

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS À
RUPTURA DE CABOS

por

Fernando Jacques Dall'Aqua

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2013.

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS À
RUPTURA DE CABOS

por

Fernando Jacques Dall'Aqua

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Jackson Manfredini Vasile

Prof. Ignácio Iturrioz

Porto Alegre, 17 de Junho de 2013.

DALL'AQUA, F.J. **Análise Dinâmica de torres de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabos**. 2013.19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de um trecho de linha de transmissão submetida à ruptura de cabo, analisando os esforços axiais nas barras das torres e seus deslocamentos. A análise é feita através do software Ansys, de forma transiente não linear, onde são implementadas as características geométricas e físicas do modelo. Além disso, é estudada a influência do amortecimento estrutural dos cabos na resposta da estrutura, avaliando sua importância no modelo.

PALAVRAS-CHAVE: torre de linha de transmissão, ruptura de cabo; método implícito de integração; análise dinâmica.

DALL'AQUA, F.J. **Dynamic Analysis in Towers Transmission Lines Submitted to Rupture Cable**. 2013.19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This work aims to study the behavior of a section of transmission line submitted to the cable rupture, analyzing the axial forces on the bars of the towers and their displacements. The analysis is performed using the ANSYS software, in a way non-linear transient, in which are implemented the physical and geometric characteristics of the model. Furthermore, it is studied the influence of structural damping of the cable structure in the response, evaluating their importance in the model.

KEYWORDS: tower transmission line, cable rupture; implicit method of integration; dynamic analysis.

ÍNDICE

RESUMO	3
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. MODELO MECÂNICO	2
4. MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL.....	4
4.1 Discretização do Modelo	4
4.2 Condições de Contorno e Carregamentos.....	5
4.3 Análise Modal	6
4.4 Análise Transiente com Força Externa	7
4.5 Análise Transiente Não Linear	7
5. RESULTADOS	8
5.1 Análise Modal	9
5.1.1 Torre Isolada.....	9
5.1.2 Sistema Estrutural Completo	10
5.2 Análise Transiente com Força Externa	10
5.3 Análise Transiente Não Linear com Dois Vãos de Cabos	11
5.4 Análise Transiente Não Linear de Um Trecho de Linha	12
6. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

As torres de linhas de transmissão são de extrema importância na interligação de energia elétrica no Brasil, elas transferem a energia gerada nas usinas hidrelétricas até as subestações. Considerando um acidente que leve ao colapso dessas torres o prejuízo sofrido será na ordem de milhões de reais, isso levando em conta os danos causados ao consumidor que não terá energia e, ainda, o reparo, que não será imediato. Assim, as linhas de transmissão devem ser projetadas para que suportem os mais variados carregamentos que podem ocorrer, não colocando em risco o fornecimento de energia elétrica, um quesito básico para sociedade.

Usualmente, os procedimentos de análise no projeto de estruturas de linhas de transmissão consideram os carregamentos dinâmicos através de carregamentos estáticos equivalentes, ou seja, cargas que não variam com o tempo são aplicadas diretamente à torre substituindo o carregamento dinâmico proveniente da ruptura de um cabo condutor, portanto não há um modelamento real do fenômeno. Assim, este trabalho visa uma modelagem mais complexa, considerando as torres, as cadeias de isoladores e os cabos, podendo assim fornecer resultados mais precisos.

O propósito desse trabalho é analisar a resposta dinâmica de uma torre de linha de transmissão submetida à ruptura de cabos, assim não será considerado o carregamento devido ao vento. Com a utilização do software Ansys modela-se uma torre autoportante com a cadeia de isoladores, cabos para-raios e cabos condutores. Um desses cabos condutores irá se romper em um determinado momento gerando um carregamento no sentido longitudinal da linha de transmissão, sendo assim, será avaliada a resposta que a estrutura da torre terá a este carregamento.

Será verificado se a torre irá ruir e, ainda, se esse colapso irá atingir as torres vizinhas ocasionando um efeito cascata, essa conferência será feita modelando um trecho de linha de transmissão com quatro torres interligadas por cabos condutores e cabos para-raios. Também será estudada influência do amortecimento estrutural, variando-se os coeficientes de amortecimento do cabo. E ainda será feita uma análise variando o local da ruptura do cabo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos realizados por Miguel *et al.*, 2005, avaliam a validade de carregamentos dinâmicos considerados como 'estáticos equivalentes', a influência do amortecimento na resposta da estrutura e a forma de transmissão dos esforços para as fundações, elucidando com a análise de uma torre de linha de transmissão submetida à ruptura de cabo. Os autores utilizam o método da integração direta das equações do movimento, de forma explícita, usando o método numérico das diferenças finitas centrais para obter uma resposta dinâmica da torre. O método foi implementado em uma rotina em Fortran desenvolvida pelos autores. No estudo, a ruptura do cabo é representada por um carregamento externo variável no tempo aplicado diretamente em um isolador da torre. Como resultado desse trabalho verifica-se a importância do amortecimento estrutural, parâmetro que acaba influenciando diretamente na amplificação dinâmica dos esforços. Além disso, conclui-se que a análise estática empregada na prática usual de projeto de torres não modela corretamente o fenômeno de ruptura de cabo.

Em Kaminski *et al.*, 2005, é feito um aprimoramento do estudo citado anteriormente, adicionando-se ao modelo cabos condutores e cabos para-raios, simulando a ruptura do cabo fazendo a força axial igual a zero no elemento que deve romper em um determinado instante. Com isso, destaca-se a importância do amortecimento estrutural dos cabos na modelagem, obtendo-se resultados compatíveis com os do estudo anterior. Também se ressalta que modelos mais complexos, considerando várias torres com suas cadeias de isoladores e cabos, podem fornecer resultados mais precisos.

Outro estudo que traz essa abordagem é o de Kaminski, 2007, o qual faz uma análise de um trecho de linha de transmissão com oito torres, utilizando o método de integração numérica direta das equações do movimento, na forma explícita, adotando diferenças finitas centrais. Este método apresenta algumas vantagens na solução de problemas não lineares. No estudo foi feita uma série de análises de modelos com diferentes parâmetros, constatando-se

que, no caso de ruptura de um cabo, as barras mais solicitadas são as diagonais devido à torção associada à flexão.

3. MODELO MECÂNICO

A torre analisada no presente trabalho é denominada “SY”, consistindo em uma torre autoportante, ou seja, sua estabilidade é assegurada por quatro montantes, sendo que cada um possui uma fundação em seu pé. Estas torres são dimensionadas para resistir aos esforços de tração e compressão combinados com os esforços horizontais. Sua função na linha é de suspensão dos cabos condutores, sendo assim são projetadas para resistir à força peso dos cabos e aos esforços laterais devidos ao vento. Conforme mostrado na Figura 3.1, a torre tem formato tronco piramidal, com circuito duplo de 130 kV, altura de 33,4 metros e abertura na base de 5 metros a torre é composta por 415 barras de aço de perfil cantoneira de abas iguais. O aço utilizado nas barras possui módulo de Young igual a 200 GPa e densidade de 7850 kg/m³.

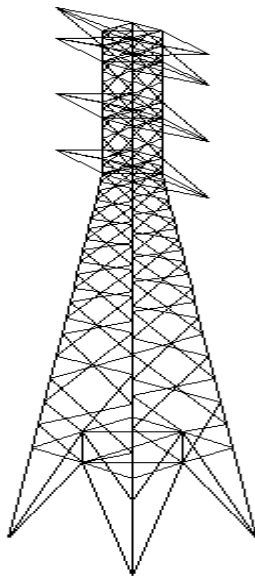


Figura 3.1 – Torre “SY”.

