

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR
ESCOLA POLITÉCNICA

THIAGO MICHEL DO VALLE PEDROSO

**ANÁLISES DE TORRES MONOTUBULARES METÁLICAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SUBMETIDAS A CARGAS
DINÂMICAS DE VENTO E RUPTURA DE CABOS**

CURITIBA
Dezembro - 2020

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR
ESCOLA POLITÉCNICA

THIAGO MICHEL DO VALLE PEDROSO

**ANÁLISES DE TORRES MONOTUBULARES METÁLICAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SUBMETIDAS A CARGAS
DINÂMICAS DE VENTO E RUPTURA DE CABOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM, Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR.

Orientador: Prof. João Elias Abdalla Filho, Ph.D

CURITIBA
Dezembro - 2020

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Pamela Travassos de Freitas – CRB 9/1960

P372a
2020

Pedroso, Thiago Michel do Valle

Análises de torres monotubulares metálicas de transmissão de energia submetidas a cargas dinâmicas de vento e ruptura de cabos / Thiago Michel do Valle Pedroso ; orientador: João Elias Abdalla Filho. – 2020.
155, [12] f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020
Bibliografia: f. 89-92

1. Engenharia mecânica. 2. Energia elétrica - Transmissão. 3. Estatística. 4. Estruturas de cabo. 5. Ventos. I. Abdalla Filho, João Elias. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná Pós-Graduação em Engenharia de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1



Pontifícia Universidade Católica do Paraná–PUCPR
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM

TERMO DE APROVAÇÃO

Thiago Michel do Valle Pedroso

Análises de Torres Monotubulares Metálicas de Transmissão de Energia Submetidas à Cargas Dinâmicas de Vento e Ruptura de Cabos

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre no Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Alkimin de Lacerda
Universidade Federal do Paraná, UFPR, Relator

Prof. Dr. Marcos Arndt
Universidade Federal do Paraná, UFPR

Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, orientador

Curitiba, 16 de dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha esposa Sarah Soares Abicht Pedroso e ao meu filho Matheus Abicht Pedroso, a quem dedico este trabalho.

Aos meus pais, meu irmão e amigos.

Aos amigos da Seccional Brasil S/A e da Fasttel Engenharia Ltda que contribuíram com este trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho e aos demais professores da PPGEM que estiveram presentes nesta jornada.

À CAPES por ter me contemplado com a bolsa de estudos e à Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aplicação de torres monotubulares em linhas de transmissão.....	15
Figura 2.1: Torres metálicas treliçadas utilizadas em Linhas de Transmissão.....	21
Figura 2.2: Torres Monotubulares utilizadas em Linhas de Transmissão.....	21
Figura 2.3: Itens componentes de uma Torre Monotubular.	22
Figura 2.4: Hipótese de ruptura de cabo em torres de suspensão.....	29
Figura 3.1: Resposta de um sistema amortecido submetido a vibração livre.....	33
Figura 3.2: Variação do Fator de Magnificação Dinâmica em relação ao amortecimento e à frequência.....	35
Figura 3.3: Gráfico de um carregamento periódico genérico.....	36
Figura 3.4: (a) Método da Aceleração Média e (b) Método da Aceleração Linear.....	38
Figura 3.5: Elemento finito de barra sob ação axial.....	38
Figura 3.6: Viga de Euler-Bernoulli.....	39
Figura 3.7: Relação entre ξ e ω para os coeficientes de Rayleigh.....	41
Figura 4.1: Espectros de Davenport, Harris, von Kármán e Kaimal.	49
Figura 4.2: Rajadas equivalentes.	51
Figura 5.1: Representação esquemática do algoritmo desenvolvido.....	57
Figura 5.2: Modelo de torre monotubular no software SAP2000 - Modos de vibração.	58
Figura 5.3: Espectros de Potência considerados no estudo.	59
Figura 5.4: Exemplo de 12 funções harmônicas consideradas para obtenção da parcela flutuante da força de vento.	60
Figura 5.5: Histórico temporal obtido a partir do Método do Vento Sintético.	60
Figura 5.6: Histórico temporal aplicado no software SAP2000. (a) Carga de vento obtida através do Método do Vento Sintético; (b) Peso próprio.	61
Figura 5.7: Hipótese de ruptura de um dos cabos condutores.	62
Figura 5.8: Modelo SAP2000.....	64
Figura 5.9: Chaminé de concreto armado - exemplo numérico.	65

Figura 5.10: Segmento de linha de transmissão composto por quatro torres modelo SY.	66
Figura 5.11: Modelo SAP2000 torre SY.	67
Figura 5.12: Modelagens considerando elementos de dois nós e três nós.	69
Figura 5.13: Histórico temporal Momento M_y no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	70
Figura 5.14: Histórico temporal Força F_x no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	71
Figura 5.15: Histórico temporal Força F_z no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	71
Figura 5.16: Histórico temporal Deslocamento δ_x no nó do topo para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	71
Figura 5.17: Histórico temporal Momento M_x no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	72
Figura 5.18: Histórico temporal Força F_y no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	73
Figura 5.19: Histórico temporal Força F_z no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	73
Figura 5.20: Histórico temporal Deslocamento δ_y no nó do topo para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós	73
 Figura 6.1: Silhueta típica das torres monotubulares analisadas	78
Figura 6.2: Gráfico FM M_y referente às cargas devidas ao vento versus f_l	85
Figura 6.3: Gráfico FM M_x referente às hipótese de ruptura do cabo condutor versus f_l	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1 Parâmetros Fr, b e p. FONTE: NBR6123 (1988)	53
Tabela 5. 1 Resultados do estudo comparativo - Chaminé de concreto armado	66
Tabela 5. 2 Resultados do estudo comparativo - Torre SY - Análises estáticas	67
Tabela 5. 3 Resultados do estudo comparativo - Torre SY - Análises dinâmicas.....	68
Tabela 5. 4 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises estáticas - Cargas de vento	69
Tabela 5. 5 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises dinâmicas - Cargas de vento	70
Tabela 5. 6 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises estáticas e dinâmicas - Hipótese de ruptura do cabo condutor	72
Tabela 5. 7 Resultados do estudo - Intervalo de tempo Δt - Método Newmark	74
Tabela 6. 1 Casos estudados	77
Tabela 6. 2 Dados de entrada.....	78
Tabela 6. 3 Frequência dos três primeiros modos de vibração.....	81
Tabela 6. 4 FM My referente às cargas devidas ao vento	82
Tabela 6. 5 FM Mx referente à hipótese de ruptura do cabo condutor.....	83
Tabela 6. 6 FM My e δx referente às cargas devidas ao vento para $\Delta t = T1/20$	84

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
C	Matriz de amortecimento
C_a	Coefficiente de arrasto
C_r	Coefficiente de redução das pressões flutuantes
D	Fator de Resposta
D_0	Diâmetro externo da seção tubular ou diâmetro externo entre faces planas para seções poligonais
E	Módulo de elasticidade do material
F_a	Tensão de compressão admissível devido às cargas axiais
F_b	Tensão de compressão admissível devido às cargas de momento fletor
F_f	Força flutuante do vento aplicada no nó
$F_r ; b; p$	Parâmetros adimensionais os quais representam diversos intervalos de tempo de integração das rajadas de vento NBR6123 (1988)
F_u	Tensão de ruptura
F_v	Tensão de cisalhamento admissível
F_y	Tensão de escoamento do material utilizado
FM	Fator de Magnificação Dinâmica
F_x	Reação de força horizontal paralela ao eixo X
F_y	Reação de força horizontal paralela ao eixo Y
F_z	Reação de força horizontal paralela ao eixo Z
G_c	Posição do centro de rajada
I	Momento de inércia da seção transversal
J	Constante de torção da seção transversal
K	Matriz de rigidez
L	Comprimento do elemento
L_k	Tamanho da rajada
M	Matriz de massa
M_x	Momento fletor atuante em torno do eixo X
M_y	Momento fletor atuante em torno do eixo Y
M_x	Reação de momento fletor em torno do eixo X
M_y	Reação de momento fletor em torno do eixo Y

M_z	Reação de momento fletor em torno do eixo Z
$N_i, ; N_j$	Funções de forma
P	Carga de compressão atuante
$P_{din}(t, j)$	Série temporal dos harmônicos para cada nó
P_m	Probabilidade da velocidade do vento superar a velocidade básica no período m
Q	Momento estático da seção em relação à linha neutra
Q	Pressão flutuante corrigida no domínio do tempo
R	Função harmônica ressonante com a frequência natural da estrutura analisada
$S(z, f)$	Espectro de potência das velocidades do vento em função da cota z e da frequência f
$S_r(z, f)$	Espectro de potência reduzido
S_1	Fator topográfico NBR6123 (1988)
S_2	Fator de rugosidade do terreno NBR6123 (1988)
S_3	Fator estatístico NBR6123 (1988)
T	Período natural de vibração
T_d	Torção atuante
TM	Torre monotubular
T_r	Período associado à frequência natural da estrutura analisada
V	Força de cisalhamento atuante
$\vec{V}(z)$	Velocidade média na cota z .
V_k	Velocidade característica do vento
V_j	Velocidade de Pico referente à rajada de 3s, no nó j.
V_{mj}	Velocidade Média referente à rajada de 600s, no nó j.
$a_0 ; a_1$	Coeficientes de proporcionalidade para Matriz de Amortecimento de Rayleigh
$a_0 ; a_n ; b_n$	Parâmetros genéricos da série de Fourier
b	Duas vezes a espessura da parede da seção (e)
c	Amortecimento de um elemento
c_c	amortecimento crítico
c_x	Distância entre o eixo Y e o ponto onde a tensão é verificada

c_y	Distância entre o eixo X e o ponto onde a tensão é verificada
e	Espessura da parede da seção do poste metálico
f	Frequência natural de vibração
f_a	Tensão de compressão atuante devido às cargas axiais
f_b	Tensão de compressão atuante devido às cargas de momento fletor
$f_b(t)$	Forças de amortecimento
$f_i(t)$	Forças inerciais
$f_s(t)$	Força de mola ou de rigidez
k	Rigidez de um elemento
k	Função harmônica
m	Massa de um elemento
m	Período de retorno considerado, em anos
$p(t)$	Carregamento temporal
p_0	Amplitude do carregamento
p'	Pressão flutuante
q_j	Pressão de vento de pico
q_{mj}	Pressão de vento média
r	Frequência natural da estrutura analisada
s	Parâmetro adimensional
t	Tempo
u^*	Velocidade de atrito ou velocidade de cisalhamento
u_0	Velocidade média do vento no período de 600s
$v(t)$	Vetor de deslocamentos
$\dot{v}(t)$	Vetor de velocidade
$\ddot{v}(t)$	Vetor de aceleração
v_0	Velocidade básica do vento NBR6123 (1988)
y	Distância entre a linha neutra e a fibra mais extrema
z	Cota do terreno ou do ponto a ser considerada a velocidade do vento
β	Razão entre frequência da carga aplicada ao sistema e a frequência natural circular
β	Parâmetro que define a variação da aceleração ao longo de cada passo de tempo do método Newmark

γ	Parâmetro que define a variação da aceleração ao longo de cada passo de tempo do método Newmark
δ	Decremento logarítmico
δx	Deslocamento no nó do topo no eixo X
δy	Deslocamento no nó do topo no eixo Y
δz	Deslocamento no nó do topo no eixo Z
θ	Ângulo de fase da resposta permanente do sistema (<i>Steady-State</i>)
θ_k	Ângulo de fase aleatório
ξ	Razão de amortecimento
ρ	Amplitude da resposta permanente do sistema (<i>Steady-State</i>)
$\emptyset$	Fator de conversão de unidades ksi e Mpa
ω	Frequência circular de vibração
$\bar{\omega}$	Frequência do carregamento
ω_d	Frequência natural circular amortecida
Δt	Passo de tempo para integração numérica
Δz_{0k}	Altura da rajada equivalente

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento de torres monotubulares metálicas destinadas a linhas de transmissão de energia sujeitas a ações dinâmicas, dimensionadas segundo as recomendações normativas vigentes, as quais contemplam somente análises estáticas. Consideram-se nas análises dinâmicas as solicitações devidas ao vento e à ruptura de um dos cabos da linha de transmissão variando no domínio do tempo. A ação do vento é obtida aplicando o Método do Vento Sintético, o qual leva em conta sua característica aleatória e se baseia em conceitos fundamentais da estatística e em espectros de potência previamente conhecidos. Através deste método é possível descrever a ação do vento decomposta em uma parcela média e uma parcela flutuante. A ação dinâmica devido à ruptura dos cabos é aplicada como uma carga de impacto atuando no eixo horizontal, devido à força de tração atuante no cabo. As estruturas são modeladas no software comercial SAP2000, baseado no Método dos Elementos Finitos, gerados automaticamente através de um algoritmo em *Visual Basic*. No algoritmo há a interação entre uma planilha de cálculo em Microsoft Excel, onde são inseridos os dados de entrada e realizados os cálculos do Método do Vento Sintético, com o software SAP2000. São considerados elementos de pórtico tridimensional, admitindo-se comportamento elástico-linear do material. A solução da equação de movimento é obtida a partir da integração direta através do Método de Newmark. São analisados e comparados os resultados referentes às análises dinâmicas e estáticas de diversos casos de torres monotubulares metálicas para linhas de transmissão de 138kV e 230kV, ambas em circuito duplo.

ABSTRACT

This work analyzes the structural behavior of steel poles destined to the power transmission lines under dynamic loads, designed according to the current normative recommendations, which ones contemplate only static loads. Dynamic analysis takes into account the wind load and the cable rupture load varying in the time domain. Wind action is obtained by applying the Synthetic Wind Method, which takes into account its random characteristic and it is based on fundamental statistical concepts and previously known power spectra. Through this method it is possible to describe the wind load decomposed into a mean pressure and a fluctuating pressure. The cable rupture load is applied as an impact load acting on the horizontal axis due to the tensile force acting on the cable. The structures are modeled on the commercial software SAP2000, based on the Finite Element Method. The models are automatically generated through a Visual Basic Application, linking an Excel spreadsheet to SAP2000. They are considered three-dimensional frame elements, assuming an elastic-linear behavior of the material. The solution of the equation of motion is obtained from direct integration through the Newmark Method. The results concerning the dynamic and static analysis of several cases of steel poles for 138kV and 230kV double circuit transmission lines are analyzed and compared.

SUMÁRIO

Agradecimentos	3
Lista De Figuras	4
Lista De Tabelas	6
Lista De Símbolos	7
Resumo	11
Abstract	12
1. Introdução	15
1.1 Contexto	15
1.2 Motivação	17
1.3 Objetivos	17
1.4 Organização Do Trabalho	18
2. Uso De Torres Monotubulares Em Linhas De Transmissão	20
2.1 Tipos De Torres Monotubulares Para Linhas De Transmissão	20
2.2 Normas Para Dimensionamento	23
2.3 Ações Atuantes	26
2.3.1 Ações Devidas Ao Vento	26
2.3.2 Hipótese De Ruptura De Cabo Condutor	28
3. Ações Dinâmicas Em Estruturas	30
3.1 Conceitos Básicos	30
3.2 Métodos De Integração Direta	36
3.3 Método Dos Elementos Finitos Aplicado Em Análises Dinâmicas	38
3.4 Estudos Já Realizados Em Linhas De Transmissão	41
4. Método Do Vento Sintético	45
4.1 Conceitos	45
4.2 Metodologia Do Vento Sintético	45
4.2.1 Dados De Vento	46
4.2.2 Espectros De Potência	46
4.2.3 Decomposição Das Pressões Flutuantes	49

4.2.4 Correlação Espacial	50
4.2.5 Funções Harmônicas Referentes Às Forças Nos Nós	52
4.3 Aplicações Do Método Do Vento Sintético	54
5. Metodologia Do Estudo	57
5.1 Descrição Do Algoritmo Elaborado	57
5.2 Validação Do Algoritmo	64
5.2.1 Estudo Chaminé - Artigo Prof. Mário Franco - Revista <i>Tqs News</i>	64
5.2.2 Estudo Torre Sy - Artigo Prof. Fadel Miguel - Revista <i>Engineering Structures</i>	66
5.2.3 Estudo De Convergência - Método Dos Elementos Finitos - Elementos De Pórtico Com Dois Nós E Três Nós	68
5.2.4 Estudo De Convergência - Método Newmark - Intervalo De Tempo Δt	74
6. Estudos De Caso	76
6.1 Descrição Das Torres Monotubulares Estudadas	76
6.2 Hipóteses De Carregamento	79
6.3 Resultados	80
6.4 Análise Dos Resultados	85
7. Conclusões	87
8. Referências Bibliográficas	89
9. Anexos	93
9.1 Algoritmo Desenvolvido Em <i>Visual Basic Application</i>	93
9.2 Gráficos Da Planilha Excel	155

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A crescente demanda por linhas aéreas de transmissão inseridas em grandes centros tem aumentado a necessidade de se utilizar estruturas mais compactas, que permitam mitigar os impactos no cenário urbano. Neste contexto, o uso de torres monotubulares metálicas, também chamadas de postes metálicos, conferem solução viável garantindo capacidade mecânica e menor área de ocupação no nível do solo, quando comparadas às torres convencionais. A figura 1.1 ilustra a aplicação das torres monotubulares em linhas de transmissão em ambiente urbano.



Figura 1.1: Aplicação de torres monotubulares em linhas de transmissão.

As torres monotubulares possuem a característica de serem mais esbeltas que as estruturas convencionais, ou seja, as torres metálicas treliçadas, as quais ocupam grande área na base e têm alto impacto visual. Porém, essa esbelteza elevada faz com que a

frequência natural das torres monotubulares seja mais baixa, tornando-as mais suscetíveis às ações dinâmicas. A norma americana ASCE 48-11 (2012) sugere que a frequência natural de torres monotubulares esteja na faixa entre 0,5 e 1 Hz.

No Brasil as torres de transmissão (torres ou postes) são dimensionadas basicamente às ações externas de peso dos equipamentos instalados (cabos, isoladores, acessórios), tração nos cabos e forças devidas ao vento. Duas destas ações podem ser consideradas como ações dinâmicas: a ação do vento e a ação devido ao desequilíbrio de tração quando há o rompimento de cabos em um dos vãos da linha de transmissão. As normas brasileiras atuais aplicáveis ao dimensionamento deste tipo de estrutura não apresentam qualquer subsídio que possibilite os projetistas analisarem o comportamento estrutural frente às ações dinâmicas.

A norma NBR6123 (1988) apresenta um capítulo exclusivamente destinado a ações dinâmicas do vento atuando em edificações. A norma explicita ainda a importância de analisar de forma dinâmica estruturas com período fundamental acima de 1s, ou seja, com frequência natural menor que 1,0 Hz. Porém, a norma não apresenta parâmetros suficientes para análise específica de torres monotubulares, tampouco fornece as cargas de vento atuando no domínio do tempo. De fato, a metodologia sugerida pela norma amplifica as cargas dinâmicas do vento, porém mantendo a natureza estática destas ações atuando na estrutura. Dessa forma, não é possível obter as respostas da estrutura ao longo do domínio tempo.

Riera *et. al.* (1984 *apud* Silva e Carvalho, 2009) consideram que em estruturas com frequência natural acima de 2,0 Hz o efeito dinâmico devido à turbulência atmosférica é desprezível e importante quando a mesma é inferior a 1,0 Hz. Na faixa entre 1,0 e 2,0 Hz o erro resultante da não consideração do efeito dinâmico na direção da velocidade média, isto é, subestimação da resposta, pode ser significativo se o amortecimento do sistema for muito baixo.

Segundo Lazanha (2003) em estruturas cujos primeiros modos de vibração encontram-se abaixo de 1,0 Hz os efeitos dinâmicos do vento tornam-se importantes e a consideração dos esforços como estáticos é uma aproximação por demais grosseira.

A Recomendação Técnica para Projeto de Postes Monotubulares de Aço para Linhas de Transmissão, publicado em 2013 pelo Cigré Brasil - Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, apresenta critérios de projeto baseado em tensões provocadas por carregamento estático, mesmo admitindo que os carregamentos nestes tipos de estruturas são de natureza cíclica.

1.2 MOTIVAÇÃO

As torres monotubulares são usualmente dimensionadas para cargas de vento atuando na própria estrutura, bem como nos cabos da linha de transmissão. Outras ações podem ser consideradas no dimensionamento de uma torre monotubular, como por exemplo, a hipótese de ruptura de um dos cabos onde é gerado um esforço no sentido longitudinal da linha. Apesar da baixa frequência natural apresentada por estas estruturas os procedimentos normativos vigentes sugerem que o dimensionamento seja realizado baseando-se somente em análises estáticas.

Atualmente há métodos não normatizados que permitem a obtenção das ações de vento de forma estocástica e aleatória no domínio do tempo. O Método do Vento Sintético proposto por Franco (1993) trata a característica aleatória do vento aplicando o método estatístico de Monte Carlo, partindo de espectros de potência do vento previamente conhecidos.

Além disso, os softwares comerciais de análises de estruturas atuais permitem que carregamentos temporais sejam aplicados, fornecendo como resultado a resposta dinâmica da estrutura.

A motivação deste trabalho surgiu a partir desta lacuna normativa e da possibilidade de implementar métodos sofisticados e reconhecidos para obtenção de ações dinâmicas em um software comercial com reputação consolidada no meio técnico e científico.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar o comportamento de torres monotubulares destinadas a linhas de transmissão submetidas a ações dinâmicas. Para tanto, são modelados diversos casos de torres monotubulares através do software SAP2000, onde são conduzidas as análises estática e dinâmica. Nestas análises são obtidos todos os parâmetros relevantes ao dimensionamento, como esforços internos, reações de apoio e deslocamentos.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Análise dos modos de vibração das torres monotubulares através do software SAP2000;
- Determinação do histórico temporal da ação do vento, considerando sua característica aleatória e estocástica, através do Método do Vento Sintético;
- Avaliação das ações dinâmicas atuantes nas torres monotubulares devido a ação do vento atuando na estrutura e na linha de transmissão e forças devido à ruptura de um cabo condutor via software SAP2000;
- Avaliação dos parâmetros de dimensionamento, como reações de apoio e deslocamentos nodais referentes às análises estáticas e dinâmicas;
- Obtenção dos fatores de magnificação dinâmica referentes à cada parâmetro de dimensionamento avaliado;
- Por fim, desenvolver uma rotina em *Visual Basic* automatizando de forma sistêmica os processos mencionados acima.

O trabalho limita-se em analisar comportamento elástico linear do material, sem variação da rigidez em função do estado de tensões admitidos pelas estruturas. O amortecimento das estruturas modeladas é assumido baseando-se em pesquisas já realizadas e considerando o amortecimento proporcional de Rayleigh.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em sete capítulos: introdução, uso de torres monotubulares em linhas de transmissão, ações dinâmicas em estruturas, método do vento sintético, metodologia, estudos de caso e conclusão.

O primeiro capítulo apresenta um contexto generalista sobre o tema, além das motivações e objetivos do trabalho e sua forma de organização.

No segundo capítulo será dado maior enfoque à aplicação das torres monotubulares em linhas de transmissão. Serão apresentados os tipos de estruturas, critérios de dimensionamento e as normas nacionais e internacionais vigentes.

O terceiro capítulo aborda os conceitos relacionados às ações dinâmicas em estruturas, com enfoque nos conceitos a serem aplicados na metodologia deste trabalho.

O Método do Vento Sintético será explorado no quarto capítulo, citando diversos estudos já realizados e comprovando sua confiabilidade.

A metodologia será apresentada no quinto capítulo, descrevendo o passo a passo do algoritmo implementado. Será apresentado também uma série de estudos comparativos que serviram de aferição da rotina de cálculo desenvolvida.

No sexto capítulo são apresentados os estudos de caso, com os detalhes das torres monotubulares estudadas, hipóteses de carregamento consideradas e os resultados obtidos.

No sétimo e último capítulo há uma discussão sobre os resultados obtidos, bem como as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. USO DE TORRES MONOTUBULARES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas aéreas de transmissão de energia elétrica são usualmente compostas por torres metálicas treliçadas, as quais suportam os cabos e os demais acessórios necessários para sua correta operação. As torres monotubulares são aplicadas em linhas de transmissão como uma solução para casos onde a utilização de torres treliçadas convencionais são restritas por questões ambientais, fundiárias ou limitação de espaço disponível para sua implantação. Para tanto, as torres monotubulares devem possuir a mesma funcionalidade das torres treliçadas, sem alterar a concepção da linha de transmissão e a disposição dos cabos condutores e para-raios.

2.1 TIPOS DE TORRES MONOTUBULARES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Como as torres monotubulares devem possuir a mesma funcionalidade das torres treliçadas convencionais, apresenta-se na figura 2.1 os modelos de torres usualmente adotados em Linhas de Transmissão.

Estas torres possuem a característica de necessitar extensa área de ocupação devido à distâncias entre os pés. Em linhas cujo traçado necessita passar por trecho urbanos e altamente povoados as torres treliçadas deixam de ser boa opção. Para estes casos uma boa solução é o uso das torres monotubulares, ou também chamados de postes metálicos.

Nos últimos anos, o setor elétrico tem demandado linhas de transmissão cada vez mais próximas dos centros urbanos, aumentando a aplicação das torres monotubulares. Estas torres apresentam a mesma funcionalidade das torres treliçadas convencionais, conforme mostra a figura 2.2.

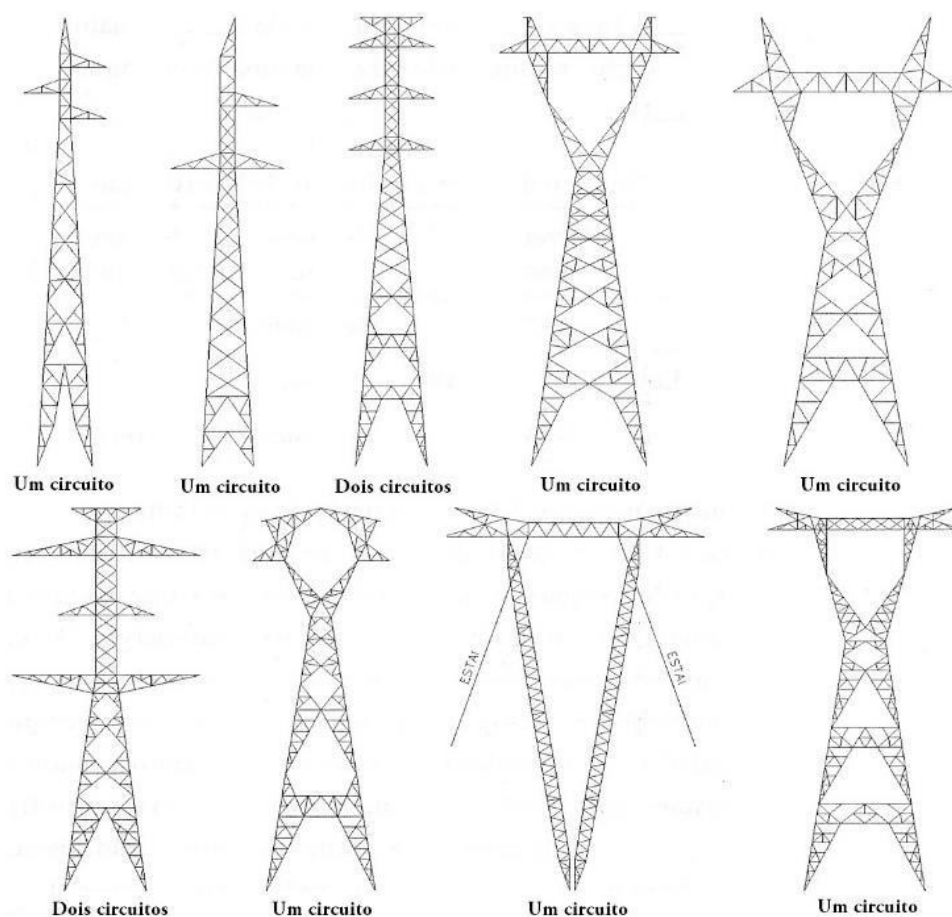


Figura 2.1: Torres metálicas treliçadas utilizadas em Linhas de Transmissão.

FONTE: Gontijo (1994)

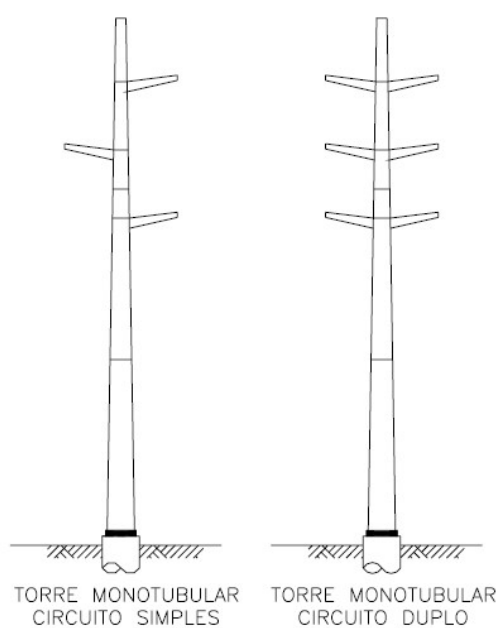


Figura 2.2: Torres Monotubulares utilizadas em Linhas de Transmissão.

FONTE: Chaves (2004)

As torres monotubulares são fabricadas em aço, em módulos tubulares cônicos ou cilíndricos. A ligação entre os módulos pode ser através de flanges ou por encaixe telescópico, chamado de *slip-joint*. A interface junto ao bloco de fundação se dá através de chumbadores e flange de ligação. Com a crescente demanda, houve um certo aumento na quantidade de fabricantes neste setor, cada um com sua característica particular de projeto, fabricação e montagem. A figura 2.3 apresenta os elementos que compõem o projeto de uma torre monotubular.

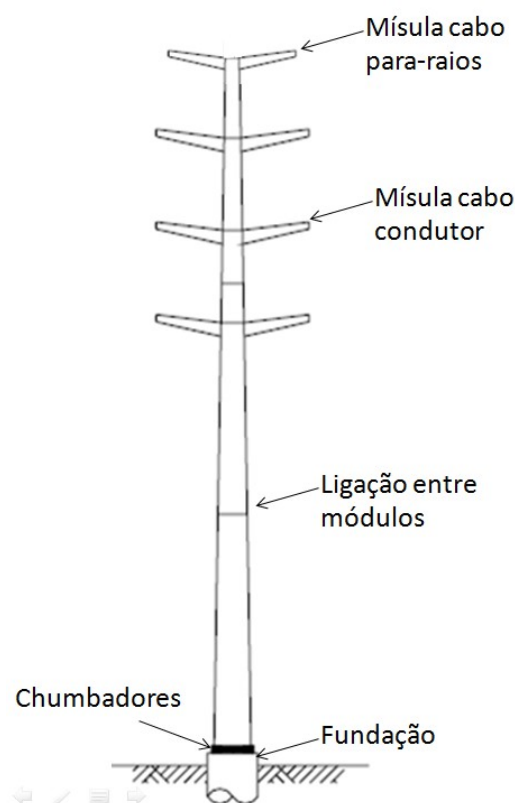


Figura 2.3: Itens componentes de uma Torre Monotubular.

FONTE: Adaptado de Chaves (2004)

Os materiais mais utilizados são aços de alta resistência e baixa liga, como ASTM A-572 Grau 50 ou aço comum ASTM A-36. Nestes casos, todas as peças devem ser galvanizadas a fogo. Há ainda a possibilidade de se utilizar aços resistentes à corrosão, como as chapas da família COR (COS-AR-COR, CSN-COR ou USI-SAC), onde nem sempre é necessária a galvanização, desde que todos os elementos de ligação sejam compatíveis.

Siddiqi (2005) cita como as principais vantagens do emprego das torres monotubulares a possibilidade de executar a montagem em locais com espaço reduzido, como dentro de cidades, reduzindo os custos com faixa de servidão e liberações fundiárias. Além disso, o autor cita sobre as menores cargas devidas ao vento que as torres monotubulares são dispostas, devido à menor área de exposição e vantagens na sua aerodinâmica.

2.2 NORMAS PARA DIMENSIONAMENTO

Dentre as normas relacionadas ao dimensionamento de torres monotubulares, destaca-se a norma americana ASCE 48-11(2012). Esta norma é específica para torres monotubulares para linhas de transmissão e é o código normativo mais completo em subsídios para projetistas e fabricantes. A norma apresenta a formulação necessária para o cálculo das ações solicitantes, bem como a resistência mecânica dos elementos que compõem a estrutura. Além disso, a norma apresenta as diretrizes para fabricação, ensaios e montagem. Há ainda sugestões de formas geométricas para a conformação dos perfis tubulares ou poligonais formados a frio, entre outros detalhes construtivos. De forma geral, as seções das torres monotubulares (tubulares ou poligonais) são dimensionadas para os esforços de flexão, cuja tensão de compressão admissível é obtida conforme:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$F_a = \begin{cases} F_y, \text{ quando } \frac{D_0}{e} \leq \frac{3800\emptyset}{F_y} \\ 0,75F_y + \frac{950\emptyset}{D_0/e}, \text{ quando } \frac{3800\emptyset}{F_y} < \frac{D_0}{e} \leq \frac{12000\emptyset}{F_y} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$F_b = \begin{cases} F_y, \text{ quando } \frac{D_0}{e} \leq \frac{6000\emptyset}{F_y} \\ 0,70F_y + \frac{1800\emptyset}{D_0/e}, \text{ quando } \frac{6000\emptyset}{F_y} < \frac{D_0}{e} \leq \frac{12000\emptyset}{F_y} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

f_a = Tensão de compressão atuante devido às cargas axiais;

f_b = Tensão de compressão atuante devido às cargas de momento fletor;

F_a = Tensão de compressão admissível devido às cargas axiais;

F_b = Tensão de compressão admissível devido às cargas de momento fletor;

F_y = Tensão de escoamento do material utilizado;

D_0 = Diâmetro externo da seção tubular (diâmetro externo entre faces planas para seções poligonais);

e = Espessura da parede da seção;

$\phi = 1,0$ para grandezas em ksi e 6,9 para grandezas em MPa.

Para tensões cisalhantes, oriundas de cargas de cisalhamento, torção ou ambas, a verificação é realizada conforme:

$$\frac{VQ}{Ib} + \frac{T_d y}{J} \leq F_v = 0,58F_y \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde:

F_y = Tensão de escoamento do material utilizado;

F_v = Tensão de cisalhamento admissível;

V = Força de cisalhamento atuante;

Q = Momento estático da seção em relação à linha neutra;

I = Momento de inércia da seção transversal;

T_d = Torção atuante;

J = Constante de torção da seção transversal;

y = Distância entre a linha neutra e a fibra mais extrema;

b = Duas vezes a espessura da parede da seção (e).

Na prática, os postes sempre estão submetidos a ações combinadas de compressão, flexão, torção e cisalhamento. Para isso, a norma ASCE 48-11(2012) traz a verificação das ações combinadas, conforme a equação:

$$\left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_y}{I_x} + \frac{M_y c_x}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{I_e} + \frac{T_d y}{J} \right)^2 \right]^{1/2} \leq F_b \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde:

P = Carga de compressão atuante;

A = Área da seção transversal;

I = Momento de inércia da seção transversal;

I_x = Momento de inércia da seção transversal em torno do eixo X;

I_y = Momento de inércia da seção transversal em torno do eixo Y;

M_x = Momento fletor atuante em torno do eixo X;

M_y = Momento fletor atuante em torno do eixo Y;

y = Distância entre a linha neutra e a fibra mais extrema;

c_x = Distância entre o eixo Y e o ponto onde a tensão é verificada;

c_y = Distância entre o eixo X e o ponto onde a tensão é verificada;

V = Força de cisalhamento atuante;

Q = Momento estático da seção em relação à linha neutra;

T_d = Torção atuante;

J = Constante de torção da seção transversal;

e = Espessura da parede da seção;

F_b = Tensão de compressão admissível devido às cargas de momento fletor.

No Brasil, o único documento normativo aplicável ao dimensionamento de torres monotubulares é a norma NBR8800 (2008), porém esta norma é generalista para estruturas metálicas de edifícios, sem referenciar este tipo de estrutura. Desta norma se obtém os critérios de dimensionamento de ligações e outros acessórios.

Outra referência importante a ser seguida no dimensionamento é o caderno de recomendações técnicas para projeto de postes monotubulares de aço para linhas de transmissão publicado pelo Cigré Brasil, em 2013. Este documento apresenta diversas informações práticas para projeto, fabricação e ensaios. Porém, o documento não é considerado como uma norma técnica homologada e seu uso também não é comum entre os projetistas.

Em linhas gerais, observa-se que não há um consenso entre os projetistas e fabricantes de torres monotubulares quanto à metodologia a ser seguida para o

dimensionamento. Sugere-se neste trabalho seguir a formulação e demais diretrizes da norma americana ASCE 48-11(2012).

2.3 AÇÕES ATUANTES

A ação mais importante para o dimensionamento de uma torre monotubular de linha de transmissão é a ação do vento atuando na própria estrutura e nos cabos fixados à mesma. Outras ações também têm seu grau de relevância no dimensionamento, como o peso próprio da estrutura, peso dos equipamentos instalados e a tração aplicada nos cabos. Uma combinação de carregamento considerável no dimensionamento é a hipótese de ruptura de um dos cabos, quando a tração nos cabos de um dos vãos adjacentes à estrutura cessa subitamente, ocasionando um desequilíbrio de trações aplicadas na estrutura. Neste capítulo serão abordados os dois casos de carga utilizados no estudo objeto do trabalho: ações devidas ao vento e hipótese de ruptura do cabo condutor.

2.3.1 Ações devidas ao vento

Segundo Blessmann (1995) a causa básica do vento natural é o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente, a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob a forma de calor.

Os eventos de maior interesse para a engenharia são os ciclones extratropicais, ciclones tropicais, tormentas elétricas e os tornados.

Os ciclones extratropicais, também encontrados na literatura como tormentas EPS (*Extended Pressure System*) ou ventos sinóticos, são movimentos circulatórios de ar em torno de centros de baixa pressão. São ventos que sopram mantendo uma velocidade média razoavelmente constante por dezenas de minutos ou horas, com flutuações causadas quase sempre por agitação mecânica do ar, chamados de redemoinhos. Estes eventos atingem grandes extensões territoriais, com intensidade média e direção razoavelmente constante por longos períodos de tempo, o que confere facilidades nas medições por instrumentos ou via satélite. Esta característica permite que estes fenômenos sejam representados estatisticamente por processos estocásticos ergódicos, nos quais seus parâmetros são os mesmos em toda a série histórica temporal. De acordo com Blessmann (1995) os ciclones extratropicais são os ventos fortes mais estudados e servem de base para a maioria das normas sobre forças causadas pelo vento.

Conforme Blessmann (1995) os ciclones tropicais são semelhantes aos ciclones extratropicais, porém são mais intensos e mais localizados. Formam-se a partir do ar úmido e quente existente sobre grandes extensões de água em regiões tropicais dos oceanos, tanto norte como sul. Blessmann (1995) afirma que os ciclones tropicais de grandes dimensões também podem, para fins de engenharia estrutural, ser considerados pelas normas de vento quanto à variação da velocidade média com a altura e quanto às características de turbulência.

Em geral, as normas de forças de vento em edificações se baseiam em rajadas de 3 segundos atuando de forma estática. A norma brasileira NBR6123 (1988) apresenta ainda um capítulo destinado ao efeito dinâmico causado pela turbulência atmosférica. No procedimento são consideradas as flutuações em torno da velocidade média, ou seja, as rajadas sucessivas. Segundo Blessmann (1998) o processo da norma apresenta a determinação da ação estática equivalente do vento, onde a vibração da estrutura em seus modos fundamentais ocorre em torno da posição deformada, definida pelas pressões geradas pela componente estática do vento (componente média). Esta metodologia apresenta uma boa aproximação para verificação de parâmetros de projeto relacionados ao conforto das edificações, porém não são relevantes para verificação e dimensionamento estrutural, pois não leva em consideração os efeitos de ressonância entre a frequência da ação do vento e os modos de vibração da estrutura analisada.

De acordo com Riera (2016) normas sobre ação do vento em estruturas usualmente admitem que, sobre terreno horizontal, o vetor da velocidade média do vento tem magnitude constante e é paralelo à superfície do solo. A hipótese é válida no caso de eventos sinóticos, causados pelos ciclones tropicais ou extratropicais (tormentas EPS).

Um evento de muita discussão nos meios técnico e científico são as tormentas elétricas, também chamadas de tormentas TS (*Thunder Storms*), microexplosão, *downburst*, ou vento não sinótico. Estas tormentas elétricas são as correntes descendentes de ar que chegam ao solo de forma brusca, após formação de uma nuvem *cumulonimbus* acompanhada por rajadas violentas e chuva torrencial. Blessmann (1995) caracteriza as tormentas elétricas por uma atmosfera verticalmente instável, com gradiente térmico vertical considerado, onde aparecem violentos movimentos verticais de ar, com formação de nuvens a grandes alturas. Fujita (1985) definiu uma microexplosão como massa de ar frio e úmido que cai repentinamente a partir da base de uma nuvem de tempestade elétrica, atinge a superfície do solo, e então diverge horizontalmente a partir do centro do impacto.

