

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

LUIZ SEITI HATASHITA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA QUANDO SUJEITAS A VENTOS FORTES VIA
MÉTODO ANALÍTICO FORM**

CURITIBA

Agosto 2007

LUIZ SEITI HATASHITA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA QUANDO SUJEITAS A VENTOS FORTES VIA
MÉTODO ANALÍTICO FORM**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Manoel Rodrigues Justino Filho

CURITIBA

Agosto 2007

Aos meus pais,

Hidecazu (in memorian) e Ayako

AGRADECIMENTOS

Agradeço a COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A. pela concessão de horário especial para cursar as disciplinas do Mestrado em Engenharia Mecânica da PUC/PR.

A Fundação CAPES por ter me agraciado com a bolsa de estudo e a comissão que escolheu os bolsistas pela confiança depositada em mim, com relação ao desenvolvimento de um bom trabalho acadêmico.

Ao Prof. Manuel Justino que me orientou na dissertação e em momentos difíceis do desenvolvimento do trabalho foi extremamente profissional e preciso nas tomadas de decisões, a fim de obtermos sucesso nesta empreitada. Muito obrigado!

Ao Prof. João Elias também responsável pela elaboração e orientação na dissertação, agradeço pela oportunidade que tive em aprofundar os conhecimentos em Métodos de Elementos Finitos, os quais tiveram suma importância para o desenvolvimento do trabalho. Além disto, um especial agradecimento pelo profissionalismo e coleguismo demonstrado durante todo o período do curso.

Ao Eng^o João Nelson Hoffmann da área de projetos de linhas de transmissão da COPEL, que desde o início da pesquisa foi solícito, contribuindo com materiais para pesquisa e sua experiência em projetos foi relevante para nortear o trabalho em caminhos certos e seguros.

Ao Eng^o Fabiano Szuba, meu especial agradecimento por ter repassado o seu conhecimento e experiência em projeto de estruturas, onde na conversa com ele, percebi que ainda havia muito a se descobrir e resolver.

Especial agradecimento a minha esposa Monica que foi incentivadora e sempre confiou e apoiou, para que eu tivesse êxito no curso. Agradeço também a meus filhos João Gabriel e Luís Henrique e novamente a Monica pela compreensão, por tê-los privados de muitos momentos juntos, quando estava exaustivamente dedicando-me ao trabalho do mestrado.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma metodologia para análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica - TTEE, quando as mesmas estão sujeitas às solicitações de natureza aleatória, como a intensidade da velocidade dos ventos sobre a estrutura.

O método FORM foi implementado a fim de obter-se a confiabilidade de uma TTEE, considerando-se que há uma variabilidade de natureza probabilística dos efeitos das solicitações, bem como da resistência dos perfis tipo cantoneiras que compõem a torre. As rotinas de cálculo do método foram desenvolvidas no software Matlab.

Como aplicação prática do método definido para determinação da confiabilidade da estrutura, foi escolhida uma TTEE da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

Consultaram-se as principais normas nacionais e internacionais aplicadas em projeto de linhas de transmissão de energia elétrica, os quais estabelecem critérios para definição das solicitações e resistência de uma TTEE.

Seguindo as orientações das normas de projeto definiram-se as cargas impostas à torre (peso próprio, peso dos cabos e cargas de vento) e com o software SAP 2000 foi realizada a análise do dimensionamento da mesma. Os resultados desta análise foram utilizados como dados de entrada, para a rotina computacional desenvolvida no Matlab para o cálculo da confiabilidade para todas as barras da torre.

Os resultados da análise de confiabilidade das barras foram confrontados com o estudo do dimensionamento da estrutura. A barra que apresentou o menor nível de confiabilidade, também se apresentou como a mais crítica no dimensionamento, deste modo manteve-se coerência entre os resultados da análise do dimensionamento com a análise da confiabilidade da estrutura.

ABSTRACT

The objective of this work is to present a methodology for the reliability analysis of transmission towers of electric energy - TTEE, when the same are under the action random loads such as wind loads.

Method FORM has been implemented in order to calculate the reliability of a TTEE, considering that loading and structural components strength have variabilities of probabilistic nature. The routines of calculation of the method have been implemented using the Matlab software.

A TTEE of the Companhia Paranaense de Energia – COPEL was chosen as a practical application of the methodology for structural reliability determination.

The main national and international codes for the design of transmission lines of electric energy have been consulted, which establish criteria for the definition of loads and strengths of a TTEE.