Cada torre contém seis cadeias de isoladores que fazem a conexão com os cabos condutores. A cadeia de isoladores é do tipo disco e têm 1,65 metros de comprimento com diâmetro de 0,25m. Além da porcelana, as cadeias de isoladores contêm ferragens, cimento e granilha que são utilizados para efetuar a conexão de cada unidade do isolador. O ponto mais crítico de ruptura é a união entre o cimento e a porcelana, assim admite-se que o material mais frágil é a porcelana, então, se assumem as suas propriedades no modelamento de toda cadeia de isoladores. A conexão entre a torre e a cadeia de isoladores é feita com um olhal fixado a um isolador no topo da cadeia e um estribo engatado na torre, conforme Figura 3.2.



Figura 3.2 – Conexão entre isoladores e torre.

Os cabos condutores são de alumínio com reforço de aço (ACSR – *Aluminum Conductor Steel Reinforced*) com 26/7 fios, os cabos para raios são de alta resistência (EHS – *Extra High Strength*) com 7 fios de aço de 3/8 de polegada. Na condição *Every Day Stress* (EDS) os cabos condutores são projetados para uma tração em volta de 20% de sua capacidade (UTS – *Ultimate Tension Stress*). Nos cabos para-raios essa tração é de 14% da UTS. Na Tabela 3.1, apresentam-se as propriedades de ambos os cabos. Em todas as análises que contenham cabos é considerada a existência de seis cabos condutores e dois cabos para-raios entre as torres que estão espaçadas por um vão de 400 metros.

Tabela 3.1 - Propriedades dos Cabos.

Propriedades	Cabo condutor	Cabo para-raios
Diâmetro (mm)	25,146	9,144
Área da seção transversal (mm ²)	374,709	51,0773
UTS (daN)	11209,5	6850,26
Densidade (kg/m ³)	3474,66	7951,16
Módulo de Elasticidade (GPa)	74,51	172,39

Ambos os cabos estão suspensos entre as torres, espaçadas por um vão de 400 metros, apresentando a forma de uma catenária. Como é assumido que os suportes das torres estão na mesma altura, a catenária é simétrica em relação ao eixo central (centro do vão) onde se localiza o vértice, que é o local da maior flecha. Essa flecha depende do comprimento do vão, da temperatura e da tração aplicada ao cabo quando este é fixado aos suportes, mais detalhes podem ser vistos em Irvine *et al.*, 1974.

De forma geral, a estrutura de linha de transmissão é guiada pela norma NBR 5422 (ABNT, 1985).

Nas Figuras 3.3 e 3.4 estão representados, respectivamente, os trechos de linhas com uma torre com dois vãos de cabos e quatro torres com cinco vãos de cabos.

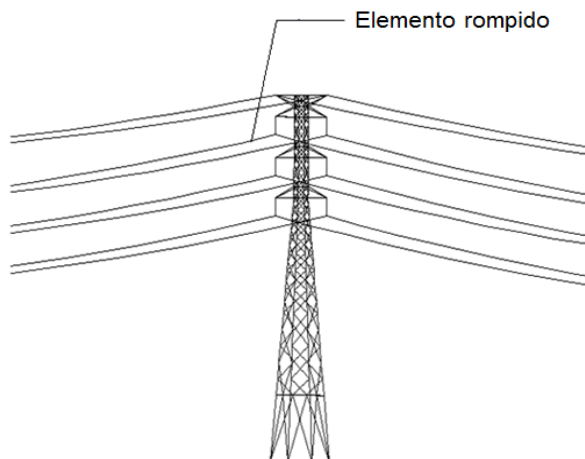


Figura 3.3 – Torre com dois vãos de cabos.

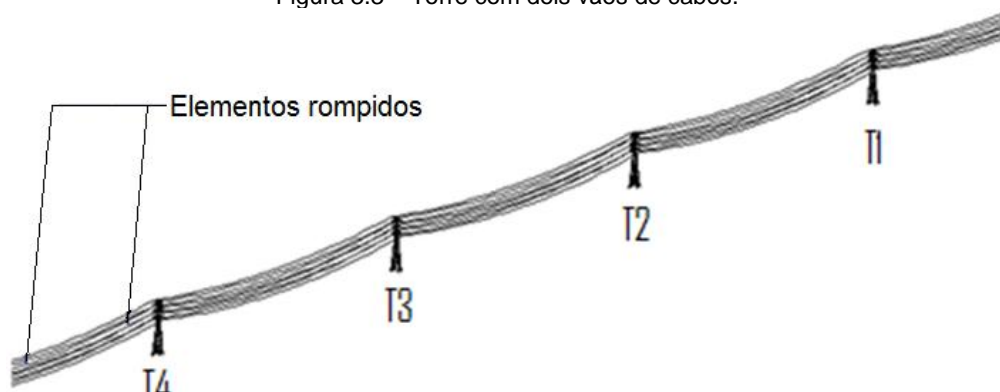


Figura 3.4 - Quatro torres com cinco vãos.

4. MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

Para a simulação computacional do modelo foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF) através do programa Ansys. O programa utiliza para resolução das equações o método de Newmark, método de integração direta implícita [Ansys, 2001], que tem como vantagem a não estabilidade incondicional para resolver problemas não lineares, conforme Groehs, 2005. Para uma melhor avaliação do comportamento dinâmico não linear de um trecho de linha de transmissão submetido a esforços devidos à ruptura de cabos desenvolveu-se uma sequência de análise que está representada de maneira resumida no fluxograma da Figura 4.1.

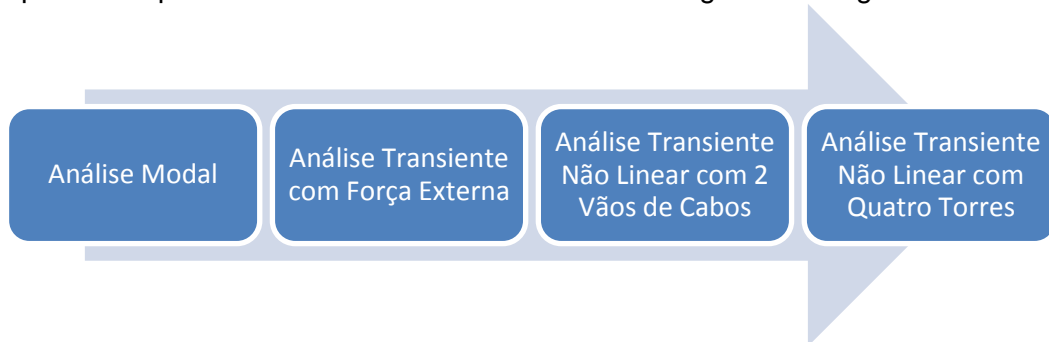


Figura 4.1 – Fluxograma das análises.

Assim, este capítulo destina-se à elaboração detalhada das simulações realizadas neste trabalho. Onde, primeiramente é abordado o modelo estrutural, sendo discutidos tópicos como a discretização dos elementos, simplificações do modelo, condições de contorno e carregamentos. Após, são discutidas as análises empregadas e suas metodologias de resolução.