Segundo Riera (2016) os efeitos do vento associado às denominadas correntes descendentes, típicas de tormentas elétricas em eventos TS (*Thunder Storm*), não foram até agora considerados em normas de projeto estrutural na América do Sul.

Conceição, Pfeil e Battista (2015) analisaram o efeito da ação dinâmica em um fenômeno de *downburst*, ou microexplosão. Os autores concluíram que, em termos de esforços axiais na estrutura, não há divergências substanciais entre as análises estática e dinâmica, justificando-se realizar apenas análise estática simplificada para ações decorrentes deste tipo de fenômeno. No trabalho de Vanin (2017) foi analisado um segmento de linha de transmissão e obteve como resultado solicitações cerca de 45% mais severas para os ventos sinóticos do que para os ventos não sinóticos.

No Brasil, para o dimensionamento de estruturas destinadas a linhas de transmissão (torres treliçadas ou torres monotubulares) usualmente considera-se a norma brasileira NBR5422 (1985) associada à norma internacional IEC60826 (2003), as quais baseiam-se apenas em análises estáticas equivalentes. A norma brasileira fornece os dados de velocidade básica de vento em todo o território nacional, enquanto a norma internacional fornece toda a formulação necessária para obtenção das forças de vento atuantes na estrutura, nos cabos e demais acessórios. Há ainda a norma brasileira NBR6123(1988), a qual é mais generalista para ações de vento em edificações.

As normas apresentam certas diferenças nas metodologias, porém os resultados finais são compatíveis. Importante ressaltar que deve haver sempre a compatibilidade entre o tempo de integração da rajada de vento, bem como o período de retorno considerado. Para cargas estáticas equivalentes adota-se rajada com 3 segundo de integração, enquanto para análises dinâmicas considera-se período de integração de 10 minutos. Para linhas de transmissão o período de retorno varia em função do seu nível de tensão, atrelado à confiabilidade exigida pelo operador do sistema. Usualmente considera-se período de retorno de 150 anos para linhas com nível de tensão até 230kV e 250 anos para linhas até 500kV.

2.3.2 Hipótese de ruptura de cabo condutor

Além da ação do vento, as torres de transmissão também são solicitadas por cargas longitudinais devidas às trações nos cabos fixados à estas estruturas. Em torres de suspensão, em alinhamento, estas cargas geralmente estão equilibradas e não geram esforço adicional à estrutura. Porém, quando há a ruptura de um dos cabos em um vão,

cessa-se a tração aplicada na estrutura e permanece apenas a tração do vão adjacente. Nesta situação há um desequilíbrio de tração aplicada na estrutura, gerando uma carga considerável ao longo do eixo longitudinal.

De acordo com Chaves (2004) quando um cabo condutor se rompe há uma redistribuição de esforços longitudinais devido ao movimento da cadeia de isoladores. Esse efeito é computado na avaliação do valor da carga que o cabo aplica na torre. Para torres de suspensão usualmente se admite um alívio entre 70% e 85% do valor da tração no cabo transmitida à estrutura. A figura 2.4 mostra um esquemático da hipótese de ruptura de cabo em torres de suspensão.

Segundo Kaminski Jr. (2007) as ações provocadas pela ruptura de um ou mais cabos em uma linha de transmissão merecem atenção especial, uma vez que elas podem levar a danos de grandes proporções. Quando tal carregamento não é adequadamente considerado no projeto, pode resultar no colapso em sequência de torres de suspensão, conhecido como efeito cascata. O autor ainda propõe uma metodologia para analisar este tipo de carregamento de forma dinâmica, considerando uma carga de impulso ou de choque atuando na extremidade da mísula.

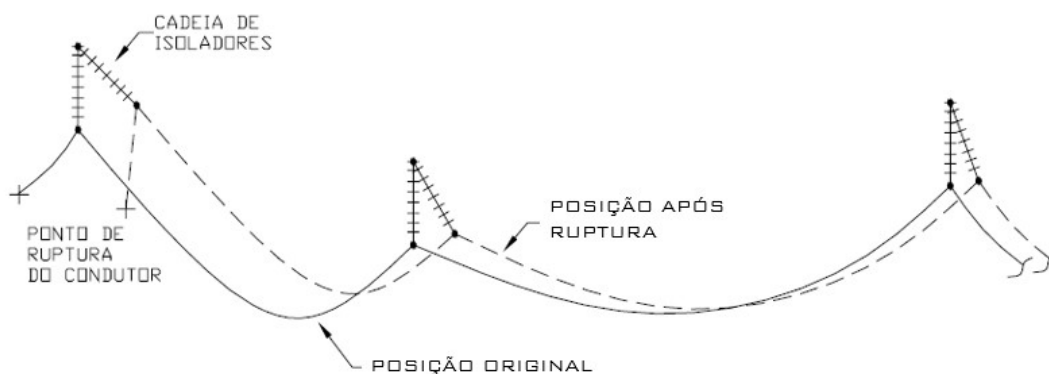


Figura 2.4: Hipótese de ruptura de cabo em torres de suspensão.

FONTE: Chaves (2004)

3. AÇÕES DINÂMICAS EM ESTRUTURAS

3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Clough & Penzien (1995) definem as cargas dinâmicas como cargas variáveis ao longo do tempo, as quais possuem magnitude, direção, sentido e/ou posição variáveis com o tempo. De forma similar, as respostas da estrutura submetida a cargas dinâmicas também são variáveis no tempo, ou seja, dinâmicas. Por ser um problema com variação temporal, a análise dinâmica possui diversas soluções, uma para cada instante de tempo, o que confere considerável complexidade na solução. Além das forças inerciais que atuam nos problemas estáticos associadas à massa do elemento analisado, surgem também nos problemas dinâmicos as forças associadas à aceleração e à velocidade do sistema. Clough & Penzien (1995) chamam de três forças resistentes resultantes do movimento devido a um carregamento $p(t)$: forças inerciais $f_I(t)$, forças de amortecimento $f_D(t)$ e força de mola ou de rigidez $f_S(t)$. A equação de movimento é dada por:

$$f_I + f_D + f_S = p(t) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

As forças resultantes $f_I(t)$, $f_D(t)$ e $f_S(t)$ são expressas em termos dos deslocamentos $v(t)$ e suas derivadas. A equação que descreve o movimento de um sistema com comportamento linear e múltiplos graus de liberdade é dada então por:

$$M\ddot{v}(t) + C\dot{v}(t) + Kv(t) = p(t) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde:

M = Matriz de massa.

C = Matriz de amortecimento.

K = Matriz de rigidez.

$v(t)$ = Vetor de deslocamentos

$\dot{v}(t)$ = Vetor de velocidade

$\ddot{v}(t)$ = Vetor de aceleração

Chopra (1981) define o período natural de vibração T de uma estrutura como o tempo requerido para um ciclo de vibração livre. Isso está relacionado à frequência natural circular de vibração ω e frequência natural cíclica de vibração f .

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Resolvendo a equação de movimento para um sistema não amortecido ($c = 0$), em vibração livre ($p(t) = 0$) e com um grau de liberdade obtém-se:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Onde k representa a rigidez e m a massa do sistema com um grau de liberdade.

Para sistemas com múltiplos graus de liberdade a frequência natural é obtida através da solução por autovalores e autovetores:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{0} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$(\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{I})\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{0} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Neste caso, os autovalores da matriz $\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}$ são representados por ω^2 , sendo ω as frequências circulares correspondentes aos modos de vibração com múltiplos graus de liberdade, cuja forma é representada por $\hat{\mathbf{v}}$. Segundo Clough & Penzien (1995) a equação 3.6 também é chamada de equação característica ou equação da frequência do sistema e possui como solução a frequência natural circular ω dos N graus de liberdade.

$$\omega = \left\{ \begin{matrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \omega_N \end{matrix} \right\} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Para sistemas amortecidos, deve-se levar em conta os conceitos de amortecimento crítico c_c e da razão de amortecimento ξ . Para definir matematicamente estas grandezas, considera-se um sistema com apenas um grau de liberdade e em vibração livre ($p(t) = 0$). As expressões são obtidas conforme segue.

$$\ddot{v}(t) = \frac{\partial^2 v(t)}{\partial t^2} = s^2; \dot{v}(t) = \frac{\partial v(t)}{\partial t} = s; v(t) = 0 \quad (\text{Eq. 3.9})$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

A partir de 3.9 e 3.10, a equação 3.2 passa a ser escrita por:

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \omega^2 = 0 \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$s = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

De acordo com Clough & Penzien (1995) considera-se que o amortecimento é crítico quando a parcela $\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2}$ se iguala a zero. Ou seja:

$$\frac{c}{2m} = \omega \rightarrow c_c = 2m\omega \quad (\text{Eq. 3.13})$$

A razão de amortecimento é, então, definida como:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Neste caso, a frequência amortecida é dada conforme Clough & Penzien (1995):

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Aplicando-se as condições iniciais $\dot{v}(0)$ e $v(0)$, a solução da equação de movimento de um sistema amortecido, com um grau de liberdade, em vibração livre toma a seguinte forma.

$$v(t) = \left[\frac{\dot{v}(0) + v(0)\xi\omega}{\omega_D} \cdot \text{sen}(\omega_D t) + v(0)\cos(\omega_D t) \right] e^{-\xi\omega t} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

$$\rho = \left[\left(\frac{\dot{v}(0) + v(0)\xi\omega}{\omega_D} \right)^2 + v(0)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\dot{v}(0) + v(0)\xi\omega}{\omega_D v(0)} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$v(t) = \rho e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t + \theta) \quad (\text{Eq. 3.19})$$

Clough & Penzien (1995) apresentam um gráfico genérico que representa a vibração livre de sistema amortecido, conforme mostra a figura 3.1.

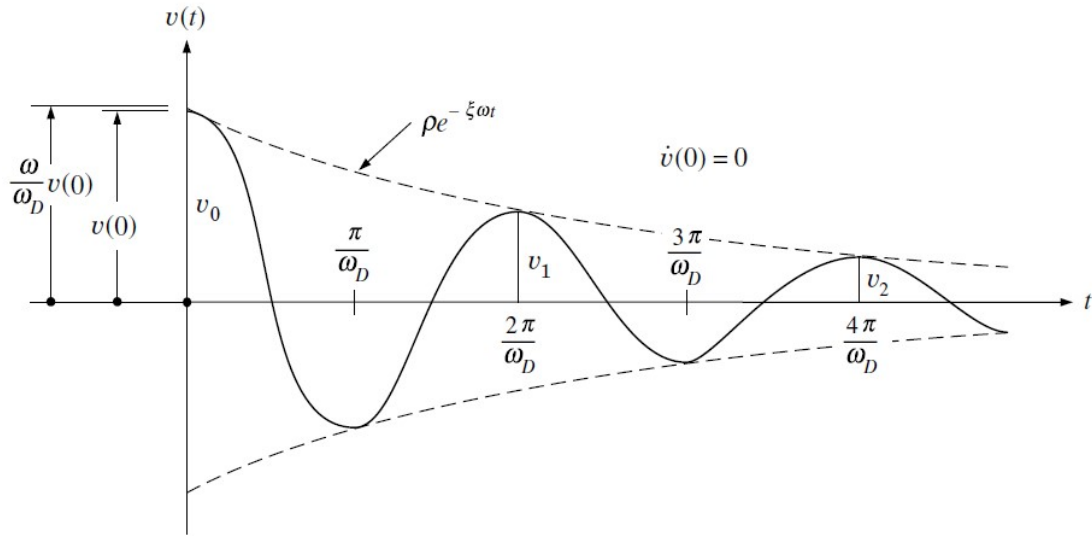


Figura 3.1: Resposta de um sistema amortecido submetido a vibração livre.

FONTE: Clough & Penzien (1995)

A razão entre dois picos sucessivos v_n e v_{n+1} é obtida através da seguinte expressão.

$$v_n/v_{n+1} = e^{2\pi\xi\omega/\omega_D} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$\delta = \ln \frac{v_n}{v_{n+1}} = 2\pi\xi\omega/\omega_D = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Clough & Penzien (1995) chamam δ de decremento logarítmico. Para baixos valores de ξ , considera-se válida a seguinte aproximação.

$$\delta = 2\pi\xi \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Considerando um sistema amortecido de um grau de liberdade submetido a um carregamento harmônico senoidal, $p(t) = p_0 \text{sen}(\bar{\omega}t)$, onde p_0 representa a amplitude e $\bar{\omega}$ a frequência do carregamento, a equação de movimento toma a seguinte forma e solução.

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) = p_0 \text{sen}(\bar{\omega}t) \quad (\text{Eq. 3.23})$$

$$v(t) = \frac{p_0}{k} \left[\frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] [(1-\beta^2)\text{sen}(\bar{\omega}t) - 2\xi\beta\cos(\bar{\omega}t)] \quad (\text{Eq. 3.24})$$

$$\rho = \frac{p_0}{k} [(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

$$v(t) = \rho \text{sen}(\bar{\omega}t - \theta) \quad (\text{Eq. 3.27})$$

A equação 3.24 é chamada por Clough & Penzien (1995) de resposta permanente do sistema (*Steady-State*), cuja amplitude é representada por ρ . β representa a razão entre frequência da carga aplicada ao sistema e a frequência natural circular, ou seja:

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

Considerando que p_0/k se refere ao deslocamento do sistema submetido a carga estática, Chopra (1981) define Fator de Resposta D como a razão entre a amplitude do deslocamento dinâmico $v_{\text{máx}}$ ou ρ e o deslocamento estático v_{est} , conforme segue.

$$v_{est} = \frac{p_0}{k} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

$$v_{m\acute{a}x} = \rho \quad (\text{Eq. 3.30})$$

$$\frac{v_{m\acute{a}x}}{v_{est}} = D \quad (\text{Eq. 3.31})$$

$$D = [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

Clough & Penzien (1995) chamam o mesmo fator D de Fator de Magnificação Dinâmica, termo que será adotado neste trabalho. Pela equação 3.32 observa-se que o Fator de Magnificação Dinâmica varia de acordo com β e ξ . A figura 3.2 apresenta o gráfico D versus β com as curvas referentes à alguns valores da razão de amortecimento ξ .

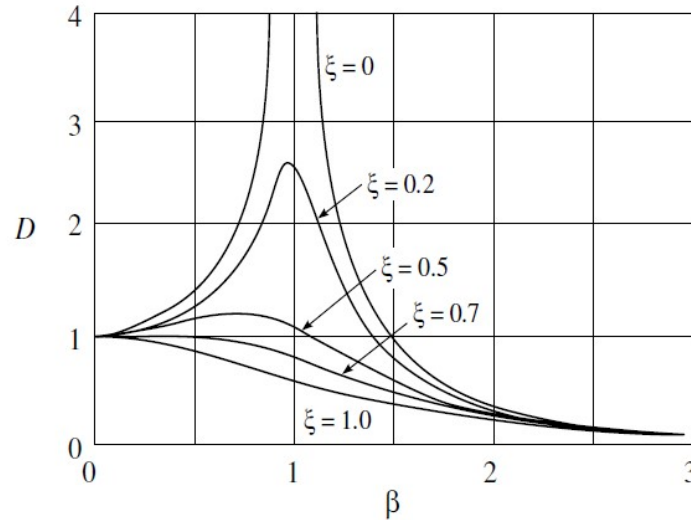


Figura 3.2: Variação do Fator de Magnificação Dinâmica em relação ao amortecimento e à frequência.

FONTE: Clough & Penzien (1995)

De acordo com Chopra (1981) quando os valores de β estão próximos à zero os efeitos dinâmicos podem ser desprezados, caso a frequência do carregamento seja menor que a frequência natural da estrutura. Para valores baixos de β o deslocamento máximo é controlado pela matriz de rigidez do sistema com pequeno efeito das matrizes de massa e amortecimento. Para $\beta = 1$, $D = 1 / 2\xi$, o que significa que o Fator de Magnificação Dinâmica é inversamente proporcional à razão de amortecimento. Para valores de β

próximos a 1 o Fator de Magnificação Dinâmica é controlado pela razão de amortecimento, podendo-se desprezar a influência das matrizes de massa e rigidez.

A frequência de ressonância é definida como a frequência cuja resposta apresenta o maior deslocamento, ou seja, quando $\beta = \sqrt{1 - 2\xi^2}$.

Considerando um sistema amortecido submetido a um carregamento periódico $p(t)$ não harmônico expresso genericamente por série de Fourier, Clough & Penzien (1995) apresentam a solução para $v(t)$ conforme descrito abaixo. A figura 3.3 mostra o gráfico de um carregamento genérico com período T_p .

$$p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\bar{\omega}_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(\bar{\omega}_n t) \quad (\text{Eq. 3.33})$$

$$\bar{\omega}_n = n\bar{\omega}_1 = n \frac{2\pi}{T_p} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

$$v(t) = \frac{1}{k} \left(a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{(1 - \beta_n^2)^2 + (2\xi\beta_n)^2} \right] \times \{ [2\xi a_n \beta_n + b_n(1 - \beta_n^2)] \sin(\bar{\omega}_n t) + [a_n(1 - \beta_n^2) - 2\xi b_n \beta_n] \cos(\bar{\omega}_n t) \} \right) \quad (\text{Eq. 3.35})$$

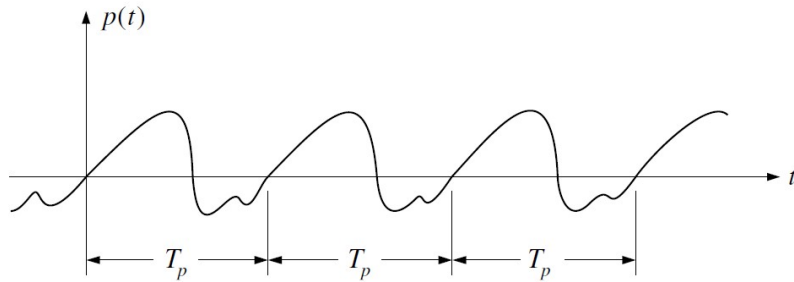


Figura 3.3: Gráfico de um carregamento periódico genérico.

FONTE: Clough & Penzien (1995)

3.2 MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DIRETA

As equações apresentadas anteriormente são apresentadas no domínio do tempo e exigem que sua solução seja realizada através da integração numérica em sucessivos

intervalos de tempo Δt . O algoritmo de Newmark é o mais aplicado para estas situações. De acordo com Chopra (1995) em 1959 Newmark desenvolveu uma família de métodos baseados nas seguintes equações.

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t \dot{v}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\ddot{v}_n + 2\beta\ddot{v}_{n+1}] \quad (\text{Eq. 3.36})$$

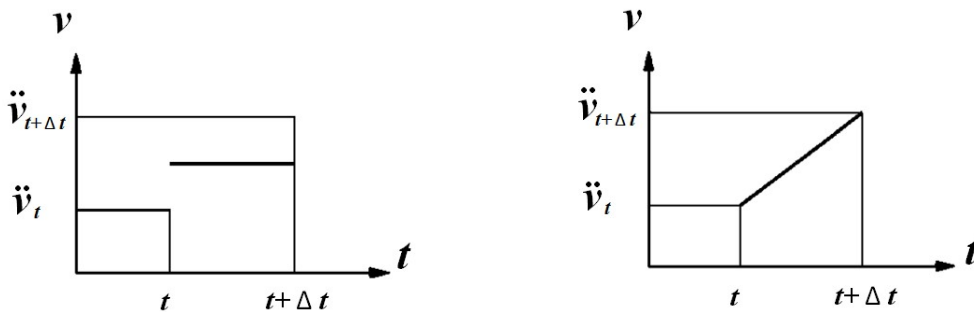
$$\dot{v}_{n+1} = \dot{v}_n + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{v}_n + \gamma\ddot{v}_{n+1}] \quad (\text{Eq. 3.37})$$

Nestas equações n representa o n -ésimo passo de tempo Δt . Os parâmetros β e γ definem a variação da aceleração ao longo de cada passo de tempo e, dessa forma, determinam a estabilidade e a acurácia do método. De acordo com Wilson (2002) o Método de Newmark é incondicionalmente estável quando $2\beta \geq \gamma \geq 0,5$ e, para sistemas com múltiplos graus de liberdade, o Δt limite é dado por:

$$\frac{\Delta t}{T} \leq \frac{1}{2\pi\sqrt{\gamma/2 - \beta}} \quad (\text{Eq. 3.38})$$

Considerando $\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/4$ o valor de Δt limite tende ao infinito e, segundo Wilson (2002), apresenta boa acurácia e estabilidade. Para estes valores de parâmetros, diversos autores chamam o método de Método da Aceleração Média, pois $\ddot{v}_{n+1}$ e $\ddot{v}_n$ passam a assumir os mesmos valores. Por outro lado, considerando $\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/6$ o método para a ser chamado de Método da Aceleração Linear, pois assume uma variação linear entre os instantes t e $(t+\Delta t)$. A figura 3.4 apresenta os gráficos de ambos os métodos.

De acordo com Clough & Penzien (1995) estes métodos são largamente utilizados na prática, porém o Método da Aceleração Linear apresenta estabilidade numérica apenas para passos de tempo muito baixos, cuja relação $\Delta t / T$ seja menor que 0,55. Chopra (1995) afirma que o Método da Aceleração Média é incondicionalmente estável.



(a)

(b)

Figura 3.4: (a) Método da Aceleração Média e (b) Método da Aceleração Linear.

FONTE: Adaptado de Chopra (1995)

Wilson (2002) sugere, baseado na experiência do autor, utilizar o Método da Aceleração Média considerando na matriz de amortecimento um valor baixo do coeficiente de proporcionalidade referente à matriz de rigidez. Chopra (1995) cita que os critérios de estabilidade não prescrevem qual deve ser o passo de tempo a ser adotado, porém quanto menor o valor de Δt , melhor será a acurácia do resultado final.

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO EM ANÁLISES DINÂMICAS

O Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta numérica utilizada para solucionar problemas complexos de meio contínuo através de discretizações em problemas menores e mais simples. O método é aplicado em diversas áreas de conhecimento, entre elas análises de estruturas, em especial as análises dinâmicas, tema deste trabalho. Para análise de estruturas, o método consiste em subdividir o domínio de interesse em segmentos menores, interligados por pontos nodais, cujo refino desta subdivisão impacta diretamente na acurácia dos resultados. A solução do problema fornece os deslocamentos nodais em termos das coordenadas generalizadas, baseando-se em funções de forma previamente estabelecidas.

Para uma barra com dois nós submetida a ação axial, com área A e módulo de elasticidade E e comprimento L , conforme mostra a figura 3.5, são definidas as seguintes funções de forma:

$$N_i(x) = 1 - \frac{x}{L} ; N_j(x) = \frac{x}{L} \quad (\text{Eq. 3.39})$$

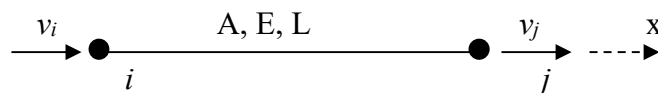


Figura 3.5: Elemento finito de barra sob ação axial

A matriz de rigidez do elemento é definida aplicando o princípio dos trabalhos virtuais e o princípio da energia potencial mínima:

$$\mathbf{K} = \int_0^L AE \begin{bmatrix} N'_i N'_i & N'_i N'_j \\ N'_j N'_i & N'_j N'_j \end{bmatrix} dx = \int_0^L AE \begin{bmatrix} 1/L^2 & -1/L^2 \\ -1/L^2 & 1/L^2 \end{bmatrix} dx \quad (\text{Eq. 3.40})$$

Assumindo AE constante:

$$\mathbf{K} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.41})$$

Do mesmo modo, para a viga de Euler-Bernoulli apresentada na figura 3.6, cujo carregamento atua no plano longitudinal de simetria e a seção transversal permanece plana após a deformação, as funções de forma são obtidas a partir do princípio dos trabalhos virtuais e utilizando polinômios hermitianos cúbicos:

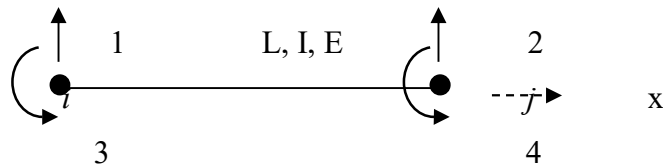


Figura 3.6: Viga de Euler-Bernoulli

$$N_1(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (\text{Eq. 3.42})$$

$$N_2(x) = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (\text{Eq. 3.43})$$

$$N_3(x) = x\left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad (\text{Eq. 3.44})$$

$$N_4(x) = \frac{x^2}{L}\left(\frac{x}{L} - 1\right) \quad (\text{Eq. 3.45})$$

Considerando que cada nó possui dois graus de liberdade v (deslocamento vertical) e θ (rotação), a equação que descreve os deslocamentos nodais é expressa da seguinte maneira.

$$v(x) = N_1(x)v_i + N_2(x)v_j + N_3(x)\theta_i + N_4(x)\theta_j \quad (\text{Eq. 3.46})$$

Aplicando o princípio dos deslocamentos virtuais se obtém o coeficiente de rigidez associado à viga de Euler-Bernoulli:

$$k_{ij} = \int_0^L EI(x) N''_i(x) N''_j(x) dx \quad (\text{Eq. 3.47})$$

A matriz de rigidez para a viga da figura 3.6 toma a seguinte forma:

$$\mathbf{K} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & -12 & 6L & 6L \\ -12 & 12 & -6L & -6L \\ 6L & -6L & 4L^2 & 2L^2 \\ 6L & -6L & 2L^2 & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.48})$$

Considerando a força elástica apresentadas nas equações 3.1 e 3.2, temos a seguinte expressão:

$$\mathbf{f}_S = \mathbf{K} \mathbf{v} \quad (\text{Eq. 3.49})$$

$$\begin{pmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \\ f_{S3} \\ f_{S4} \end{pmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & -12 & 6L & 6L \\ -12 & 12 & -6L & -6L \\ 6L & -6L & 4L^2 & 2L^2 \\ 6L & -6L & 2L^2 & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ v_j \\ \theta_i \\ \theta_j \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 3.50})$$

Clough & Penzien (1995) definem que a matriz de massa seja obtida assumindo que a massa do sistema seja concentrada nos nós onde os deslocamentos de translação sejam considerados. Dessa maneira, surgem nestes nós forças inerciais conforme apresentado nas equações 3.1 e 3.2, desde que a aceleração não seja nula. Como a massa e a aceleração de um nó irão interferir somente naquele nó, a matriz de massa assume a característica de matriz diagonal, ou também chamada de matriz de massa concentrada. A massa de cada nó representa a massa equivalente ao trecho de influência.

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.51})$$

A matriz de amortecimento $\mathbf{c}$ de um elemento é usualmente obtida adotando-se os coeficientes de proporcionalidade relativos à matriz de massa e à matriz de rigidez. Este artifício também é chamado de Amortecimento Proporcional de Rayleigh:

$$\mathbf{c} = a_0 \mathbf{m} + a_1 \mathbf{k} \quad (\text{Eq. 3.52})$$

Clough & Penzien (1995) definem que a contribuição da parcela $a_0 \mathbf{m}$ se refere às menores frequências, enquanto a parcela $a_1 \mathbf{k}$ se refere às maiores frequências. Cook *et al.* (2002) citam que os coeficientes de proporcionalidade podem ser obtidos através da solução de um par de equações simultâneas, associadas à razão de amortecimento e à frequência dos dois primeiros modos de vibração. O gráfico da figura 3.7 apresenta esta relação.

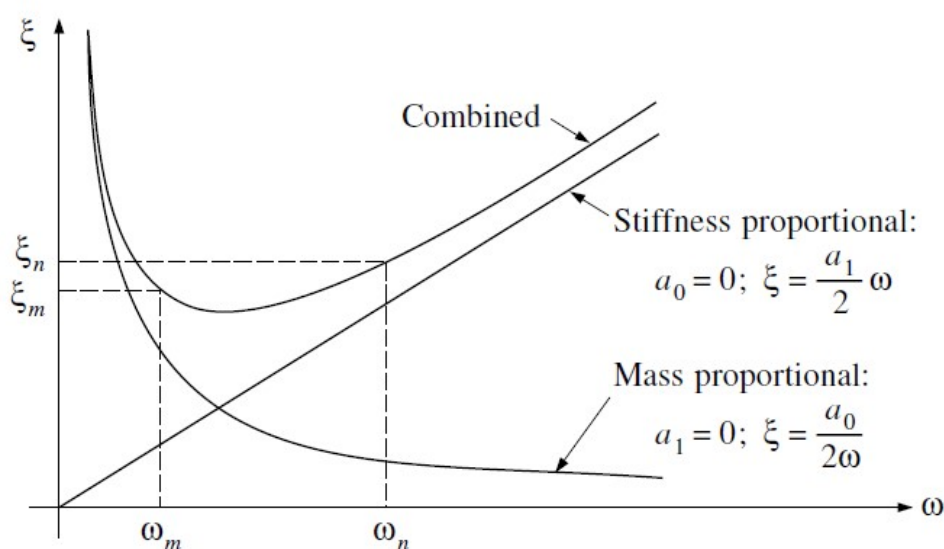


Figura 3.7: Relação entre ξ e ω para os coeficientes de Rayleigh.

FONTE: Clough & Penzien (1995)

3.4 ESTUDOS JÁ REALIZADOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Diversos estudos nacionais e internacionais têm dado ênfase às ações dinâmicas em torres de linhas de transmissão. Embora grande parte dos projetistas considerem somente ações estáticas em seus dimensionamentos, é senso comum no meio técnico e científico a importância da consideração das ações dinâmicas em estruturas destinadas a

transmissão de energia elétrica. Segundo Silva e Carvalho (2009), as principais razões para os projetistas omitirem as análises dinâmicas durante o dimensionamento de estruturas, está a dificuldade de modelagem dos espectros dinâmicos destes carregamentos, bem como a determinação das propriedades dinâmicas básicas das estruturas.

No trabalho de Kaminski (2007) foram analisados os efeitos da força dinâmica devida à ruptura de um dos cabos condutores em uma torre de transmissão. Para tanto, foi considerada a força variando no domínio do tempo, iniciando com valor nulo, alcançando subitamente seu valor máximo aos 25s e reduzindo para 80% do valor máximo no instante seguinte. Este modelo dinâmico resultou em esforços nas barras cerca de 40% acima dos valores resultantes do modelo estático.

Argenta (2007) analisou no software SAP2000 a ação dinâmica do vento em uma torre de transmissão através dos espectros de Kaimal e Davenport, utilizando séries de Fourier para determinação da parcela flutuante do vento. O autor obteve fatores de amplificação dinâmica em torno de 1,6. Além disso, o trabalho apresentou resultados referentes à hipótese de ruptura dos cabos da linha de transmissão como ação dinâmica, seguindo o mesmo procedimento de Kaminski (2007). Nesta hipótese o autor obteve fator de amplificação dinâmica na ordem de 2,0.

Em Kaminski *et. al.* (2008) foi avaliada a incerteza dos modelos de torres de linhas de transmissão submetidos a ação estática e dinâmica. Para tanto, foi analisado um trecho de linha de transmissão composto por quatro torres, além dos cabos, submetidos a ação dinâmica devido à ruptura de um dos cabos. O trabalho sugere que as incertezas de modelo neste tipo de estrutura são relevantes e não podem ser desprezadas, podendo influenciar significativamente na estimativa da confiabilidade. Por fim, o trabalho apresenta valores quantitativos da incerteza dos modelos analisados traduzidos por um coeficiente de variação e reforça a noção de que incertezas de modelo devem ser explicitamente consideradas no projeto de estruturas de linhas de transmissão.

Analogamente, Miguel *et. al.* (2009) analisaram a incerteza dos modelos de avaliação de cargas de vento EPS em projetos de linhas de transmissão. No trabalho foram comparados os resultados obtidos de análises estáticas seguindo as normas vigentes (NBR5422 e IEC60826) e as respostas obtidas das análises dinâmicas baseadas nos modelos de Davenport, Harris e Kaimal. O trabalho demonstrou que em alguns casos a solicitação oriunda da análise dinâmica pode ser até 30% superior à solicitação obtida com a análise estática.

Segundo Légeron e Gani (2009) os procedimentos normativos baseados em abordagens estáticas equivalentes apresentam bons resultados para estruturas autoportantes de transmissão de energia. Os autores analisaram a ação dinâmica do vento em torres estaiadas, as quais são mais esbeltas e, portanto, possuem menor rigidez que as torres autoportantes. Para geração do histórico temporal do vento foi utilizado processo estocástico e ergódico. A análise estática baseou-se no método da norma IEC60826 (2003). Segundo os autores as peças componentes da treliça da torre estaiada analisada apresentaram comportamento estrutural pouco divergente entre as análises estática e dinâmica. Porém, os valores da reação transversal e do esforço axial no cabo do estai para a ação dinâmica resultaram em valores 30% acima aos resultados da análise estática. O trabalho também apresentou o estudo de uma torre autoportante para travessia de rio e demonstrou que há inconsistências a serem corrigidas na norma, tanto para análises estáticas, quanto dinâmicas, a respeito de longas travessias e torres muito altas.

Pengyun *et. al.* (2012) analisaram os modos de vibração de uma torre de transmissão de 108 m de altura para um vão de 830 m e obtiveram as mesmas conclusões de Silva e Carvalho (2009), os quais concluíram através de um ensaio de protótipo que na direção transversal da linha há diminuição da frequência natural quando a massa dos cabos é considerada. Já na direção longitudinal há leve aumento na frequência natural. Silva e Carvalho (2009) concluíram ainda que a consideração da massa dos cabos também influencia no amortecimento da estrutura, sendo mais significativo na direção transversal à linha.

Em Lu *et. al.* (2016) são apresentadas várias análises estruturais de torres de transmissão de energia, dando ênfase aos casos de ações dinâmicas, especialmente a carga devido à ruptura de um dos cabos, além do vento ressonante com o primeiro modo de vibração da torre.

O amortecimento em estruturas pode ser numericamente determinado após uma campanha de medições experimentais. Muitas normas sugerem valores estimativos baseados em estudos empíricos, porém sem considerar aspectos referentes à rigidez, massa e frequência natural. No Brasil a norma NBR6123 (1988) apresenta recomendações de valores para a razão de amortecimento (ξ) de diversos tipos de estruturas. Para edifícios de aço é sugerido valor de 1% e para torres de aço com seção uniforme sugere-se 0,8%. A norma americana AISC 360 (2016) recomenda adotar valor de ξ igual a 1% para estruturas metálicas submetidas a ação do vento. Nota-se que ambas as normas não definem com exatidão qual valor da razão de amortecimento deve ser

adotado para torres monotubulares, deixando de forma genérica para estruturas metálicas em geral.

Solari e Pagnini (2001) comentam que enquanto vários trabalhos lidam com o amortecimento em estruturas em geral, faltam modelos que prevejam o amortecimento de torres monotubulares. De fato, como já apresentado anteriormente, há diversos estudos relacionados à análises dinâmicas em estruturas para transmissão de energia, porém a grande maioria considera valores de amortecimento estimados e baseados em trabalhos anteriores. De acordo com Loredou-Souza (2000 *apud* Nascimento, 2002) os valores genéricos da razão de amortecimento (ζ) podem ser de 4% para torres treliçadas e de 2% para postes.

Solari e Pagnini (2001) realizaram estudos experimentais em escala real em modelos de torres monotubulares destinadas a iluminação pública e obtiveram valor experimental do decremento logarítmico de 4,5%, ou seja, ζ aproximadamente 0,7%.

Balagopal, Rao e Rokade (2018) simularam através do Método dos Elementos Finitos o comportamento de torres monotubulares de iluminação e de transmissão de energia considerando ζ igual a 4,5%. Apesar de terem assumido um valor acima do usual, as simulações computacionais foram validadas experimentalmente.

Dai e Chen (2010) realizaram análises dinâmicas em casos reais de um poste metálico e um poste de concreto destinados a transmissão de energia e submetidos a vibração livre e a solicitações devidas a explosões em usinas de mineração. Os autores consideraram valor de ζ igual a 2% para as torres monotubulares, porém concluíram que este valor é uma estimativa conservadora e de difícil determinação.

Para construção da matriz de amortecimento usualmente utilizam-se os coeficientes de Rayleigh, proporcionais às matrizes de massa e de rigidez. Em Pengyun *et. al.* (2012) é aplicada esta metodologia para uma torre de transmissão de 108 m de altura.

Observa-se que diversas pesquisas abordam as análises dinâmicas em estruturas de transmissão, porém o foco sempre se concentra em estruturas convencionais, ou seja, as torres treliçadas metálicas. Por se tratar de um produto relativamente novo no mercado de linhas de transmissão de energia, as torres monotubulares ou postes metálicos não têm o mesmo enfoque em trabalhos científicos. Apesar de existir esta lacuna no setor elétrico, há pesquisas em torres monotubulares destinadas aos mercados de telecomunicações e iluminação de grandes áreas.

4. MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

4.1 CONCEITOS

O Método do Vento Sintético proposto por Franco (1993) consiste na aplicação do método estatístico de Monte Carlo acoplado à norma brasileira de ventos em edificações NBR6123 (1988), a fim de obter as parcelas de vento médio e flutuante no domínio do tempo, considerando sua característica aleatória e instável. Considera-se que a força de vento é composta por uma parcela média ou estática, referente a 48%, e uma parcela flutuante, referente a 52%.

A parcela flutuante é decomposta em, no mínimo 11 funções harmônicas, dentre as quais uma é ressonante com o primeiro modo de vibração da estrutura e com os ângulos de fase variando aleatoriamente. A amplitude de cada harmônica é obtida a partir da consideração de um espectro de potência previamente conhecido, como os espectros de Davenport, Kaimal, Harris e von Kármán.

O método é considerado um processo estocástico, pois suas variáveis são aleatórias em toda série temporal discreta. Além disso, considera-se o método como um processo estacionário ergódico, ou seja, todos os parâmetros estatísticos são iguais em toda série histórica temporal.

Em Franco (1993) o método foi aplicado à uma edificação através do software comercial SAP90, hoje denominado de SAP2000, e obteve as respostas no domínio do tempo para diversos parâmetros de projeto, como deslocamentos, velocidades, acelerações e esforços solicitantes. Apesar de ser relativamente antigo, o método vem sendo cada vez mais utilizado no Brasil, desde sua implementação, em 2011, no software comercial TQS, destinado a projetos de estruturas de concreto armado.

4.2 METODOLOGIA DO VENTO SINTÉTICO

A metodologia apresentada neste capítulo se refere à formulação publicada por Franco (1993) e adaptada em Franco e Medeiros (2011). São apresentadas ainda algumas modificações baseadas na norma NBR6123 (1988), a fim de compatibilizar o período de retorno do vento e as condições topográficas do terreno de acordo com as condições usuais de linhas de transmissão.

4.2.1 Dados de vento

O primeiro dado de entrada se refere ao u_0 , o qual representa a velocidade média do vento no período de 600 s, conforme abaixo.

$$u_0 = 0,69 \cdot S_1 \cdot S_3 \cdot v_0 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

S_1 = Fator topográfico, que leva em consideração as variações do terreno. Para terrenos planos ou fracamente acidentados, considera-se 1,0.

S_3 = Fator estatístico, o qual considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

v_0 = Velocidade básica do vento, em m/s, referente à uma rajada de 3 s, com período de retorno de 50 anos, à 10m acima do terreno, em campo aberto e plano.

Foi inserida nesta metodologia o parâmetro estatístico S_3 , a fim de compatibilizar o período de retorno do vento considerado na análise. Conforme abordado anteriormente, em linhas de transmissão com nível de tensão até 230kV considera-se período de retorno de 150 anos. Seguindo a recomendação da norma NBR6123 (1988) o parâmetro é por:

$$S_3 = 0,54 \left[-\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

m = Período de retorno considerado, em anos.

P_m = Probabilidade de a velocidade do vento superar a velocidade básica no período m .

Valor sugerido pela norma 63%.

4.2.2 Espectros de potência

De acordo com Blessmann (1988) o espectro de potência de um fenômeno aleatório é definido como a distribuição de energia contida nesse fenômeno para diversas frequências. De acordo com Franco (1993) para um espectro de potência das velocidades

do vento $S(z,f)$, com altura z e frequência f , a potência dW associada ao intervalo infinitesimal de frequência df é expresso por:

$$dW = S(z, f)df \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Quando uma escala de frequência logarítmica é utilizada, adota-se o espectro de potência reduzido, conforme:

$$S_r(z, f) = \frac{f \cdot S(z, f)}{u_*^2} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde u_* representa a velocidade de atrito ou velocidade de cisalhamento, o qual depende da condição de rugosidade do terreno, apresentado por Fadel Miguel *et. al.* (2009) através da expressão:

$$u_* = 0,4 \cdot \frac{\vec{V}(z)}{\ln(z/z_0)} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Da norma IEC60826 (2003) obtém-se o valor de z_0 referente à terrenos abertos e com poucos obstáculos (categoria B) igual a 0,05m. $\vec{V}(z)$ representa o vetor da velocidade média na altura de referência z .

