tower and conductors at lower frequencies”, *Eng. Structs*, vol. 14, No. 4, pp. 210-212, 1992.
- [7] M. J. Alam, A. R. Santhakumar, “System reliability analysis of transmission line towers”, *Comp. & Structs*, 53, 2, 343-350, 1987.
- [8] R. S. Rodrigues, “Mecânica do colapso aeroelástico de torres TEE”, Tese de Doutorado em Eng. Civil, UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro.
- [9] R. C. Battista, R. S. Rodrigues, M. S. Pfeil, “Dynamic Behavior and Stability of Transmission Line Towers under Wind Forces”, *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 91 (2003) 1051-1067.
- [10] J. Blessmann, “Acidentes causados pelos ventos”, 3.ed. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 1986.
- [11] R. M. de Souza, J.C.W.A. Costa, “Desenvolvimento de um Sistema para Análise de Segurança e Monitoração On-line para Previsão de Falhas Estruturais de Torres de Linhas de Transmissão”, Universidade Federal do Pará – UFPA, Projeto de P&D-Aneel, Belém-PA, 2003.

- [12] S. Caldas, "LT 230 kV Caxipó/Sinop – Acidente Provocado por Vento com Velocidade Superior a 100 km/h no estado do Mato Grosso", Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - Eletronorte, Brasília-DF, Relatório Técnico, 2004.
- [13] Labegalini, P. R., Labegalini, J. A., Fuchs, R. D., de Almeida, M. T., "Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão", Editora Edgar Blücher Ltda, 2a. Edição, 1992.
- [14] S. D. R. Amador, "Identificação estocástica de parâmetros modais de estruturas metálicas - ênfase em pontes e torres de linhas de transmissão", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Univ. Federal do Pará, 2007.
- [15] S. D. R. Amador, L. A. C. Veloso, R. M., de Souza, J. R. F. Aguilera, "Full-Scale Experimental Modal Analysis of an Overhead Transmission Line Tower Crossing Guamá River in The Amazon Region", in Proceedings of the Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV13), Vienna, Austria, 2006.
- [16] M.B.C. Rosa, S.D.R. Amador, R.M. de Souza, "Pré-Processador Gráfico Interativo no Ambiente AutoCAD para Análise estrutural de Torres de Linhas de Transmissão submetidas ao efeito do vento, através dos programa OpenSees e Ansys", NiCAE – Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Univ. Federal do Pará, Belém-Pa., Relatório Técnico, 2007.
- [17] C.L. Vasconcellos e L. D. A de Oliveira, "Verificação do Projeto Estrutural de uma Torre de Linha Aérea de Transmissão de Energia Elétrica Segundo a Norma Brasileira NBR 8850/2003", Trabalho de Concl. de Curso em Eng. Civil, Univ. Federal do Pará, 2007.
- [18] A. P. L. do Rosário e R. N. de Oliveira, "Análise Estrutural de Torres de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica Submetidas à Ação do Vento". Trab. Concl. de Curso em Eng. Civil, UFPA, 2006.
- [19] E. M. L. e Silva, "Modelagem computacional do comportamento mecânico da estrutura de torres de LTs", Relatório de Iniciação Científica, Programa PIBIC, Univ. Federal do Pará, 2006.
- [20] G. C. Anholetti, "Determinação do Carregamento Dinâmico do Vento em LTs", Relat. Inic. Científica, Programa PIBIC, UFPA, 2006.
- [21] I. G. Dias, "Análise Comparativa entre as prescrições da NBR 8850/1985 e o Projeto de Revisão de Agosto de 2003, No que se Refere ao Dimensionamento das Barras", Trabalho de Concl. de Curso em Eng. Civil, Univ. Federal do Pará, 2004.
- [22] H. L. S. da Silva, "Pré-Análise Estática e Modal de uma LT 230kV com Torres Autoportantes". Trab. Concl. Eng. Civil, UFPA, 2004.
- [23] R. D. Cook, D. S. Malkus e M. E. Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 3rd Edit, John Wiley & Sons, 1989.
- [24] S. Mazzoni, F. McKenna, M. H. Scott, G. L. Fenves, "OpenSees - Open System for Earthquake Engineering Simulations - Command Language Manual", University of California at Berkeley, 2006.
- [25] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [26] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 8850 - Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de transmissão - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- [27] M. Franco, "Direct Along Wind Dynamic Analysis of Tall Structures", Proceedings International Conference on Tall buildings, Rio de Janeiro, 1993.
- [28] R. M. de Souza, "Force-based Finite Element for Inelastic Large Displacement Analysis of Frames", Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, California, EUA, 2000.
- [29] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão. Rio de Janeiro, 1985.
- [30] IEEE Committee Report. Standardization of Conductor Vibration Measurements. IEEE Trans, Vol PAS-85, n. 1, pp 10-22, 1966.
- [31] A. L. Rolim, F. V. de Souza, "Determinação da expectativa de vida de cabos de linhas de transmissão, Trabalho de Concl. de Curso em Eng. Civil, Univ. Federal do Pará, 2007.
- [32] CIGRÉ. Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors. Cigré SC-22 (Overhead lines), WG-04, Electra n. 63, 1979.
- [33] A. Castro, A.B.R. Klautau Jr, B. Bastos, M. Cabral, M. J. Sousa, J.C.W.A. Costa, R. M. de Souza, "Sistema de monitoração on-line de torres de linhas de transmissão através de redes sem fio", Univ. Federal do Pará, Belém-Pa., Relatório Técnico, 2007.
- [34] B. Peeters, "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering", Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2000.
- [35] B. Peeters, G. De Roeck, "Stochastic subspace system identification of a steel transmitter mast", In Proc. of The International Modal Analysis Conference, USA, 1998, 130-136.