4.1 Discretização do Modelo

Para representação física dos elementos estruturais do trecho modelado nas linhas de transmissão foram utilizados os seguintes tipos de elemento finito:

- Elemento um: pórtico espacial de dois nós (Beam4)
- Elemento dois: treliça espacial (Link180);

O elemento de pórtico espacial de dois nós possui seis graus de liberdades em cada nó e é orientado espacialmente a partir de um terceiro nó, conforme mostrado na Figura 4.2.

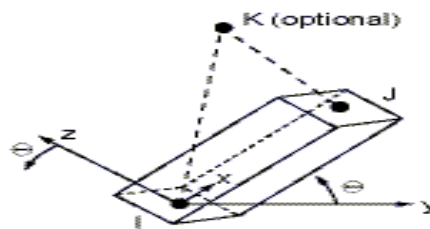


Figura 4.2 – Elemento pórtico espacial de dois nós.

O elemento finito de treliça tem dois nós e três graus de liberdade por nó, ele é orientado no espaço a partir de seu eixo longitudinal, conforme mostra a Figura 4.3.

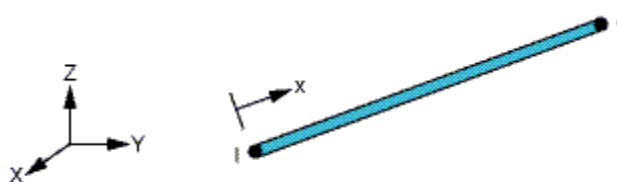


Figura 4.3 – Elemento treliça espacial.

Na representação da estrutura da torre é utilizado o elemento finito de pórtico espacial de dois nós. Assim, todos os esforços existentes nos elementos da torre são considerados, incluindo tração, compressão, torção e flexão. Trabalhos como os de Silva *et al.*, 2005, e Oliveira, 2006, não recomendam a modelagem dessas estruturas a partir apenas de elementos de treliça.

Na análise transiente na qual uma força externa variável no tempo é aplicada diretamente ao isolador no exato local que estaria o cabo (Figura 4.4), as cadeias de isoladores foram representadas pelo elemento finito de pórtico espacial de dois nós. Isso se deve ao fato da força externa ser aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal do elemento, assim para que o isolador transmita a força externa à torre o elemento que o representa deve ter a capacidade de suportar o esforço de flexão. Já nas análises transientes com os cabos modelados, as cadeias de isoladores foram representadas pelo elemento de treliça espacial considerando apenas o esforço axial, pois o movimento do cabo desloca a cadeia de isoladores fazendo com que esta sofra apenas esforços no seu eixo longitudinal.

Os cabos, tanto condutores quanto para-raios, são modelados pelo elemento finito de treliça espacial, suportando apenas esforços axiais de tração, não tendo rigidez alguma à compressão e uma rigidez à flexão relativamente baixa frente aos comprimentos considerados. Devido a essa característica estrutural do cabo, a análise é não linear, uma vez que o cabo altera entre as situações de folga e de tensão. Por isso, os efeitos de grandes deslocamentos são ativados. Ao ativar os efeitos de grandes deslocamentos, automaticamente os efeitos de rigidez geométrica, que é a rigidez da estrutura devido ao estado de tensão, são incluídos. Tais efeitos auxiliam na convergência da solução.

4.2 Condições de Contorno e Carregamentos

Com relação às restrições do modelo foi considerado desde o início do processo que os nós da base da torre não se deslocam, portanto foram restringidos todos os graus de liberdade. Para os modelos em que os cabos são representados, também foi considerado que não há deslocamento nos nós que simbolizam a continuidade da linha, pois não há interferência no resultado das torres representadas.

Na análise transiente com força externa, primeiramente foi aplicada uma força gravitacional de forma gradual durante 0,5 segundos, período de tempo superior ao maior período de vibração da estrutura, a fim de evitar amplificações dinâmicas significativas. Após a aplicação completa da gravidade, foi dado um intervalo de 0,5 segundos para aplicação da força externa longitudinal que representa o cabo.

A força longitudinal que representa a ruptura do cabo está baseada na carga de tração do cabo condutor, que é na ordem de 20% da sua carga última. No instante em que ocorre o colapso do cabo condutor, esta carga é atenuada devido ao movimento da cadeia de isoladores, ficando em torno de 16% da carga. As cargas aplicadas na torre são apresentadas no gráfico da Figura 4.5.

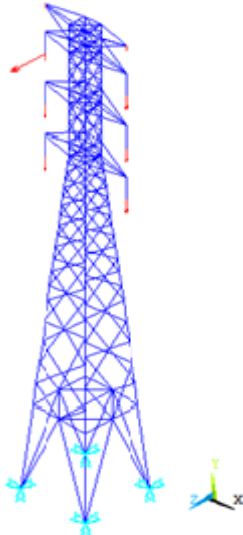


Figura 4.4 – Torre com aplicação de carga externa.

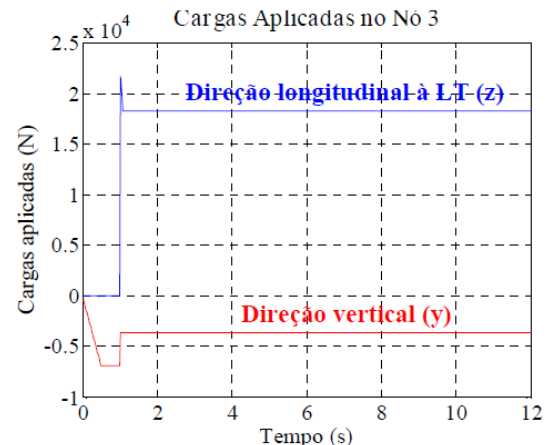


Figura 4.5 – Cargas aplicadas nas direções “y” e “z”.

Na análise transiente não linear, com uma torre e dois vãos de cabos, foram aplicadas as cargas de peso próprio (direção y), tanto da torre quanto dos cabos e isoladores, de forma gradual, durante 5 segundos. Após um intervalo de 10 segundos, o cabo é rompido utilizando-se o comando “*Birth and Death*” do software Ansys, que desativa o elemento selecionado multiplicando a matriz de rigidez por um fator de redução. As cargas associadas ao elemento desativado são zeradas no vetor carga. Da mesma forma, massa, amortecimento e outros efeitos são definidos como zero para os elementos desativados [Ansys, 2011]. A massa e a energia dos elementos desativados não são incluídas nos cálculos envolvendo todo o modelo. A deformação do elemento desativado também é definida como zero assim que este elemento é “morto”.

Para análise transiente não linear com quatro torres e cinco vãos de cabos foi utilizado o mesmo conceito da análise citada anteriormente, com a diferença que o intervalo de tempo entre a aplicação da força gravitacional e o comando “*Birth and Death*”, é de vinte segundos devido a maior complexidade do modelo. Esse intervalo de tempo é dado para amortecer qualquer vibração induzida. Assim, no instante de 25 segundos o elemento de cabo selecionado rompe e os 25 segundos restantes são usados para a análise da linha de transmissão.

Em todos os casos o amortecimento de cada componente da estrutura foi considerado, para tanto, foi utilizada a matriz de amortecimento proposta por Rayleigh, equação 4.1, onde somente a constante de amortecimento proporcional à massa (α) é alterada. Mais detalhes em Rao, 2004.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4.1)$$

4.3 Análise Modal

A análise modal é utilizada para determinar as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Esses parâmetros são de extrema importância no projeto de estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos.