Na engenharia de estruturas os espectros mais utilizados são os definidos por Davenport, Kaimal, von Kármán e Harris. Estes autores definiram tais espectros através de medições das velocidades do vento em diversas alturas e diferentes condições de terreno. A formulação de cada espectro está apresentada a seguir, seguindo a formulação publicada por Lazanha (2003) e Bec (2010).

4.2.2.1 Espectro de Davenport

$$\begin{aligned} \frac{f \cdot S(f)}{u_*^2} &= \frac{4X(f)^2}{(1 + X(f)^2)^{4/3}} ; X(f) \\ &= \frac{1220 \cdot f}{u_0} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

4.2.2.2 Espectro de Kaimal

$$\frac{f \cdot S(f, z)}{u_*^2} = \frac{105X(f, z)}{(1 + 33X(f, z))^{5/3}} ; X(f, z) = \frac{f \cdot z}{u(z)} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

4.2.2.3 Espectro de Harris

$$\begin{aligned} \frac{f \cdot S(f)}{u_*^2} &= \frac{4X(f)}{(2 + X(f)^2)^{5/6}} ; X(f) \\ &= \frac{1800 \cdot f}{u_0} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

4.2.2.4 Espectro de von Kármán

$$\begin{aligned} \frac{f \cdot S(f)}{u_*^2} &= \frac{24Xu}{(1 + 70,7Xu^2)^{5/6}} ; Xu = Lux \cdot X ; X \\ &= \frac{f \cdot z}{u(z)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$Lux = 300 \cdot \left(\frac{z}{350} \right)^{1/k} ; \frac{1}{k} = 0,437 + 0,153 \log z_0$$

Em Lazanha (2003) é apresentado o gráfico da densidade espectral normalizada pela variância σ^2 *versus* o número de ondas em ciclos por metro, $f / \bar{V}(z)$ onde f é a frequência da rajada em Hz e $\bar{V}(z)$ é a velocidade média na cota z . A figura 4.1 mostra o gráfico plotado em escala logarítmica.

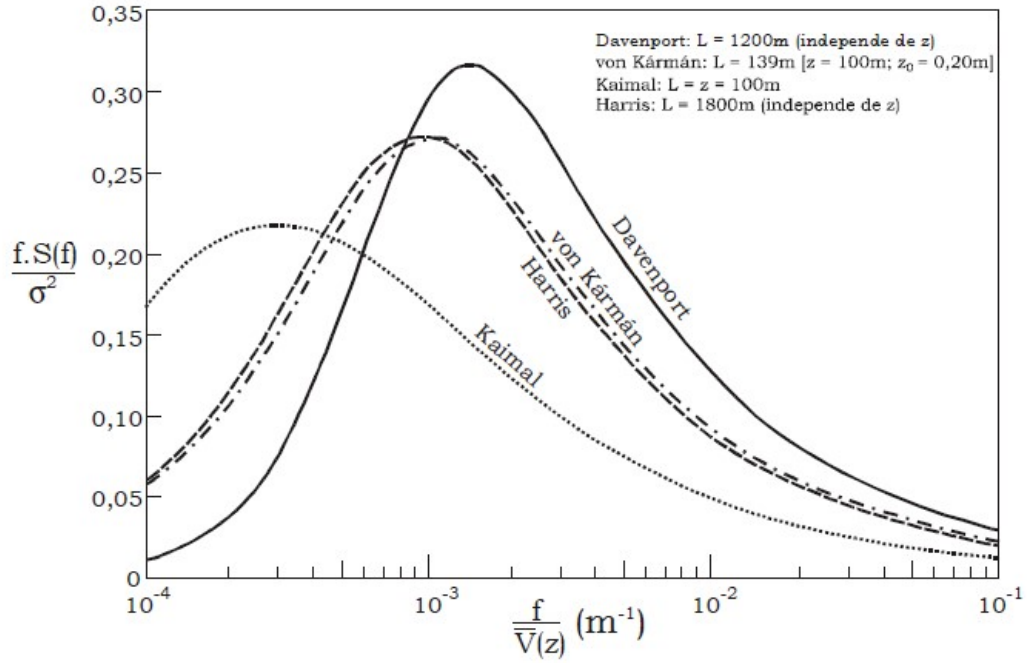


Figura 4.1: Espectros de Davenport, Harris, von Kármán e Kaimal.

FONTE: Lazanha (2003)

4.2.3 Decomposição das pressões flutuantes

A pressão flutuante p' constitui um processo aleatório, estacionário, ergódico, gaussiano, com média zero e pode ser representada em termos de série de Fourier, conforme:

$$p'(t, k) = \sum_{k=1}^m c_k \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{T_r \cdot 2^{k-R}} \cdot t - \theta_k \right) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$c_k = \frac{C_k}{\sqrt{6,125 \cdot \sum_{k=1}^m C_k^2}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$C_k = \sqrt{2 \cdot \int_{fp_k}^{fa_k} S_r(f) df} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Onde:

$$f_k = \frac{r}{2^{k-R}}; \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$T_k = \frac{1}{f_k}; \quad (\text{Eq. 4.14})$$

$$fa_k = \frac{r}{2^{k-0,5-R}}; \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$fp_k = \frac{r}{2^{k+0,5-R}}; \quad (\text{Eq. 4.16})$$

r = Frequência fundamental da estrutura analisada;

T_r = Período associado à frequência natural da estrutura analisada;

k = Ordem da função harmônica;

m = Número de funções harmônicas, considerado neste trabalho igual a 12;

R = Ordem da função harmônica ressonante com a frequência natural da estrutura analisada, considerada neste trabalho como sendo a função de ordem $k = 3$.

A equação 4.10 referente à pressão flutuante representa a superposição das m funções harmônicas, com índice k , com ângulo de fase θ_k aleatório e variável de 0 a 2π , no instante de tempo t . Os ângulos de fase são randômicos e, por isso, representam a componente aleatória do processo. Franco (1993) recomenda que sejam gerados pelo menos 20 séries temporais de carregamento em cada análise, com ângulos de fase variados.

O parâmetro expresso pela equação 4.11 representa o fator de normalização das amplitudes da pressão flutuante, proposto por Franco e Medeiros (2011). A integral da equação 4.12 é obtida a partir da área sob a curva do espectro correspondente.

Franco (1993) propõe algumas correções no coeficiente c_k (chamadas de c_{*k}) em funções harmônicas com frequências próximas à frequência natural. Segundo o autor em diversas aplicações numéricas houve resultados superestimados na ordem de 2, em estruturas metálicas e de concreto, com baixo amortecimento, entre 1% e 2%.

$$c_{*R} = \frac{c_R}{2}; \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$c_{*R-1} = c_{R-1} + \frac{c_R}{4}; \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$c_{*R+1} = c_{R+1} + \frac{c_R}{4}; \quad (\text{Eq. 4.19})$$

4.2.4 Correlação espacial

De acordo com Franco (1993) a correlação espacial de velocidades é descrita em função da distância de pontos no espaço. Quanto maior a distância, menor a correlação espacial de velocidades entre estes pontos. Franco sugere um coeficiente de decaimento exponencial igual a 7 no eixo vertical, a favor da segurança. Dessa forma, a altura da rajada equivalente de frequência f_k é dada por:

$$\Delta z_{0k} = \frac{u_0}{7 \cdot f_k} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Ainda seguindo as recomendações de Franco (1993) para cada frequência do vento adota-se uma correlação espacial representada por dois triângulos com decaimento de 1 a 0 atuando na altura total, representado na figura 4.2. O tamanho da rajada é, então, expresso por:

$$L_k = 2 \times \Delta z_{0k} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

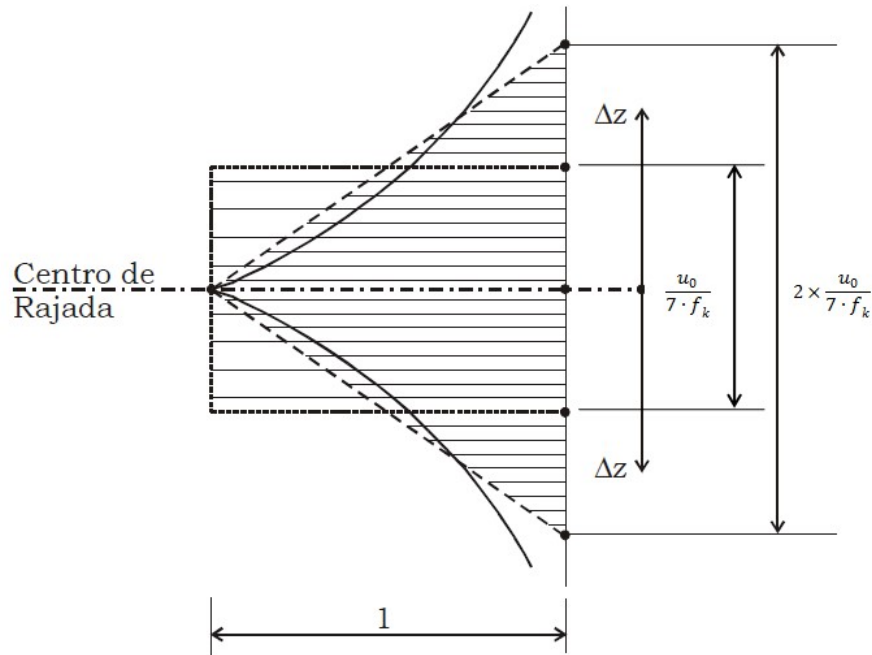


Figura 4.2: Rajadas equivalentes.

FONTE: Adaptado de Lazanha (2003)

A aplicação do conceito de tamanho de rajada é fortemente influenciada pela posição do centro desta rajada atuando na estrutura (G_c). Franco (1993) sugere que seja

adotado, a favor da segurança, o ponto mais desfavorável para estrutura, cuja resposta desejada seja máxima. Além disso, admite-se que todas as rajadas possuem o mesmo centro. Esta técnica foi aplicada em diversos trabalhos consagrados referentes ao assunto e implementada no algoritmo desenvolvido no presente trabalho.

De acordo com Carril (2000), após determinada a posição do centro de rajada G_c calcula-se o coeficiente de redução C_r das pressões flutuantes, referente à função harmônica k e ao nó j , conforme expressões abaixo.

$$C_r(j, k) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta z_{0k}} \cdot (G_c - z_j) + 1 ; \text{se } G_c \leq z_j \leq G_c + \Delta z_{0k} \\ \frac{-1}{\Delta z_{0k}} \cdot (G_c - z_j) + 1 ; \text{se } G_c - \Delta z_{0k} \leq z_j \leq G_c \\ 0 ; \text{para os demais casos} \end{cases} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

4.2.5 Funções harmônicas referentes às forças nos nós

Uma vez obtida a expressão matemática que representa a pressão flutuante do vento no domínio do tempo, basta aplicá-la à formulação da norma NBR6123 (1988) para se obter a função temporal das forças no nós. Antes disso, é necessário determinar as velocidades média e de pico, bem como suas pressões de vento correspondentes. Pela norma, a velocidade é dada por:

$$V_k = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot v_0 \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (\text{Eq. 4.24})$$

$$V_k = \left[b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \right] \cdot S_1 \cdot S_3 \cdot v_0 \quad (\text{Eq. 4.25})$$

Onde:

V_k é a velocidade característica do vento na cota z , em m/s;

S_2 fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e cota sobre o terreno;

F_r , b e p são parâmetros adimensionais os quais representam diversos intervalos de tempo de integração das rajadas de vento, classificados em cinco categorias de rugosidade do terreno. Valores apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4. 1 Parâmetros F_r , b e p . FONTE: NBR6123 (1988)

Categoria do terreno	t (s)	3	600
I Superfícies lisas de grandes dimensões. Exemplo: Mar calmo.	b	1,1	1,23
	p	0,06	0,095
II Terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos. Exemplo: Zonas costeiras, campos de aviação, fazendas sem sebes ou muros.	b	1	1
	p	0,085	0,15
	F_r	1	0,69
III Terrenos planos ou ondulados, com obstáculos. Exemplo: subúrbios, com edificações baixas.	b	0,94	0,86
	p	0,1	0,185
IV Terrenos cobertos por obstáculos numerosos. Exemplo: Zona florestal, industrial ou urbanizada.	b	0,86	0,71
	p	0,12	0,23
V Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e grandes. Exemplo: Centros de grandes cidades.	b	0,74	0,5
	p	0,15	0,31

Na tabela 4.1 foram apresentados apenas os valores referentes às rajadas de 3s e 600s, as quais são utilizadas neste procedimento. Considerando-se os parâmetros referentes à categoria II do terreno, obtém-se as seguintes expressões para a Velocidade Média (V_{mj}) referente à rajada de 600s e Velocidade de Pico (V_j) referente à rajada de 3s, no nó j :

$$V_{mj} = \left[0,69 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,15} \right] \cdot S_1 \cdot S_3 \cdot v_0 \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$V_j = \left[1,0 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,085} \right] \cdot S_1 \cdot S_3 \cdot v_0 \quad (\text{Eq. 4.27})$$

Ainda seguindo a formulação da NBR6123 (1988) as pressões de vento média (q_{mj}) e de pico (q_j) são calculadas como:

$$q_{mj} = 0,6123 \cdot (V_{mj})^2 \quad (\text{Eq. 4.28})$$

$$q_j = 0,6123 \cdot (V_j)^2 \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Conforme apresentado em Franco (1993) a razão entre a pressão de média q_{mj} , e pressão de pico q_j demonstra numericamente que aproximadamente 48% da pressão total representa a pressão média ou estática, enquanto os cerca de 52% restantes representam as pressões flutuantes q_f , dado pela diferença entre pressão média e a pressão de pico:

$$\frac{q_{mj}}{q_j} = \frac{0,6123 \cdot (V_{mj})^2}{0,6123 \cdot (V_j)^2} = 0,69^2 \approx 0,48 \quad (\text{Eq. 4.30})$$

$$q_f = q_j - q_{mj} \quad (\text{Eq. 4.31})$$

Conforme procedimento apresentado por Carril (2000) a função que representa a pressão flutuante corrigida no domínio do tempo t , referente ao nó j e à harmônica k é obtida através da expressão:

$$Q(t, j, k) = q_f \cdot C_r(j, k) \cdot p'(t, k) \quad (\text{Eq. 4.32})$$

A força flutuante do vento aplicada no nó j é obtida multiplicando Q pelo coeficiente aerodinâmico do perfil C_a e pela área de exposição ao vento A_j :

$$F_f(t, j, k) = Q(t, j, k) \cdot C_a \cdot A_j \quad (\text{Eq. 4.33})$$

Finalmente obtém-se a série temporal dos harmônicos para cada nó j através da somatória das forças flutuantes das m harmônicas consideradas:

$$P_{din}(t, j) = \sum_{k=1}^m F_f(t, j, k) \quad (\text{Eq. 4.34})$$

4.3 APLICAÇÕES DO MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

Carril (2000) aplicou o Método do Vento Sintético ao analisar uma torre de telecomunicações de 100 m de altura dimensionada de acordo com os padrões normativos. Foram investigadas as respostas ressonantes, não ressonante e o fator de resposta de rajada. Concluiu-se que a resposta ressonante não foi significativa para a estrutura estudada, apresentando um Fator de Magnificação Dinâmica de 0,69 em termos de deslocamentos. O autor propôs ainda algumas alterações no método para a obtenção das velocidades média e flutuante do vento ao longo da altura da estrutura.

Lazanha (2003) desenvolveu um programa computacional para realizar análises dinâmicas elásticas e elasto-plásticas em estruturas. Para obtenção dos históricos temporais das cargas devidas ao vento, foi utilizado o procedimento do Método do Vento Sintético.

Chávez (2006) analisou comportamento estático e dinâmico da estrutura de um edifício de 102 metros de altura. Para tanto foram comparados os resultados obtidos a partir da ação do vento estático e vento dinâmico simplificado, conforme prescrições da norma NBR6123 (1988), além da ação dinâmica do vento através do Método do Vento Sintético. A autora obteve valores de deslocamentos no topo cerca de 5% superiores para a solicitação de vento obtida a partir do Método do Vento Sintético, porém para as solicitações de momento fletor nas vigas o valor obtido com o método foi cerca de 6% inferior.

Em Chaves (2009) foram analisadas as respostas de dois edifícios com 30 e 50 pavimentos submetidos a ação dinâmica do vento e de sismos, a fim de avaliar a melhor opção de configuração dos contraventamentos. Para as ações de vento o autor utilizou a formulação prevista no Método do Vento Sintético.

Leite (2015) analisou uma torre de transmissão de energia submetida a ação dinâmica do vento utilizando o Método do Vento Sintético para obtenção do histórico temporal deste carregamento. O autor concluiu que os fatores de magnificação dinâmica para os parâmetros de projeto como deslocamentos, esforços axiais nas barras e reações de apoio resultaram valores abaixo de 1,0 o que, neste caso, não são relevantes ao dimensionamento da estrutura.

No trabalho de Cerutti (2017) foram modeladas através do software SAP2000 uma chaminé de concreto armado de 113 m de altura e frequência natural de 0,26 Hz e um edifício de 60 andares, 180 m de altura e frequência natural de 0,15 Hz. As estruturas foram solicitadas com ações de vento estático e dinâmico conforme norma NBR6123

(1988), além dos históricos temporais obtidos pelo Método do Vento Sintético e do Método Estocástico de Davenport. Obteve-se valor do Fator de Magnificação Dinâmica referente ao Método do Vento Sintético de aproximadamente 1,5 para ambas as estruturas analisadas.

Santos (2018) analisou um edifício de concreto armado solicitado à ação dinâmica do vento e obteve com o resultado um Fator de Magnificação Dinâmica de 2,45 para o Método do Vento Sintético, em termos de deslocamentos no topo da estrutura.

5. METODOLOGIA DO ESTUDO

5.1 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO ELABORADO

Para o desenvolvimento do estudo foi elaborado um algoritmo em *Visual Basic Application*, o qual possibilita interagir automaticamente uma planilha de cálculo em Microsoft Excel com o software comercial de análise estrutural SAP2000. A partir dos dados de entrada informados na planilha de cálculo, a rotina automaticamente recorre ao software SAP2000 para geração do modelo estrutural e obtenção dos resultados das análises estáticas e dinâmicas. A figura 5.1 apresenta um esquemático da sequência operacional do algoritmo desenvolvido neste trabalho.

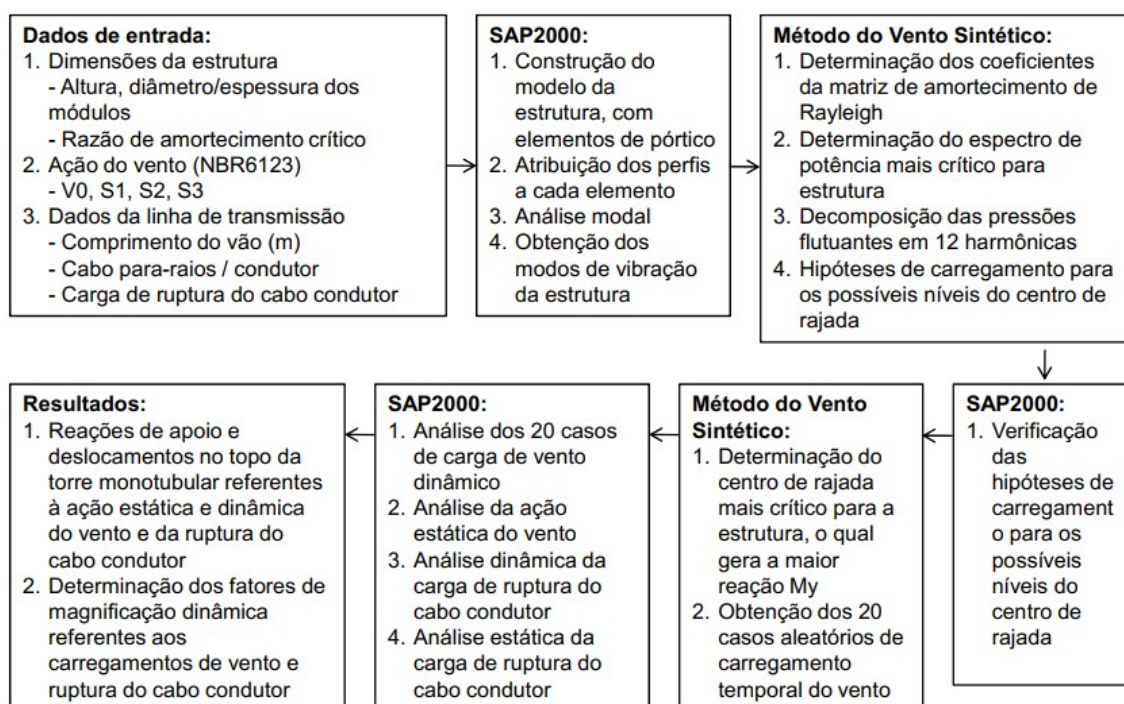


Figura 5.1: Representação esquemática do algoritmo desenvolvido.

Na planilha Excel são inseridos todos os dados de entrada das estruturas previamente dimensionadas de acordo com a norma ASCE 48-11 (2012), tais como geometria das seções componentes, razão de amortecimento adotado e dimensões das mísulas. Além disso, são inseridos os dados da linha de transmissão, como dados de vento da região conforme norma NBR6123 (1988), vão médio, bitola dos cabos e carga de ruptura de um dos cabos condutores.

Inicialmente o algoritmo recorre ao software SAP2000, o qual baseia-se no Método dos Elementos Finitos, para construção do modelo da estrutura utilizando elementos *frame*, com dois nós em cada elemento. O software considera para este elemento prismático uma formulação generalizada de pórtico tridimensional, na qual segundo Bathe *et. al.* (1973) incluem-se forças axiais e de cisalhamento, além de momento fletor e torsor. Neste trabalho o software considera comportamento elástico-linear do material, sem alteração da matriz de rigidez da estrutura, uma vez que a tensão de escoamento do material não é superada em nenhum dos casos.

A estrutura é modelada de acordo com a rigidez dos perfis e com as condições de vinculação. Com isso, é realizada a análise modal para obtenção dos três primeiros modos de vibração. Estes dados são necessários para prosseguir com a formulação do Método do Vento Sintético e obtenção dos históricos temporais das cargas de vento. Na maioria dos casos o primeiro modo de vibração se refere à flexão em torno do eixo Y, o segundo modo de vibração se refere à flexão em torno do eixo X e o terceiro modo de vibração se refere à torção em torno do eixo Z. A figura 5.2 apresenta um exemplo da aplicação do software com a geração dos três modos de vibração.

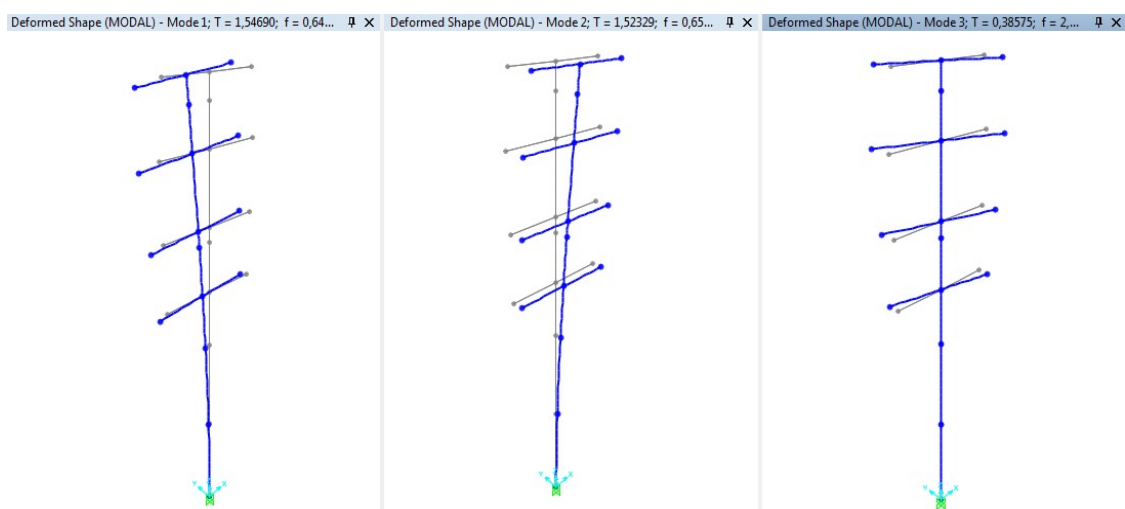


Figura 5.2: Modelo de torre monotubular no software SAP2000 - Modos de vibração.

Com a estrutura modelada são aplicadas as cargas devidas ao vento distribuída na estrutura, além das cargas nos cabos e nas cadeias de isoladores. As cargas de vento na estrutura são aplicadas nos nós considerando-se a área de influência de cada módulo, conforme as normas ASCE 48-11 (2012), IEC60826 (2017), NBR5422 (1985) e

NBR6123 (1988), e aplicando-se o coeficiente aerodinâmico. Estas áreas de exposição ao vento são consideradas nas análises estática e dinâmica.

A planilha Excel foi programada também para calcular toda a formulação do Método do Vento Sintético, a fim de obter os históricos temporais da ação dinâmica do vento. Para tanto, são analisados os espectros de potência mais utilizados na engenharia (Davenport, Harris, Kaimal e von Kármán) e adotado o mais severo para a estrutura. A figura 5.3 mostra os quatro espectros estudados.

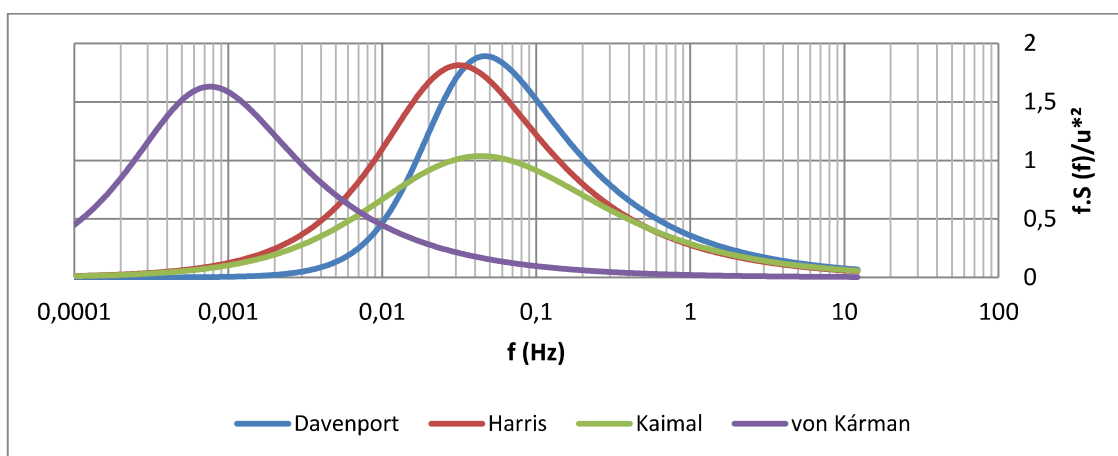


Figura 5.3: Espectros de Potência considerados no estudo.

Franco (1993) sugere que a parcela flutuante da força do vento seja obtida considerando a superposição de no mínimo 11 funções harmônicas com ângulos de fase aleatórios, cujas frequências são proporcionais aos modos de vibração da estrutura e com uma das harmônicas coincidindo com o primeiro modo de vibração. Em Franco e Medeiros (2011) afirma-se que o aumento do número de funções harmônicas tende a estabilizar as respostas em valores ligeiramente inferiores. Essa conclusão foi obtida após comparar os resultados considerando 11, 81 e 161 funções harmônicas. Para a rotina de cálculo desenvolvida neste trabalho são consideradas 12 funções harmônicas superpostas. A figura 5.4 mostra um exemplo de 12 funções harmônicas consideradas na parcela flutuante da força de vento.

Conforme sugerido por Franco (1993), o Centro de Rajada é adotado a partir de um cálculo iterativo implementado no algoritmo, que determina qual a posição mais severa para as reações de apoio geradas na estrutura.

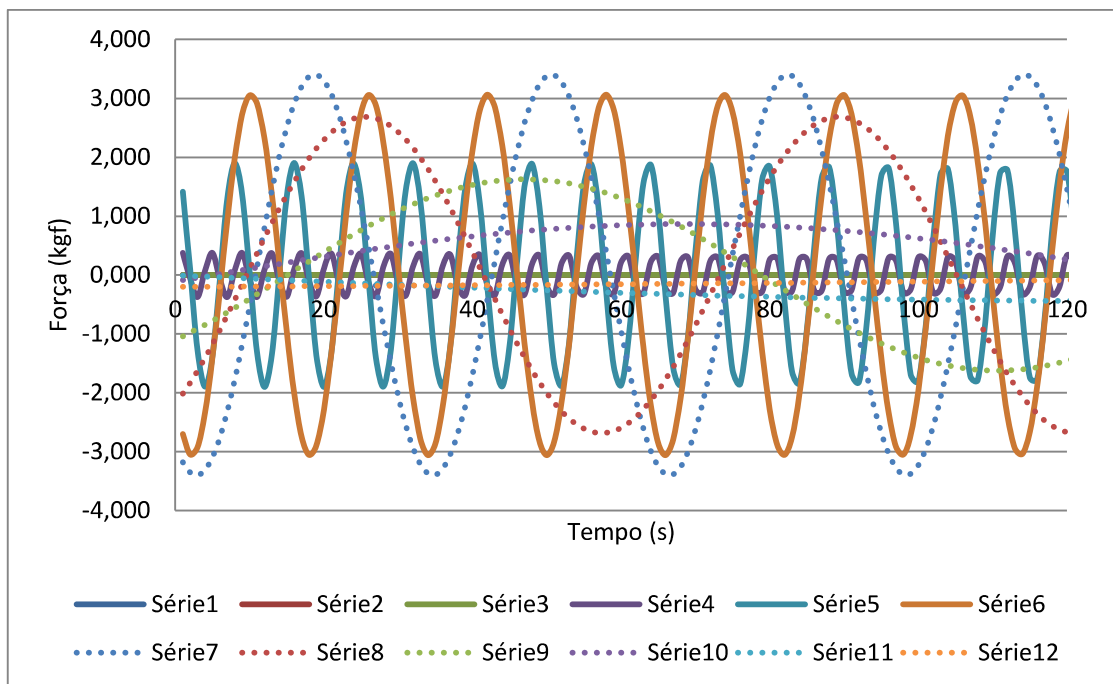


Figura 5.4: Exemplo de 12 funções harmônicas consideradas para obtenção da parcela flutuante da força de vento.

A partir da rotina de cálculo programada, a planilha retorna a série temporal da ação dinâmica do vento em cada nó da estrutura, em um intervalo de 10 minutos (600 segundos). A figura 5.5 apresenta um exemplo de histórico temporal da força de vento gerado pela planilha.

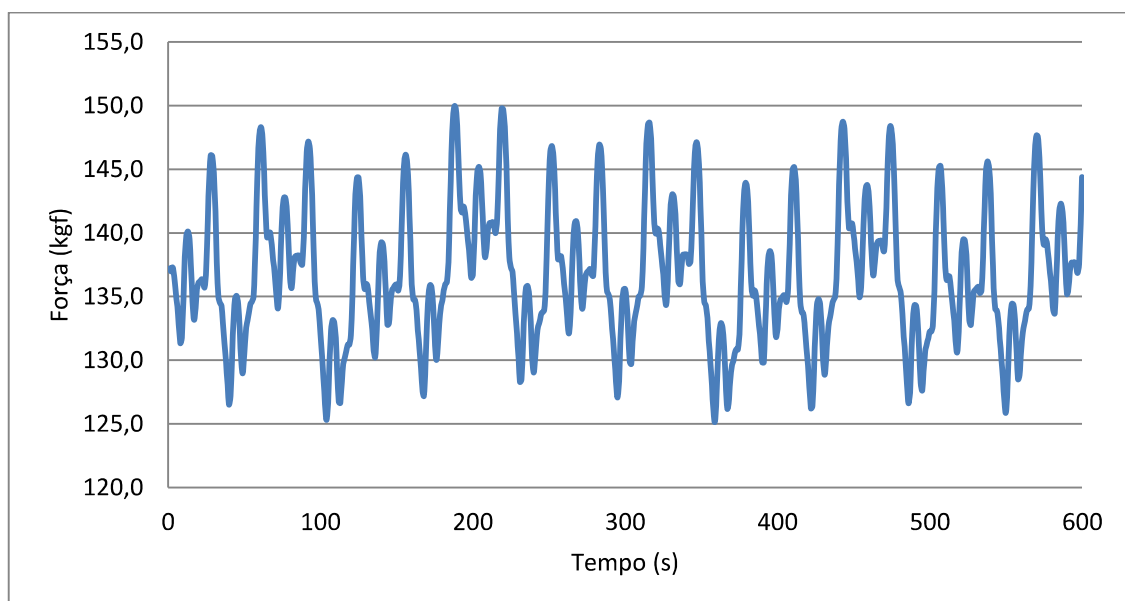


Figura 5.5: Histórico temporal obtido a partir do Método do Vento Sintético.

Para evitar que o software considere que as cargas sejam aplicadas subitamente na estrutura e, conseqüentemente, evitar o efeito transitório, as cargas são aplicadas gradativamente até o instante 50 segundos. Dessa forma a série temporal é estendida até 650 segundos. O mesmo ocorre com as cargas verticais devidas ao peso dos cabos no vão da linha de transmissão. A figura 5.6 mostra um exemplo da série temporal aplicada no software SAP2000.

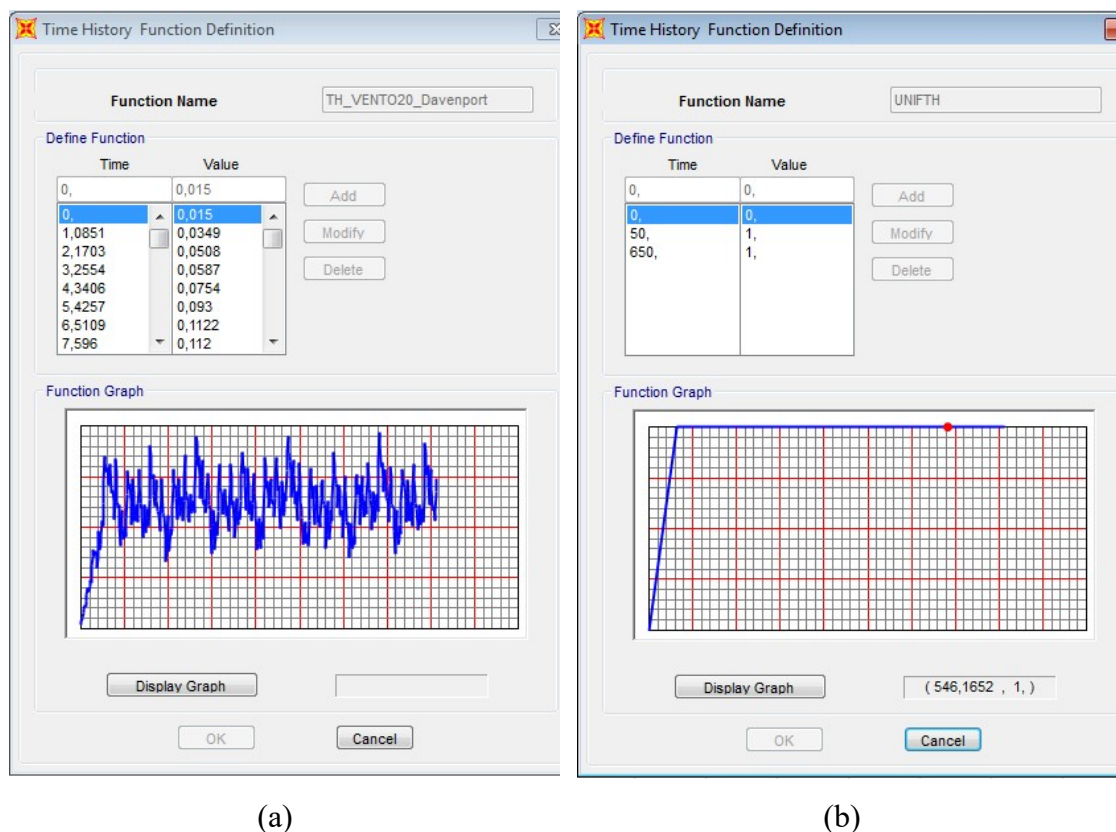


Figura 5.6: Histórico temporal aplicado no software SAP2000. (a) Carga de vento obtida através do Método do Vento Sintético; (b) Peso próprio.

O algoritmo prossegue inserindo 20 casos de séries temporais de forças de vento aplicadas na estrutura, com ângulos de fase aleatórios para cada função harmônica. Segundo Lanza (2003) a adoção de ângulos aleatórios de fase para cada harmônica representa a característica aleatória e estocástica do fenômeno do vento.

Na sequência o algoritmo insere o carregamento temporal da hipótese de ruptura de um dos cabos condutores. Para este caso de carga foi considerado procedimento adotado em Kaminski *et. al.* (2008), onde 100% da carga de ruptura é aplicada no instante 25s e no instante seguinte, em 25,1s, o carregamento reduz para 80% do valor inicial,

permanecendo assim até o final da série temporal em 50s. Esta redução se deve à redistribuição dos esforços longitudinais devida ao movimento da cadeia de isoladores, conforme citado no capítulo 2. A figura 5.7 mostra o gráfico desta ação dinâmica inserido no software SAP2000.

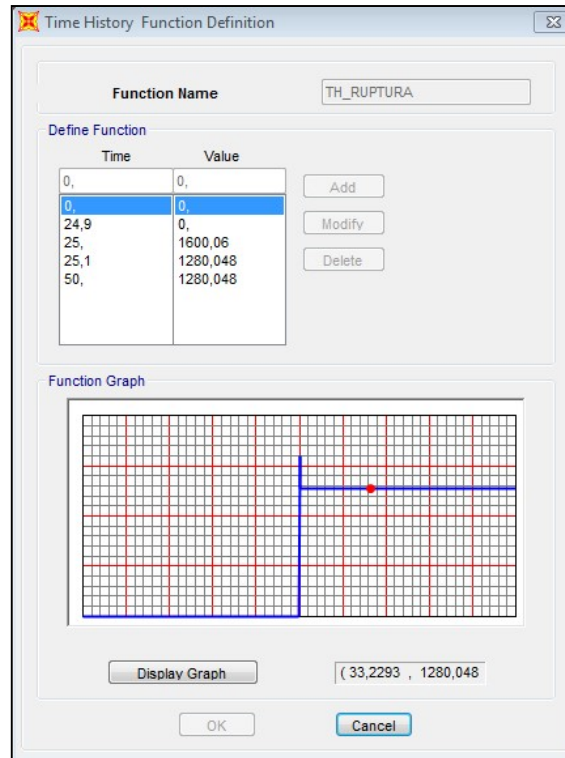


Figura 5.7: Hipótese de ruptura de um dos cabos condutores.

Para o amortecimento é considerada Matriz de Amortecimento de Rayleigh [C], vide fórmulas abaixo, onde são utilizados coeficientes proporcionais às matrizes de massa e de rigidez. Os coeficientes a_0 e a_1 são obtidos conforme Clough & Penzien (1995):

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{w_1 + w_2} \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \cdot w_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

A matriz de massa é gerada pelo software SAP2000 assumindo a matriz de massa concentrada, onde a massa da estrutura é representada pela massa equivalente para o trecho de influência de cada nó.

Para as análises dinâmicas considera-se o método de integração direta de Newmark, com parâmetros iguais a $\beta=0,25$ e $\gamma=0,50$. Estes parâmetros conferem ao método estabilidade incondicional, independente do intervalo de tempo de integração numérica Δt . De acordo com Clough & Penzien (1995) com estes valores de parâmetros o método Newmark também pode ser chamado de método da aceleração média constante. Entretanto, sua acurácia é fortemente dependente do passo de tempo de integração. Usualmente, adota-se valores de Δt proporcionais ao período fundamental da estrutura analisada. Para determinar qual passo de tempo mais adequado foi realizada uma campanha de análises, conforme será descrito posteriormente, onde optou-se por adotar um valor de $\Delta t = T_1/20$ em todos os estudos. Adiante será detalhado o motivo pelo qual foi adotado este valor.

Além das ações dinâmicas o software também verifica as hipóteses de ruptura do cabo condutor e vento máximo como ações estáticas. Nesta última, considera-se o método tradicional, ou seja, força do vento devido a uma rajada de 3 segundos atuando na estrutura de forma estática.