Os modos de vibração consistem na representação das formas deformadas quando a estrutura é excitada em diferentes frequências. Esses modos são obtidos através da resolução de um problema de autovetores e autovalores. Os autovetores fornecem um conjunto de n modos de vibração que estão associados a n frequências naturais, sendo n igual ao número de graus de liberdade do sistema analisado.

No programa Ansys, a análise modal é uma análise linear, portanto qualquer não linearidade é ignorada se for definida. O método utilizado para extração de modos de vibração foi Block Lanczos, que é geralmente usado para grandes problemas de autovalores simétricos, além de ser um método fácil de usar [Ansys, 2011]. O método emprega uma estratégia de

deslocamento automatizado, combinada com uma sequência de verificação de Sturm, para extrair o número de autovalores próprios solicitados [Ansys, 2011].

4.4 Análise Transiente com Força Externa

Esta análise foi considerada linear, pois não há presença do elemento finito que representa os cabos. Assim, a equação de equilíbrio dinâmico transiente para uma estrutura linear é mostrada na equação 4.2.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \quad (4.2)$$

Onde:

[M] = matriz de massa;

[C] = matriz de amortecimento;

[K] = matriz de rigidez;

$\{\ddot{u}\}$ = vetor de aceleração nodal;

$\{\dot{u}\}$ = vetor de velocidade nodal;

$\{u\}$ = vetor de deslocamento nodal;

$\{F^a\}$ = vetor de força aplicada;

Para resolver a equação (4.2) o software utiliza o método de integração numérica implícita, chamado método de Newmark, no qual diferentes equações temporais são combinadas com as correntes equações do movimento, de forma que as equações resultantes são resolvidas para se obter o deslocamento corrente [Grohes, 2005], segue formulação:

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + [(1 - \delta)\{\dot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (4.3)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + [(\frac{1}{2} - \alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t^2 \quad (4.4)$$

Onde:

α, δ = parâmetros da integração de Newmark;

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$;

$\{u_n\}$ = vetor de deslocamento nodal no tempo t_n ;

$\{\dot{u}_n\}$ = vetor de velocidade nodal no tempo t_n ;

$\{u_{n+1}\}$ = vetor de deslocamento nodal no tempo t_{n+1} ;

$\{\dot{u}_{n+1}\}$ = vetor de velocidade nodal no tempo t_{n+1} ;

$\{\ddot{u}_{n+1}\}$ = vetor de aceleração nodal no tempo t_{n+1} ;

Uma vez que o objetivo principal é o cálculo de deslocamentos $\{u_{n+1}\}$ a equação (4.2) é avaliada no tempo t_{n+1} , assim:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F^a\} \quad (4.5)$$

Mais detalhes sobre a resolução pode ser vistos em [Groehs, 2005].

4.5 Análise Transiente Não Linear

Quando é feita a análise de um trecho de linha de transmissão, a análise se torna não linear devido à presença do elemento finito que representa os cabos, conforme explicado no item 4.1.

Para resolução de uma análise não linear, o método de Newton-Raphson é empregado juntamente com as hipóteses de Newmark, auxiliando na convergência da solução [Ansys, 2011]. No processo de discretização dos elementos finitos produz-se um conjunto de equações simultaneamente:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (4.6)$$

Onde:

$[K]$ = matriz de coeficientes;

$\{u\}$ = vetor de valores desconhecidos de GDL (graus de liberdade);

$\{F^a\}$ = vetor de forças aplicadas

Como $[K]$ é função de $\{u\}$ a equação é não linear. Então, o processo iterativo de Newton-Raphson é utilizado para resolver essa não linearidade, podendo ser escrito como:

$$[K^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (4.7)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (4.8)$$

Onde:

$[K^T]$ = matriz de rigidez tangente;

i = subscrito representando a corrente iteração de equilíbrio;

$\{F^{nr}\}$ = vetor de força resistiva calculado do elemento deformado;

Ambos, $[K^T]$ e $\{F^{nr}\}$, são avaliados baseados nos valores dados por $\{u_i\}$. O lado direito da equação (4.7) é vetor de força desbalanceado, isto é, diz o quanto que o sistema está fora de equilíbrio. Como pode ser visto na Figura 4.6, mais de uma iteração é necessária para obter a convergência da solução.

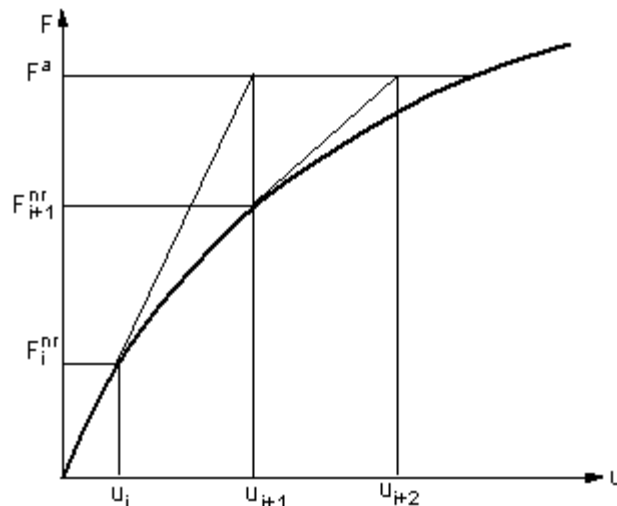


Figura 4.6 – Iterações da solução de Newton-Raphson.

A convergência é alcançada quando a seguinte equação for satisfeita:

$$\|\{F^a\} - \{F^{nr}\}\| < \epsilon_R R_{ref} \quad (4.7)$$

Onde:

$\| \|$ = vetor norma;

ϵ_R = tolerância padronizada pelo Ansys;

R_{ref} = valor de referência padronizada pelo Ansys;

Na utilização do comando “*Birth and Death*” é indicado que seja utilizada a técnica descida adaptativa (*adaptive descent*), a qual permite que sejam utilizadas de forma ponderada as matrizes de rigidez secante e tangente, resultando em uma taxa de convergência mais rápida.

5. RESULTADOS

Neste capítulo se apresentam os resultados obtidos das diversas análises executadas. Primeiramente, são mostrados os resultados relativos às análises modais, tanto da estrutura da torre sem cabos e as cadeias de isoladores, quanto do sistema completo, ou seja, da torre com

isoladores e cabos. Após, são apresentados os resultados referentes à análise transiente com força externa. E por último, os resultados associados à análise transiente não linear para o sistema estrutural completo, tanto de dois quanto de cinco vãos.

5.1 Análise Modal

5.1.1 Torre Isolada

Estes resultados servem para obter uma estimativa do comportamento da torre. Também tem como objetivo validar a torre que é utilizada como modelo para as análises seguintes. Na Tabela 5.1 apresentam-se as frequências naturais de vibração obtidas para a torre isolada. Os modos de vibração para as quatro primeiras frequências naturais podem ser visualizados da Figura 5.1 à 5.4.

Tabela 5.1 – Frequências Naturais da torre.

Frequência	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor [Hz]	2.9418	2.9601	9.4320	9.7498	9.9483	12.343	13.702	14.175

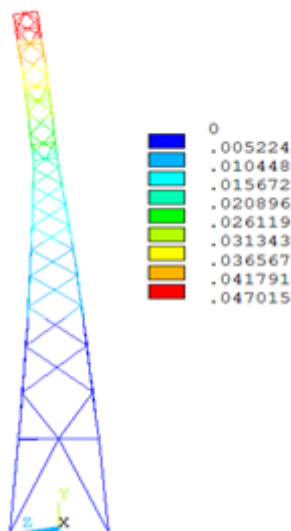


Figura 5.1 – 1º modo de vibração, flexão frontal.