Por fim, o algoritmo retorna os resultados das análises estáticas e dinâmicas à planilha Excel e calcula o Fator de Magnificação Dinâmica (FM) das reações de apoio e dos deslocamentos. São obtidas as reações de momento em torno dos eixos X, Y e Z (M_x , M_y e M_z), forças paralelas aos eixos X, Y e Z (F_x , F_y e F_z) e deslocamentos δx , δy , δz .

Esta diversidade de parâmetros permite avaliar o Fator de Magnificação Dinâmica de uma quantidade considerável de estruturas com diferentes valores de frequência natural, a fim de identificar um padrão referente às respostas das estruturas diante dos efeitos dinâmico da ação do vento e da ruptura de cabo condutor. A figura 5.8 apresenta a interface gráfica do software SAP2000 de um dos modelos estudados.

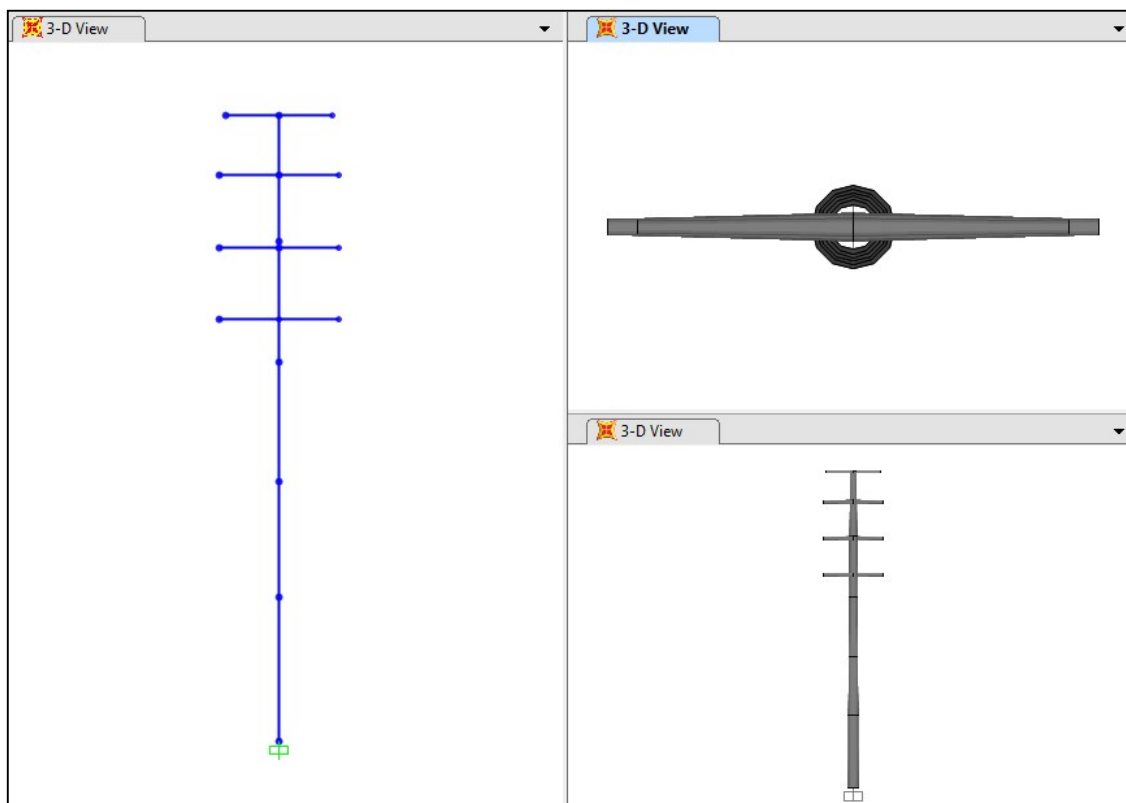


Figura 5.8: Modelo SAP2000.

5.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

Para validação da metodologia e do algoritmo desenvolvido no trabalho foram realizados alguns estudos comparativos de trabalhos anteriores e alguns estudos de convergência.

5.2.1 Estudo chaminé - Artigo Prof. Mário Franco - Revista *TQS News*

Na revista *TQS News* de Agosto de 2011 o artigo de Franco e Medeiros (2011) apresentou algumas novas considerações sobre o Método do Vento Sintético, dando continuidade ao trabalho de Franco (1993). No artigo foi demonstrado numericamente que a adoção de 11 funções harmônicas para a parcela flutuante é suficiente para a convergência dos resultados, desde que seja corrigida a formulação do coeficiente de redução das pressões flutuantes c_k .

Para tanto, foi apresentado memorial de cálculo de uma análise dinâmica da ação do vento atuando em uma chaminé de concreto armado com 113 m de altura, peso total

1.068 tf e amortecimento de $\zeta = 1,6\%$. A figura 5.9 mostra um croqui da estrutura analisada.

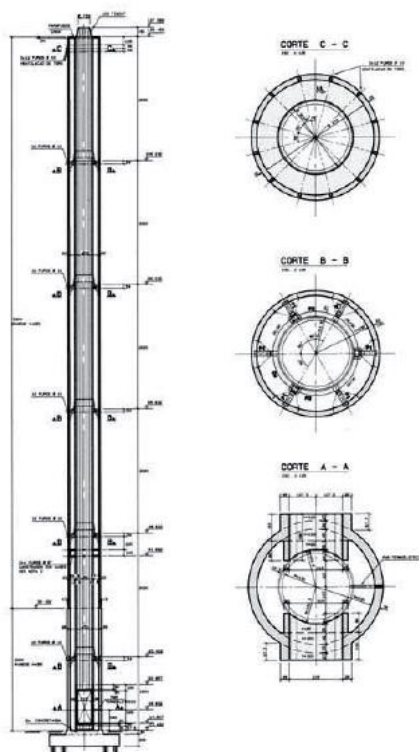


Figura 5.9: Chaminé de concreto armado - exemplo numérico.

FONTE: Franco e Medeiros (2011)

No estudo de Franco e Medeiros (2011) foram realizadas análises com 11, 81 e 161 harmônicos a fim de comprovar a eficiência do método com apenas 11 harmônicos. Quanto aos dados de vento, foram considerados os seguintes parâmetros da norma NBR6123 (1988): $v_0 = 42,5\text{m/s}$, $S_1 = 1,0$, Categoria do terreno II, $S_3 = 0,95$ e Coeficiente de Arrasto único para toda a estrutura $C_a = 0,60$.

Para validar a metodologia utilizada no presente trabalho, a mesma chaminé foi modelada no software SAP2000 e seus dados de entrada aplicados no algoritmo desenvolvido. A tabela 5.1 a seguir apresenta os resultados, bem como a comparação com os valores obtidos por Franco e Medeiros (2011). Na análise foram consideradas 12 funções harmônicas, conforme metodologia do trabalho, com passos de tempo de 0,19s, equivalente a $T_1/20$. Observa-se que para todas as grandezas analisadas os desvios não ultrapassam 12%, o que permite considerar que a metodologia do trabalho e o algoritmo desenvolvidos apresentam boa aproximação numérica.

Tabela 5. 1 Resultados do estudo comparativo - Chaminé de concreto armado

	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	My (tf.m)	Fx (tf)	δx (cm)
Franco e Medeiros (2011)	3,83	0,66	0,25	3453	49	31
Metodologia do presente trabalho	3,41	0,59	0,23	3645	50	35
Desvio	12%	12%	9%	6%	2%	12%

5.2.2 Estudo torre SY - Artigo Prof. Fadel Miguel - Revista *Engineering Structures*

Miguel *et. al.* (2012) analisaram uma torre de transmissão de energia elétrica modelo SY submetida a ação dinâmica do vento de acordo com a norma IEC60826. Na análise foi considerado um segmento de linha de transmissão composto por quatro torres SY idênticas, de 33,4m de altura, com vão de 400m e amortecimento $\xi = 3,0\%$. A figura 5.10 apresenta um croqui do modelo analisado no artigo.

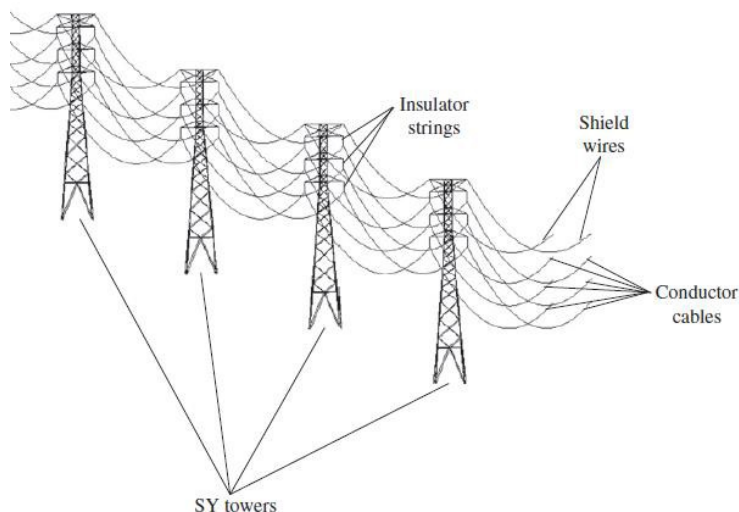


Figura 5.10: Segmento de linha de transmissão composto por quatro torres modelo SY.

No artigo os autores apresentam os resultados para diferentes parâmetros de correlação para obtenção da parcela flutuante do vento e concluem que houve pouca variação nos valores finais. Os resultados de Miguel *et. al.* (2012) foram comparados com os valores obtidos a partir da modelagem realizada seguindo a metodologia aplicada neste

trabalho. Para este estudo comparativo, a mesma torre modelo SY foi modelada no software SAP2000 e os dados de entrada foram aplicados no algoritmo desenvolvido, a fim de obter os carregamentos devidos ao vento no domínio do tempo. Vale observar que em ambas análises foram considerados os mesmos espectros de potência: Davenport, Harris e Kaimal. A figura 5.11 apresenta uma imagem da modelagem da torre SY no software.

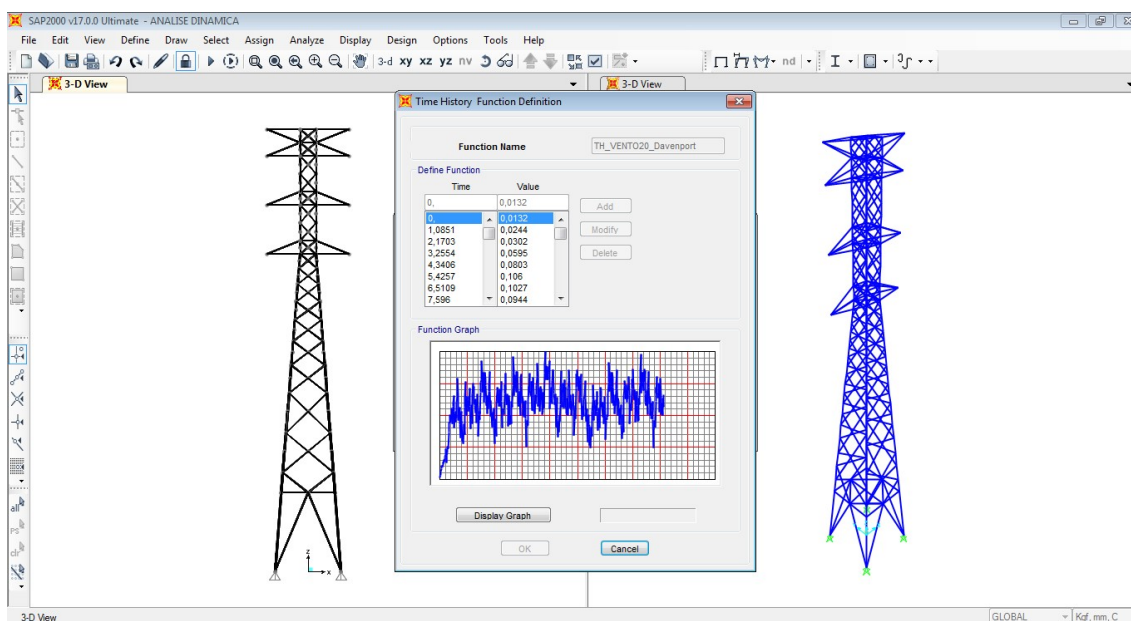


Figura 5.11: Modelo SAP2000 torre SY.

O estudo demonstrou que os resultados convergiram com boa aproximação, tanto para os resultados da análise estática, quanto para os resultados das análises dinâmicas. A diagonal 2 apresentou desvio superior aos demais, principalmente para o espectro de Kaimal, porém ainda dentro dos limites aceitáveis. As tabelas 5.2 e 5.3 a seguir apresentam os resultados das análises estática e dinâmica, respectivamente.

Tabela 5. 2 Resultados do estudo comparativo - Torre SY - Análises estáticas

Barra	Esforço axial (kgf)			
	Montante 1	Montante 2	Diagonal 1	Diagonal 2
Fadel Miguel <i>et. al.</i> (2012)	-16.028	108.135	8.424	1.443
Presente trabalho	-17.343	113.992	9.126	1.309
Desvio	8,2%	5,4%	8,3%	9,3%

Tabela 5. 3 Resultados do estudo comparativo - Torre SY - Análises dinâmicas

	Esforço axial (kgf)					
Barra	Montante 1			Montante 2		
Espectro	Davenport	Harris	Kaimal	Davenport	Harris	Kaimal
Fadel Miguel <i>et. al.</i> (2012)	-16.695	-16.321	-16.715	108.526	104.675	106.540
Presente trabalho	-17.717	-17.254	-17.787	110.379	108.283	110.164
Desvio	6,1%	5,7%	6,4%	1,7%	3,4%	3,4%
Barra	Diagonal 1			Diagonal 2		
Espectro	Davenport	Harris	Kaimal	Davenport	Harris	Kaimal
Fadel Miguel <i>et. al.</i> (2012)	8.601	8.446	8.524	1.376	1.366	1.406
Presente trabalho	9.026	8.800	9.056	1.267	1.257	1.260
Desvio	4,9%	4,2%	6,2%	7,9%	8,0%	10,4%

5.2.3 Estudo de convergência - Método dos Elementos Finitos - Elementos de pórtico com dois nós e três nós

Conforme citado anteriormente, para o desenvolvimento deste trabalho foi considerado elemento de pórtico tridimensional com dois nós. A fim de validar esta premissa foram elaboradas duas modelagens por elementos finitos de um determinado tipo de torre monotubular: uma considerando elementos de dois nós e outra com elementos de três nós. A figura 5.12 apresenta as duas modelagens no software SAP2000.

O modelo de torre monotubular escolhido para este estudo foi uma torre hipotética para linha de transmissão de 138kV, com 45m de altura, vão de vento 300m e vento básico 30m/s. Inicialmente a estrutura foi modelada com elementos de dois nós, conforme rotina do algoritmo desenvolvido. Posteriormente foram inseridos os nós adicionais de cada elemento manualmente dentro do ambiente do software.

Conforme era previsto não houve grandes desvios nos resultados entre as análises dinâmicas, ficando na ordem de 0,3% para as reações de apoio e deslocamentos. A reação vertical ficou com desvio de 3,4%, ainda dentro do aceitável, mesmo com as ações nesta direção sendo de origem estática.

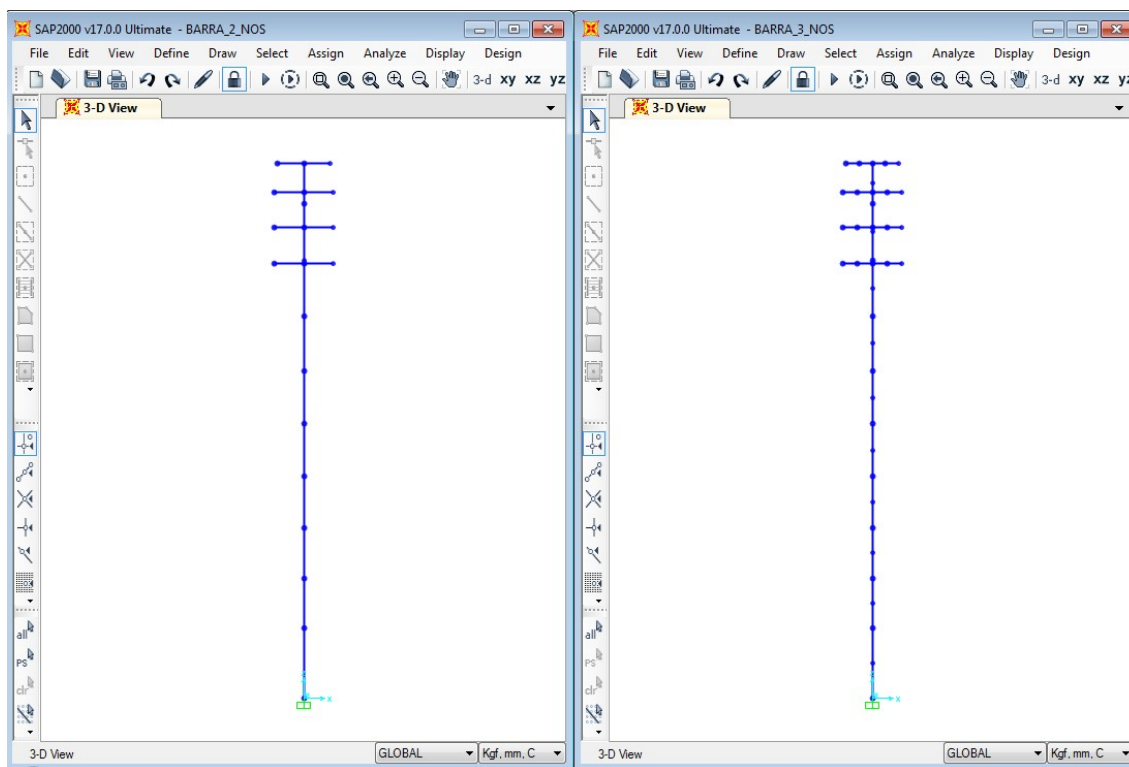


Figura 5.12: Modelagens considerando elementos de dois nós e três nós.

Para as cargas devidas ao vento os resultados das análises estáticas dos dois modelos ficaram idênticas, conforme esperado. As tabelas 5.4 e 5.5 a seguir mostram os resultados obtidos com as análises estática e dinâmica, respectivamente.

Tabela 5. 4 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises estáticas - Cargas de vento

	Elementos com dois nós	Elementos com três nós	Desvio
Fx (kgf)	-10.559	-10.559	0,0%
Fy (kgf)	0	0	-
Fz (kgf)	13.422	13.422	0,0%
Mx (kgf.mm)	0	0	-
My (kgf.mm)	-383.980.205	-383.980.205	0,0%
Mz (kgf.mm)	0	0	-
δx (mm)	2.774	2.774	0,0%
δy (mm)	0	0	-
δz (mm)	-1	-1	0,0%

Tabela 5. 5 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises dinâmicas
- Cargas de vento, valores máximos

	Elementos com dois nós	Elementos com três nós	Desvio
f1 (Hz)	0,3820	0,3824	0,1%
f2 (Hz)	2,2650	2,2645	0,0%
f3 (Hz)	2,4864	2,4944	0,3%
Fx (kgf)	-10.847	-10.882	0,3%
Fy (kgf)	0	0	-
Fz (kgf)	12.573	13.002	3,4%
Mx (kgf.mm)	0	0	-
My (kgf.mm)	-407.586.272	-408.891.819	0,3%
Mz (kgf.mm)	0	0	-
δx (mm)	2.983	2.992	0,3%
δy (mm)	0	0	-
δz (mm)	-1	-1	0,0%

Importante observar que além do pequeno desvio obtido nas análises dinâmicas, as reações de apoio e os deslocamentos apresentaram flutuação similar nas duas modelagens. As figuras de 5.13 a 5.16 a seguir apresentam os históricos temporais para as reações de apoio e deslocamento do nó do topo para o carregamento mais crítico de vento, cujo espectro de potência se refere ao espectro de Kaimal.

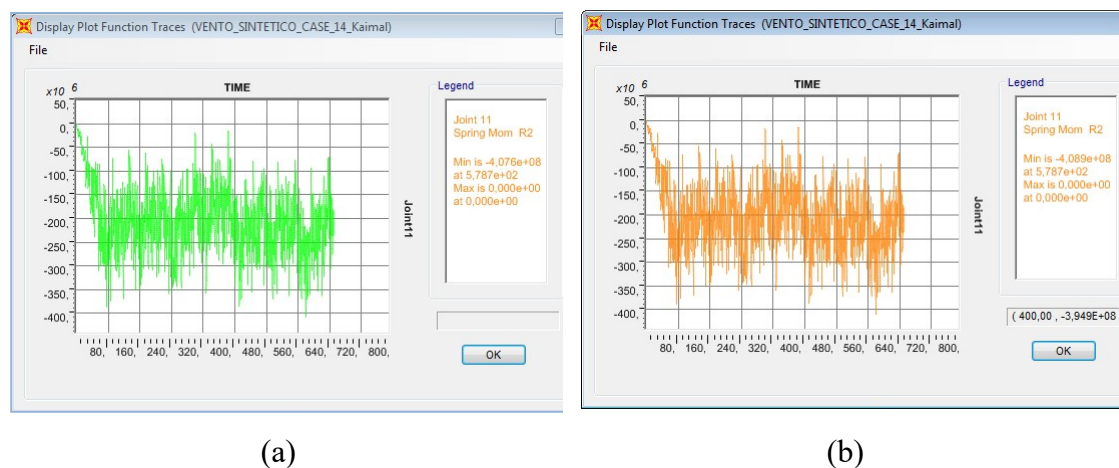
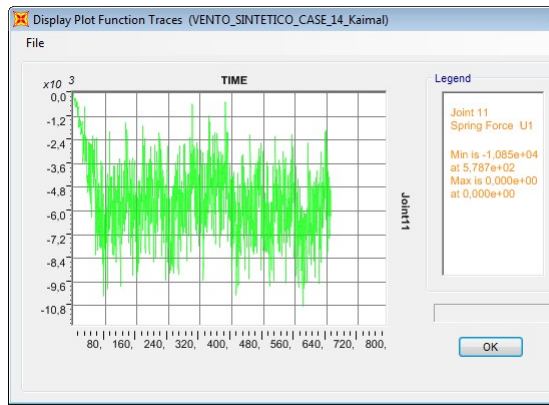
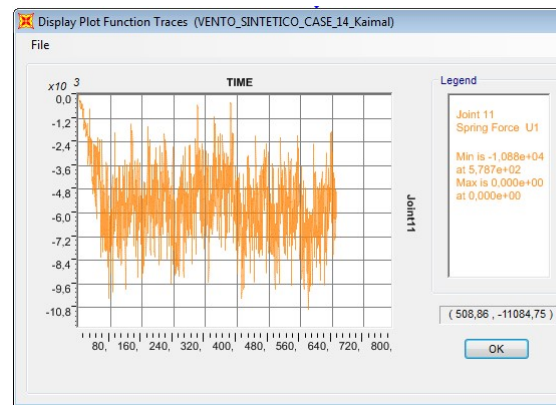


Figura 5.13: Histórico temporal Momento My no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

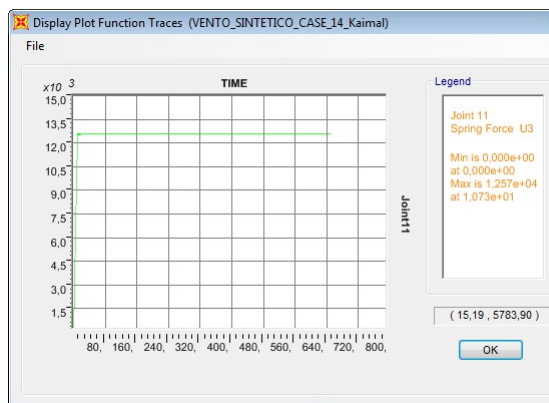


(a)

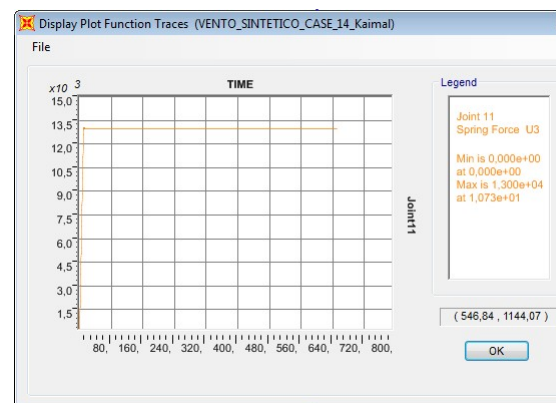


(b)

Figura 5.14: Histórico temporal Força Fx no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

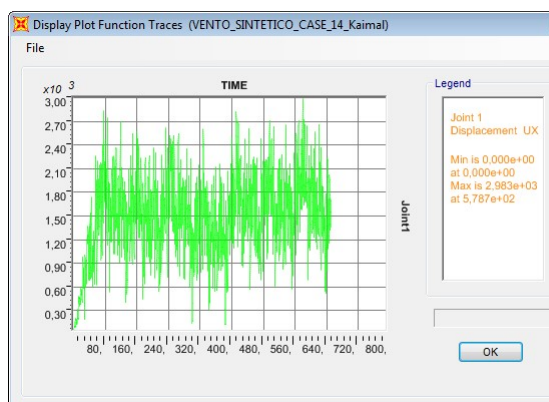


(a)

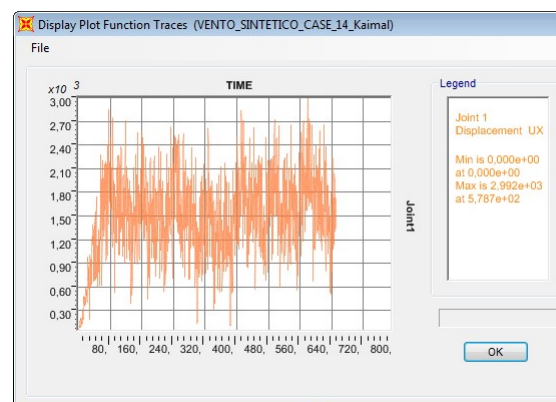


(b)

Figura 5.15: Histórico temporal Força Fz no nó da base para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós



(a)



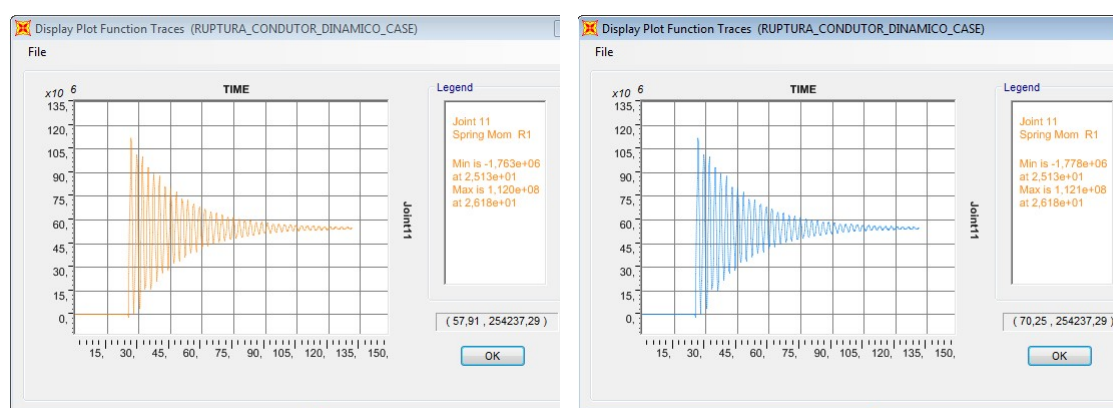
(b)

Figura 5.16: Histórico temporal Deslocamento δx no nó do topo para cargas de vento. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

Para a hipótese de ruptura do cabo condutor os resultados foram os mesmos nas duas modelagens, não superando 0,3% de desvio. Similar às análises das cargas de vento apenas a reação vertical apresentou desvio de 3,4%, porém sem importância para a avaliação das cargas dinâmicas. A tabela 5.6 mostra os resultados obtidos. Apenas para ilustrar a análise desta hipótese de carga, as figuras 5.17 a 5.20 a seguir apresenta os históricos temporais das grandezas analisadas nas análises dinâmicas.

Tabela 5. 6 Resultados do estudo comparativo - Elementos Finitos - Análises estáticas e dinâmicas - Hipótese de ruptura do cabo condutor, valores máximos

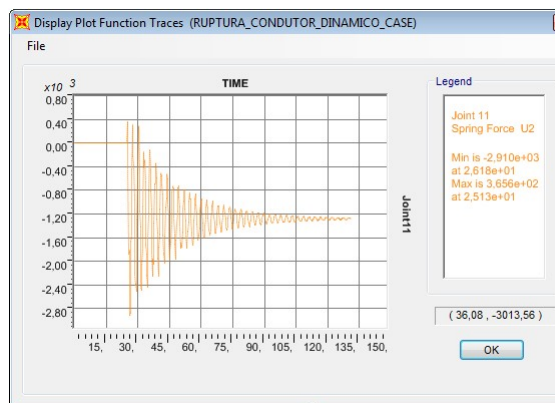
	Estático			Dinâmico		
	Dois nós	Três nós	Desvio	Dois nós	Três nós	Desvio
Fx (kgf)	0	0	-	0	0	-
Fy (kgf)	-1.600	-1.600	0,0%	-2.910	-2.912	0,0%
Fz (kgf)	13.422	13.422	0,0%	12.579	13.009	3,4%
Mx (kgf.mm)	68.586.572	68.586.572	0,0%	112.031.524	112.075.850	0,0%
My (kgf.mm)	0	0	-	0	0	-
Mz (kgf.mm)	4.000.150	4.000.150	0,0%	6.345.125	6.352.703	0,1%
δx (mm)	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
δy (mm)	547,41	547,41	0,0%	835,05	835,26	0,0%
δz (mm)	-0,72	-0,72	0,0%	-0,72	-0,72	0,0%



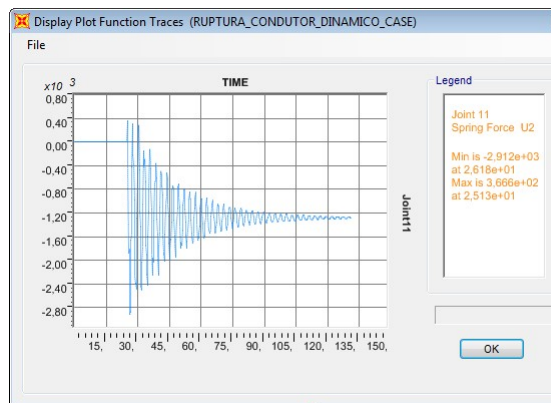
(a)

(b)

Figura 5.17: Histórico temporal Momento M_x no nó da base para hipótese de ruptura do cabo condutor. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

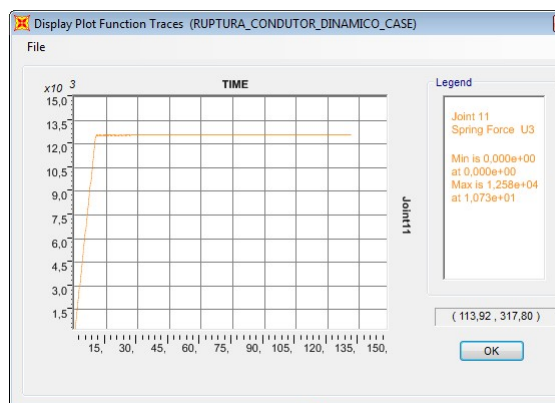


(a)

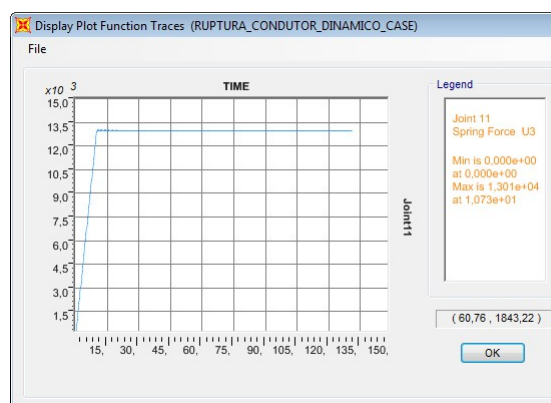


(b)

Figura 5.18: Histórico temporal Força F_y no nó da base para hipótese de ruptura do cabo condutor. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

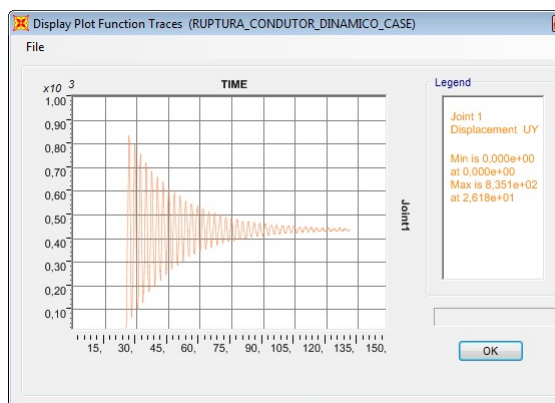


(a)

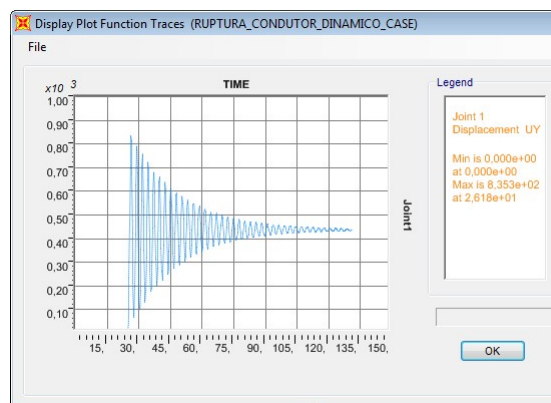


(b)

Figura 5.19: Histórico temporal Força F_z no nó da base para hipótese de ruptura do cabo condutor. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós



(a)



(b)

Figura 5.20: Histórico temporal Deslocamento δy no nó do topo para hipótese de ruptura do cabo condutor. (a) Elementos com dois nós; (b) Elementos com três nós

5.2.4 Estudo de convergência - Método Newmark - Intervalo de tempo Δt

Conforme demonstrado no capítulo 3, para a família métodos de Newmark, quanto menor o valor de Δt maior será a confiabilidade dos resultados obtidos. Para se determinar o Δt adotado na metodologia deste trabalho, foi realizada uma campanha de análises que demonstraram qual valor mais eficaz relacionando sua assertividade com o tempo demandado para execução das análises via algoritmo.

Foi escolhido um exemplo hipotético de torre monotubular de 45m de altura, classe de tensão 138kV, $v_0 = 30\text{m/s}$, vão vento 300m. Previamente calculou-se a frequência natural e o período fundamental da torre, de 0,382Hz e 2,62s, respectivamente. Para determinação do passo de tempo Δt foram adotados valores proporcionais ao período fundamental T_1 , iguais a T_1 , $T_1/2$, $T_1/5$, $T_1/10$, $T_1/15$, $T_1/20$, $T_1/25$, $T_1/30$ e $T_1/50$. Para cada análise foi obtida a flutuação dos valores dos Fatores de Magnificação Dinâmica (FM) para as reações de momento fletor em torno do eixo Y (My) para cargas de vento e reações de momento fletor em torno do eixo X (Mx) para a hipótese de ruptura de cabo.

Foi calculado ainda o tempo de cada análise realizada pelo algoritmo. Para o estudo foi utilizado uma máquina com 8,00GB RAM, HD HP SSD S700 500GB, processador Intel Core i5 2,5GHz. A tabela 5.7 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5. 7 Resultados do estudo - Intervalo de tempo Δt - Método Newmark

f_1 Hz	T_1 s	Δt s	Tempo Análise	Cargas de Vento			Hipótese de Ruptura		
				FM My	Desvio anterior %	Desvi o $T_1/50$ %	FM Mx	Desvio anterior %	Desvi o $T_1/50$ %
0,38 2	2,61 8	2,61 8 (T1)	00:30:4 7	0,9 4	-	22,0%	1,6 1	-	2,3%
0,38 2	2,61 8	1,30 9 (T1/2)	00:43:5 4	1,1 0	17,2%	8,5%	1,5 3	5,3%	7,5%
0,38 2	2,61 8	0,52 4 (T1/5)	01:11:3 9	1,0 2	7,4%	15,3%	1,5 7	3,1%	4,6%
0,38 2	2,61 8	0,26 2 (T1/10)	01:24:4 1	1,0 9	7,2%	9,2%	1,6 3	3,9%	1,0%
0,38 2	2,61 8	0,17 5 (T1/15)	01:39:4 5	1,1 3	3,5%	6,0%	1,6 3	0,0%	0,9%
0,38 2	2,61 8	0,13 1 (T1/20)	01:52:2 6	1,1 7	3,7%	2,6%	1,5 7	3,7%	4,6%
0,38 2	2,61 8	0,10 5 (T1/25)	02:18:2 1	1,2 0	2,6%	0,1%	1,6 5	4,8%	0,1%

0,38 2	2,61 8	0,08 7	(T ₁ /30)	02:33:4 7	1,1 8	1,1%	1,3%	1,6 7	1,2%	1,1%
0,38 2	2,61 8	0,05 2	(T ₁ /50)	03:58:5 1	1,2 0	1,3%	0,0%	1,6 5	1,1%	0,0%

De fato, observa-se que à medida que Δt diminui, a variação entre os fatores de magnificação dinâmica torna-se menores. Por outro lado, os tempos as análises aumentam, demandando mais esforço computacional.

Os resultados teoricamente mais próximos do exato seriam os referentes à análise com $\Delta t = T_1/50$. Porém este caso demandou quase 4h de análise. No outro extremo, o caso que menos gerou esforço computacional demorou apenas 30min para executar a análise, cujo resultado desviou em 22% na análise mais exata.

Dessa forma, optou-se por adotar na metodologia deste trabalho o passo de tempo $\Delta t = T_1/20$ por apresentar boa margem de convergência, de 3,7% em relação ao estudo anterior ($T_1/15$) e 2,6% em relação ao estudo teoricamente mais exato ($T_1/50$). Além disso, este caso demandou tempo mais razoável para a execução da análise, de 1h52'.

A partir dos estudos comparativos apresentados, considerou-se o algoritmo aferido para condução da metodologia deste trabalho. Na sequência serão apresentados os resultados obtidos em todas as análises realizadas neste estudo.

6. ESTUDOS DE CASO

6.1 DESCRIÇÃO DAS TORRES MONOTUBULARES ESTUDADAS

O algoritmo desenvolvido confere grande agilidade e confiabilidade nas análises realizadas. Diante disso, foi possível estudar diversos casos de torres monotubulares para linhas de transmissão, a fim de avaliar o comportamento destas estruturas frente às ações dinâmicas e obter os fatores de magnificação dinâmica. Foram estudados 34 casos hipotéticos de torres monotubulares para linhas de 138 kV e 230 kV, ambas em circuito duplo, com vão médio variando entre 80 m e 350 m, em locais com condições de vento básico de 30 m/s e 40 m/s e com diversas alturas entre 22 m e 46 m, de modo a abranger maior gama de exemplos aplicáveis em casos reais. A tabela 6.1 apresenta as informações dos casos estudados neste trabalho.

Os modelos de estruturas analisados são identificados pela classe de tensão, seguido da sigla TM (Torre Monotubular), altura da estrutura, vento básico e vão vento. Por exemplo, o primeiro modelo da tabela, identificado por 138KV_TM22_30_80, representa uma torre monotubular de 22 m de altura, classe de tensão 138 kV, vento básico 30 m/s e vão vento 80 m.

Apenas para facilitar a didática e ilustrar a diferença do carregamento imposto à estrutura foi considerado para os dois casos de classe de tensão o cabo condutor Grosbeak, variando apenas a quantidade: um cabo por fase para linhas de 138 kV e dois cabos por fase para linhas de 230 kV. A tabela 6.2 apresenta os dados de entrada considerados nas análises.

As torres monotubulares estudadas foram previamente dimensionadas conforme prescrições da norma internacional ASCE 48-11 (2012), a qual se baseia apenas em análises estáticas, tanto para as ações de vento, quanto para a hipótese de ruptura do cabo condutor. Todas as peças foram dimensionadas adotando-se aço com tensão de escoamento $F_y = 350\text{MPa}$ e tensão de ruptura $F_u = 450\text{MPa}$, correspondente aos aços ASTM A-572 Grau 50 ou USI-SAC-350. Os módulos componentes das torres foram considerados tubulares, cônicos e ligados através de encaixe telescópico *slip-joint*. Para todas as análises dinâmicas foi considerada uma razão de amortecimento $\xi = 2,0\%$. A figura 6.1 mostra a silhueta típica das torres analisadas.