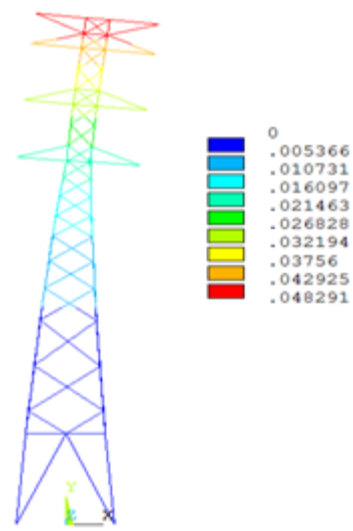


Figura 5.2 - 2º modo de vibração, flexão lateral.

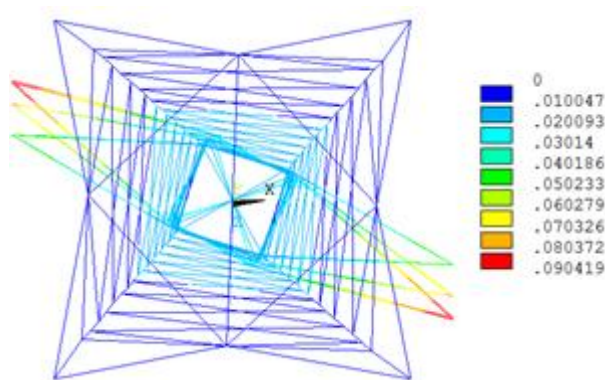


Figura 5.3 – 3º modo de vibração, torção.

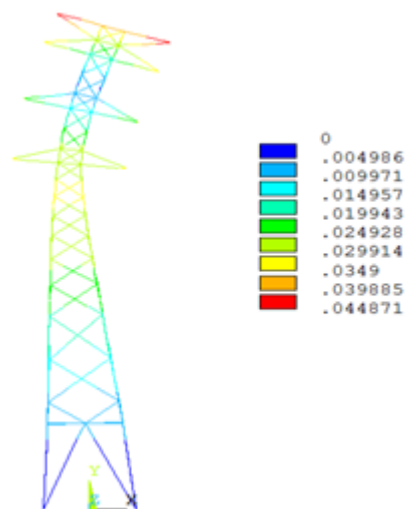


Figura 5.4 - 4º modo de vibração, flexão lateral.

5.1.2 Sistema Estrutural Completo

A Tabela 5.2 mostra informações sobre as cinco primeiras frequências naturais de vibração obtidas com sistema estrutural completo, formado pela torre, cadeias de isoladores, cabos condutores e cabos para-raios.

As características dos cabos e isoladores de possuírem uma rigidez baixa e uma massa relativamente grande influenciam expressivamente no comportamento dinâmico global da estrutura. Portanto, uma análise modal da estrutura completa é realizada com resultados satisfatórios, chegando a ser cerca de dezessete vezes menor que a frequência natural da torre isolada.

Tabela 5.2 – Frequências naturais da estrutura completa.

Frequências	1	2	3	4	5
Valor [Hz]	0.18199	0.18241	0.18243	0.18243	0.18243

Tais resultados estão de acordo com estudos semelhantes, Oliveira, 2006, onde se obteve frequências na faixa de 0.162Hz para uma torre tipo delta com 32m de altura.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostrados os dois primeiros modos de vibração da estrutura com cabos e isoladores.

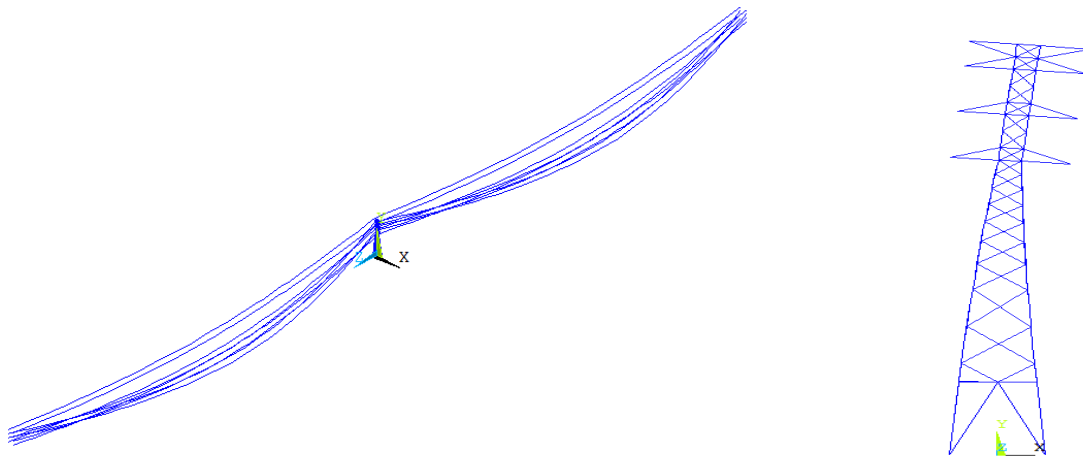


Figura 5.5 – 1º modo de vibração.

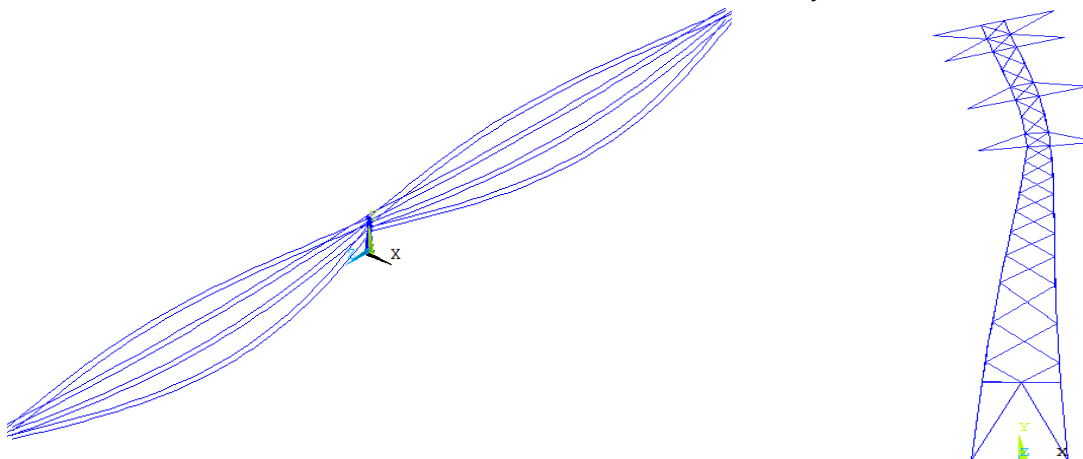


Figura 5.6– 2º modo de vibração.

5.2 Análise Transiente com Força Externa

Nessa análise foram considerados coeficientes de amortecimento proporcional à massa igual 3 para a torre e 2 para os isoladores com base no estudo paramétrico realizado por Kaminski et al, 2005. Os resultados são em termos do deslocamento no topo da torre no

sentido longitudinal dos cabos (Figura 5.8) e dos esforços (Figura 5.9) nas barras destacadas da torre (Figura 5.7).

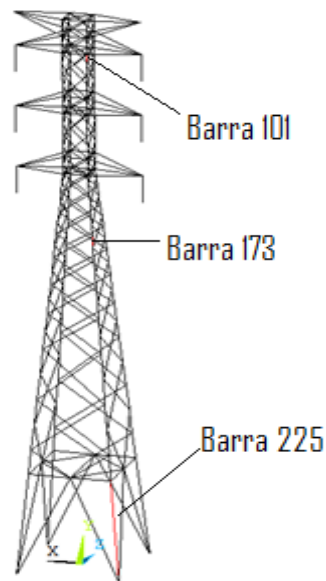


Figura 5.7 – Torre com barras analisadas destacadas.

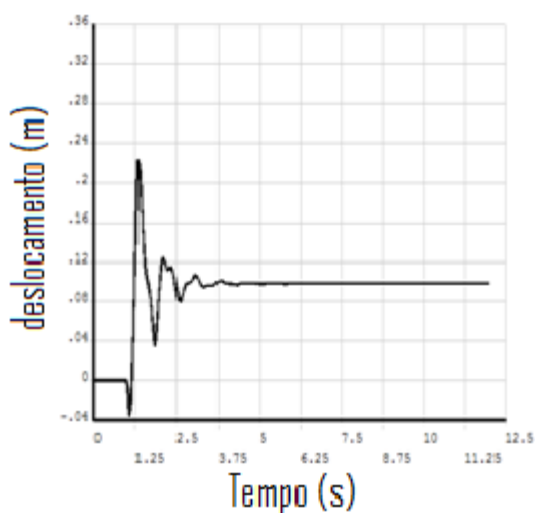


Figura 5.8 – Deslocamento no topo da torre.

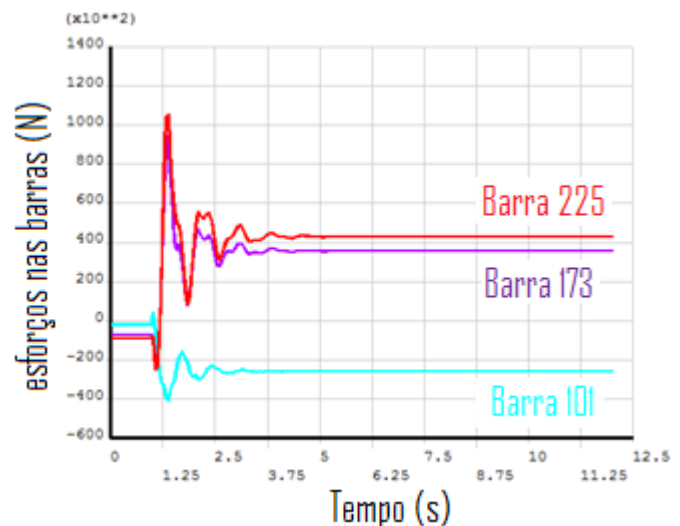


Figura 5.9 – Esforços nas barras.

Nota-se pela Figura 5.9 que as barras 225 e 173, ambas montantes, sofrem a mesma variação de esforços sofrendo esforços de tração após estabilização, com uma leve diferença no valor de estabilização. Já a barra 101, que se encontra na parte superior da torre, sofre um esforço de compressão. Os resultados estão de acordo com o trabalho de Miguel *et al.*, 2005 onde o deslocamento final foi de 11cm, os esforços finais nas barras 225 e 173 iguais a 40kN, sendo que todos os gráficos apresentam o mesmo formato .

Pela Figura 5.8, a torre apresenta um deslocamento no topo de 10 cm, chegando a se movimentar 22 cm no momento da aplicação da força.

5.3 Análise Transiente Não Linear com Dois Vãos de Cabos

Nessa análise são obtidos gráficos de deslocamento do topo da torre e esforços de algumas barras, tal como a análise anterior. Como podem ser observados, os resultados obtidos são semelhantes, corroborando assim, a análise não linear com cabos e a utilização do comando “*Birth and Death*” para simular o rompimento do cabo. Na Figura 5.10 observa-se o deslocamento no topo da torre e na Figura 5.11 os esforços obtidos nas mesmas barras observadas na análise transiente com força externa. O coeficiente de amortecimento do cabo

utilizado é 0,5. Tais resultados estão de acordo com o trabalho de Kaminski *et al*, 2005, onde o deslocamento final é de 7cm e os esforços axiais finais das barras 173 e 225 igual a 21kN.

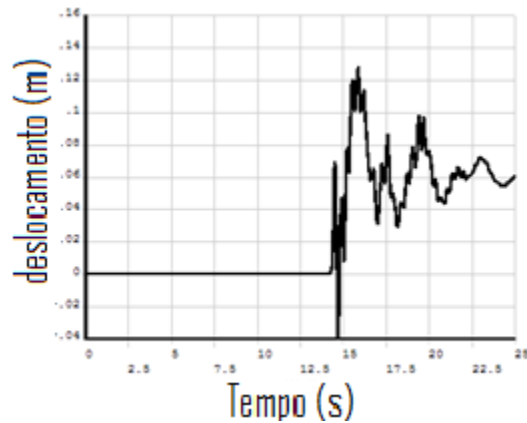


Figura 5.10 – deslocamento no topo da torre.

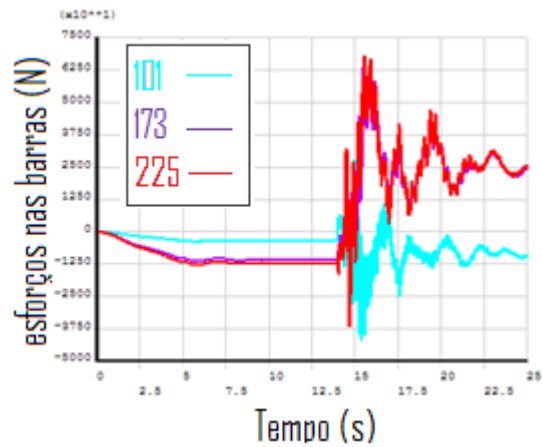


Figura 5.11 – Esforço nas barras 101, 173 e 225.

5.4 Análise Transiente Não Linear de Um Trecho de Linha

Nessa etapa é feita uma análise de um trecho de linha com quatro torres e cinco vãos de cabos. O primeiro parâmetro avaliado nessa análise foi o coeficiente de amortecimento estrutural proporcional à massa do cabo (α), alterando o valor de 0,5 a 1,0. Nas Figuras 5.12 e 5.13 é mostrado o deslocamento no topo da torre mais próxima (T4), indicado na figura 3.4, ao rompimento do cabo, sendo que o elemento de cabo rompido encontra-se no meio do vão.

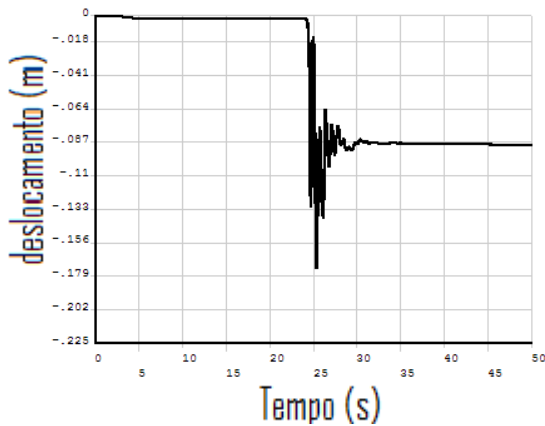


Figura 5.12 – Deslocamento no topo com $\alpha=1$.