Tabela 6. 1 Casos estudados

Identificação	Classe Tensão kV	Altura m	v_0 m/s	Vão Vento m
138KV_TM22_30_80	138	22	30	80
138KV_TM22_30_150	138	22	30	150
138KV_TM22_40_80	138	22	40	80
138KV_TM22_40_150	138	22	40	150
138KV_TM30_30_80	138	30	30	80
138KV_TM30_30_150	138	30	30	150
138KV_TM30_30_300	138	30	30	300
138KV_TM30_40_80	138	30	40	80
138KV_TM30_40_150	138	30	40	150
138KV_TM30_40_300	138	30	40	300
138KV_TM45_30_150	138	45	30	150
138KV_TM45_30_300	138	45	30	300
138KV_TM45_40_150	138	45	40	150
138KV_TM45_40_300	138	45	40	300
230KV_TM28_30_120	230	28	30	120
230KV_TM28_30_200	230	28	30	200
230KV_TM28_40_120	230	28	40	120
230KV_TM28_40_200	230	28	40	200
230KV_TM33_30_80	230	33	30	80
230KV_TM33_30_120	230	33	30	120
230KV_TM33_30_200	230	33	30	200
230KV_TM33_30_300	230	33	30	300
230KV_TM33_40_80	230	33	40	80
230KV_TM33_40_120	230	33	40	120
230KV_TM33_40_200	230	33	40	200
230KV_TM33_40_300	230	33	40	300
230KV_TM38_30_120	230	38	30	120
230KV_TM38_30_200	230	38	30	200
230KV_TM38_30_300	230	38	30	300
230KV_TM38_40_120	230	38	40	120
230KV_TM38_40_200	230	38	40	200
230KV_TM38_40_300	230	38	40	300
230KV_TM46_30_300	230	46	30	300
230KV_TM46_40_300	230	46	40	300

Tabela 6. 2 Dados de entrada

Cabo Condutor Adotado : Cabo CAA 636MCM Grosbeak	
Ø cabo condutor: 25,15mm	Peso cabo: 1,302 kg / m
Cabo Para-raios Adotado : CAA Dotterel	
Ø cabo para-raios: 15,40mm	Peso cabo: 0,655 kg / m
Qtde cabos / fase :	138kV : 1
	230kV : 2
Área cadeia de isoladores :	138kV : 0,6m ²
	230kV : 1,0m ²
Comprimento mísulas para-raios (LPR):	138kV : 2,2m
	230kV : 3,0m
Comprimento mísulas condutor (LC):	138kV : 2,5m
	230kV : 4,0m
Distância entre mísula para-raios e mísula condutor (dPR):	138kV : 2,5m
	230kV : 3,0m
Distância entre mísulas condutor (dC):	138kV : 3,0m
	230kV : 5,0m

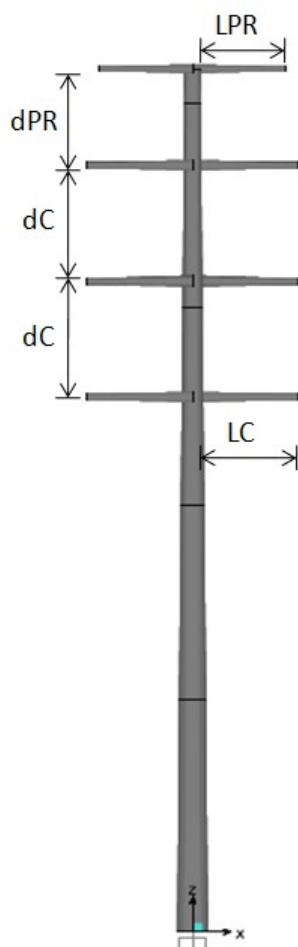


Figura 6.1: Silhueta típica das torres monotubulares analisadas

6.2 HIPÓTESES DE CARREGAMENTO

O algoritmo desenvolvido foi programado para avaliar automaticamente as ações estáticas e dinâmicas devidas ao vento e à hipótese de ruptura de cabo condutor atuando nos postes metálicos.

6.2.1 Ações devidas ao vento

Para as ações devidas ao vento para as análises estática e dinâmica foram considerados seguintes os dados da norma brasileira de vento NBR6123 (1988):

$$v_0 = 30 \text{ e } 40 \text{ m/s}$$

$$S_1 = 1,0 \text{ (Terreno plano ou pouco acidentado)}$$

S_2 , Categoria II (Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas)

$S_3 = 1,19$ (Período de retorno 150 anos com 63% de probabilidade de exceder o vento básico v_0)

Coeficiente de arrasto para os módulos tubulares $C_a = 0,60$

Coeficiente de arrasto para os cabos da linha de transmissão $C_a = 1,20$

Coeficiente de arrasto para as cadeias de isoladores $C_a = 1,20$

As cargas de vento foram aplicadas paralelas ao eixo X, no sentido transversal à linha, o que representa a condição mais severa para a estrutura.

6.2.2 Hipótese de ruptura de cabo condutor

Para as ações devidas à hipótese de ruptura do cabo condutor foi considerado tração de 1.600,0 kgf, referente à 14% da carga de ruptura do cabo adotado. Na análise estática foi considerada a carga de tração aplicada na mísula no sentido longitudinal da linha, referente ao eixo Y. Para a análise dinâmica foi considerado procedimento idêntico ao adotado por Kaminski *et. al.* (2008) citado no capítulo 5, com as cargas aplicadas no eixo Y.

6.3 RESULTADOS

O primeiro resultado a ser apresentado oriundo das análises realizadas é o da frequência natural de cada um dos modelos. A tabela 6.3 apresenta o valor da frequência dos três primeiros modos de vibração. Importante observar que todos os modelos estudados apresentaram frequência fundamental abaixo de 1 Hz.

Com as análises realizadas foi possível obter o Fator de Magnificação Dinâmica (FM) de uma série de casos hipotéticos de torres monotubulares. As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados obtidos referentes aos valores dos fatores de magnificação dinâmica para as cargas de vento e hipótese de ruptura do cabo condutor, respectivamente.

Como a ação principal dos postes metálicos é a flexão, são apresentados nas tabelas a seguir os fatores de magnificação dinâmica referentes ao momento fletor na base em torno dos eixos mais críticos, ou seja, momento em torno do eixo Y (M_y) para as cargas devidas ao vento e momento em torno do eixo X (M_x) para as cargas devidas à hipótese de ruptura do cabo condutor. Em ambos os casos são apresentados os resultados obtidos para diversos passos de tempo Δt , demonstrando a convergência para $\Delta t = T_1/20$.

Outro parâmetro interessante para avaliação é o deslocamento no nó do topo das torres monotubulares. A tabela 6.6 apresenta os valores obtidos referentes ao deslocamento no eixo X (δx) para ações devidas ao vento. Os resultados demonstraram que o Fator de Magnificação Dinâmica deste parâmetro tende a ser muito próximo ao FM referente à reação de momento fletor na base.

Tabela 6. 3 Frequência dos três primeiros modos de vibração

Identificação	f₁ (Hz)	f₂ (Hz)	f₃ (Hz)
138KV_TM22_30_80	0,75	2,72	3,86
138KV_TM22_30_15	0,66	2,24	3,42
138KV_TM22_40_80	0,94	3,47	4,78
138KV_TM22_40_15	0,93	3,19	4,47
138KV_TM30_30_80	0,61	2,84	3,29
138KV_TM30_30_15	0,52	2,31	2,95
138KV_TM30_30_30	0,53	2,33	3,08
138KV_TM30_40_80	0,73	3,65	3,98
138KV_TM30_40_15	0,74	3,55	4,21
138KV_TM30_40_30	0,72	3,08	3,80
138KV_TM45_30_15	0,42	2,19	2,74
138KV_TM45_30_30	0,38	2,26	2,49
138KV_TM45_40_15	0,53	2,84	3,84
138KV_TM45_40_30	0,51	2,94	3,34
230KV_TM28_30_12	0,52	1,31	2,08
230KV_TM28_30_20	0,57	1,35	1,92
230KV_TM28_40_12	0,80	1,92	2,54
230KV_TM28_40_20	0,81	1,70	2,08
230KV_TM33_30_80	0,51	1,54	2,22
230KV_TM33_30_12	0,51	1,48	2,12
230KV_TM33_30_20	0,48	1,31	1,84
230KV_TM33_30_30	0,51	1,27	1,63
230KV_TM33_40_80	0,66	2,03	2,74
230KV_TM33_40_12	0,66	1,89	2,45
230KV_TM33_40_20	0,70	1,73	2,07
230KV_TM33_40_30	0,71	1,51	1,74
230KV_TM38_30_12	0,43	1,42	1,95
230KV_TM38_30_20	0,45	1,39	1,84
230KV_TM38_30_30	0,47	1,32	1,64
230KV_TM38_40_12	0,58	1,91	2,39
230KV_TM38_40_20	0,60	1,69	2,03
230KV_TM38_40_30	0,63	1,55	1,75
230KV_TM46_30_30	0,40	1,34	1,61
230KV_TM46_40_30	0,54	1,48	1,69

Tabela 6. 4 FM My referente às cargas devidas ao vento

Identificação	$\Delta t = T_1 / 1$	$\Delta t = T_1 / 5$	$\Delta t = T_1 / 10$	$\Delta t = T_1 / 15$	$\Delta t = T_1 / 20$
138KV_TM22_30_80	0,90	0,92	0,95	0,94	0,97
138KV_TM22_30_15	1,02	1,17	0,98	1,06	1,01
138KV_TM22_40_80	0,99	0,95	0,93	0,93	0,92
138KV_TM22_40_15	1,07	0,96	0,94	0,94	0,96
138KV_TM30_30_80	0,91	0,91	1,10	1,08	1,14
138KV_TM30_30_15	0,92	0,94	0,99	1,02	1,04
138KV_TM30_30_30	0,94	0,97	1,00	1,04	1,06
138KV_TM30_40_80	0,93	0,93	0,97	0,98	0,97
138KV_TM30_40_15	0,94	0,96	0,99	1,00	1,06
138KV_TM30_40_30	1,01	0,99	0,98	0,99	0,99
138KV_TM45_30_15	0,97	0,95	1,03	1,06	1,09
138KV_TM45_30_30	0,96	0,99	1,06	1,12	1,16
138KV_TM45_40_15	0,98	0,98	0,99	1,03	1,05
138KV_TM45_40_30	0,94	1,00	1,08	1,05	1,13
230KV_TM28_30_12	0,94	0,93	0,93	1,00	1,01
230KV_TM28_30_20	0,95	0,95	0,96	1,01	1,02
230KV_TM28_40_12	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95
230KV_TM28_40_20	1,01	0,96	0,94	0,94	0,95
230KV_TM33_30_80	0,90	0,92	0,94	0,99	1,00
230KV_TM33_30_12	0,93	0,90	0,97	1,01	1,05
230KV_TM33_30_20	0,93	1,10	1,04	1,05	1,13
230KV_TM33_30_30	0,93	0,99	0,99	1,03	1,07
230KV_TM33_40_80	1,02	1,19	0,96	1,02	0,97
230KV_TM33_40_12	1,08	1,15	0,95	0,98	1,03
230KV_TM33_40_20	1,06	0,96	0,97	0,99	0,96
230KV_TM33_40_30	1,09	0,97	0,95	0,98	0,97
230KV_TM38_30_12	0,90	0,94	1,03	1,06	1,06
230KV_TM38_30_20	0,92	0,94	1,04	1,12	1,13
230KV_TM38_30_30	0,93	0,99	1,14	1,18	1,15
230KV_TM38_40_12	0,98	0,93	1,01	1,02	1,04
230KV_TM38_40_20	1,03	1,07	1,05	1,11	1,16
230KV_TM38_40_30	0,96	1,19	1,07	1,03	0,99
230KV_TM46_30_30	0,95	1,02	1,05	1,15	1,14
230KV_TM46_40_30	0,92	0,96	1,07	1,02	1,02

Tabela 6. 5 FM Mx referente à hipótese de ruptura do cabo condutor

Identificação	$\Delta t = T_1 / 1$	$\Delta t = T_1 / 5$	$\Delta t = T_1 / 10$	$\Delta t = T_1 / 15$	$\Delta t = T_1 / 20$
138KV_TM22_30_80	1,67	1,58	1,62	1,66	1,64
138KV_TM22_30_15	1,55	1,55	1,59	1,62	1,62
138KV_TM22_40_80	1,65	1,54	1,60	1,66	1,68
138KV_TM22_40_15	1,65	1,52	1,60	1,65	1,64
138KV_TM30_30_80	1,57	1,58	1,66	1,65	1,67
138KV_TM30_30_15	1,66	1,54	1,60	1,64	1,61
138KV_TM30_30_30	1,64	1,54	1,63	1,63	1,60
138KV_TM30_40_80	1,70	1,55	1,66	1,67	1,69
138KV_TM30_40_15	1,69	1,56	1,67	1,66	1,65
138KV_TM30_40_30	1,67	1,55	1,62	1,66	1,63
138KV_TM45_30_15	1,62	1,62	1,74	1,71	1,67
138KV_TM45_30_30	1,62	1,51	1,72	1,61	1,59
138KV_TM45_40_15	1,74	1,60	1,75	1,72	1,66
138KV_TM45_40_30	1,68	1,58	1,67	1,68	1,63
230KV_TM28_30_12	1,67	1,63	1,55	1,65	1,66
230KV_TM28_30_20	1,70	1,69	1,60	1,57	1,58
230KV_TM28_40_12	1,59	1,67	1,65	1,60	1,58
230KV_TM28_40_20	1,59	1,71	1,74	1,71	1,69
230KV_TM33_30_80	1,66	1,58	1,60	1,71	1,72
230KV_TM33_30_12	1,66	1,60	1,57	1,70	1,70
230KV_TM33_30_20	1,59	1,67	1,54	1,63	1,64
230KV_TM33_30_30	1,65	1,61	1,63	1,57	1,57
230KV_TM33_40_80	1,66	1,58	1,58	1,66	1,74
230KV_TM33_40_12	1,67	1,61	1,58	1,58	1,67
230KV_TM33_40_20	1,64	1,67	1,69	1,65	1,61
230KV_TM33_40_30	1,63	1,69	1,74	1,70	1,69
230KV_TM38_30_12	1,70	1,62	1,62	1,74	1,72
230KV_TM38_30_20	1,61	1,65	1,55	1,66	1,70
230KV_TM38_30_30	1,71	1,67	1,59	1,58	1,60
230KV_TM38_40_12	1,71	1,63	1,58	1,71	1,73
230KV_TM38_40_20	1,69	1,68	1,63	1,57	1,62
230KV_TM38_40_30	1,73	1,70	1,65	1,68	1,65
230KV_TM46_30_30	1,58	1,56	1,57	1,67	1,69
230KV_TM46_40_30	1,74	1,66	1,61	1,61	1,58

Tabela 6. 6 FM My e δx referente às cargas devidas ao vento para $\Delta t = T_1/20$

Identificação	My	δx	Desvio
138KV_TM22_30_80	0,97	0,98	0,9%
138KV_TM22_30_15	1,01	1,02	1,1%
138KV_TM22_40_80	0,92	0,92	0,0%
138KV_TM22_40_15	0,96	0,96	0,3%
138KV_TM30_30_80	1,14	1,17	2,3%
138KV_TM30_30_15	1,04	1,06	1,8%
138KV_TM30_30_30	1,06	1,07	1,3%
138KV_TM30_40_80	0,97	0,97	0,5%
138KV_TM30_40_15	1,06	1,07	0,9%
138KV_TM30_40_30	0,99	0,99	0,1%
138KV_TM45_30_15	1,09	1,11	1,8%
138KV_TM45_30_30	1,16	1,17	0,9%
138KV_TM45_40_15	1,05	1,06	0,7%
138KV_TM45_40_30	1,13	1,13	0,1%
230KV_TM28_30_12	1,01	1,04	3,3%
230KV_TM28_30_20	1,02	1,04	2,2%
230KV_TM28_40_12	0,95	0,96	0,9%
230KV_TM28_40_20	0,95	0,96	0,7%
230KV_TM33_30_80	1,00	1,02	2,2%
230KV_TM33_30_12	1,05	1,07	2,4%
230KV_TM33_30_20	1,13	1,16	2,9%
230KV_TM33_30_30	1,07	1,08	1,3%
230KV_TM33_40_80	0,97	0,99	1,6%
230KV_TM33_40_12	1,03	1,04	1,1%
230KV_TM33_40_20	0,96	0,97	1,4%
230KV_TM33_40_30	0,97	0,98	0,7%
230KV_TM38_30_12	1,06	1,08	1,7%
230KV_TM38_30_20	1,13	1,15	1,9%
230KV_TM38_30_30	1,15	1,16	1,1%
230KV_TM38_40_12	1,04	1,06	1,6%
230KV_TM38_40_20	1,16	1,17	1,1%
230KV_TM38_40_30	0,99	1,00	1,0%
230KV_TM46_30_30	1,14	1,15	1,0%
230KV_TM46_40_30	1,02	1,03	0,7%

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os dados obtidos a partir das análises observou-se que, para as reações de momento fletor, os Fatores de Magnificação Dinâmica referentes às ações de vento variam entre 0,92 e 1,16. Com relação aos deslocamentos do nó do topo o FM apresentou variação entre 0,92 e 1,17. Diante desta amplitude dos valores resultantes, buscou-se identificar um padrão para esta distribuição em função dos valores da frequência natural das estruturas analisadas. O gráfico da figura 6.2 apresenta a distribuição dos Fatores de Magnificação Dinâmica da reação de momento fletor no eixo Y e deslocamento no nó do topo no eixo X para a ação do vento relacionados à frequência do primeiro modo de vibração das torres monotubulares.

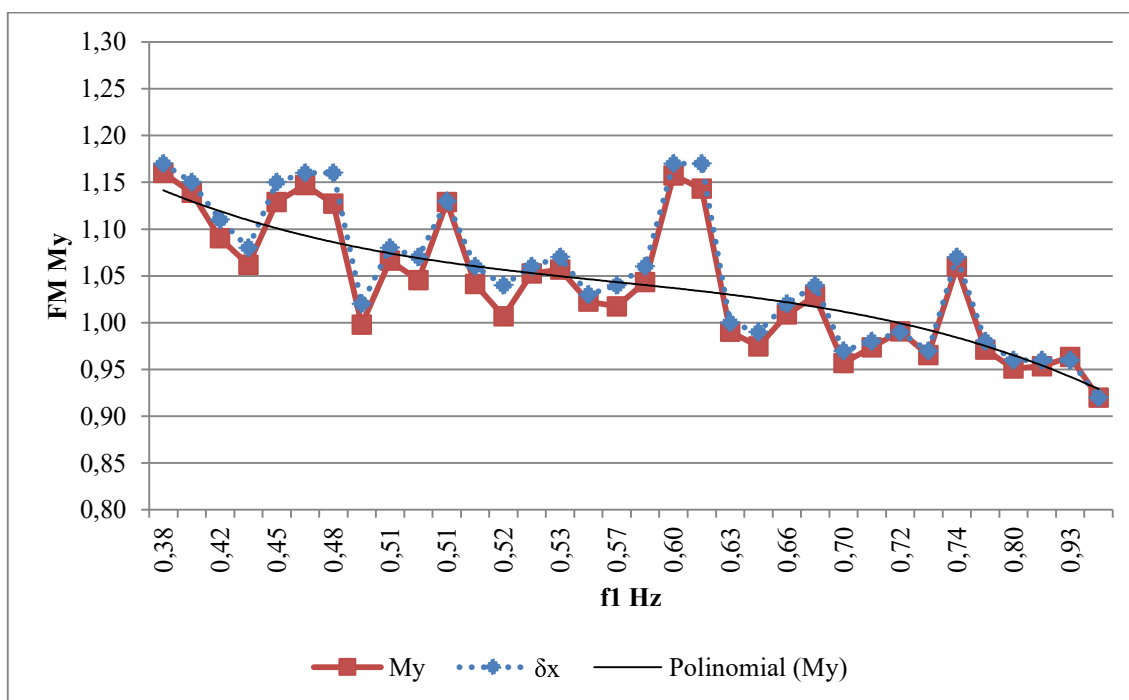


Figura 6.2: Gráfico FM My referente às cargas devidas ao vento versus f_1

Observa-se pela linha de tendência plotada no gráfico que os valores do Fator de Magnificação Dinâmica tendem a diminuir com o aumento da frequência da estrutura. Além disso, há uma tendência de que estruturas com frequência fundamental acima de 0,75 Hz apresentem FM abaixo de 1,0, ou seja, sem esforços ou deslocamentos adicionais devidos à ação dinâmica. De fato, o consenso atual no meio técnico é de que estruturas com frequências naturais acima de 1,0 Hz não tenham a necessidade de se analisar de forma dinâmica.

Do mesmo modo, para as ações devidas à hipótese de ruptura do cabo condutor o FM varia entre 1,56 e 1,74. A figura 6.3 apresenta a distribuição do Fatores de Magnificação Dinâmica da reação de momento fletor para a hipótese de ruptura do cabo condutor em relação à frequência natural das estruturas analisadas.

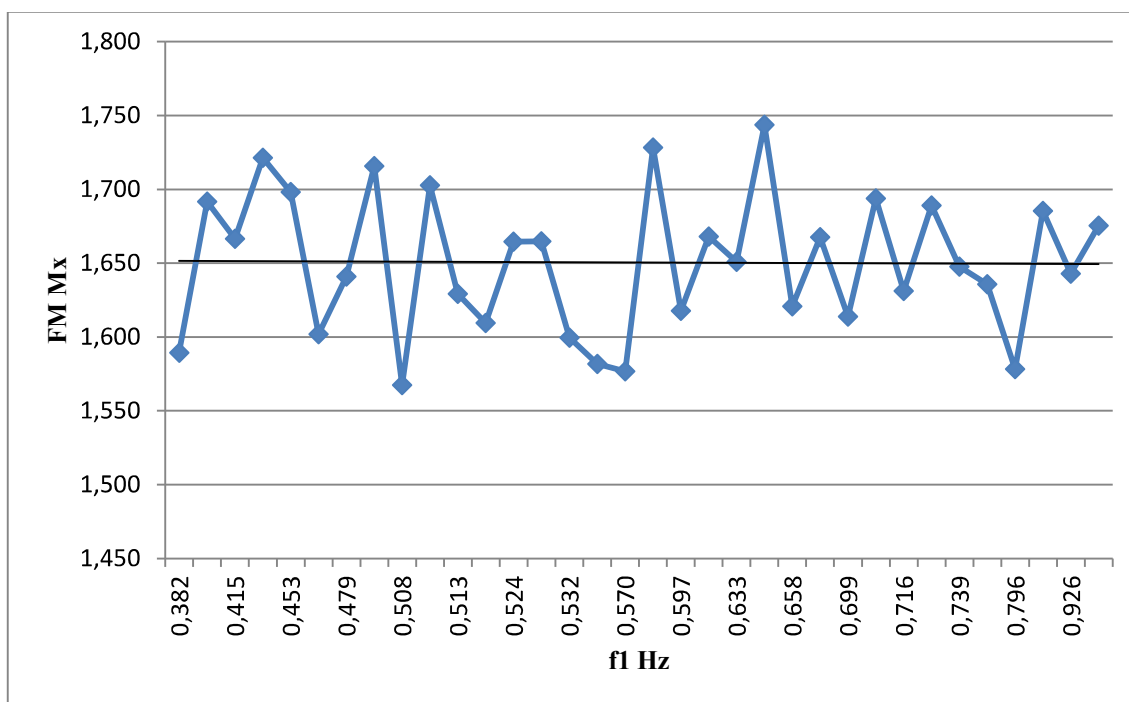


Figura 6.3: Gráfico FM Mx referente às hipóteses de ruptura do cabo condutor versus f1

O gráfico mostra que há uma flutuação dos valores resultantes do Fator de Magnificação Dinâmica em torno de um valor médio de 1,65, porém sem superar o valor de 1,75. Este resultado é uma importante evidência de que, durante o dimensionamento de uma torre monotubular, deve-se adotar coeficientes de majoração elevados para as cargas da hipótese de ruptura do cabo condutor, quando apenas a análise estática é considerada.

7. CONCLUSÕES

Os códigos normativos nacionais e internacionais recomendam analisar de forma dinâmica estruturas cuja frequência natural encontra-se abaixo de 1 Hz. As torres monotubulares, ou postes metálicos, possuem como principal característica elevada esbelteza, o que conduz a baixos valores de frequência natural. Este trabalho analisou 34 casos de torres monotubulares destinadas a transmissão de energia elétrica, todas com frequência fundamental abaixo do limite de 1 Hz.

Os resultados demonstraram a importância da verificação das ações dinâmicas devidas ao vento em torres monotubulares de transmissão de energia. No entanto, pode-se afirmar que nem sempre estas ações trazem grandes impactos ao dimensionamento destas estruturas, tendo em vista a variação do Fator de Magnificação Dinâmica em função da frequência fundamental das torres monotubulares. O estudo demonstrou que estruturas com frequências fundamentais mais baixas, próximas a 0,4 Hz, podem apresentar valores elevados dos Fatores de Magnificação Dinâmica para ações devidas ao vento, os quais podem ser restritivos para o dimensionamento. O fator máximo obtido neste trabalho, considerando o Método do Vento Sintético, foi de 1,16 para a reação de momento fletor e de 1,17 para o deslocamento do nó do topo. Já para estruturas cuja frequência natural é acima de 0,75Hz estas ações demonstraram não ser restritivas para o dimensionamento. Nestes casos o Fator de Magnificação Dinâmica obtido ficou abaixo de 1,0, o que significa que não há esforços adicionais à estrutura relativos à ação dinâmica do vento.

As ações dinâmicas devidas à ruptura do cabo condutor ficaram entre 55% e 75% superiores às análises estáticas. Dessa forma, demonstrou-se numericamente a necessidade de se adotar coeficientes de majoração elevados para estas cargas quando é realizada apenas a análise estática, o que na prática usualmente ocorre.

Por fim, apresenta-se nos anexos deste trabalho uma rotina em *Visual Basic Application* onde é possível modelar automaticamente no software SAP2000 uma torre monotubular previamente dimensionada e gerar o histórico temporal das ações de vento conforme formulação do Método do Vento Sintético. O algoritmo processa as verificações quanto às análises estáticas e dinâmicas referentes às ações de vento e da hipótese de ruptura do cabo condutor, retornando como resultado final o Fator de

Magnificação Dinâmica correspondente às reações de apoio e deslocamentos para as ações consideradas.

O algoritmo e a metodologia deste trabalho foram validados através de estudos comparativos com trabalhos anteriores, para quais foi demonstrada boa convergência quanto aos resultados. Quando comparado a um estudo clássico de uma estrutura analisada via Método do Vento Sintético o desvio do algoritmo em relação ao estudo original foi de 12%. A adoção de elementos de barra com 2 nós ou 3 nós para discretização dos postes não apresentou divergência considerável, a qual ficou na casa de 3%. Para o método de Newmark para solução das equações no domínio do tempo a adoção do passo de tempo Δt igual $T_1/20$ foi mais adequada, considerando-se a acurácia e o tempo de análise computacional.

Para o dimensionamento das torres monotubulares sugere-se que tenha um consenso entre os projetistas, fabricantes e concessionárias de energia elétrica para que o dimensionamento das torres monotubulares sejam uniformizados, sem divergências em termos metodologia de dimensionamento, ensaios, entre outros parâmetros diretamente ligados à aplicação destas estruturas. Certamente uma norma brasileira específica para o assunto traria grandes benefícios a todos os envolvidos.

A partir deste trabalho sugere-se repetir a mesma metodologia aplicada em torres treliçadas autoportantes e estaiadas, a fim de verificar o comportamento destas estruturas frente às ações dinâmicas do vento e da hipótese de ruptura do cabo condutor.

Neste trabalho foi adotada uma taxa de amortecimento genérica para todas as estruturas, baseada em referências renomadas sobre o assunto. Porém, sugere-se ainda que uma campanha de medições experimentais criteriosa seja realizada para torres monotubulares com ligações entre módulos através de flanges e encaixe tipo *slip-joint*. Além disso, outras estruturas para linhas de transmissão poderiam fazer parte de uma campanha de medições, como torres autoportantes, tipo Danúbio, Cara de Gato, entre outras, além de torres estaiadas, tipo monomastro, *Cross-Rope*, entre outras.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5422 - Projeto de linhas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.
2. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
3. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
4. AISC 360-16 - American Institute of Steel Construction. **Specification for structural steel buildings**. Chicago, 2016.
5. ARGENTA, M. A.; **Análise de torres de transmissão submetidas a cargas dinâmicas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.
6. ASCE 48-11 - American Society of Civil Engineers. **Design of steel transmission pole structures**. Reston, 2012.
7. ASCE 72-10 - American Society of Civil Engineers. **Guidelines for electrical transmission line structural loading**. Reston, 2010.
8. BALAGOPAL, R.; RAO, N. P., ROKADE, R. P.; **Simplified model to predict deflection and natural frequency of steel pole structures**. In: Journal of the Institution of Engineers (India), 99(3):595-607, sep. 2018.
9. BATHE, K.J.; DOVEY, H.H.; PETERSON, F.E.; WILSON, E.L.; **SAP - A structural analysis program for linear systems**. In: Nuclear Engineering and Design, 25 (1973) 257-274, jul. 1973.
10. BEC, J. **Influence of wind spectrum formula choice on footbridge response**. In: Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Caroline, USA, May 23-27, 2010.
11. BLESSMANN, J.; **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
12. BLESSMANN, J.; **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1998.
13. CARRIL, C. F.; **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
14. CERUTTI, R. M. B.; **Estudo comparativo de métodos para análise aerodinâmica de estruturas submetidas ao vento turbulento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.
15. CHAVES, J. R. F.; **Análise dinâmica de pórticos metálicos contraventados**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

16. CHAVES, R. A.; **Fundações de torres de linhas de transmissão e de telecomunicação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
17. CHÁVEZ, E. S.; **Análise estrutural de edifício alto submetido as pressões flutuantes induzidas pela ação do vento**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.
18. CHOPRA. A., K.; **Dynamics of structures: A primer**. Earthquake engineering research institute. Berkeley, CA, 1981.
19. CHOPRA. A., K.; **Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering**. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
20. CIGRÉ-BRASIL; **Recomendação técnica para projeto de postes monotubulares de aço para linhas de transmissão**. B2-13(GT-08)10, jun. 2013.
21. CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J.; **Dynamics of structures**. Third Edition Berkeley, CA: Computer & Structures, Inc. 1995.
22. CONCEIÇÃO, R.S.; PFEIL, M.S.; BATTISTA, R.C; **Torres de linha de transmissão sob ação de ventos originados de ciclones extratropicais e de downbursts**. In: XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2015.
23. COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J.; **Concepts and applications of finite element analysis**. 4th ed. John Willey & Sons. University of Wisconsin, Madison, WI, 2002.
24. DAI, K.; CHEN, S.; **Recent developments in transmission pole dynamic analysis and design**. In: Transmission Lines: Theory, Types and Applications, Editor: Nova Science Publishers Inc, 2010.
25. FRANCO, M.; **Direct along-wind dynamic analysis of tall structures**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: EPUSP, 1993.
26. FRANCO, M.; MEDEIROS, S.R.P.; **O método do "vento sintético" - Novas considerações**. In: TQSNews, Ano XV, nº33, ago. 2011.
27. FUJITA, T., T. **Downburst: Microburst and Macrobust**. Chicago University, Chicago, IL, 1985.
28. GONTIJO, C. R.; **Contribuição à análise e projeto de torres autoportantes de linhas de transmissão**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1994.
29. IEC 60826 - International Electrotechnical Commission. **Design criteria of overhead transmission lines**. Geneva, Switzerland, 2003.
30. KAMINSKI JR, J. **Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
31. KAMINSKI JR, J.; RIERA, J. D.; MENEZES, R.C.R.; MIGUEL, L.F.F.; **Modelo uncertainty in the assessment of transmission line towers subjected to cable rupture**. In: Engineering Structures, 30 (2008) 2935-2944, may. 2008.

32. LAZANHA, E.C.; **Análise dinâmica elasto-plástica de estruturas metálicas sob excitação aleatória de vento.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.
33. LÉGERON, F.; GANI, F.; **Dynamic wind effects on transmission line structures.** In: International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation, jul. 2009.
34. LEITE, E. B.; **Análise comparativa entre respostas de torre de transmissão sujeita a carregamentos obtidos através do Método do Vento Sintético e da norma NBR6123/88.** Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
35. LU, C.; OU, Y.; XING, M.; MILLS, J.E.; **Structural analysis of lattice steel transmission tower: A review.** In: Journal of Steel Structures & Construction, 2:114, jun. 2016.
36. MIGUEL, L.F.F.; MIGUEL, L.F.F.; RIERA, J.D.; KAMINSKI JR, J.; MENEZES, R.C.R.; **Model uncertainty in the assessment of EPS wind loads in transmission line design.** In: International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation, jul. 2009.
37. MIGUEL, L.F.F.; MIGUEL, L.F.F.; RIERA, J.D.; KAMINSKI JR, J.; MENEZES, R.C.R.; **Assesment of code recommendations through simulation of EPS wind loads along a segment of a transmission line.** In: Engineering Structures 43 (2012) 1–11, jun. 2012.
38. NASCIMENTO, F. O. D. A.; **Análise de estruturas metálicas de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.
39. PENGYUN, L.; JIEDONG, L.; MING, N.; WANLI, Z.; ANGUP, H.; **Dynamic response of power transmission towers under wind load.** In: Energy Procedia, 17(2012):1124-1131. 2012.
40. RIERA, J. D.; **Sobre a definição do vento para projeto estrutural na ABNT NBR6123 e outras normas sulamericanas.** In: Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, set/dez. 2016.
41. RIERA, J. D.; SILVA, V.R.; BLESSMANN, J.; Nanni, L.F.; GALINDEZ, E.E.; **Determinação experimental das propriedades dinâmicas básicas de uma torre de transmissão de 230kV.** In: VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 1984.
42. SANTOS, V. H.; **Comparação do método discreto da NBR6123 e do Método do Vento Sintético para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.
43. SIDDIQI, Z. A. **A Study of power transmission poles.** In: Asian Journal of Civil Engineering, VOL. 6, NO.6. 2005.
44. SILVA, J.B.G.F.; CARVALHO, M.M.; **Algumas considerações sobre a problemática dos efeitos dinâmicos nas estruturas para linhas de transmissão.** In: International Seminar on Modeling and Identification of Structures Subjected to Dynamic Excitation, jul. 2009.

45. SOLARI, G.; PAGNINI, L. C.; **Damping measurements of steel poles and tubular towers.** In: Engineering Structures, 23(2001):1085-1095, jan. 2001.
46. VANIN, V.; **Determinação Probabilística da resposta dinâmica de linhas de transmissão submetidas a ação de tormentas elétricas estacionárias e não estacionárias.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2017.
47. WILSON, E. L.; **Three-dimensional static and dynamic analysis of structures: A physical approach with emphasis on earthquake engineering.** Computer and Structures Inc. Berkeley, CA, 2002.

9. ANEXOS

9.1 ALGORITMO DESENVOLVIDO EM *VISUAL BASIC APPLICATION*

'Macro elaborada por Thiago Pedroso em jun/19

Option Explicit

Dim SapObject As SAP2000.SapObject

Dim ret As Long

Dim coordinates As Range

Sub separar_cortante()

'Elaborado por Wilderson Schultz em jul/19'

Dim Hmod(0, 1000) As Variant

Dim Q(0, 1000) As Variant

Dim cont, n, P, T, k As Integer

Dim inicio_frame(0, 1000), final_frame(0, 1000) As Variant

Dim cortante As Double

Sheets("plan1").Activate

ActiveSheet.Unprotect

Range("E13:E28").Select

Selection.ClearContents

n = 51

P = 1

cont = 0

While Cells(n, 1) <> 0

Hmod(0, P) = Cells(n, 1)

$Q(0, P) = \text{Cells}(n, 5)$

$n = n + 1$

$P = P + 1$

$\text{cont} = \text{cont} + 1$

Wend

$T = 0$

$P = 1$

$k = 13$

For $n = 51$ To $\text{cont} + n$

$\text{inicio_frame}(0, T) = \text{Cells}(k, 2)$

$\text{final_frame}(0, T) = \text{Cells}(k, 3)$

If $(\text{final_frame}(0, T) \neq 0)$ Then

If $((\text{inicio_frame}(0, T) / 1000) < \text{Hmod}(0, P))$ Then

$\text{cortante} = \text{cortante} + Q(0, P)$

Else

$\text{Cells}(k, 5) = \text{cortante}$

$\text{cortante} = 0$

$k = k + 1$

$P = P - 1$

End If

T = T + 1

P = P + 1

End If

Next n

Sheets("plan1").Activate

ActiveSheet.Protect

End Sub

Sub area_estrutura()

Dim Hmod(0, 1000) As Variant

Dim A(0, 1000) As Variant

Dim cont, n, P, T, k As Integer

Dim inicio_frame(0, 1000), final_frame(0, 1000) As Variant

Dim area As Double

Sheets("plan2").Activate

ActiveSheet.Unprotect

Range("I62:I77").Select

Selection.ClearContents

Sheets("plan1").Activate

ActiveSheet.Unprotect

n = 51

P = 1

cont = 0

While Cells(n, 1) <> 0

Hmod(0, P) = Cells(n, 1)

A(0, P) = Cells(n, 4)

n = n + 1

P = P + 1

cont = cont + 1

Wend

T = 0

P = 1

k = 62

For n = 51 To cont + n

Sheets("plan2").Activate

inicio_frame(0, T) = Cells(k + 1, 2)

final_frame(0, T) = Cells(k, 2)

If (final_frame(0, T) <> 0) Then

If ((inicio_frame(0, T)) < Hmod(0, P)) Then

area = area + A(0, P)

Else

Cells(k, 9) = area / 0.75

area = 0

k = k + 1

P = P - 1

End If

T = T + 1

P = P + 1

End If

Next n

Sheets("plan2").Activate
ActiveSheet.Protect

Sheets("plan1").Activate
ActiveSheet.Protect

End Sub

Sub Determinar_Gc()

Dim i As Integer

Dim z As Integer

Dim time() As Double

Dim value() As Double

Dim ltype() As String

Dim lname() As String

Dim func() As String

Dim SF() As Double

Dim TF() As Double

Dim AT() As Double

Dim cs() As String

Dim ang() As Double

Dim joint As Integer
Dim totaljoint As Integer
Dim jointnumber As Integer
Dim cargax As Double
Dim cargay As Double

Dim alfa As Double
Dim beta As Double

Dim nomeload As String
Dim nomeTH As String
Dim nomecase As String

Dim numberresults As Long
Dim F1() As Double
Dim F2() As Double
Dim F3() As Double
Dim M2() As Double
Dim M3() As Double
Dim M1() As Double
Dim obj() As String
Dim elm() As String
Dim elmSTA() As Double
Dim objsta() As Double
Dim loadcase() As String
Dim steptype() As String
Dim stepnum() As Double
Dim u1() As Double
Dim u2() As Double
Dim u3() As Double
Dim r1() As Double
Dim r2() As Double
Dim r3() As Double

Dim j As Integer

Dim MAX(2) As Double

ReDim time(2)

ReDim value(2)

'Coeficientes da matriz de Rayleigh

Sheets("plan2").Activate

alfa = Cells(27, 9) 'a0

beta = Cells(28, 9) 'a1

'Passos de tempo método Newmark"

Dim nstep As Long

Dim dt As Double

Dim betan As Double

Dim gama As Double

nstep = Cells(7, 2)

dt = Cells(6, 2)

betan = Cells(7, 5)

gama = Cells(6, 5)

ActiveSheet.Unprotect

Range("BD89:BD108").Select

Selection.ClearContents

For z = 89 To 108

If Cells(z, 55) < 18 And Cells(z, 55) > Cells(28, 2) Then

GoTo p0

End If

Cells(93, 51) = Cells(z, 57)

```
nomeTH = "TH_VENTO_GC" & z
```

```
Range("A1949:W2552").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Range("A2555").Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks
```

—

```
:=False, Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
Set coordinates = Range("W2556:W3155")
```

```
ReDim time(600)
```

```
ReDim value(600)
```

```
For i = 0 To 599
```

```
time(i) = i * (650 / 599)
```

```
value(i) = coordinates(i + 1, 1).value
```

```
Next i
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser(nomeTH, 600, time, value)
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.Delete("RAMPTH")
```

```
nomeload = "VENTO_SINTETICO_GC" & z
```

```
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_GC" & z
```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add(nomeload,  
eLoadPatternType_Other, 0, False)
```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase(nomecase)
```

```

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional(nomecase, 1,
alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration(nomecase, 1, 0,
betan, gama, 0)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep(nomecase,
nstep, dt)

```

```

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)
ReDim func(1)
ReDim SF(1)
ReDim TF(1)
ReDim AT(1)
ReDim cs(1)
ReDim ang(1)

```

```

ltype(0) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1
func(0) = "UNIFTH"
TF(0) = 1
AT(0) = 0
cs(0) = "GLOBAL"
ang(0) = 0

```

```

ltype(1) = "Load"
lname(1) = nomeload
SF(1) = 1
func(1) = nomeTH
TF(1) = 1
AT(1) = 0

```

```

cs(1) = "GLOBAL"
ang(1) = 0

ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads(nomecase, 2,
ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)

'carregamento de vento na estrutura e nas mísulas

Set coordinates = Range("B3158:U3159")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

    joint = coordinates(2, jointnumber).value
    cargax = coordinates(1, jointnumber).value

    ReDim value(6)
    value(0) = cargax
    ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")

Next jointnumber

' carga nas mísulas
Set coordinates = Range("R3158:U3160")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

    joint = coordinates(3, jointnumber).value
    cargax = coordinates(1, jointnumber).value

```

```
ReDim value(6)
value(0) = cargax
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")
```

```
Next jointnumber
```

```
p0:
```

```
Next z
```

```
'salvar e rodar modelo
```

```
ret = SapObject.SapModel.File.Save("C:\MACRO_SAP2000\Example.sdb")
```

```
ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis
```

```
ret =
```

```
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
```

```
'Reações de Apoio VENTO SINTETICO
```

```
For z = 89 To 108
```

```
If Cells(z, 55) < 18 And Cells(z, 55) > Cells(28, 2) Then
```

```
GoTo p1
```

```
End If
```

```
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_GC" & z
```

```
Sheets("plan1").Activate
```

```
ActiveSheet.Unprotect
```

```
Set coordinates = Range("B13:E28")
```

```
i = 2 * (coordinates.Rows.Count - Cells(29, 3))
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomecase)
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm,  
numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)
```

```
    If Abs(M2(i)) > Abs(M2(i + 1)) Then
```

```
        M2(i) = M2(i)
```

```
    Else
```

```
        M2(i) = M2(i + 1)
```

```
    End If
```

```
Sheets("plan2").Activate
```

```
Cells(z, 56).value = M2(i)
```

```
ret =
```

```
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
```

```
p1:
```

```
Next z
```

```
ret = SapObject.SapModel.SetModelIsLocked(False)
```

```
Cells(93, 51) = Cells(111, 56)
```

```
Sheets("plan2").Activate
```

```
ActiveSheet.Protect
```

```
End Sub
```

```
Sub Sap2000_open()
```

```
'Hora início da análise
```

```
Sheets("plan1").Activate
```

```
ActiveSheet.Unprotect
```

```
Range("Z95:Z95").Select
```

```
Selection.Copy
```

```

Range("Z96:Z96").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
    :=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False
ActiveSheet.Protect

```

```

Set SapObject = New SAP2000.SapObject
SapObject.ApplicationStart
SapObject.SapModel.InitializeNewModel (eUnits_kgf_mm_C)
ret = SapObject.SapModel.File.NewBlank

```

```

End Sub

```

```

Sub Sap2000_build()

```

```

Dim totalrows As Integer
Dim rownumber As Integer
Dim zcoord1 As Double
Dim zcoord2 As Double
Dim framename() As String
Dim frame As String
Dim i As Integer
Dim restraintvalue() As Boolean
Dim zeros As Integer
Dim LPR As Double
Dim LF As Double
Dim z1 As Double
Dim z2 As Double
Dim z3 As Double
Dim zPR As Double
Dim espessura As Double
Dim diametro As Double
Dim secao As String

```

```

Dim frametopo As Double
Dim framebase As Double
Dim matprop As String
Dim filename As String
Dim t3 As Double
Dim tw As Double
Dim color As Long
Dim notes As String
Dim GUID As String
Dim value() As Double
Dim Lsecao() As Double
Dim ftopo() As String
Dim fbase() As String
Dim tt() As Long
Dim e3() As Long
Dim e2() As Long

```

```

'construir secoes'

```

```

Set coordinates = Range("B13:C28")

```

```

zeros = Range("C29")

```

```

totalrows = coordinates.Rows.Count - zeros

```

```

For rownumber = 1 To (totalrows)

```

```

    zcoord1 = coordinates(rownumber, 1).value

```

```

    zcoord2 = coordinates(rownumber, 2).value

```

```

    ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(0, 0, zcoord2, 0, 0, zcoord1,
"Default")

```

```

Next rownumber

```

```

'inserir restricao na base'

```

```

ReDim restraintvalue(5)

```

```

For i = 0 To 5
    restraintvalue(i) = True
Next i
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetRestraint(totalrows + 1, restraintvalue)

'construire misulas'

LPR = Range("B32")
LF = Range("B35")
z1 = Range("B36")
z2 = Range("B37")
z3 = Range("B38")
zPR = Range("C13")

ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(-LPR, 0, zPR, 0, 0, zPR,
"Default")
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(LPR, 0, zPR, 0, 0, zPR,
"Default")

ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(-LF, 0, z1, 0, 0, z1,
"Default")
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(LF, 0, z1, 0, 0, z1,
"Default")

ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(-LF, 0, z2, 0, 0, z2,
"Default")
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(LF, 0, z2, 0, 0, z2,
"Default")

ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(-LF, 0, z3, 0, 0, z3,
"Default")
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.AddByCoord(LF, 0, z3, 0, 0, z3,
"Default")

```

```

ret = SapObject.SapModel.View.RefreshView(0, "false")

'material COR
ret = SapObject.SapModel.PropMaterial.AddMaterial("CORTEN",
eMatType_Steel, "United States", "ASTM A572", "Grade 50", "CORTEN")

'definição das seções TOPO'

Set coordinates = Range("F13:H28")

For frametopo = 1 To (totalrows)
    espessura = coordinates(frametopo, 3).value
    diametro = coordinates(frametopo, 2).value
    secao = coordinates(frametopo, 1).value

    ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe(secao, "CORTEN", diametro,
    espessura)
    ret = SapObject.SapModel.PropFrame.GetPipe(secao, filename, matprop, t3, tw,
    color, notes, GUID)

Next frametopo

'definição das seções BASE'

Set coordinates = Range("J13:L28")

For framebase = 1 To (totalrows)
    espessura = coordinates(framebase, 3).value
    diametro = coordinates(framebase, 2).value
    secao = coordinates(framebase, 1).value

    ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe(secao, "CORTEN", diametro,
    espessura)

```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.GetPipe(secao, filename, matprop, t3, tw,  
color, notes, GUID)
```

```
Next framebase
```

```
'definição das seções não prismáticas'
```

```
ReDim tt(1)
```

```
ReDim e3(1)
```

```
ReDim e2(1)
```

```
ReDim fbase(1)
```

```
ReDim ftopo(1)
```

```
ReDim Lsecao(1)
```

```
Set coordinates = Range("A13:J28")
```

```
For rownumber = 1 To (totalrows)
```

```
For i = 0 To 1
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
e3(i) = CLng(1)
```

```
e2(i) = CLng(1)
```

```
secao = coordinates(rownumber, 1).value
```

```
fbase(i) = coordinates(rownumber, 10).value
```

```
ftopo(i) = coordinates(rownumber, 6).value
```

```
Lsecao(i) = coordinates(rownumber, 4).value
```

```
Next i
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetNonPrismatic(secao, 1, ftopo, fbase,  
Lsecao, tt, e3, e2, color, notes, GUID)
```

```
Next rownumber
```

'definição das seções misulas'

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe("PRT", "CORTEN", 120, 3)
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe("FT", "CORTEN", 160, 3)
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe("PRB", "CORTEN", 197, 3)
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetPipe("FB", "CORTEN", 280, 3)
```

```
For i = 0 To 1
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
e3(i) = CLng(1)
```

```
e2(i) = CLng(1)
```

```
fbase(i) = "PRT"
```

```
ftopo(i) = "PRB"
```

```
Lsecao(i) = 1
```

```
Next i
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetNonPrismatic("PR", 1, fbase, ftopo,  
Lsecao, tt, e3, e2, color, notes, GUID)
```

```
For i = 0 To 1
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
tt(i) = CLng(1)
```

```
e3(i) = CLng(1)
```

```
e2(i) = CLng(1)
```

```
fbase(i) = "FT"
```

```
ftopo(i) = "FB"
```

```
Lsecao(i) = 1
```

```
Next i
```

```
ret = SapObject.SapModel.PropFrame.SetNonPrismatic("Fase", 1, fbase, ftopo,  
Lsecao, tt, e3, e2, color, notes, GUID)
```

```
'Imput seções nas barras
```

```
Set coordinates = Range("A13:A28")
```

```
For rownumber = 1 To (totalrows)
```

```
frame = rownumber
```

```
secao = coordinates(rownumber, 1).value
```

```
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.SetSection(frame, secao)
```

```
Next rownumber
```

```
For rownumber = (totalrows + 1) To (totalrows + 2)
```

```
frame = rownumber
```

```
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.SetSection(frame, "PR")
```

```
Next rownumber
```

```
For rownumber = (totalrows + 3) To (totalrows + 8)
```

```
frame = rownumber
```

```
ret = SapObject.SapModel.FrameObj.SetSection(frame, "Fase")
```

```
Next rownumber
```

```
End Sub
```

```
Sub Sap2000_Carga_Estatica()
```

Dim totalrows As Integer
Dim rownumber As Integer
Dim joint As Double
Dim cargax As Double
Dim cargay As Double
Dim cargaz As Double
Dim value() As Double
Dim zeros As Integer
Dim i As Integer
Dim coordz As Double
Dim qestrut As Double
Dim ltype() As String
Dim lname() As String
Dim SF() As Double

Dim numberresults As Long
Dim loadcase() As String
Dim steptype() As String
Dim stepnum() As Double
Dim per() As Double
Dim freq() As Double
Dim circf() As Double
Dim egv() As Double

Call separar_cortante
Call area_estrutura

Sheets("plan1").Activate
ActiveSheet.Unprotect

'Criar load pattern Vento Estático
ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add("VENTO_ESTATICO",
eLoadPatternType_Wind, 0, False)

```
ret =  
SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add("RUPTURA_CONDUTOR_ESTATICO",  
eLoadPatternType_Other, 0, False)
```

```
'carregamento de vento na estrutura
```

```
Set coordinates = Range("B13:E28")  
zeros = Range("C29")
```

```
totalrows = coordinates.Rows.Count - zeros
```

```
For rownumber = 1 To (totalrows)
```

```
joint = rownumber  
cargax = coordinates(rownumber, 4).value
```

```
ReDim value(6)  
value(0) = cargax  
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint,  
"VENTO_ESTATICO", value, True, "global")
```

```
Next rownumber
```

```
'carregamento nas mísulas
```

```
Set coordinates = Range("G39:J46")
```

```
totalrows = coordinates.Rows.Count
```

```
For rownumber = 1 To (totalrows)
```

```
joint = coordinates(rownumber, 1).value  
cargax = coordinates(rownumber, 2).value  
cargay = coordinates(rownumber, 3).value
```

```

ReDim value(6)
value(0) = cargax
value(1) = cargay

ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint,
"VENTO_ESTATICO", value, True, "global")

Next rownumber

'carga vertical nas mísulas

Set coordinates = Range("G39:J46")

totalrows = coordinates.Rows.Count

For rownumber = 1 To (totalrows)

    joint = coordinates(rownumber, 1).value
    cargaz = coordinates(rownumber, 4).value

ReDim value(6)

value(2) = cargaz
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, "DEAD", value, True,
"global")

Next rownumber

'carga de ruptura do condutor na mísula

Set coordinates = Range("G39:K46")

totalrows = coordinates.Rows.Count

```

```

For rownumber = 1 To (totalrows)

    joint = coordinates(rownumber, 1).value
    cargay = coordinates(rownumber, 5).value

    ReDim value(6)
    value(1) = cargay
    ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint,
"RUPTURA_CONDUTOR_ESTATICO", value, True, "global")

Next rownumber

'Aplicar Dead Load ao Load Case Vento Estatico
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.StaticLinear.SetCase("VENTO_ESTATICO_CASE")

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)

ltype(0) = "Load"
ltype(1) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1
lname(1) = "VENTO_ESTATICO"
SF(1) = 1

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.StaticLinear.SetLoads("VENTO_ESTATICO_CASE"
, 2, ltype, lname, SF)

'Aplicar Dead Load ao Load Case Ruptura_Conductor

```

```
ret =  
SapObject.SapModel.LoadCases.StaticLinear.SetCase("RUPTURA_CONDUTOR_ES  
TATICO_CASE")
```

```
ReDim ltype(1)
```

```
ReDim lname(1)
```

```
ReDim SF(1)
```

```
ltype(0) = "Load"
```

```
ltype(1) = "Load"
```

```
lname(0) = "DEAD"
```

```
SF(0) = 1
```

```
lname(1) = "RUPTURA_CONDUTOR_ESTATICO"
```

```
SF(1) = 1
```

```
ret =  
SapObject.SapModel.LoadCases.StaticLinear.SetLoads("RUPTURA_CONDUTOR_ES  
TATICO_CASE", 2, ltype, lname, SF)
```

```
'Aplicar carga DEAD ao Mass Source
```

```
ReDim lname(0)
```

```
ReDim SF(0)
```

```
lname(0) = "DEAD"
```

```
SF(0) = 1
```

```
ret = SapObject.SapModel.SourceMass.SetMassSource("MSSSRC1", False,  
True, True, True, 1, lname, SF)
```

```
'Rodar SAP2000 e obter valor da frequencia natural
```

```
ret = SapObject.SapModel.File.Save("C:\MACRO_SAP2000\Example.sdb")
```

```
ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis
```

```

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

ret = SapObject.SapModel.Results.ModalPeriod(numberresults, loadcase,
steptype, stepnum, per, freq, circf, egv)

Cells(95, 12).value = freq(0)
Cells(95, 13).value = freq(2)
Cells(95, 14).value = freq(4)

ret = SapObject.SapModel.SetModelIsLocked(False)

ActiveSheet.Protect

End Sub

Sub Sap2000_Vento_Sintetico()

'Aplicar vento sintetico

Dim time() As Double
Dim value() As Double
Dim i As Integer

Dim ltype() As String
Dim lname() As String
Dim func() As String
Dim SF() As Double
Dim TF() As Double
Dim AT() As Double
Dim cs() As String
Dim ang() As Double

```

```
Dim joint As Integer
Dim totaljoint As Integer
Dim jointnumber As Integer
Dim cargax As Double
Dim cargay As Double
```

```
Dim alfa As Double
Dim beta As Double
```

```
Dim nomeload As String
Dim nomeTH As String
Dim nomecase As String
Dim z As Integer
```

```
ReDim time(2)
ReDim value(2)
```

```
'Criar time history para carga DEAD
```

```
time(0) = 0
```

```
time(1) = 50
```

```
time(2) = 650
```

```
value(0) = 0
```

```
value(1) = 1
```

```
value(2) = 1
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser("UNIFTH", 3, time, value)
```

```
'Coeficientes da matriz de Rayleigh
```

```
Sheets("plan2").Activate
```

```
alfa = Cells(27, 9) 'a0
```

```
beta = Cells(28, 9) 'a1
```

```
'Passos de tempo método Newmark"
```

```
Dim nstep As Long
```



```

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks
-
:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

Set coordinates = Range("W2556:W3155")

ReDim time(600)
ReDim value(600)

For i = 0 To 599
time(i) = i * (650 / 599)
value(i) = coordinates(i + 1, 1).value

Next i

ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser(nomeTH, 600, time, value)

ret = SapObject.SapModel.func.Delete("RAMPTH")

nomeload = "VENTO_SINTETICO_" & z & "_Davenport"
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Davenport"

ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add(nomeload,
eLoadPatternType_Other, 0, False)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase(nomecase)

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional(nomecase, 1,
alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration(nomecase, 1, 0,
betan, gama, 0)

```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep(nomecase,  
nstep, dt)
```

```
ReDim ltype(1)  
ReDim lname(1)  
ReDim SF(1)  
ReDim func(1)  
ReDim SF(1)  
ReDim TF(1)  
ReDim AT(1)  
ReDim cs(1)  
ReDim ang(1)
```

```
ltype(0) = "Load"  
lname(0) = "DEAD"  
SF(0) = 1  
func(0) = "UNIFTH"  
TF(0) = 1  
AT(0) = 0  
cs(0) = "GLOBAL"  
ang(0) = 0
```

```
ltype(1) = "Load"  
lname(1) = nomeload  
SF(1) = 1  
func(1) = nomeTH  
TF(1) = 1  
AT(1) = 0  
cs(1) = "GLOBAL"  
ang(1) = 0
```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads(nomecase, 2,  
ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)
```

'carregamento de vento na estrutura e nas mísulas

Set coordinates = Range("B3158:U3159")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

joint = coordinates(2, jointnumber).value

cargax = coordinates(1, jointnumber).value

ReDim value(6)

value(0) = cargax

ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")

Next jointnumber

' carga nas mísulas

Set coordinates = Range("R3158:U3160")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

joint = coordinates(3, jointnumber).value

cargax = coordinates(1, jointnumber).value

ReDim value(6)

value(0) = cargax

ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")

Next jointnumber


```

For i = 0 To 599
time(i) = i * (650 / 599)
value(i) = coordinates(i + 1, 1).value

Next i

ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser(nomeTH, 600, time, value)

ret = SapObject.SapModel.func.Delete("RAMPTH")

nomeload = "VENTO_SINTETICO_" & z & "_Harris"
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Harris"

ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add(nomeload,
eLoadPatternType_Other, 0, False)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase(nomecase)

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional(nomecase, 1,
alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration(nomecase, 1, 0,
betan, gama, 0)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep(nomecase,
nstep, dt)

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)
ReDim func(1)
ReDim SF(1)
ReDim TF(1)
ReDim AT(1)

```

```
ReDim cs(1)
ReDim ang(1)
```

```
ltype(0) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1
func(0) = "UNIFTH"
TF(0) = 1
AT(0) = 0
cs(0) = "GLOBAL"
ang(0) = 0
```

```
ltype(1) = "Load"
lname(1) = nomeLoad
SF(1) = 1
func(1) = nomeTH
TF(1) = 1
AT(1) = 0
cs(1) = "GLOBAL"
ang(1) = 0
```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads(nomeCase, 2,
ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)
```

'carregamento de vento na estrutura e nas mísulas

```
Set coordinates = Range("B3158:U3159")
```

```
totaljoint = coordinates.Columns.Count
```

```
For jointnumber = 1 To (totaljoint)
```

```
joint = coordinates(2, jointnumber).value
cargax = coordinates(1, jointnumber).value
```



```
nomeTH = "TH_VENTO" & z & "_Kaimal"
```

```
Range("B112:M112").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Range("B113").Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks
```

—

```
:=False, Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
Range("A1949:W2552").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Range("A2555").Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks
```

—

```
:=False, Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
Set coordinates = Range("W2556:W3155")
```

```
ReDim time(600)
```

```
ReDim value(600)
```

```
For i = 0 To 599
```

```
time(i) = i * (650 / 599)
```

```
value(i) = coordinates(i + 1, 1).value
```

```
Next i
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser(nomeTH, 600, time, value)
```

```
ret = SapObject.SapModel.func.Delete("RAMPTH")
```

```

nomeload = "VENTO_SINTETICO_" & z & "_Kaimal"
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Kaimal"

ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add(nomeload,
eLoadPatternType_Other, 0, False)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase(nomecase)

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional(nomecase, 1,
alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration(nomecase, 1, 0,
betan, gama, 0)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep(nomecase,
nstep, dt)

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)
ReDim func(1)
ReDim SF(1)
ReDim TF(1)
ReDim AT(1)
ReDim cs(1)
ReDim ang(1)

ltype(0) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1
func(0) = "UNIFTH"
TF(0) = 1
AT(0) = 0
cs(0) = "GLOBAL"

```

```
ang(0) = 0
```

```
ltype(1) = "Load"
```

```
lname(1) = nomeload
```

```
SF(1) = 1
```

```
func(1) = nomeTH
```

```
TF(1) = 1
```

```
AT(1) = 0
```

```
cs(1) = "GLOBAL"
```

```
ang(1) = 0
```

```
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads(nomecase, 2,  
ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)
```

```
'carregamento de vento na estrutura e nas mísulas
```

```
Set coordinates = Range("B3158:U3159")
```

```
totaljoint = coordinates.Columns.Count
```

```
For jointnumber = 1 To (totaljoint)
```

```
joint = coordinates(2, jointnumber).value
```

```
cargax = coordinates(1, jointnumber).value
```

```
ReDim value(6)
```

```
value(0) = cargax
```

```
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,  
"global")
```

```
Next jointnumber
```

```
' carga nas mísulas
```

```
Set coordinates = Range("R3158:U3160")
```



```

Range("A1949:W2552").Select
Selection.Copy
Range("A2555").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks

```

—

```

:=False, Transpose:=False
Application.CutCopyMode = False

```

```

Set coordinates = Range("W2556:W3155")

```

```

ReDim time(600)
ReDim value(600)

```

```

For i = 0 To 599
time(i) = i * (650 / 599)
value(i) = coordinates(i + 1, 1).value

```

```

Next i

```

```

ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser(nomeTH, 600, time, value)

```

```

ret = SapObject.SapModel.func.Delete("RAMPTH")

```

```

nomeload = "VENTO_SINTETICO_" & z & "_Von Kármán"
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Von Kármán"

```

```

ret = SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add(nomeload,
eLoadPatternType_Other, 0, False)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase(nomecase)

```

```

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional(nomecase, 1,
alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration(nomecase, 1, 0,
betan, gama, 0)
ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep(nomecase,
nstep, dt)

```

```

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)
ReDim func(1)
ReDim SF(1)
ReDim TF(1)
ReDim AT(1)
ReDim cs(1)
ReDim ang(1)

```

```

ltype(0) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1
func(0) = "UNIFTH"
TF(0) = 1
AT(0) = 0
cs(0) = "GLOBAL"
ang(0) = 0

```

```

ltype(1) = "Load"
lname(1) = nomeload
SF(1) = 1
func(1) = nomeTH
TF(1) = 1
AT(1) = 0

```

```

cs(1) = "GLOBAL"
ang(1) = 0

ret = SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads(nomecase, 2,
ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)

'carregamento de vento na estrutura e nas mísulas

Set coordinates = Range("B3158:U3159")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

    joint = coordinates(2, jointnumber).value
    cargax = coordinates(1, jointnumber).value

    ReDim value(6)
    value(0) = cargax
    ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")

Next jointnumber

' carga nas mísulas
Set coordinates = Range("R3158:U3160")

totaljoint = coordinates.Columns.Count

For jointnumber = 1 To (totaljoint)

    joint = coordinates(3, jointnumber).value
    cargax = coordinates(1, jointnumber).value

```

```
ReDim value(6)
value(0) = cargax
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint, nomeload, value, True,
"global")
```

```
Next jointnumber
```

```
Next z
```

```
'Voltar para início da aba plan2'
```

```
Range("A1:A1").Select
```

```
ActiveSheet.Protect
```

```
'Aplicar carga dinâmica de ruptura do condutor
```

```
Sheets("plan1").Activate
```

```
ReDim time(4)
```

```
ReDim value(4)
```

```
time(0) = 0
```

```
time(1) = 24.9
```

```
time(2) = 25
```

```
time(3) = 25.1
```

```
time(4) = 50
```

```
value(0) = 0
```

```
value(1) = 0
```

```
value(2) = Cells(41, 11)
```

```
value(3) = 0.8 * Cells(41, 11)
```

```
value(4) = 0.8 * Cells(41, 11)
```

```

ret = SapObject.SapModel.func.Count(7)
ret = SapObject.SapModel.func.FuncTH.SetUser("TH_RUPTURA", 5, time,
value)

ret =
SapObject.SapModel.LoadPatterns.Add("RUPTURA_CONDUTOR_DINAMICO",
eLoadPatternType_Other, 0, False)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetCase("RUPTURA_CONDUTOR_D
INAMICO_CASE")

ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetDampProportional("RUPTURA_CO
NDUTOR_DINAMICO_CASE", 1, alfa, beta, 0, 0, 0, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeIntegration("RUPTURA_CON
DUTOR_DINAMICO_CASE", 1, 0, betan, gama, 0)
ret =
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetTimeStep("RUPTURA_CONDUTO
R_DINAMICO_CASE", 500, dt)

ReDim ltype(1)
ReDim lname(1)
ReDim SF(1)
ReDim func(1)
ReDim SF(1)
ReDim TF(1)
ReDim AT(1)
ReDim cs(1)
ReDim ang(1)

ltype(0) = "Load"
lname(0) = "DEAD"
SF(0) = 1

```

```
func(0) = "UNIFTH"
```

```
TF(0) = 1
```

```
AT(0) = 0
```

```
cs(0) = "GLOBAL"
```

```
ang(0) = 0
```

```
ltype(1) = "Load"
```

```
lname(1) = "RUPTURA_CONDUTOR_DINAMICO"
```

```
SF(1) = 1
```

```
func(1) = "TH_RUPTURA"
```

```
TF(1) = 1
```

```
AT(1) = 0
```

```
cs(1) = "GLOBAL"
```

```
ang(1) = 0
```

```
ret =
```

```
SapObject.SapModel.LoadCases.DirHistLinear.SetLoads("RUPTURA_CONDUTOR_
DINAMICO_CASE", 2, ltype, lname, func, SF, TF, AT, cs, ang)
```

```
'carga de ruptura dinamica na mísula
```

```
joint = Cells(41, 7)
```

```
cargay = 1
```

```
ReDim value(6)
```

```
value(1) = cargay
```

```
ret = SapObject.SapModel.PointObj.SetLoadForce(joint,
"RUPTURA_CONDUTOR_DINAMICO", value, True, "global")
```

```
End Sub
```

```
Sub Sap2000_Run()
```

```
Dim numberresults As Long
```

```
Dim F1() As Double
```

```

Dim F2() As Double
Dim F3() As Double
Dim M2() As Double
Dim M3() As Double
Dim M1() As Double
Dim obj() As String
Dim elm() As String
Dim elmSTA() As Double
Dim objsta() As Double
Dim loadcase() As String
Dim steptype() As String
Dim stepnum() As Double
Dim u1() As Double
Dim u2() As Double
Dim u3() As Double
Dim r1() As Double
Dim r2() As Double
Dim r3() As Double
Dim i As Integer
Dim j As Integer

```

```

Dim MAX(2) As Double

```

```

Dim nomecase As String

```

```

Dim z As Integer

```

```

'não rodar casos utilizados para obtenção de GC

```

```

For z = 89 To 108

```

```

    nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_GC" & z

```

```

    ret = SapObject.SapModel.Analyze.SetRunCaseFlag(nomecase, False)

```

```

Next z

```

```

'salvar e rodar modelo

```

```

ret = SapObject.SapModel.File.Save("C:\MACRO_SAP2000\Example.sdb")

```

```
ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis  
ret =  
  
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput  
  
'Inserir resultados na planilha  
Sheets("plan1").Activate  
ActiveSheet.Unprotect  
  
'deslocamento VENTO SINTETICO  
' Espectro de Davenport <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<  
For z = 1 To 20  
  
nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Davenport"  
  
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomecase)  
ret = SapObject.SapModel.Results.JointDisplAbs("All",  
eItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, u1,  
u2, u3, r1, r2, r3)  
  
If Abs(u1(0)) > Abs(u1(1)) Then  
u1(0) = u1(0)  
Else  
u1(0) = u1(1)  
End If  
  
If Abs(u2(0)) > Abs(u2(1)) Then  
u2(0) = u2(0)  
Else  
u2(0) = u2(1)  
End If  
  
If Abs(u3(0)) > Abs(u3(1)) Then  
u3(0) = u3(0)  
Else
```


End If

If $\text{Abs}(u3(0)) > \text{Abs}(u3(1))$ Then

$$u_3(0) = u_3(0)$$

Else

$$u_3(0) = u_3(1)$$

End If

```
Cells(101 + z, 52).value = u1(0)
```

```
Cells(101 + z, 53).value = u2(0)
```

```
Cells(101 + z, 54).value = u3(0)
```

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

Next z

' Espectro de Von Kármán

[illegible]

For z = 1 To 20

nomecase = "VENTO SINTETICO CASE " & z & " Von Kármán"

```
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomcase)
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.JointDisplAbs("All",
```

```
elItemtypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, u1,
u2, u3, r1, r2, r3)
```

If $\text{Abs}(u1(0)) > \text{Abs}(u1(1))$ Then

$$u_1(0) = u_1(0)$$

Else

$$u_1(0) = u_1(1)$$

End If

End If

End If

```
Cells(101 + z, 64).value = u3(0)
```

SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

Next z

'Reações de Apoio VENTO SINTETICO

```
Set coordinates = Range("B13:E28")
```

```
i = 2 * (coordinates.Rows.Count - Cells(29, 3))
```

```
nomcase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Davenport"
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomcase)
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm,  
numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)
```

```
If Abs(F1(i)) > Abs(F1(i + 1)) Then
```

```
F1(i) = F1(i)
```

```
Else
```

```
F1(i) = F1(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(F2(i)) > Abs(F2(i + 1)) Then
```

```
F2(i) = F2(i)
```

```
Else
```

```
F2(i) = F2(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(F3(i)) > Abs(F3(i + 1)) Then
```

```
F3(i) = F3(i)
```

```
Else
```

```
F3(i) = F3(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M1(i)) > Abs(M1(i + 1)) Then
```

```
M1(i) = M1(i)
```

```
Else
```

```
M1(i) = M1(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M2(i)) > Abs(M2(i + 1)) Then
```

```
M2(i) = M2(i)
```

```
Else
```

```
M2(i) = M2(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M3(i)) > Abs(M3(i + 1)) Then
```

```
Cells(101 + z, 26).value = F1(i)
Cells(101 + z, 27).value = F2(i)
Cells(101 + z, 28).value = F3(i)
Cells(101 + z, 29).value = M1(i)
Cells(101 + z, 30).value = M2(i)
Cells(101 + z, 31).value = M3(i)

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

Next z

' Espectro de Harris <<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<
For z = 1 To 20
    nomecase = "VENTO_SINTETICO_CASE_" & z & "_Harris"

    ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomecase)
    ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeId_GroupElm,
numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)

    If Abs(F1(i)) > Abs(F1(i + 1)) Then
        F1(i) = F1(i)
    Else
        F1(i) = F1(i + 1)
    End If

    If Abs(F2(i)) > Abs(F2(i + 1)) Then
        F2(i) = F2(i)
    Else
```

$F2(i) = F2(i + 1)$

End If

If $Abs(F3(i)) > Abs(F3(i + 1))$ Then

$F3(i) = F3(i)$

Else

$F3(i) = F3(i + 1)$

End If

If $Abs(M1(i)) > Abs(M1(i + 1))$ Then

$M1(i) = M1(i)$

Else

$M1(i) = M1(i + 1)$

End If

If $Abs(M2(i)) > Abs(M2(i + 1))$ Then

$M2(i) = M2(i)$

Else

$M2(i) = M2(i + 1)$

End If

If $Abs(M3(i)) > Abs(M3(i + 1))$ Then

$M3(i) = M3(i)$

Else

$M3(i) = M3(i + 1)$

End If

$Cells(101 + z, 36).value = F1(i)$

$Cells(101 + z, 37).value = F2(i)$

$Cells(101 + z, 38).value = F3(i)$

$Cells(101 + z, 39).value = M1(i)$

$Cells(101 + z, 40).value = M2(i)$

$Cells(101 + z, 41).value = M3(i)$

End If

If $\text{Abs}(\text{M2}(i)) > \text{Abs}(\text{M2}(i + 1))$ Then

$$M2(i) = M2(i)$$

Else

$$M2(i) = M2(i + 1)$$

End If

If $\text{Abs}(\text{M3}(i)) > \text{Abs}(\text{M3}(i + 1))$ Then

$$M3(i) = M3(i)$$

Else

$$M3(i) = M3(i + 1)$$

End If

```
Cells(101 + z, 46).value = F1(i)
```

```
Cells(101 + z, 47).value = F2(i)
```

```
Cells(101 + z, 48).value = F3(i)
```

```
Cells(101 + z, 49).value = M1(i)
```

```
Cells(101 + z, 50).value = M2(i)
```

```
Cells(101 + z, 51).value = M3(i)
```

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

Next z

' Espectro de Von Kármán

[illegible]

For z = 1 To 20

```
nomecase = "VENTO SINTETICO CASE " & z & " Von Kármán"
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput(nomcase)
```

```
ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm,  
numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)
```

```
If Abs(F1(i)) > Abs(F1(i + 1)) Then
```

```
F1(i) = F1(i)
```

```
Else
```

```
F1(i) = F1(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(F2(i)) > Abs(F2(i + 1)) Then
```

```
F2(i) = F2(i)
```

```
Else
```

```
F2(i) = F2(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(F3(i)) > Abs(F3(i + 1)) Then
```

```
F3(i) = F3(i)
```

```
Else
```

```
F3(i) = F3(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M1(i)) > Abs(M1(i + 1)) Then
```

```
M1(i) = M1(i)
```

```
Else
```

```
M1(i) = M1(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M2(i)) > Abs(M2(i + 1)) Then
```

```
M2(i) = M2(i)
```

```
Else
```

```
M2(i) = M2(i + 1)
```

```
End If
```

```
If Abs(M3(i)) > Abs(M3(i + 1)) Then
```

```

M3(i) = M3(i)
Else
M3(i) = M3(i + 1)
End If

```

```

Cells(101 + z, 56).value = F1(i)
Cells(101 + z, 57).value = F2(i)
Cells(101 + z, 58).value = F3(i)
Cells(101 + z, 59).value = M1(i)
Cells(101 + z, 60).value = M2(i)
Cells(101 + z, 61).value = M3(i)

```

```

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

```

```

Next z

```

```

'CARGA DE VENTO ESTATICO
'deslocamento CARGA DE VENTO ESTATICO

```

```

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("VENTO_ESTATICO_
CASE")
ret = SapObject.SapModel.Results.JointDispl("ALL",
elItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, u1,
u2, u3, r1, r2, r3)

```

```

Cells(95, 8).value = u1(0)
Cells(95, 9).value = u2(0)
Cells(95, 10).value = u3(0)

```

```

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

```

```

'reacoes de apoio CARGA DE VENTO ESTATICO
Set coordinates = Range("B13:E28")
i = coordinates.Rows.Count - Cells(29, 3)

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("VENTO_ESTATICO_
CASE")
ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm,
numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)

Cells(95, 2).value = F1(i)
Cells(95, 3).value = F2(i)
Cells(95, 4).value = F3(i)
Cells(95, 5).value = M1(i)
Cells(95, 6).value = M2(i)
Cells(95, 7).value = M3(i)

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

'CARGA DE RUPTURA ESTATICO E DINAMICO
'deslocamento CARGA DE RUPTURA

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("RUPTURA_CONDUCT
OR_ESTATICO_CASE")
ret = SapObject.SapModel.Results.JointDispl("ALL",
eItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, u1,
u2, u3, r1, r2, r3)

Cells(96, 8).value = u1(0)
Cells(96, 9).value = u2(0)
Cells(96, 10).value = u3(0)

```

```

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("RUPTURA_CONDUCT
OR_DINAMICO_CASE")
ret = SapObject.SapModel.Results.JointDisplAbs("All",
eItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, u1,
u2, u3, r1, r2, r3)

If Abs(u1(0)) > Abs(u1(1)) Then
u1(0) = u1(0)
Else
u1(0) = u1(1)
End If

If Abs(u2(0)) > Abs(u2(1)) Then
u2(0) = u2(0)
Else
u2(0) = u2(1)
End If

If Abs(u3(0)) > Abs(u3(1)) Then
u3(0) = u3(0)
Else
u3(0) = u3(1)
End If

Cells(102, 8).value = u1(0)
Cells(102, 9).value = u2(0)
Cells(102, 10).value = u3(0)

ret =
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

```

'reacoes de apoio CARGA DE RUPTURA

Set coordinates = Range("B13:E28")

i = coordinates.Rows.Count - Cells(29, 3)

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("RUPTURA_CONDUCTOR_ESTATICO_CASE")

ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)

Cells(96, 2).value = F1(i)

Cells(96, 3).value = F2(i)

Cells(96, 4).value = F3(i)

Cells(96, 5).value = M1(i)

Cells(96, 6).value = M2(i)

Cells(96, 7).value = M3(i)

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput

Set coordinates = Range("B13:E28")

i = 2 * (coordinates.Rows.Count - Cells(29, 3))

ret =

SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("RUPTURA_CONDUCTOR_DINAMICO_CASE")

ret = SapObject.SapModel.Results.JointReact("All", eItemTypeElm_GroupElm, numberresults, obj, elm, loadcase, steptype, stepnum, F1, F2, F3, M1, M2, M3)

If Abs(F1(i)) > Abs(F1(i + 1)) Then

F1(i) = F1(i)

Else

F1(i) = F1(i + 1)

End If

If $\text{Abs}(F2(i)) > \text{Abs}(F2(i + 1))$ Then

$F2(i) = F2(i)$

Else

$F2(i) = F2(i + 1)$

End If

If $\text{Abs}(F3(i)) > \text{Abs}(F3(i + 1))$ Then

$F3(i) = F3(i)$

Else

$F3(i) = F3(i + 1)$

End If

If $\text{Abs}(M1(i)) > \text{Abs}(M1(i + 1))$ Then

$M1(i) = M1(i)$

Else

$M1(i) = M1(i + 1)$

End If

If $\text{Abs}(M2(i)) > \text{Abs}(M2(i + 1))$ Then

$M2(i) = M2(i)$

Else

$M2(i) = M2(i + 1)$

End If

If $\text{Abs}(M3(i)) > \text{Abs}(M3(i + 1))$ Then

$M3(i) = M3(i)$

Else

$M3(i) = M3(i + 1)$

End If

$\text{Cells}(102, 2).\text{value} = F1(i)$

$\text{Cells}(102, 3).\text{value} = F2(i)$

$\text{Cells}(102, 4).\text{value} = F3(i)$

```
Cells(102, 5).value = M1(i)
```

```
Cells(102, 6).value = M2(i)
```

```
Cells(102, 7).value = M3(i)
```

```
ret =
```

```
SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
```

```
'Hora de término da análise
```

```
Sheets("plan1").Activate
```

```
ActiveSheet.Unprotect
```

```
Range("Z95:Z95").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Range("Z97:Z97").Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _  
:=False, Transpose:=False
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
ActiveSheet.Protect
```