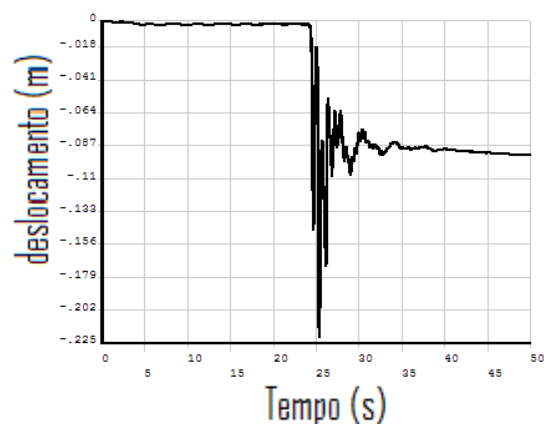


Figura 5.13 – Deslocamento no topo com $\alpha=0,5$.

As Figuras 5.14 a 5.17 demonstram os esforços sofridos em barras localizadas em diferentes pontos torre, sendo T4 a torre analisada.

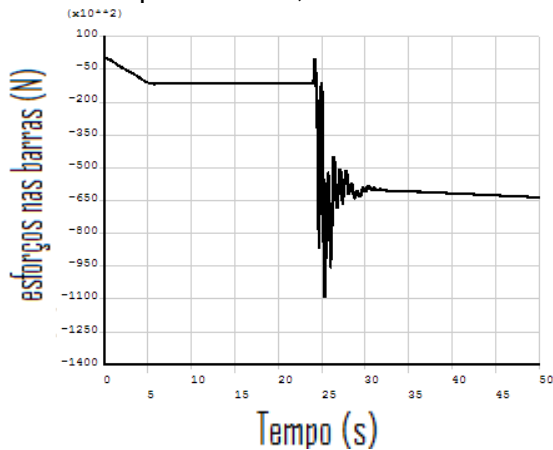


Figura 5.14 – Esforços em barra montante com $\alpha=1$.

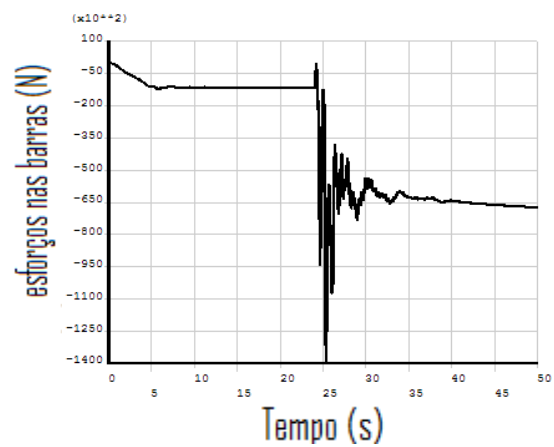


Figura 5.15 – Esforços em barra montante com $\alpha=0,5$.

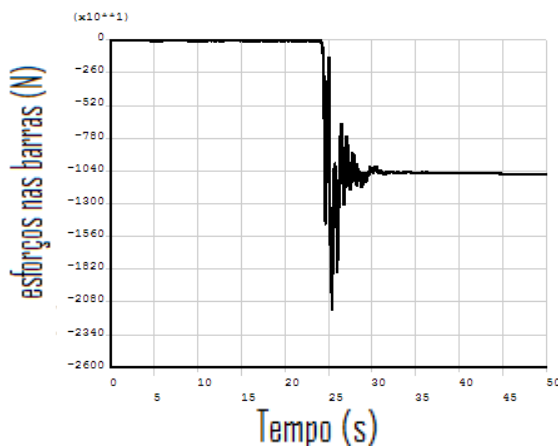


Figura 5.16 – Esforços em barra diagonal com $\alpha=1$.

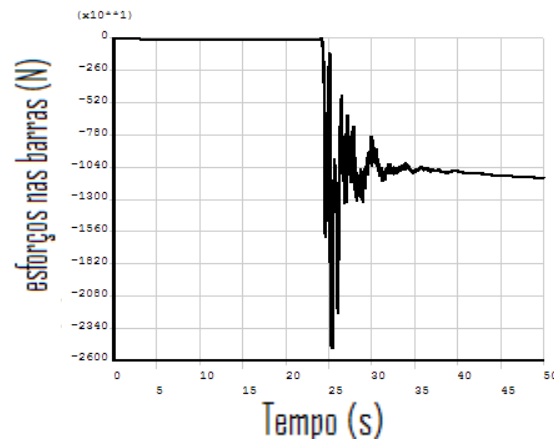


Figura 5.17 – Esforços em barra diagonal com $\alpha=0,5$.

Analisando os gráficos das Figuras 5.14 a 5.17, nota-se que as barras montantes são mais solicitadas, porém se deve um cuidado no projeto das barras diagonais, pois elas estão sujeitas ao efeito de torção associado à flexão na torre ocasionado pela ruptura dos cabos.

A seguir foi avaliada a influência do local de ruptura do cabo, rompendo um elemento de cabo próximo à torre. As Figuras 5.18 a 5.20 mostram os esforços nas barras diagonal e montante e o deslocamento do topo da torre, sendo T4 a torre analisada.

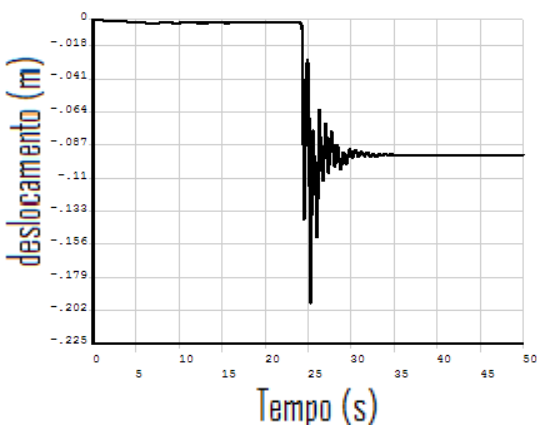


Figura 5.18 – Deslocamento do topo $\alpha=1$.

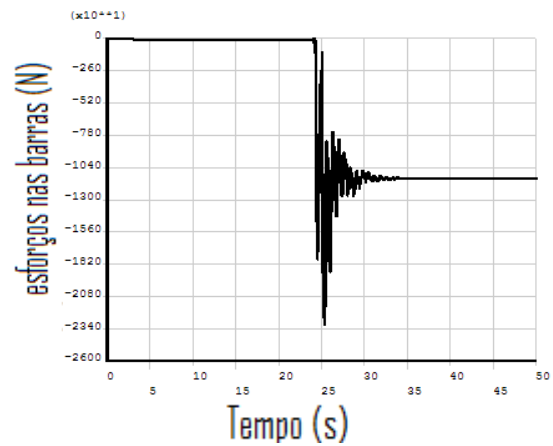


Figura 5.19 – Esforços em barra diagonal com $\alpha=1$.

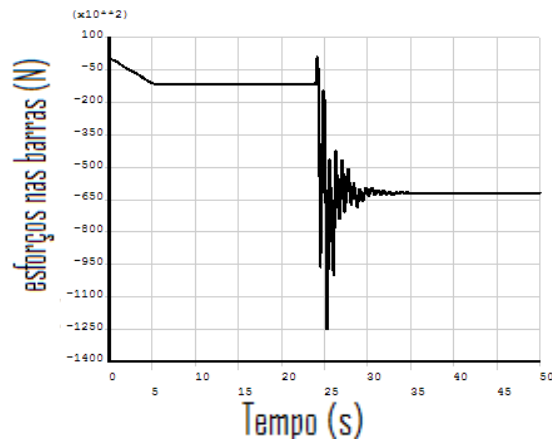


Figura 5.20 – Esforços em barra montante com $\alpha=1$.