```
End Sub
```

```
Sub Sap2000_Close()
```

```
SapObject.ApplicationExit False
```

```
Set SapObject = Nothing
```

```
End Sub
```

9.2 GRÁFICOS DA PLANILHA EXCEL

Dimensões das Mísulas

Mísulas para-raios:	
L =	2.200 mm
Mísulas fase:	
L =	2.500 mm
z1 =	42.865 mm
z2 =	39.865 mm
z3 =	36.865 mm

Carga Estática

Carregamento Vento Máximo:				Ruptura Conductor:
	Fx (kgf)	Fy (kgf)	Fz (kgf)	Fy (kgf)
Para-raios	568	-	-	339
Fase 1	992	-	-	674
Fase 2	980	-	-	674
Fase 3	967	-	-	674

Resultados Análise Estática:

		Reações de Apoio				Deslocamento Topo				Frequência Natural		
Hipótese	Fx (kgf)	Fy (kgf)	Fz (kgf)	Mx (kgf.mm)	My (kgf.mm)	Mz (kgf.mm)	δx (mm)	δy (mm)	δz (mm)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
Vento	-10.559	0	13.422	0,00E+00	-3,84E+08	0,00E+00	2.774,01	0,00	-0,72	0,382035	2,264984	2,486379
Ruptura	0	-1.600	13.422	6,86E+07	0,00E+00	4,00E+06	0,00	547,41	-0,72			

Resultados Análise Dinâmica:

		Reações de Apoio				Deslocamento Topo				Espectro de vento adotado :		
Hipótese	Fx (kgf)	Fy (kgf)	Fz (kgf)	Mx (kgf.mm)	My (kgf.mm)	Mz (kgf.mm)	δx (mm)	δy (mm)	δz (mm)	Von Kármán		
Vento	-8.316	0	12.558	0,00E+00	-3,09E+08	0,00E+00	2.254,68	0,00	-0,72			
Ruptura	0	-2.908	12.585	1,15E+08	2,83E-03	4,77E+06	0,00	862,26	-0,72			

Fator de Magnificação Dinâmica

		Reações de Apoio				Deslocamento Topo			
Hipótese	Fx (kgf)	Fy (kgf)	Fz (kgf)	Mx (kgf.mm)	My (kgf.mm)	Mz (kgf.mm)	δx (mm)	δy (mm)	δz (mm)
Vento	0,79	0,00	0,94	0,00	0,80	0,00	0,81	0,00	1,00
Ruptura	0,00	1,82	0,94	1,68	0,00	1,19	0,00	1,58	1,00

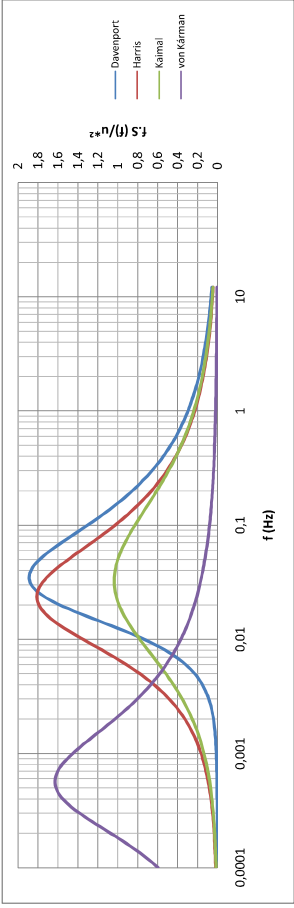
1. Dados de projeto

Vento médio: 10 minutos, 10m de altura, 50 anos, terreno aberto

v0 =	30	m/s	u0 =	24,570	m/s	Vão Vento	300	m
S1=	1		S2 CAT =	II		Ø para-raios	15,4	mm
S3=	1,19		Método Newmark:			Ø condutor	25,15	mm
Δt=	0.13	s	γ =	0.50		Cabos / Fase	1	
			β =	0.25				

2. Espectro de potência

Espectro adotado : Von Kármán



3. Dados da Torre

r =	0.38203459	Hz	Frequência Fundamental
j =	10		Qtde divisões no eixo vertical (nós)

4. Decomposição das pressões flutuantes

k	f _k (Hz)	T _k (s)	f _{pk}	C _k	ck	cck	rxk
1	1.528	0.654	2.161	1.081	0.021	0.021	0.250
2	0.764	1.209	1.081	0.540	0.026	0.034	0.500
3	0.382	2.618	0.540	0.270	0.033	0.016	1.000
4	0.191	5.235	0.270	0.135	0.041	0.049	2.000
5	0.096	10.470	0.135	0.068	0.052	0.052	4.000
6	0.048	20.941	0.068	0.034	0.066	0.066	8.000
7	0.024	41.881	0.034	0.017	0.083	0.083	16.000
8	0.012	83.762	0.017	0.008	0.104	0.104	32.000
9	0.006	167.524	0.008	0.004	0.131	0.131	64.000
10	0.003	335.048	0.004	0.002	0.163	0.163	128.000
11	0.001	670.096	0.002	0.001	0.199	0.199	256.000
12	0.001	1340.193	0.001	0.001	0.227	0.227	512.000

$\bar{p} =$ 2,0%

$a_0 =$ 0,08221 Amort. Rayleigh

$a_1 =$ 0,00241

$\bar{p} =$ 2,0%

$a_0 =$ 0,08221 Amort. Rayleigh

$a_1 =$ 0,00241

m =	150	anos	Período de Retorno
Pm =	63%		Probabilidade de exceder Vo em m anos. Padrão NBR6123 = 63%

CÁLCULO DA INTEGRAL DO ESPECTRO DE POTÊNCIA PARA CADA HARMÔNICO

k=1	fpk	f	1,080556998	1,085040637	1,089524276	1,094007915	1,098491554	1,102975193
x(f)			278,2630225	279,4176408	280,5722592	281,7268775	282,8814959	284,0361142
Sr (f)			0,014987999	0,014884918	0,014782967	0,014682128	0,014582386	0,014483723
Al			6,69697E-05	6,651E-05	6,60554E-05	6,56058E-05	6,5161E-05	6,4721E-05
Jsr(f)df			0,008989432					
k=2	fpk	f	0,540278499	0,542520319	0,544762138	0,547003958	0,549245777	0,551487597
x(f)			139,1315112	139,7088204	140,2861296	140,8634388	141,4407479	142,0180571
Sr (f)			0,047583909	0,047256648	0,046932973	0,046612831	0,046296169	0,045982934
Al			0,000106308	0,000105578	0,000104856	0,000104143	0,000103437	0,000102738
Jsr(f)df			0,01426983					
k=3	fpk	f	0,27013925	0,271260159	0,272381069	0,273501979	0,274622889	0,275743798
x(f)			69,56575562	69,85441021	70,1430648	70,43171938	70,72037397	71,00902856
Sr (f)			0,151069217	0,150030232	0,149002634	0,14798625	0,146980914	0,145986461
Al			0,000168753	0,000167594	0,000166449	0,000165316	0,000164195	0,000163086
Jsr(f)df			0,02265192					
k=4	fpk	f	0,135069625	0,13563008	0,136190535	0,136750989	0,137311444	0,137871899
x(f)			34,78287781	34,9272051	35,0715324	35,21585969	35,36018699	35,50451428
Sr (f)			0,479611364	0,476312846	0,473050475	0,469823709	0,466632016	0,463474873
Al			0,000267876	0,000266038	0,000264219	0,000262421	0,000260641	0,000258882
Jsr(f)df			0,035957532					
k=5	fpk	f	0,067534812	0,06781504	0,068095267	0,068375495	0,068655722	0,06893595
x(f)			17,39143891	17,46360255	17,5357662	17,60792985	17,68009349	17,75225714
Sr (f)			1,522626666	1,512155194	1,501798469	1,491554771	1,48142241	1,471399729
Al			0,000425215	0,000422296	0,00041941	0,000416555	0,000413731	0,000410937
Jsr(f)df			0,057078074					
k=6	fpk	f	0,033767406	0,03390752	0,034047634	0,034187747	0,034327861	0,034467975
x(f)			8,695719453	8,731801276	8,7678831	8,803964923	8,840046747	8,87612857
Sr (f)			4,833473298	4,800236958	4,767364757	4,734851234	4,70289103	4,670878886
Al			0,000674907	0,000670276	0,000665695	0,000661165	0,000656683	0,00065225
Jsr(f)df			0,090599766					
k=7	fpk							

5. Correlação espacial

Δz_{Or} =	9,188	m	
L_r =	18,375	m	
z_1 =	45,365	m	Cota do topo da estrutura
G_c =	36,177	m	Posição do centro de rajada
G_c adot =	42,865	m	Valor adotado

6. Harmônicos de força nos nós da torre

j	zj	Vmj	Vj	q est j	qj	qfj	Ca	Aj
1	45,37	30,83	40,49	59,38	102,46	43,08	0,60	2,289
2	41,94	30,46	40,22	57,99	101,10	43,10	0,60	4,190
3	37,12	29,91	39,81	55,91	99,02	43,11	0,60	3,661
4	32,40	29,31	39,35	53,67	96,76	43,09	0,60	3,937
5	27,78	28,64	38,84	51,25	94,26	43,01	0,60	4,214
6	23,25	27,89	38,26	48,59	91,45	42,86	0,60	4,475
7	18,82	27,01	37,57	45,60	88,22	42,62	0,60	4,736
8	14,46	25,97	36,74	42,14	84,36	42,22	0,60	3,716
9	10,19	24,64	35,67	37,94	79,49	41,55	0,60	5,182
10	6,00	22,76	34,10	32,36	72,64	40,28	0,60	6,834
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	
17	45,37	30,83	40,49	59,38	102,46	43,08	1,20	4,62 Para-raios 4,37E+04
18	42,87	30,56	40,30	58,38	101,47	43,10	1,20	8,15 Fase 1 7,09E+04
19	39,87	30,23	40,05	57,12	100,23	43,11	1,20	8,15 Fase 2 7,05E+04
20	36,87	29,88	39,78	55,79	98,91	43,11	1,20	8,15 Fase 3 7,00E+04

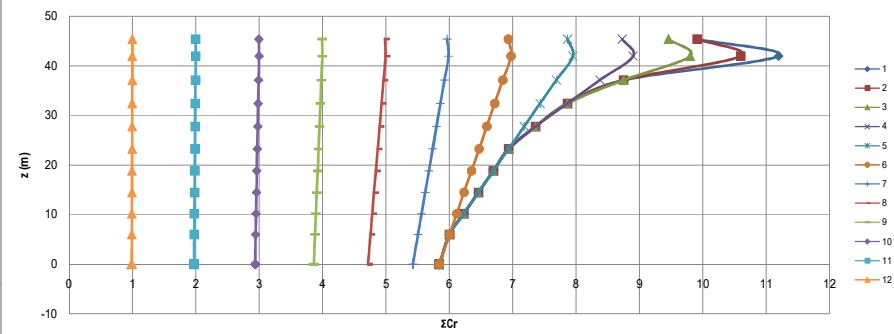
Cr (j,k) :

j	k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	fk	1,528	0,764	0,382	0,191	0,096	0,048	0,024	0,012	0,006	0,003	0,001	0,001
1	zj \ Δz_{Ok}	2,297	4,594	9,188	18,375	36,750	73,501	147,002	294,004	588,007	1176,015	2352,029	4704,058
1	45,365	0,000	0,456	0,728	0,864	0,932	0,966	0,983	0,991	0,996	0,998	0,999	0,999
2	41,939	0,597	0,798	0,899	0,950	0,975	0,987	0,994	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000
3	37,120	0,000	0,000	0,375	0,687	0,844	0,922	0,961	0,980	0,990	0,995	0,998	0,999
4	32,401	0,000	0,000	0,000	0,431	0,715	0,858	0,929	0,964	0,982	0,991	0,996	0,998
5	27,780	0,000	0,000	0,000	0,179	0,590	0,795	0,897	0,949	0,974	0,987	0,994	0,997
6	23,254	0,000	0,000	0,000	0,000	0,466	0,733	0,867	0,933	0,967	0,983	0,992	0,996
7	18,816	0,000	0,000	0,000	0,000	0,346	0,673	0,836	0,918	0,959	0,980	0,990	0,995
8	14,463	0,000	0,000	0,000	0,000	0,227	0,614	0,807	0,903	0,952	0,976	0,988	0,994
9	10,193	0,000	0,000	0,000	0,000	0,111	0,555	0,778	0,889	0,944	0,972	0,986	0,993
10	6,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,498	0,749	0,875	0,937	0,969	0,984	0,992
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,417	0,708	0,854	0,927	0,964	0,982	0,991
17	45,365	0,000	0,456	0,728	0,864	0,932	0,966	0,983	0,991	0,996	0,998	0,999	0,999
18	42,865	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
19	39,865	0,000	0,347	0,673	0,837	0,918	0,959	0,980	0,990	0,995	0,997	0,999	0,999
20	36,865	0,000	0,000	0,347	0,673	0,837	0,918	0,959	0,980	0,990	0,995	0,997	0,999

zCr

z	j / k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
45,37	1	9,912	9,912	9,456	8,728	7,864	6,933	5,967	4,984	3,992	2,996	1,998	0,999
41,94	2	11,194	10,597	9,799	8,899	7,950	6,975	5,988	4,994	3,997	2,999	1,999	1,000
37,12	3	8,751	8,751	8,751	8,376	7,689	6,845	5,923	4,962	3,982	2,991	1,996	0,999
32,40	4	7,863	7,863	7,863	7,863	7,433	6,717	5,860	4,931	3,967	2,984	1,993	0,998
27,78	5	7,361	7,361	7,361	7,361	7,182	6,593	5,798	4,901	3,952	2,978	1,990	0,997
23,25	6	6,937	6,937	6,937	6,937	6,937	6,471	5,737	4,871	3,937	2,971	1,987	0,996
18,82	7	6,696	6,696	6,696	6,696	6,696	6,351	5,678	4,842	3,923	2,964	1,985	0,995
14,46	8	6,460	6,460	6,460	6,460	6,460	6,233	5,620	4,813	3,909	2,958	1,982	0,994
10,19	9	6,229	6,229	6,229	6,229	6,229	6,118	5,562	4,785	3,896	2,951	1,979	0,993
6,00	10	6,005	6,005	6,005	6,005	6,005	6,005	5,506	4,757	3,882	2,945	1,976	0,992
0,00	11	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991
0,00	12	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991
0,00	13	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991
0,00	14	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991
0,00	15	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991
0,00	16	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,843	5,426	4,718	3,863	2,936	1,973	0,991

Correlação Espacial das Rajadas



P (t,k):	3,638	2,671	4,343	2,126	0,042	3,327	4,508	2,429	0,559	0,531	2,614	1,827
0	0,653	2,612	1,888	3,671	0,633	3,267	4,840	5,505	3,224	5,834	5,107	2,229
t \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,794	-0,863	-0,312	-0,863	0,806	-0,992	0,127	0,712	-0,997	0,901	0,385	-0,612
1,085142	-0,942	-0,856	0,754	-0,716	1,000	-0,980	-0,035	0,653	-0,999	0,892	0,375	-0,608
2,170284	0,233	0,047	-0,984	0,483	0,784	-0,865	-0,197	0,589	-1,000	0,882	0,366	-0,604
3,255426	0,688	0,900	0,937	0,972	0,247	-0,659	-0,353	0,522	-0,999	0,872	0,356	-0,600
4,340568	-0,983	0,812	-0,627	0,032	-0,390	-0,384	-0,500	0,451	-0,997	0,862	0,347	-0,596
5,42571	0,384	-0,126	0,140	-0,955	-0,869	-0,069	-0,634	0,376	-0,993	0,852	0,337	-0,592
6,510851	0,565	-0,932	0,386	-0,539	-0,991	0,254	-0,751	0,300	-0,987	0,841	0,328	-0,588
7,595993	-1,000	-0,763	-0,804	0,669	-0,708	0,550	-0,848	0,221	-0,979	0,830	0,318	-0,584
8,681135	0,525	0,204	0,995	0,894	-0,135	0,788	-0,923	0,141	-0,970	0,818	0,308	-0,579
9,766277	0,428	0,958	-0,906	-0,195	0,493	0,944	-0,973	0,060	-0,960	0,806	0,299	-0,575
10,85142	-0,991	0,710	0,563	-0,997	0,919	1,000	-0,998	-0,021	-0,948	0,794	0,289	-0,571
11,93656	0,653	-0,281	-0,061	-0,334	0,970	0,951	-0,996	-0,102	-0,934	0,782	0,279	-0,567
13,0217	0,279	-0,978	-0,458	0,820	0,623	0,802	-0,968	-0,183	-0,919	0,769	0,269	-0,563
14,10684	-0,957	-0,652	0,848	0,769	0,021	0,569	-0,914	-0,262	-0,902	0,756	0,260	-0,558
15,19199	0,764	0,356	-1,000	-0,413	-0,589	0,276	-0,836	-0,340	-0,883	0,742	0,250	-0,554
16,27713	0,124	0,991	0,870	-0,988	-0,958	-0,046	-0,736	-0,415	-0,864	0,728	0,240	-0,550
17,36227	-0,900	0,589	-0,496	-0,111	-0,935	-0,363	-0,617	-0,488	-0,842	0,714	0,230	-0,546
18,44741	0,857	-0,429	-0,018	0,929	-0,530	-0,642	-0,481	-0,557	-0,820	0,700	0,220	-0,541
19,53255	-0,034	-0,999	0,527	0,604	0,093	-0,853	-0,333	-0,623	-0,796	0,685	0,210	-0,537
20,6177	-0,819	-0,523	-0,888	-0,608	0,677	-0,975	-0,175	-0,684	-0,770	0,670	0,200	-0,533
21,70284	0,927	0,499	0,998	-0,927	0,985	-0,995	-0,013	-0,741	-0,744	0,655	0,190	-0,529
22,78798	-0,192	1,000	-0,828	0,117	0,889	-0,910	0,149	-0,793	-0,716	0,640	0,180	-0,524
23,87312	-0,718	0,454	0,425	0,989	0,429	-0,729	0,307	-0,840	-0,687	0,624	0,170	-0,520
24,95826	0,975	-0,566	0,098	0,407	-0,206	-0,472	0,457	-0,882	-0,657	0,608	0,160	-0,516
26,04341	-0,344	-0,995	-0,593	-0,772	-0,757	-0,165	0,595	-0,917	-0,626	0,591	0,150	-0,511
27,12855	-0,599	-0,382	0,921	-0,817	-0,998	0,159	0,718	-0,946	-0,593	0,575	0,140	-0,507
28,21369	0,998	0,630	-0,991	0,339	-0,831	0,467	0,821	-0,970	-0,560	0,558	0,130	-0,502
29,29883	-0,488	0,983	0,781	0,997	-0,323	0,725	0,903	-0,986	-0,526	0,541	0,120	-0,498
30,38397	-0,465	0,308	-0,352	0,190	0,316	0,907	0,961	-0,996	-0,491	0,524	0,110	-0,494
31,46912	0,996	-0,689	-0,176	-0,896	0,827	0,994	0,993	-1,000	-0,455	0,506	0,100	-0,489
32,55426	-0,620	-0,965	0,655	-0,665	0,999	0,976	0,999	-0,997	-0,419	0,489	0,090	-0,485
33,6394	-0,320	-0,231	-0,949	0,543	0,762	0,856	0,979	-0,987	-0,381	0,471	0,079	-0,480
34,72454	0,969	0,745	0,977	0,953	0,213	0,646	0,933	-0,971	-0,343	0,453	0,069	-0,476
35,80968	-0,736	0,942	-0,729	-0,038	-0,422	0,368	0,862	-0,948	-0,305	0,435	0,059	-0,471
36,89482	-0,166	0,154	0,277	-0,974	-0,885	0,051	0,768	-0,920	-0,266	0,416	0,049	-0,467
37,97997	0,917	-0,795	0,254	-0,479	-0,986	-0,271	0,654	-0,885	-0,226	0,398	0,039	-0,462
39,06511	-0,834	-0,912	-0,713	0,720	-0,683	-0,565	0,523	-0,844	-0,187	0,379	0,029	-0,458
40,15025	-0,008	-0,075	0,971	0,860	-0,101	-0,799	0,378	-0,797	-0,146	0,360	0,018	-0,453
41,23539	0,843	0,841	-0,956	-0,263	0,523	-0,949	0,223	-0,746	-0,106	0,341	0,008	-0,449
42,32053	-0,911	0,877	0,673	-1,000	0,933	-1,000	0,062	-0,689	-0,066	0,322	-0,002	-0,444
43,40568	0,150	-0,005	-0,200	-0,267	0,960	-0,946	-0,101	-0,628	-0,025	0,302	-0,012	-0,440
44,49082	0,747	-0,881	-0,329	0,858	0,595	-0,792	-0,261	-0,562	0,016	0,283	-0,022	-0,435
45,57596	-0,965	-0,836	0,766	0,722	-0,014	-0,555	-0,414	-0,493	0,057	0,263	-0,032	-0,430
46,6611	0,305	0,084	-0,987	-0,475	-0,617	-0,259	-0,556	-0,421	0,097	0,244	-0,043	-0,426
47,74624	0,632	0,916	0,930	-0,974	-0,968	0,063	-0,683	-0,346	0,137	0,224	-0,053	-0,421
48,83139	-0,994	0,790	-0,612	-0,042	-0,922	0,379	-0,793	-0,268	0,178	0,204	-0,063	-0,417
49,91653	0,451	-0,163	0,121	0,952	-0,500	0,655	-0,881	-0,189	0,218	0,184	-0,073	-0,412
51,00167	0,502	-0,945	0,403	0,547	0,128	0,862	-0,946	-0,109	0,257	0,164	-0,083	-0,407
52,08681	-0,999	-0,739	-0,815	-0,662	0,703	0,979	-0,986	-0,027	0,296	0,144	-0,093	-0,403
53,17195	0,587	0,240	0,997	-0,898	0,990	0,993	-1,000	0,054	0,335	0,124	-0,103	-0,398
54,2571	0,359	0,968	-0,898	0,186	0,872	0,902	-0,988	0,135	0,373	0,104	-0,114	-0,393
55,34224	-0,978	0,683	0,547	0,997	0,397	0,717	-0,949	0,215	0,410	0,083	-0,124	-0,389
56,42738	0,707	-0,316	-0,042	0,343	-0,240	0,456	-0,885	0,294	0,447	0,063	-0,134	-0,384
57,51252	0,207	-0,985	-0,475	-0,815	-0,779	0,148	-0,798	0,371	0,483	0,043	-0,144	-0,379
58,59766	-0,933	-0,623	0,858	-0,775	-1,000	-0,177	-0,690	0,445	0,518	0,022	-0,154	-0,375
59,6828	0,810	0,391	-1,000	0,404	-0,811	-0,482	-0,564	0,516	0,553	0,002	-0,164	-0,370
60,76795	0,050	0,995	0,861	0,989	-0,290	-0,737	-0,422	0,584	0,586	-0,018	-0,174	-0,365
61,85309	-0,865	0,559	-0,479	0,121	0,349	-0,915	-0,270	0,648	0,619	-0,039	-0,184	-0,360
62,93823	0,893	-0,462	-0,037	-0,925	0,846	-0,996	-0,110	0,708	0,650	-0,059	-0,194	-0,356
64,02337	-0,109	-1,000	0,543	-0,611	0,996	-0,973	0,052	0,763	0,680	-0,079	-0,204	-0,351
65,10851	-0,774	-0,491	-0,896	0,601	0,739	-0,847	0,214	0,813	0,710	-0,100	-0,214	-0,346
66,19366	0,953	0,531	0,997	0,930	0,179	-0,633	0,369	0,858	0,738	-0,120	-0,224	-0,341
67,2788	-0,264	0,998	-0,818	-0,108	-0,454	-0,352	0,515	0,897	0,765	-0,140	-0,234	-0,337
68,36394	-0,664	0,421	0,408	-0,987	-0,901	-0,034	0,647	0,930	0,790	-0,160	-0,244	-0,332
69,44908	0,989	-0,597	0,116	-0,416	-0,980	0,288	0,762	0,957	0,815	-0,180	-0,253	-0,327
70,53422	-0,413	-0,990	-0,608	0,766	-0,657	0,579	0,857	0,977	0,837	-0,200	-0,263	-0,322
71,61937	-0,538	-0,348	0,928	0,823	-0,066	0,809	0,929	0,991	0,859	-0,220	-0,273	-0,317
72,70451	1,000	0,658	-0,988	-0,330	0,553	0,955	0,977	0,999	0,879	-0,240	-0,283	-0,313
73,78965	-0,552	0,976	0,769	-0,998	0,945	1,000	0,999	1,000	0,898	-0,260	-0,293	-0,308
74,87479	-0,398	0,272	-0,335	-0,199	0,950	0,940	0,994	0,994	0,915	-0,279	-0,302	-0,303
75,95993	0,986	-0,716	-0,194	0,892	0,567	0,781	0,963	0,982	0,931	-0,299	-0,312	-0,298
77,04508	-0,677	-0,955	0,669	0,672	-0,049	0,540	0,907	0,963	0,945	-0,318	-0,322	-0,293
78,13022	-0,248	-0,195	-0,955	-0,536	-0,644	0,242	0,826	0,938	0,957	-0,337	-0,331	-0,288
79,21536	0,947	0,769	0,972	-0,956	-0,976	-0,081	0,724	0,906	0,968	-0,356	-0,341	-0,283
80,3005	-0,785	0,929	-0,716	0,028	-0,908	-0,395	0,603	0,869	0,978	-0,375	-0,350	-0,278
81,38564	-0,092	0,117	0,259	0,971	-0,469	-0,668	0,466	0,826	0,985	-0,394	-0,360	-0,274
82,47078	0,885	-0,817	0,272	0,487	0,162	-0,871	0,316	0,777	0,992	-0,413	-0,369	-0,269
83,55593	-0,873	-0,896	-0,726	-0,713	0,727	-0,982	0,158	0,723	0,996	-0,431	-0,379	-0,264
84,64107	0,067	-0,038	0,975	-0,865	0,994	-0,991	-0,004	0,665	0,999	-0,449	-0,388	-0,259
85,72621	0,800	0,860	-0,951	0,254	0,855	-0,895	-0,166	0,602	1,000	-0,467	-0,398	-0,254
86,81135	-0,939	0,858	0,659	1,000	0,365	-0,705	-0,324	0,535	0,999	-0,485	-0,407	-0,249
87,89649	0,224	-0,042	-0,181	0,276	-0,274	-0,440	-0,473	0,464	0,997	-0,503	-0,416	-0,244
88,98164	0,695	-0,898	-0,347	-0,854	-0,801	-0,130	-0,609	0,391	0,994	-0,521	-0,425	-0,239
90,06678	-0,982	-0,815	0,778	-0,729	-1,000	0,194	-0,730	0,315	0,988	-0,538	-0,435	-0,234
91,15192	0,375	0,121	-0,990	0,467	-0,790	0,497	-0,831	0,236	0,981	-0,555	-0,444	-0,229
92,23706	0,573	0,930	0,923	0,976	-0,256	0,749	-0,910	0,157	0,972	-0,572	-0,453	-0,224
93,3222	-0,999	0,766	-0,597	0,051	0,382	0,921	-0,965	0,076	0,962	-0,588	-0,462	-0,219
94,40735												

604,424	-0,969	-0,831	-0,769	0,690	-0,698	-0,556	-0,527	-0,535	0,827	0,710	0,847	0,823
605,5092	0,321	0,093	0,988	0,881	-0,121	-0,793	-0,383	-0,601	0,804	0,724	0,842	0,820
606,5943	0,619	0,919	-0,929	-0,223	0,505	-0,946	-0,228	-0,664	0,779	0,738	0,836	0,817
607,6795	-0,996	0,784	0,608	-0,999	0,925	-1,000	-0,067	-0,723	0,753	0,751	0,831	0,814
608,7646	0,467	-0,171	-0,117	-0,307	0,966	-0,949	0,096	-0,777	0,725	0,764	0,825	0,811
609,8497	0,487	-0,948	-0,407	0,836	0,612	-0,798	0,256	-0,825	0,697	0,777	0,819	0,808
610,9349	-0,998	-0,733	0,817	0,751	0,007	-0,563	0,409	-0,869	0,667	0,790	0,813	0,805
612,02	0,601	0,249	-0,997	-0,438	-0,600	-0,270	0,551	-0,906	0,636	0,802	0,807	0,802
613,1052	0,343	0,970	0,896	-0,983	-0,962	0,053	0,679	-0,937	0,604	0,814	0,801	0,799
614,1903	-0,974	0,676	-0,544	-0,083	-0,930	0,369	0,789	-0,963	0,571	0,826	0,795	0,796
615,2755	0,720	-0,325	0,038	0,939	-0,518	0,647	0,878	-0,981	0,537	0,837	0,789	0,793
616,3606	0,190	-0,986	0,478	0,581	0,107	0,857	0,944	-0,994	0,503	0,848	0,783	0,790
617,4457	-0,927	-0,616	-0,860	-0,630	0,688	0,977	0,985	-1,000	0,467	0,859	0,776	0,787
618,5309	0,820	0,399	1,000	-0,916	0,987	0,994	1,000	-0,999	0,431	0,869	0,770	0,784
619,616	0,032	0,996	-0,858	0,145	0,882	0,907	0,988	-0,991	0,394	0,879	0,763	0,780
620,7012	-0,856	0,551	0,475	0,992	0,417	0,724	0,951	-0,977	0,356	0,888	0,757	0,777
621,7863	0,900	-0,470	0,041	0,382	-0,220	0,465	0,888	-0,957	0,318	0,898	0,750	0,774
622,8715	-0,126	-1,000	-0,547	-0,790	-0,766	0,158	0,801	-0,930	0,279	0,906	0,743	0,771
623,9566	-0,763	-0,484	0,898	-0,801	-0,999	-0,166	0,694	-0,897	0,239	0,915	0,736	0,768
625,0417	0,958	0,539	-0,997	0,365	-0,823	-0,473	0,568	-0,858	0,200	0,923	0,729	0,764
626,1269	-0,281	0,997	0,815	0,994	-0,310	-0,730	0,427	-0,813	0,160	0,931	0,722	0,761
627,212	-0,651	0,413	-0,404	0,162	0,330	-0,910	0,275	-0,763	0,119	0,938	0,715	0,758
628,2972	0,991	-0,604	-0,120	-0,908	0,834	-0,995	0,115	-0,708	0,079	0,945	0,708	0,754
629,3823	-0,429	-0,989	0,611	-0,644	0,998	-0,975	-0,047	-0,648	0,038	0,951	0,701	0,751
630,4674	-0,523	-0,339	-0,930	0,567	0,753	-0,853	-0,209	-0,584	-0,002	0,957	0,694	0,748
631,5526	1,000	0,665	0,987	0,945	0,200	-0,641	-0,364	-0,516	-0,043	0,963	0,686	0,744
632,6377	-0,567	0,974	-0,767	-0,066	-0,435	-0,361	-0,510	-0,445	-0,084	0,968	0,679	0,741
633,7229	-0,382	0,264	0,330	-0,980	-0,892	-0,044	-0,643	-0,371	-0,124	0,973	0,671	0,737
634,808	0,983	-0,722	0,199	-0,454	-0,984	0,278	-0,759	-0,294	-0,164	0,978	0,664	0,734
635,8932	-0,690	-0,952	-0,672	0,739	-0,673	0,570	-0,854	-0,215	-0,204	0,982	0,656	0,730
636,9783	-0,231	-0,186	0,956	0,846	-0,087	0,803	-0,927	-0,135	-0,244	0,985	0,648	0,727
638,0634	0,942	0,775	-0,971	-0,290	0,535	0,952	-0,976	-0,054	-0,283	0,989	0,641	0,724
639,1466	-0,796	0,925	0,713	-1,000	0,938	1,000	-0,998	0,027	-0,322	0,991	0,633	0,720
640,2337	-0,074	0,108	-0,255	-0,240	0,956	0,943	-0,995	0,108	-0,360	0,994	0,625	0,716
641,3189	0,877	-0,822	-0,276	0,872	0,584	0,787	-0,965	0,189	-0,398	0,996	0,617	0,713
642,404	-0,881	-0,892	0,729	0,703	-0,028	0,549	-0,909	0,268	-0,435	0,998	0,609	0,709
643,4891	0,084	-0,029	-0,976	-0,500	-0,628	0,253	-0,829	0,345	-0,471	0,999	0,601	0,706
644,5743	0,789	0,865	0,950	-0,968	-0,971	-0,070	-0,728	0,421	-0,507	1,000	0,593	0,702
645,6594	-0,945	0,854	-0,656	-0,013	-0,917	-0,386	-0,607	0,493	-0,541	1,000	0,584	0,698
646,7446	0,241	-0,051	0,177	0,961	-0,487	-0,660	-0,470	0,562	-0,575	1,000	0,576	0,695
647,8297	0,682	-0,902	0,351	0,523	0,142	-0,866	-0,321	0,627	-0,608	0,999	0,568	0,691
648,9149	-0,985	-0,810	-0,781	-0,683	0,713	-0,980	-0,163	0,689	-0,640	0,999	0,559	0,687
650	0,391	0,130	0,990	-0,885	0,992	-0,992	-0,001	0,745	-0,671	0,997	0,551	0,684

Pp (t,k) :

ckk	0,021	0,034	0,016	0,049	0,052	0,066	0,083	0,104	0,131	0,163	0,199	0,227
t \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,016	-0,030	-0,005	-0,043	0,042	-0,065	0,011	0,074	-0,130	0,147	0,077	-0,139
1,085142	-0,019	-0,029	0,012	-0,035	0,052	-0,064	-0,003	0,068	-0,131	0,146	0,075	-0,138
2,170284	0,005	0,002	-0,016	0,024	0,041	-0,057	-0,016	0,061	-0,131	0,144	0,073	-0,137
3,255426	0,014	0,031	0,015	0,048	0,013	-0,043	-0,029	0,054	-0,131	0,142	0,071	-0,136
4,340568	-0,020	0,028	-0,010	0,002	-0,020	-0,025	-0,041	0,047	-0,130	0,141	0,069	-0,135
5,42571	0,008	-0,004	0,002	-0,047	-0,045	-0,004	-0,052	0,039	-0,130	0,139	0,067	-0,134
6,510851	0,012	-0,032	0,006	-0,027	-0,052	0,017	-0,062	0,031	-0,129	0,137	0,065	-0,133
7,595993	-0,021	-0,026	-0,013	0,033	-0,037	0,036	-0,070	0,023	-0,128	0,135	0,063	-0,132
8,681135	0,011	0,007	0,016	0,044	-0,007	0,052	-0,076	0,015	-0,127	0,134	0,061	-0,131
9,766277	0,009	0,033	-0,015	-0,010	0,026	0,062	-0,080	0,006	-0,125	0,132	0,060	-0,130
10,85142	-0,020	0,024	0,009	-0,049	0,048	0,066	-0,082	-0,002	-0,124	0,130	0,058	-0,129
11,93656	0,013	-0,010	-0,001	-0,017	0,050	0,062	-0,082	-0,011	-0,122	0,128	0,056	-0,128
13,0217	0,006	-0,033	-0,008	0,041	0,032	0,053	-0,080	-0,019	-0,120	0,126	0,054	-0,127
14,10684	-0,020	-0,022	0,014	0,038	0,001	0,037	-0,075	-0,027	-0,118	0,123	0,052	-0,127
15,19199	0,016	0,012	-0,016	-0,020	-0,031	0,018	-0,069	-0,035	-0,115	0,121	0,050	-0,126
16,27713	0,003	0,034	0,014	-0,049	-0,050	-0,003	-0,061	-0,043	-0,113	0,119	0,048	-0,125
17,36227	-0,019	0,020	-0,008	-0,006	-0,049	-0,024	-0,051	-0,051	-0,110	0,117	0,046	-0,124
18,44741	0,018	-0,015	0,000	0,046	-0,028	-0,042	-0,040	-0,058	-0,107	0,114	0,044	-0,123
19,53255	-0,001	-0,034	0,009	0,030	0,005	-0,056	-0,027	-0,065	-0,104	0,112	0,042	-0,122
20,6177	-0,017	-0,018	-0,015	-0,030	0,035	-0,064	-0,014	-0,071	-0,101	0,109	0,040	-0,121
21,70284	0,019	0,017	0,016	-0,046	0,051	-0,065	-0,001	-0,077	-0,097	0,107	0,038	-0,120
22,78798	-0,004	0,034	-0,014	0,006	0,046	-0,060	0,012	-0,082	-0,094	0,104	0,036	-0,119
23,87312	-0,015	0,016	0,007	0,049	0,022	-0,048	0,025	-0,087	-0,090	0,102	0,034	-0,118
24,95826	0,020	-0,019	0,002	0,020	-0,011	-0,031	0,038	-0,092	-0,086	0,099	0,032	-0,117
26,04341	-0,007	-0,034	-0,010	-0,038	-0,039	-0,011	0,049	-0,095	-0,082	0,097	0,030	-0,116
27,12855	-0,012	-0,013	0,015	-0,040	-0,052	0,010	0,059	-0,098	-0,078	0,094	0,028	-0,115
28,21369	0,021	0,022	-0,016	0,017	-0,043	0,031	0,068	-0,101	-0,073	0,091	0,026	-0,114
29,29883	-0,010	0,034	0,013	0,049	-0,017	0,048	0,075	-0,103	-0,069	0,088	0,024	-0,113
30,38397	-0,010	0,011	-0,006	0,009	0,016	0,059	0,079	-0,104	-0,064	0,086	0,022	-0,112
31,46912	0,021	-0,024	-0,003	-0,044	0,043	0,065	0,082	-0,104	-0,059	0,083	0,020	-0,111
32,55426	-0,013	-0,033	0,011	-0,033	0,052	0,064	0,082	-0,104	-0,055	0,080	0,018	-0,110
33,6394	-0,007	-0,008	-0,016	0,027	0,040	0,056	0,081	-0,103	-0,050	0,077	0,016	-0,109
34,72454	0,020	0,025	0,016	0,047	0,011	0,042	0,077	-0,101	-0,045	0,074	0,014	-0,108
35,80968	-0,015	0,032	-0,012	-0,002	-0,022	0,024	0,071	-0,099	-0,040	0,071	0,012	-0,107
36,89482	-0,003	0,005	0,005	-0,048	-0,046	0,003	0,063	-0,096	-0,035	0,068	0,010	-0,106
37,97997	0,019	-0,027	0,004	-0,024	-0,051	-0,018	0,054	-0,092	-0,030	0,065	0,008	-0,105
39,06511	-0,017	-0,031	-0,012	0,036	-0,036	-0,037	0,043	-0,088	-0,024	0,062	0,006	-0,104
40,15025	0,000	-0,003	0,016	0,043	-0,005	-0,052	0,031	-0,083	-0,019	0,059	0,004	-0,103
41,23539	0,017	0,029	-0,016	-0,013	0,027	-0,062	0,018	-0,077	-0,014	0,056	0,002	-0,102
42,32053	-0,019	0,030	0,011	-0,049	0,048	-0,066	0,005	-0,072	-0,009	0,053	0,000	-0,101
43,40568	0,003	0,000	-0,003	-0,013	0,050	-0,062	-0,008	-0,065	-0,003	0,049	-0,002	-0,100
44,49082	0,015	-0,030	-0,005	0,042	0,031	-0,052	-0,022	-0,058	0,002	0,046	-0,004	-0,099
45,57596	-0,020	-0,029	0,013	0,036	-0,001	-0,036	-0,034	-0,051	0,007	0,043	-0,006	-0,098
46,6611	0,006	0,003	-0,016	-0,024	-0,032	-0,017	-0,046	-0,044	0,013	0,040	-0,008	-0,096
47,74624	0,013	0,031	0,015	-0,048	-0,050	0,004	-0,056	-0,036	0,018	0,037	-0,011	-0,095
48,83139	-0,021	-0,027	-0,010	-0,002	-0,048	0,025	-0,065	-0,028	0,023	0,033	-0,013	-0,094
49,91653	0,009	0,006	0,002	0,047	-0,026	0,043	-0,073	-0,020	0,028	0,030	-0,015	-0,093
51,00167	0,010	-0,032	0,007	0,027	0,007	0,057	-0,078	-0,011	0,034	0,027	-0,017	-0,092
52,08681	-0,021	-0,025	-0,013	-0,033	0,037	0,064	-0,081	-0,003	0,039	0,024	-0,019	-0,091
53,17195	0,012	0,008	0,016	-0,044	0,051	0,065	-0,083	0,006	0,044	0,020	-0,021	-0,090
54,2571	0,007	0,033	-0,015	0,009	0,045	0,059	-0,082	0,014	0,049	0,017	-0,023	-0,089
55,34224	-0,020	0,023	0,009	0,049	0,021	0,047	-0,078	0,022	0,054	0,014	-0,025	-0,088
56,42738	0,015	-0,011	-0,001	0,017	-0,012	0,030	-0,073	0,031	0,058	0,010	-0,027	-0,087
57,51252	0,004	-0,034	-0,008	-0,040	-0,041	0,010	-0,066	0,039	0,063	0,007	-0,029	-0,086

58,59766	-0,019	-0,021	0,014	-0,038	-0,052	-0,012	-0,057	0,046	0,068	0,004	-0,031	-0,085
59,6828	0,017	0,013	-0,016	0,020	-0,042	-0,032	-0,047	0,054	0,072	0,000	-0,033	-0,084
60,76795	0,001	0,034	0,014	0,049	-0,015	-0,048	-0,035	0,061	0,077	-0,003	-0,035	-0,083
61,85309	-0,018	0,019	-0,008	0,006	0,018	-0,060	-0,022	0,067	0,081	-0,006	-0,037	-0,082
62,93823	0,018	-0,016	-0,001	-0,046	0,044	-0,065	-0,009	0,074	0,085	-0,010	-0,039	-0,081
64,02337	-0,002	-0,034	0,009	-0,030	0,052	-0,064	0,004	0,079	0,089	-0,013	-0,041	-0,079
65,10851	-0,016	-0,017	-0,015	0,030	0,038	-0,055	0,018	0,085	0,093	-0,016	-0,043	-0,078
66,19366	0,020	0,018	0,016	0,046	0,009	-0,041	0,030	0,089	0,096	-0,020	-0,045	-0,077
67,2788	-0,005	0,034	-0,013	-0,005	-0,024	-0,023	0,042	0,093	0,100	-0,023	-0,047	-0,076
68,36394	-0,014	0,014	0,007	-0,049	-0,047	-0,002	0,053	0,097	0,103	-0,026	-0,049	-0,075
69,44908	0,020	-0,020	0,002	-0,021	-0,051	0,019	0,063	0,099	0,106	-0,029	-0,051	-0,074
70,53422	-0,009	-0,034	-0,010	0,038	-0,034	0,038	0,071	0,102	0,109	-0,033	-0,052	-0,073
71,61937	-0,011	-0,012	0,015	0,041	-0,003	0,053	0,077	0,103	0,112	-0,036	-0,054	-0,072
72,70451	0,021	0,023	-0,016	-0,016	0,029	0,063	0,081	0,104	0,115	-0,039	-0,056	-0,071
73,78965	-0,011	0,033	0,013	-0,049	0,049	0,065	0,082	0,104	0,117	-0,042	-0,058	-0,070
74,87479	-0,008	0,009	-0,005	-0,010	0,049	0,062	0,082	0,103	0,120	-0,046	-0,060	-0,069
75,95993	0,020	-0,024	-0,003	0,044	0,029	0,051	0,079	0,102	0,122	-0,049	-0,062	-0,067
77,04508	-0,014	-0,033	0,011	0,033	-0,003	0,035	0,075	0,100	0,123	-0,052	-0,064	-0,066
78,13022	-0,005	-0,007	-0,016	-0,026	-0,033	0,016	0,068	0,097	0,125	-0,055	-0,066	-0,065
79,21536	0,020	0,026	0,016	-0,047	-0,051	-0,005	0,060	0,094	0,127	-0,058	-0,068	-0,064
80,3005	-0,016	0,032	-0,012	0,001	-0,047	-0,026	0,050	0,090	0,128	-0,061	-0,070	-0,063
81,38564	-0,002	0,004	0,004	0,048	-0,024	-0,044	0,038	0,086	0,129	-0,064	-0,072	-0,062
82,47078	0,018	-0,028	0,004	0,024	0,008	-0,057	0,026	0,081	0,130	-0,067	-0,074	-0,061
83,55593	-0,018	-0,031	-0,012	-0,035	0,038	-0,064	0,013	0,075	0,130	-0,070	-0,076	-0,060
84,64107	0,001	-0,001	0,016	-0,043	0,052	-0,065	0,000	0,069	0,131	-0,073	-0,077	-0,059
85,72621	0,017	0,029	-0,016	0,013	0,044	-0,059	-0,014	0,063	0,131	-0,076	-0,079	-0,058
86,81135	-0,019	0,029	0,011	0,049	0,019	-0,046	-0,027	0,056	0,131	-0,079	-0,081	-0,056
87,89649	0,005	-0,001	-0,003	0,014	-0,014	-0,029	-0,039	0,048	0,130	-0,082	-0,083	-0,055
88,98164	0,014	-0,031	-0,006	-0,042	-0,042	-0,009	-0,050	0,041	0,130	-0,085	-0,085	-0,054
90,06678	-0,020	-0,028	0,013	-0,036	-0,052	0,013	-0,060	0,033	0,129	-0,088	-0,087	-0,053
91,15192	0,008	0,004	-0,016	0,023	-0,041	0,033	-0,069	0,025	0,128	-0,091	-0,088	-0,052
92,23706	0,012	0,032	0,015	0,048	-0,013	0,049	-0,075	0,016	0,127	-0,093	-0,090	-0,051
93,3222	-0,021	0,026	-0,010	0,003	0,020	0,060	-0,080	0,008	0,126	-0,096	-0,092	-0,050
94,40735	0,011	-0,007	0,002	-0,047	0,045	0,065	-0,082	-0,001	0,124	-0,099	-0,094	-0,049
95,49249	0,009	-0,033	0,007	-0,027	0,052	0,063	-0,082	-0,009	0,122	-0,101	-0,096	-0,047
96,57763	-0,020	-0,024	-0,014	0,032	0,037	0,055	-0,080	-0,017	0,120	-0,104	-0,097	-0,046
97,66277	0,013	0,009	0,016	0,045	0,008	0,041	-0,076	-0,026	0,118	-0,106	-0,099	-0,045
98,74791	0,006	0,033	-0,015	-0,009	-0,025	0,022	-0,070	-0,034	0,116	-0,109	-0,101	-0,044
99,83306	-0,020	0,022	0,009	-0,049	-0,048	0,001	-0,062	-0,042	0,113	-0,111	-0,103	-0,043
100,9182	0,016	-0,012	0,000	-0,017	-0,051	-0,020	-0,053	-0,049	0,111	-0,114	-0,104	-0,042
600,0835	0,017	0,029	0,016	0,048	0,012	0,043	-0,077	-0,025	0,119	0,106	0,173	0,189
601,1686	-0,019	0,030	-0,011	0,000	-0,021	0,025	-0,071	-0,033	0,116	0,109	0,172	0,188
602,2538	0,003	0,000	0,003	-0,048	-0,046	0,004	-0,064	-0,041	0,114	0,111	0,171	0,188
603,3389	0,015	-0,030	0,005	-0,025	-0,051	-0,017	-0,054	-0,048	0,111	0,113	0,170	0,187
604,424	-0,020	-0,028	-0,013	0,034	-0,036	-0,036	-0,044	-0,056	0,108	0,116	0,169	0,186
605,5092	0,007	0,003	0,016	0,044	-0,006	-0,052	-0,032	-0,063	0,105	0,118	0,168	0,186
606,5943	0,013	0,031	-0,015	-0,011	0,026	-0,062	-0,019	-0,069	0,102	0,120	0,167	0,185
607,6795	-0,021	0,027	0,010	-0,049	0,048	-0,066	-0,006	-0,075	0,098	0,123	0,166	0,184
608,7646	0,010	-0,006	-0,002	-0,015	0,050	-0,062	0,008	-0,081	0,095	0,125	0,164	0,184
609,8497	0,010	-0,032	-0,007	0,041	0,032	-0,052	0,021	-0,086	0,091	0,127	0,163	0,183
610,9349	-0,021	-0,025	0,013	0,037	0,000	-0,037	0,034	-0,090	0,087	0,129	0,162	0,182
612,02	0,012	0,009	-0,016	-0,022	-0,031	-0,018	0,046	-0,094	0,083	0,131	0,161	0,182
613,1052	0,007	0,033	0,015	-0,049	-0,050	0,003	0,056	-0,097	0,079	0,133	0,160	0,181
614,1903	-0,020	0,023	-0,009	-0,004	-0,048	0,024	0,065	-0,100	0,075	0,135	0,158	0,180
615,2755	0,015	-0,011	0,001	0,046	-0,027	0,042	0,072	-0,102	0,070	0,137	0,157	0,180
616,3606	0,004	-0,034	0,008	0,029	0,006	0,056	0,078	-0,103	0,066	0,138	0,156	0,179
617,4457	-0,019	-0,021	-0,014	-0,031	0,036	0,064	0,081	-0,104	0,061	0,140	0,155	0,178
618,5309	0,017	0,014	0,016	-0,045	0,051	0,065	0,083	-0,104	0,056	0,142	0,153	0,178
619,616	0,001	0,034	-0,014	0,007	0,046	0,059	0,082	-0,103	0,051	0,144	0,152	0,177
620,7012	-0,018	0,019	0,008	0,049	0,022	0,047	0,078	-0,102	0,047	0,145	0,151	0,176
621,7863	0,019	-0,016	0,001	0,019	-0,011	0,030	0,073	-0,099	0,041	0,147	0,149	0,175
622,8715	-0,003	-0,034	-0,009	-0,039	-0,040	0,010	0,066	-0,097	0,036	0,148	0,148	0,175
623,9566	-0,016	-0,017	0,015	-0,040	-0,052	-0,011	0,057	-0,093	0,031	0,149	0,147	0,174
625,0417	0,020	0,018	-0,016	0,018	-0,043	-0,031	0,047	-0,089	0,026	0,151	0,145	0,173
626,1269	-0,006	0,034	0,013	0,049	-0,016	-0,048	0,035	-0,085	0,021	0,152	0,144	0,172
627,212	-0,013	0,014	-0,007	0,008	0,017	-0,060	0,023	-0,079	0,016	0,153	0,143	0,172
628,2972	0,020	-0,021	-0,002	-0,045	0,043	-0,065	0,010	-0,074	0,010	0,154	0,141	0,171
629,3823	-0,009	-0,034	0,010	-0,032	0,052	-0,064	-0,004	-0,067	0,005	0,155	0,140	0,170
630,4674	-0,011	-0,012	-0,015	0,028	0,039	-0,056	-0,017	-0,061	0,000	0,156	0,138	0,169
631,5526	0,021	0,023	0,016	0,047	0,010	-0,042	-0,030	-0,054	-0,006	0,157	0,137	0,169
632,6377	-0,012	0,033	-0,013	-0,003	-0,023	-0,024	-0,042	-0,046	-0,011	0,158	0,135	0,168
633,7229	-0,008	0,009	0,005	-0,048	-0,046	-0,003	-0,053	-0,039	-0,016	0,159	0,134	0,167
634,808	0,020	-0,025	0,003	-0,022	-0,051	0,018	-0,063	-0,031	-0,021	0,160	0,132	0,166
635,8932	-0,014	-0,033	-0,011	0,037	-0,035	0,037	-0,071	-0,022	-0,027	0,160	0,131	0,165
636,9783	-0,005	-0,006	0,016	0,042	-0,004	0,053	-0,077	-0,014	-0,032	0,161	0,129	0,165
638,0634	0,019	0,026	-0,016	-0,014	0,028	0,062	-0,081	-0,006	-0,037	0,161	0,128	0,164
639,1486	-0,016	0,032	0,012	-0,049	0,049	0,066	-0,082	0,003	-0,042	0,162	0,126	0,163
640,2337	-0,002	0,004	-0,004	-0,012	0,050	0,062	-0,082	0,011	-0,047	0,162	0,125	0,162
641,3189	0,018	-0,028	-0,005	0,043	0,030	0,052	-0,080	0,020	-0,052	0,163	0,123	0,161
642,404	-0,018	-0,031	0,012	0,035	-0,001	0,036	-0,075	0,028	-0,057	0,163	0,121	0,161
643,4891	0,002	-0,001	-0,016	-0,025	-0,033	0,017	-0,068	0,036	-0,062	0,163	0,120	0,160
644,5743	0,016	0,030	0,016	-0,048	-0,051	-0,005	-0,060	0,044	-0,066	0,163	0,118	0,159
645,6594	-0,020	0,029	-0,011	-0,001	-0,048	-0,025	-0,050	0,051	-0,071	0,163	0,116	0,158
646,7446	0,005	-0,002	0,003	0,048	-0,025	-0,043	-0,039	0,058	-0,075	0,163	0,115	0,157
647,8297	0,014	-0,031	0,006	0,026	0,007	-0,057	-0,026	0,065	-0,079	0,163	0,113	0,157
648,9149	-0,020	-0,028	-0,013	-0,034	0,037	-0,064	-0,013	0,072	-0,084	0,163	0,111	0,156
650	0,008	0,004	0,016	-0,044	0,052	-0,065	0,000	0,077	-0,088	0,163	0,110	0,155

Ca . Aj . qfj. Cr (j, k)

j \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,000	26,971	43,072	51,123	55,148	57,161	58,167	58,670	58,922	59,048	59,110	59,142
2	64,678	86,522	97,444	102,905	105,635	107,000	107,683	108,024	108,195	108,280	108,323	108,344
3	0,000	0,000	35,486	65,095	79,900	87,302	91,004	92,854	93,779	94,242	94,473	94,589
4	0,000	0,000	0,000	43,823	72,804	87,295	94,541	98,163	99,975	100,880	101,333	101,560
5	0,000	0,000	0,000	0,000	19,470	64,102	86,418	97,576	103,155	105,945	107,340	108,037
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	53,671	84,377	99,729	107,406	111,244	113,163	114,122
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,855	81,480	101,292	111,198	116,151	118,628	119,866
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,385	57,761	75,949	85,043	89,590	91,864	93,001
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,338	71,767	100,482	114,839	122,017	125,607	127,401
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	82,327	123,748	144,458	154,813	159,991	162,580
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	108,861	173,850	206,345	222,592	230,716	234,778	236,809	237,824	238,332	238,586	238,713
18	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253	421,253
19	0,000	146,196	283,788	352,584	386,982	404,181	412,780	417,080	419,230	420,305	420,842	421,111
20	0,000	0,000	146,199	283,793	352,590	386,989	404,188	412,788	417,087	419,237	420,312	420,850

Ff(t,j,k):

k=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t\j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0,000	1,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,906	0,000	0,000
1,085142	0,000	-1,258	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,191	0,000	0,000
2,170284	0,000	0,311	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,024	0,000	0,000
3,255426	0,000	0,919	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,985	0,000	0,000
4,340568	0,000	-1,313	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,549	0,000	0,000
5,42571	0,000	0,512	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,335	0,000	0,000
6,510851	0,000	0,754	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,913	0,000	0,000
7,595993	0,000	-1,334	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,691	0,000	0,000
8,681135	0,000	0,700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,562	0,000	0,000
9,766277	0,000	0,571	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,718	0,000	0,000
10,85142	0,000	-1,323	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,615	0,000	0,000
11,93656	0,000	0,871	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,674	0,000	0,000
13,0217	0,000	0,373	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,429	0,000	0,000
14,10684	0,000	-1,278	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,322	0,000	0,000
15,19199	0,000	1,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,644	0,000	0,000
16,27713	0,000	0,166	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,080	0,000	0,000
17,36227	0,000	-1,201	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,820	0,000	0,000
18,44741	0,000	1,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,446	0,000	0,000
19,53255	0,000	-0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,297	0,000	0,000
20,6177	0,000	-1,093	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,122	0,000	0,000
21,70284	0,000	1,238	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,062	0,000	0,000
22,78798	0,000	-0,256	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-1,667	0,000	0,000
23,87312	0,000	-0,959	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-6,245	0,000	0,000
24,95826	0,000	1,301	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,475	0,000	0,000
26,04341	0,000	-0,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,994	0,000	0,000
27,12855	0,000	-0,800	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-5,210	0,000	0,000
28,21369	0,000	1,332	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,674	0,000	0,000
29,29883	0,000	-0,652	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,246	0,000	0,000
30,38397	0,000	-0,621	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,045	0,000	0,000
31,46912	0,000	1,329	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,656	0,000	0,000
32,55426	0,000	-0,828	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-5,392	0,000	0,000
33,6394	0,000	-0,427	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,778	0,000	0,000
34,72454	0,000	1,293	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,421	0,000	0,000
35,80968	0,000	-0,983	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-6,402	0,000	0,000
36,89482	0,000	-0,221	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-1,441	0,000	0,000
37,97997	0,000	1,224	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,973	0,000	0,000
39,06511	0,000	-1,113	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,251	0,000	0,000
40,15025	0,000	-0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,068	0,000	0,000
41,23539	0,000	1,125	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,325	0,000	0,000
42,32053	0,000	-1,216	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,918	0,000	0,000
43,40568	0,000	0,201	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,307	0,000	0,000
44,49082	0,000	0,997	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,493	0,000	0,000
45,57596	0,000	-1,288	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,386	0,000	0,000
46,6611	0,000	0,407	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,649	0,000	0,000
47,74624	0,000	0,844	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,498	0,000	0,000
48,83139	0,000	-1,327	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,643	0,000	0,000
49,91653	0,000	0,602	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,924	0,000	0,000
51,00167	0,000	0,670	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,365	0,000	0,000
52,08681	0,000	-1,333	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,682	0,000	0,000
53,17195	0,000	0,783	0,000																	

95,49249	0,000	0,582	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,792	0,000	0,000
96,57763	0,000	-1,324	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,626	0,000	0,000
97,66277	0,000	0,862	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,611	0,000	0,000
98,74791	0,000	0,385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,508	0,000	0,000
99,83306	0,000	-1,281	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,346	0,000	0,000
100,9182	0,000	1,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,590	0,000	0,000
600,0835	0,000	1,112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,242	0,000	0,000
601,1686	0,000	-1,225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,980	0,000	0,000
602,2538	0,000	0,224	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,458	0,000	0,000
603,3389	0,000	0,981	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,390	0,000	0,000
604,424	0,000	-1,294	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,425	0,000	0,000
605,5092	0,000	0,429	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,794	0,000	0,000
606,5943	0,000	0,826	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,379	0,000	0,000
607,6795	0,000	-1,329	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,658	0,000	0,000
608,7646	0,000	0,623	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,060	0,000	0,000
609,8497	0,000	0,650	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,231	0,000	0,000
610,9349	0,000	-1,332	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,673	0,000	0,000
612,02	0,000	0,802	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,224	0,000	0,000
613,1052	0,000	0,457	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,978	0,000	0,000
614,1903	0,000	-1,301	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,471	0,000	0,000
615,2755	0,000	0,961	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,257	0,000	0,000
616,3606	0,000	0,253	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,650	0,000	0,000
617,4457	0,000	-1,237	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,055	0,000	0,000
618,5309	0,000	1,095	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,132	0,000	0,000
619,616	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,280	0,000	0,000
620,7012	0,000	-1,142	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,437	0,000	0,000
621,7863	0,000	1,202	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,828	0,000	0,000
622,8715	0,000	-0,168	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-1,097	0,000	0,000
623,9566	0,000	-1,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-6,632	0,000	0,000
625,0417	0,000	1,279	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,327	0,000	0,000
626,1269	0,000	-0,376	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,446	0,000	0,000
627,212	0,000	-0,869	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-5,661	0,000	0,000
628,2972	0,000	1,323	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,617	0,000	0,000
629,3823	0,000	-0,573	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-3,733	0,000	0,000
630,4674	0,000	-0,698	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,547	0,000	0,000
631,5526	0,000	1,334	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,691	0,000	0,000
632,6377	0,000	-0,757	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,927	0,000	0,000
633,7229	0,000	-0,510	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-3,319	0,000	0,000
634,808	0,000	1,312	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,545	0,000	0,000
635,8932	0,000	-0,921	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-5,997	0,000	0,000
636,9783	0,000	-0,308	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,007	0,000	0,000
638,0634	0,000	1,257	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,186	0,000	0,000
639,1486	0,000	-1,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-6,917	0,000	0,000
640,2337	0,000	-0,099	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,645	0,000	0,000
641,3189	0,000	1,170	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,620	0,000	0,000
642,404	0,000	-1,176	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-7,662	0,000	0,000
643,4891	0,000	0,113	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,733	0,000	0,000
644,5743	0,000	1,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,863	0,000	0,000
645,6594	0,000	-1,261	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,215	0,000	0,000
646,7446	0,000	0,321	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,093	0,000	0,000
647,8297	0,000	0,911	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,933	0,000	0,000
648,9149	0,000	-1,314	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,561	0,000	0,000
650	0,000	0,522	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,400	0,000	0,000

k=	12																				
l\j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

48,83139	-5,582	-10,225	-8,927	-9,585	-10,229	-10,816	-11,371	-8,831	-12,109	-15,466	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-22,529	-39,757	-39,744	-39,719
49,91653	-5,520	-10,112	-8,828	-9,479	-10,116	-10,696	-11,245	-8,733	-11,974	-15,294	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-22,279	-39,316	-39,302	-39,278
51,00167	-5,458	-9,998	-8,729	-9,372	-10,002	-10,575	-11,118	-8,634	-11,839	-15,122	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-22,028	-38,873	-38,860	-38,835
52,08681	-5,395	-9,884	-8,629	-9,265	-9,887	-10,455	-10,991	-8,536	-11,704	-14,949	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-21,777	-38,429	-38,416	-38,392
53,17195	-5,333	-9,769	-8,529	-9,158	-9,773	-10,334	-10,864	-8,437	-11,569	-14,776	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-21,524	-37,984	-37,971	-37,948
54,2571	-5,270	-9,655	-8,429	-9,050	-9,658	-10,212	-10,737	-8,338	-11,433	-14,603	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-21,272	-37,538	-37,525	-37,502
55,34224	-5,207	-9,540	-8,329	-8,942	-9,543	-10,091	-10,609	-8,239	-11,297	-14,429	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-21,019	-37,091	-37,079	-37,056
56,42738	-5,145	-9,425	-8,228	-8,834	-9,428	-9,969	-10,481	-8,139	-11,160	-14,255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-20,765	-36,644	-36,631	-36,608
57,51252	-5,082	-9,309	-8,127	-8,726	-9,313	-9,847	-10,352	-8,040	-11,024	-14,080	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-20,511	-36,195	-36,183	-36,160
58,59766	-5,018	-9,193	-8,026	-8,618	-9,197	-9,725	-10,224	-7,940	-10,887	-13,905	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-20,256	-35,745	-35,733	-35,711
59,6828	-4,955	-9,078	-7,925	-8,509	-9,081	-9,602	-10,095	-7,840	-10,750	-13,730	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-20,001	-35,295	-35,283	-35,261
60,76795	-4,892	-8,961	-7,824	-8,400	-8,965	-9,479	-9,966	-7,739	-10,612	-13,555	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-19,745	-34,843	-34,831	-34,810
61,85309	-4,828	-8,845	-7,722	-8,291	-8,849	-9,356	-9,836	-7,639	-10,474	-13,379	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-19,488	-34,391	-34,379	-34,358
62,93823	-4,765	-8,729	-7,620	-8,182	-8,732	-9,233	-9,707	-7,538	-10,336	-13,202	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-19,231	-33,938	-33,926	-33,905
64,02337	-4,701	-8,612	-7,518	-8,072	-8,615	-9,109	-9,577	-7,437	-10,198	-13,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-18,974	-33,483	-33,472	-33,451
65,10851	-4,637	-8,495	-7,416	-7,963	-8,498	-8,985	-9,447	-7,336	-10,059	-12,849	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-18,716	-33,028	-33,017	-32,997
66,19366	-4,573	-8,377	-7,314	-7,853	-8,381	-8,861	-9,316	-7,235	-9,920	-12,671	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-18,458	-32,572	-32,561	-32,541
67,2788	-4,509	-8,260	-7,211	-7,743	-8,263	-8,737	-9,186	-7,134	-9,781	-12,494	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-18,199	-32,116	-32,105	-32,085
68,36394	-4,445	-8,142	-7,109	-7,632	-8,145	-8,613	-9,055	-7,032	-9,642	-12,316	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-17,940	-31,658	-31,648	-31,628
69,44908	-4,380	-8,024	-7,006	-7,522	-8,028	-8,488	-8,924	-6,930	-9,502	-12,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-17,680	-31,200	-31,189	-31,170
70,53422	-4,316	-7,906	-6,903	-7,411	-7,909	-8,363	-8,792	-6,828	-9,363	-11,959	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-17,420	-30,741	-30,730	-30,711
71,61937	-4,251	-7,788	-6,799	-7,300	-7,791	-8,238	-8,661	-6,726	-9,222	-11,780	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-17,159	-30,281	-30,270	-30,252
72,70451	-4,187	-7,670	-6,696	-7,189	-7,672	-8,113	-8,529	-6,624	-9,082	-11,600	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-16,898	-29,820	-29,810	-29,791
73,78965	-4,122	-7,551	-6,592	-7,078	-7,554	-7,987	-8,397	-6,521	-8,942	-11,421	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-16,637	-29,358	-29,349	-29,330
74,87479	-4,057	-7,432	-6,488	-6,967	-7,435	-7,861	-8,265	-6,418	-8,801	-11,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-16,375	-28,896	-28,886	-28,868
75,95993	-3,992	-7,313	-6,384	-6,855	-7,316	-7,735	-8,132	-6,316	-8,660	-11,061	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-16,112	-28,433	-28,424	-28,406
77,04508	-3,927	-7,194	-6,280	-6,743	-7,196	-7,609	-8,000	-6,213	-8,518	-10,881	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-15,849	-27,969	-27,960	-27,943
78,13022	-3,862	-7,074	-6,176	-6,631	-7,077	-7,483	-7,867	-6,109	-8,377	-10,700	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-15,586	-27,505	-27,496	-27,478
79,21536	-3,796	-6,954	-6,072	-6,519	-6,957	-7,356	-7,734	-6,006	-8,235	-10,519	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-15,323	-27,040	-27,031	-27,014
80,3005	-3,731	-6,835	-5,967	-6,407	-6,837	-7,229	-7,601	-5,903	-8,093	-10,338	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-15,059	-26,574	-26,565	-26,548
81,38564	-3,665	-6,715	-5,862	-6,294	-6,717	-7,102	-7,467	-5,799	-7,951	-10,156	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-14,794	-26,107	-26,098	-26,082
82,47078	-3,600	-6,594	-5,757	-6,181	-6,597	-6,975	-7,333	-5,695	-7,809	-9,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-14,529	-25,640	-25,631	-25,615
83,55593	-3,534	-6,474	-5,652	-6,069	-6,477	-6,848	-7,200	-5,591	-7,666	-9,792	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-14,264	-25,172	-25,163	-25,148
84,64107	-3,468	-6,354	-5,547	-5,956	-6,356	-6,721	-7,066	-5,487	-7,524	-9,610	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-13,999	-24,703	-24,695	-24,680
85,72621	-3,402	-6,233	-5,442	-5,843	-6,235	-6,593	-6,931	-5,383	-7,381	-9,427	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-13,733	-24,234	-24,226	-24,211
86,81135	-3,336	-6,112	-5,336	-5,729	-6,114	-6,465	-6,797	-5,279	-7,238	-9,245	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-13,467	-23,764	-23,756	-23,742
87,89649	-3,270	-5,991	-5,230	-5,616	-5,993	-6,337	-6,662	-5,174	-7,094	-9,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-13,200	-23,294	-23,286	-23,271
88,98164	-3,204	-5,870	-5,125	-5,502	-5,872	-6,209	-6,528	-5,069	-6,951	-8,878	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-12,933	-22,823	-22,815	-22,801
90,06678	-3,138	-5,749	-5,019	-5,389	-5,751	-6,081	-6,393	-4,965	-6,807	-8,695	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-12,666	-22,351	-22,344	-22,330
91,15192	-3,072	-5,627	-4,913	-5,275	-5,629	-5,952	-6,258	-4,860	-6,664	-8,511	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-12,398	-21,879	-21,871	-21,858
92,23706	-3,005	-5,506	-4,807	-5,161	-5,508	-5,824	-6,122	-4,755	-6,520	-8,327	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-12,130	-21,406	-21,399	-21,386
93,3222	-2,939	-5,384	-4,700	-5,047	-5,386	-5,695	-5,987	-4,650	-6,375	-8,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-11,862	-20,933	-20,926	-20,913
94,40735	-2,872	-5,262	-4,594	-4,932	-5,264	-5,566	-5,852	-4,544	-6,231	-7,959	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-11,593	-20,459	-20,452	-20,439
95,49249	-2,806	-5,140	-4,487	-4,818	-5,142	-5,437	-5,716	-4,439	-6,087	-7,774	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-11,325	-19,984	-19,978	-19,965
96,57763	-2,739	-5,018	-4,381	-4,704	-5,020	-5,308	-5,580	-4,333	-5,942	-7,589	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-11,055	-19,509	-19,503	-19,491
97,66277	-2,672	-4,895	-4,274	-4,589	-4,897	-5,178	-5,444	-4,228	-5,797	-7,404	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-10,786	-19,034	-19,028	-19,016
98,74791	-2,605	-4,773	-4,167	-4,474	-4,775	-5,049	-5,308	-4,122	-5,652	-7,219	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-10,516	-18,558	-18,552	-18,540
99,83306	-2,539	-4,650	-4,060	-4,359	-4,652	-4,919	-5,172	-4,016	-5,507	-7,034	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-10,246	-18,082	-18,075	-18,064
100,9182	-2,472	-4,528	-3,953	-4,244	-4,530	-4,789	-5,035	-3,910	-5,362	-6,848	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-9,976	-17,605	-17,599	-17,588
600,0835	11,177	20,476	17,877	19,194	20,484	21,659	22,771	17,684	24,248	30,971	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	45,115	79,614	79,588	79,538
601,1686	11,140	20,407	17,816	19,129	20,415	21,586	22,694	17,624	24,166	30,867	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	44,963	79,346	79,319	79,270
602,2538	11,102	20,338	17,756	19,064	20,346	21,512	22,617	17,564	24,083	30,761	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	44,810	79,075	79,048	78,999
603,3389	11,063	20,268	17,694	18,998	20,275	21,438	22,539	17,504	24,000	30,655	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	44,655	78,802	78,776	78,727
604,424	11,025	20,197	17,633	18,932	20,205	21,363	22,460	17,443	23,917	30,548	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	44,499	78,528	78,501	78,452
605,5092	10,986	20,126	17,571	18,865	20,133	21,288	22,381	17,381	23,832	30,441	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	44,343	78,251	78,224	78,176
606,5943	10,947																			

1,085,142	79,679	140,029	121,048	125,045	128,339	129,532	128,241	92,650	115,824	129,538	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	321,607	542,376	546,235	537,469
2,170,284	80,812	144,785	121,586	125,311	127,161	127,228	125,988	91,029	113,774	127,132	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	326,177	567,527	552,923	539,883
3,255,426	82,114	149,552	121,165	123,357	124,760	124,548	123,538	89,406	111,928	125,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	331,433	591,716	560,003	537,576
4,340,568	76,478	135,850	114,145	118,373	121,092	122,023	121,293	87,975	110,387	123,778	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	308,685	529,961	521,289	506,994
5,425,71	72,246	128,430	109,306	114,209	118,230	120,259	119,704	86,944	109,247	122,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	291,606	502,487	493,004	485,657
6,510,851	72,439	128,271	110,319	114,596	118,069	119,655	119,057	86,433	108,534	121,724	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	292,384	500,782	495,309	489,994
7,595,993	75,676	132,616	114,725	118,233	120,028	120,193	119,311	86,392	108,157	120,847	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	305,449	513,348	517,734	509,412
8,681,135	79,993	144,596	118,742	120,679	121,859	121,406	120,076	86,596	107,911	119,889	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	322,872	569,927	545,953	526,775
9,766,277	78,149	141,136	116,324	120,210	122,343	122,522	120,729	86,706	107,527	118,742	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	315,432	556,235	532,772	516,590
10,851,42	77,666	138,224	115,586	119,243	122,088	122,752	120,642	86,388	106,752	117,340	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	313,479	539,641	529,490	513,193
11,936,56	77,391	138,772	116,401	119,649	121,624	121,585	119,413	85,433	105,442	115,665	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	312,369	544,919	528,942	516,745
13,021,77	77,414	137,733	116,924	119,273	119,980	118,999	117,033	83,843	103,609	113,753	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	312,464	538,238	529,830	518,884
14,106,84	75,625	133,414	113,232	115,062	116,081	115,475	113,892	81,834	101,435	111,688	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	305,244	518,053	516,342	502,332
15,191,99	69,268	124,056	103,900	108,246	110,955	111,830	110,651	79,768	99,211	109,595	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	279,585	488,126	471,090	461,627
16,277,13	67,434	120,821	99,718	103,701	107,268	108,920	108,007	78,032	97,257	107,626	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	272,183	475,545	456,822	442,912
17,362,27	67,293	118,638	100,172	104,008	106,515	107,337	106,453	76,908	95,829	105,944	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	271,613	462,194	456,507	444,962
18,447,41	69,644	124,682	104,199	106,511	107,218	106,124	106,124	76,497	95,055	104,703	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	281,102	490,458	473,996	462,447
19,532,55	69,971	123,514	105,301	107,412	108,613	108,237	106,791	76,706	94,925	104,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	282,422	481,477	477,038	467,257
20,617,77	67,936	118,489	102,878	106,880	109,290	109,779	107,989	77,314	95,326	104,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	274,207	458,623	462,852	457,014
21,702,84	70,640	127,583	104,776	107,918	110,581	111,214	109,236	78,082	96,109	104,682	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	285,123	504,233	479,876	465,137
22,787,98	72,962	130,902	107,885	111,044	112,501	112,174	110,237	78,853	97,158	106,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	294,493	514,499	495,716	479,018
23,873,12	75,392	134,668	111,299	113,000	113,620	112,685	110,996	79,613	98,429	107,908	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	304,301	527,334	512,994	493,757
24,958,26	72,378	129,646	108,825	111,584	113,193	113,135	111,791	80,475	99,941	110,237	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	292,138	509,710	493,713	483,047
26,043,41	68,552	119,507	104,822	109,448	112,726	114,072	113,012	81,603	101,730	112,812	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	276,693	462,543	468,156	465,754
27,128,55	71,031	124,926	107,090	110,993	114,432	115,918	114,949	83,105	103,785	115,426	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	286,699	489,801	484,304	475,568
28,213,69	75,559	136,682	112,762	116,517	118,486	118,735	117,610	84,942	105,994	117,863	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	304,978	539,843	514,911	500,776
29,298,83	81,551	147,129	120,010	121,873	122,818	122,132	120,651	86,899	108,133	119,924	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	329,162	578,581	555,775	532,389
30,383,97	80,864	144,517	120,856	124,005	125,635	125,363	123,459	88,630	109,902	121,439	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	326,387	565,340	552,591	536,489
31,469,12	79,292	142,017	120,363	124,374	127,085	127,578	125,348	89,762	111,002	122,291	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	320,044	557,152	543,339	534,483
32,545,26	80,735	142,552	122,360	125,590	127,952	128,136	125,808	90,022	111,228	122,420	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	325,869	553,679	553,556	543,121
33,639,4	82,225	146,605	123,676	126,657	127,681	126,848	124,692	89,338	110,534	121,834	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	331,881	572,597	563,023	548,983
34,724,54	83,095	151,765	122,536	124,168	124,959	124,059	122,283	87,866	109,053	120,605	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	335,395	601,393	566,943	543,525
35,809,68	76,561	136,598	113,902	117,800	120,087	120,524	119,194	85,946	107,066	118,860	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	309,020	534,347	521,551	505,849
36,894,82	71,453	126,716	107,414	111,876	115,513	117,145	116,162	83,988	104,917	116,775	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	288,406	494,981	486,775	477,162
37,979,97	70,050	124,526	106,318	110,301	113,400	114,652	113,794	82,342	102,921	114,549	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	282,742	487,827	478,099	472,197
39,065,11	71,745	125,421	108,707	111,868	113,397	113,369	112,382	81,198	101,288	112,392	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	289,584	485,457	490,014	482,653
40,150,25	74,508	133,318	110,683	112,492	113,593	113,143	111,846	80,594	100,097	110,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	300,736	523,018	507,546	491,023
41,235,39	72,015	130,065	107,117	110,987	113,161	113,475	111,827	80,258	99,313	109,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	290,674	513,759	489,575	475,777
42,320,53	71,961	127,908	106,549	110,086	112,959	113,767	111,882	80,108	98,848	108,131	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	290,455	499,876	488,838	473,102
43,405,68	72,331	128,958	108,306	111,560	113,530	113,611	111,705	79,961	98,633	107,840	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	291,946	505,288	492,759	480,870
44,490,82	73,503	131,190	110,752	113,026	113,796	112,975	111,272	79,806	98,662	108,173	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	296,679	514,434	501,987	491,499
45,575,96	72,868	127,950	109,397	111,401	112,599	112,215	110,852	79,768	99,000	109,078	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	294,114	496,313	497,206	485,379
46,661,1	68,650	121,896	103,437	107,946	110,849	111,916	110,881	80,052	99,743	110,454	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	277,091	477,172	467,201	459,611
47,746,24	69,619	125,476	103,199	107,256	110,912	112,621	111,756	80,834	100,953	112,163	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	281,001	495,364	472,411	458,353
48,831,39	72,094	127,690	107,321	111,292	113,802	114,564	113,630	82,161	102,599	114,049	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	290,990	497,936	490,215	476,688
49,916,53	76,609	137,500	114,474	116,839	117,967	117,527	116,304	83,900	104,529	115,954	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	309,214	540,248	522,848	507,999
51,001,67	77,868	138,962	117,496	119,921	121,271	120,881	119,258	85,758	106,488	117,735	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	314,296	544,025	532,938	521,393
52,086,81	76,580	134,095	116,513	120,742	123,317	123,794	121,824	87,372	108,191	119,284	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	309,098	518,691	524,392	517,501
53,171,95	79,516	143,348	118,832	122,195	124,963	125,545	123,427	88,436	109,406	120,536	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	320,947	564,245	543,121	527,494
54,257,1	81,509	147,505	121,154	124,572	126,140	125,793	123,800	88,810	110,034	121,479	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	328,993	581,459	556,317	537,897
55,342,24	82,971	148,713	122,692	124,648	125,519	124,717	123,087	88,577	110,145	122,150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0					

608,7646	109,020	196,438	167,129	174,578	180,691	184,513	186,089	137,608	177,514	208,390	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	440,035	768,414	754,192	742,554
609,8497	110,808	199,138	170,441	176,984	181,866	184,747	186,496	138,047	178,282	209,569	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	447,250	777,607	767,663	757,049
610,9349	111,054	198,115	170,097	176,239	181,478	184,726	186,786	138,510	179,239	211,179	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	448,246	769,588	768,794	755,371
612,02	107,258	193,354	164,715	173,383	180,304	184,974	187,336	139,158	180,423	213,049	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	432,923	756,812	741,690	732,173
613,1052	108,230	196,001	164,672	172,940	180,653	185,988	188,495	140,128	181,849	214,980	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	436,845	768,967	747,113	731,793
614,1903	110,615	198,277	168,852	176,990	183,575	187,969	190,378	141,439	183,442	216,758	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	446,472	772,437	764,509	750,369
615,2755	114,957	208,013	175,848	182,407	187,543	190,675	192,759	142,934	185,014	218,178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	463,998	815,132	796,019	780,997
616,3606	116,294	209,071	178,682	185,112	190,366	193,455	195,096	144,301	186,285	219,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	469,395	815,827	806,383	793,505
617,4457	114,614	204,171	176,892	185,139	191,559	195,463	196,702	145,163	186,949	219,272	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	462,612	792,105	794,827	786,047
618,5309	116,840	212,378	178,039	185,367	191,968	195,957	196,985	145,203	186,761	218,735	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	471,598	834,242	808,460	790,830
619,616	117,814	213,751	178,931	186,230	191,574	194,583	195,667	144,276	185,619	217,436	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	475,531	838,278	814,610	794,873
620,7012	118,055	213,091	178,799	184,565	189,075	191,514	192,892	142,465	183,601	215,429	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	476,500	832,801	816,213	793,878
621,7863	111,963	202,370	171,659	178,513	184,021	187,396	189,186	140,062	180,947	212,828	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	451,912	792,915	775,190	762,493
622,8715	104,790	186,288	162,588	171,171	178,314	183,119	185,273	137,470	177,993	209,794	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	422,959	723,194	726,056	722,702
623,9566	103,715	184,445	159,532	167,322	174,556	179,505	181,832	135,072	175,074	206,525	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	418,623	716,028	717,201	708,901
625,0417	104,905	190,163	160,029	167,575	173,294	177,028	179,274	133,120	172,445	203,230	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	423,426	747,126	724,142	711,147
626,1269	107,940	195,561	162,565	168,152	172,846	175,691	177,639	131,675	170,228	200,116	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	435,676	767,187	743,907	721,859
627,212	104,802	187,939	159,557	166,436	171,802	175,087	176,644	130,628	168,422	197,362	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	423,008	733,101	723,264	708,874
628,2972	101,684	182,821	156,625	164,223	170,605	174,619	175,851	129,782	166,953	195,108	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	410,424	715,304	703,039	696,025
629,3823	102,261	181,866	157,445	164,223	170,162	173,793	174,890	128,965	165,738	193,442	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	412,753	706,346	707,291	699,437
630,4674	103,821	185,456	158,922	165,359	169,896	172,440	173,636	128,120	164,750	192,391	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	419,048	721,934	717,337	705,988
631,5526	105,538	192,551	159,030	164,109	168,385	170,803	172,271	127,331	164,036	191,924	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	425,980	759,237	727,198	706,065
632,6377	100,594	180,678	152,678	160,028	165,751	169,418	171,198	126,790	163,688	191,958	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	406,024	705,930	692,888	678,508
633,7229	97,698	174,563	149,376	157,177	164,153	168,877	170,855	126,696	163,791	192,369	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	394,337	680,387	673,577	663,915
634,808	98,479	176,784	151,684	159,007	165,341	169,541	171,495	127,148	164,351	193,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	397,489	691,445	680,413	674,046
635,8932	102,272	181,601	157,380	163,811	168,525	171,349	173,039	128,076	165,257	193,711	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	412,798	704,545	707,293	699,139
636,9783	106,680	191,977	162,012	167,147	171,435	173,791	175,063	129,233	166,285	194,338	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	430,591	750,352	736,599	719,300
638,0634	105,524	191,708	160,431	167,638	172,991	176,073	176,925	130,269	167,153	194,769	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	425,924	754,063	728,014	712,852
639,1486	106,370	191,422	161,036	167,856	173,872	177,405	177,994	130,846	167,602	194,925	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	429,340	747,971	733,443	715,362
640,2337	106,798	192,185	162,830	169,407	174,502	177,299	177,883	130,761	167,486	194,779	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	431,067	751,216	737,706	723,309
641,3189	107,309	193,605	164,305	169,870	173,809	175,759	176,601	130,023	166,821	194,354	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	433,129	758,276	742,311	729,624
642,404	105,214	187,386	160,962	166,363	170,808	173,292	174,557	128,855	165,785	193,725	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	424,674	727,856	727,440	714,715
643,4891	99,380	177,837	152,601	160,501	166,700	170,716	172,411	127,617	164,665	193,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	401,124	693,768	686,080	678,299
644,5743	98,722	178,959	149,776	157,201	164,159	168,868	170,841	126,683	163,769	192,333	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	398,468	703,772	679,683	665,570
645,6594	99,579	178,130	151,291	158,656	164,482	168,300	170,308	126,317	163,333	191,860	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	401,928	694,275	685,892	672,356
646,7446	102,669	185,002	156,170	161,901	166,403	169,102	170,907	126,596	163,465	191,724	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	414,402	724,299	708,356	693,574
647,8297	102,646	184,457	157,407	163,302	168,086	170,910	172,377	127,408	164,135	192,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	414,306	721,232	709,535	699,087
648,9149	100,821	178,246	155,719	163,366	169,380	173,088	174,234	128,521	165,216	192,878	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	406,939	689,774	697,332	692,056
650	103,909	187,459	158,322	165,084	171,243	175,012	175,996	129,691	166,552	194,256	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	419,404	734,350	717,196	703,304

Histórico Temporal da Força do Vento