Nota-se que a diferença do local do rompimento do cabo acarreta leve mudança nos valores de picos dos esforços, mas os valores finais se mantêm muito parecidos.

Os gráficos das Figuras 5.21 a 5.23 mostram como ocorre o amortecimento ao longo da linha de transmissão. Para esta análise foi considerado $\alpha=1$ e o elemento de cabo que se rompe se encontra no meio do vão.

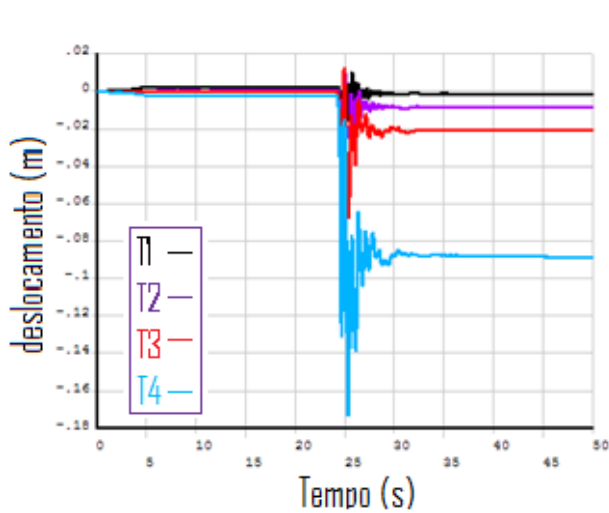


Figura 5.21 – Deslocamento do topo das torres ao longo da linha.

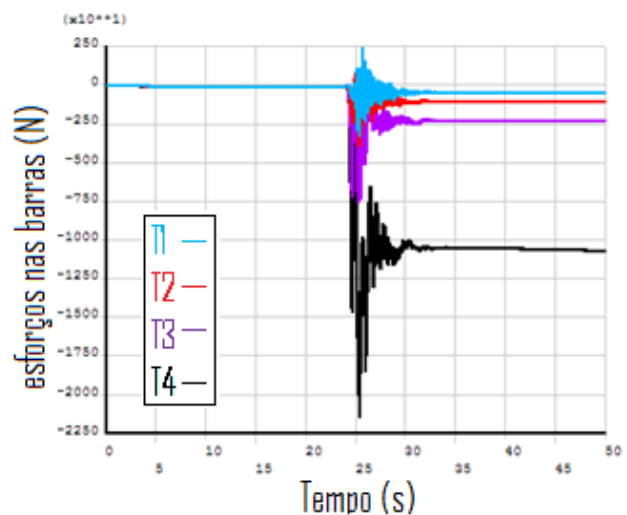


Figura 5.22 – Esforços nas barras diagonais com $\alpha=1$.

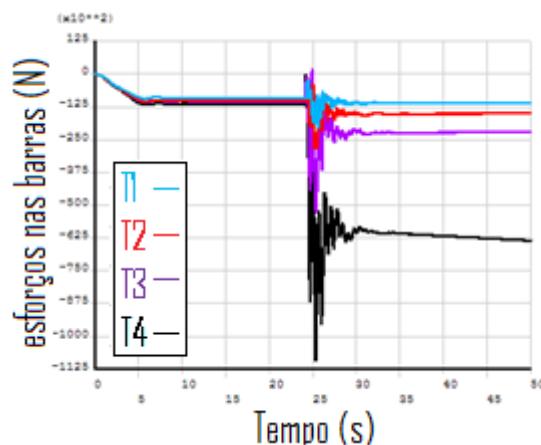


Figura 5.23 – Esforços nas barras montantes com $\alpha=1$.

Pelas Figuras 5.22 e 5.23 verifica-se que no vão entre as torres T4 e T3 há um amortecimento relativamente alto, com o resultado dos esforços axiais diminuindo na razão de

quatro. Já no gráfico do deslocamento (Figura 5.21) nota-se que a torre 1, mais distante do ponto de ruptura, não sofre um deslocamento permanente.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um modelo para representar e analisar um trecho de linha de transmissão de energia. O modelo consegue reproduzir a ruptura de um cabo, provocando deslocamentos no topo das torres e esforços axiais nas barras que constituem a torre.

Foi realizada uma comparação entre os resultados do presente trabalho e os obtidos por Miguel *et al.*, 2005, e Kaminski *et al.*, 2005, e observou-se que mesmo possuindo leves diferenças entre os resultados, provavelmente devido às diferentes abordagens utilizadas para resolver o problema, as mesmas tendências de curvas foram encontradas, tanto na análise transiente com força externa quanto na análise transiente não linear com dois vãos de cabos.

Através das análises dos esforços axiais nas barras, verifica-se que as barras montantes são mais solicitadas chegando a 80% da sua tensão admissível. Porém, se deve ter cuidado especial com as barras diagonais, pois elas estão sujeitas a esforço de torção combinado com flexão. Quanto ao amortecimento estrutural dos cabos, observa-se que é um parâmetro que influencia na amplitude da resposta, sendo de fundamental importância a sua quantificação na análise.

Por fim gostaria de destacar a importância deste trabalho que me possibilitou aplicar conhecimentos adquiridos durante a graduação, e também aprender muitos conceitos novos, capacitou-me a aprender utilizar o Ansys, o qual não tinha conhecimento prévio, e obter um conhecimento mais aprofundado sobre análise dinâmica não linear de estruturas, além de um conhecimento satisfatório sobre linhas de transmissão de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansys, “**Ansys Multiphysics Documentation – Theory Reference**”, 2011.
- Groehs, A.G.; **Mecânica Vibratória**. São Leopoldo, RS. Editora Unisinos, 2ª ed. 2005.
- Irvine, H.M., Caughey, T.K., “**The linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable**”. Proceedings of the Royal Society of London, Vol. A341, 299-315, December. 1974.
- Miguel, L. F. F., Menezes, R. C. R., Kaminski Jr., J., “**Sobre a Resposta de Estruturas de LTs Submetidas a Cargas Dinâmicas**”, XI ERIAC, 2005.
- Kaminski Jr., J., Miguel, L. F. F., Menezes, R. C. R., “**Aspectos Relevantes na Análise Dinâmica de Torres de LT Submetidas à Ruptura de Cabos**”, XVIII SNPTEE, Curitiba, Brasil, 2005.
- Kaminski Jr., J., “**Incertezas de Modelo na Análise de Torres Metálicas Trelaçadas de Linhas de Transmissão**”, Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2007.
- Oliveira, M.I.R., “**Análise Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Submetidas ao Efeito do Vento**”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, UERJ. 2006.
- ABNT. **NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.
- Rao, S.S., “**Mechanical Vibrations**”. Prentice Hall, Brasil, 5ª edição, 2011.
- Silva, J.G.S. da, Vellasco, P.C.G. da S., Andrade, S.A.L de, Oliveira, M.I.R. de. “**Structural Assessment of Current Steel Design Models for Transmission and Telecommunication Towers**”, Journal of Constructional Steel Research, 61, 1108-1134, 2005.