Following the rules of the design codes, applied loads were defined for the tower, namely; its proper weight, the weight of the conductors and wind loads. Analysis using the software SAP 2000 was performed to design the tower's structural members. The results of this analysis were used as input data for the computational routine developed in Matlab for the calculation of the reliability for all bars of the tower.

The results of the reliability analysis have been correlated to the sizing of the structural members. The bar that presented the lowest level of reliability was also the one that showed to be most critical in the sizing procedure. This shows coherence between results of both analyses.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1 TEMA DO ESTUDO	1
I.2 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	2
I.3 OBJETIVOS.....	4
I.4 ESCOPO	4
I.5 ORGANIZAÇÃO	4
REVISÃO DE LITERATURA.....	7
CAPÍTULO II - PROJETO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	7
II.1 TIPOS DE TORRES	7
II.2 MÉTODOS DE ANÁLISE PARA CÁLCULO DAS FORÇAS NOS MEMBROS DA ESTRUTURA ...	9
II.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O VENTO EM PROJETOS DE TTEE.....	11
II.4 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	12
II.5 PERFIL VERTICAL DAS VELOCIDADES MÉDIAS.....	13
II.6 SÍNTESE DA NBR 5422 – PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	14
II.6.1 Definições	14
II.6.2 Esforços Mecânicos	18
II.6.2.1 Tipos de esforços mecânicos a que o suporte está sujeito	18
II.6.2.2 Cargas de vento.....	18
II.6.2.3 Ação do vento nos cabos	18
II.7 IEC 60826 – DESIGN CRITERIA OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES.....	19
II.7.1 Definições	20
II.7.2 Avaliação da confiabilidade da linha.....	20
II.7.2.1 Resistência Característica Rc	21
II.7.3 Cálculo da Confiabilidade.....	22
II.7.3.1 Combinações de carga e resistência.....	22
II.7.4 Seleção do nível de confiabilidade	25
II.8 ASCE 10-97 DESIGN OF LATTICED STEEL TRANSMISSION STRUCTURES	26
II.8.1 Dimensionamento de membros da torre sob compressão	26
II.8.2 Dimensionamento de membros da torre sob tração.....	28
II.8.3 Verificação do dimensionamento de barras sob compressão	29
II.9 PARÂMETROS METEOROLÓGICOS APLICÁVEIS PARA O PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO PARANÁ.	29
II.9.1 Estatística das Séries de Vento	30
CAPÍTULO III - CONFIABILIDADE ESTRUTURAL EM ENGENHARIA	35
III.1 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	35
III.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UMA VARIÁVEL ALEATÓRIA.....	38
III.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES IMPORTANTES	39
III.3.1 Distribuição Normal ou Gaussiana.....	40
III.3.2 Distribuição Normal Padronizada	41
III.3.3 Distribuição Lognormal	43
III.3.4 Estatística de Valores Extremos	45
III.3.4.1 Distribuição de Probabilidades de Valores Extremos	45

III.3.4.2 Distribuição de Probabilidades Assintóticas	48
III.3.4.3 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo I	48
III.3.4.4 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo II	51
III.3.4.5 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo III	51
III.4 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE	52
III.5 DISTRIBUIÇÕES NORMAIS EQUIVALENTES	54
CAPÍTULO IV - MÉTODOS ANALÍTICOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL	57
IV.1 MÉTODO ANALÍTICO FORM	58
IV.1.1 Transformação das variáveis U para variáveis normais padrão V	61
IV.1.2 Determinação do ponto de projeto	63
IV.1.3 Algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM	64
IV.2 MÉTODO ANALÍTICO SORM	67
IV.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO FORM	69
APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS	75
CAPÍTULO V - ESTUDO DE CASO: TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA COPEL	75
V.1 DESCRIÇÃO DA TORRE DE TRANSMISSÃO DO ESTUDO	75
V.2 MODELAGEM GEOMÉTRICA DA TTEE	76
V.3 DEFINIÇÃO DAS CARGAS DE PROJETO	77
V.4 DEFINIÇÃO DA COMBINAÇÃO DAS CARGAS PARA AVALIAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA	83
V.5 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO E ESTABILIDADE DA TORRE	84
V.6 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DA TTEE DA COPEL	88
COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DA PESQUISA	91
CAPÍTULO VI	91
VI.1 COMENTÁRIOS FINAIS	91
VI.2 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	93
REFERÊNCIAS:	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1: Colapso de Torre de Transmissão de Energia Elétrica	2
Figura I.2: Queda de torre de transmissão de energia no Paraná em 2003.....	3
Figura II.1 - Disposição dos condutores: (a) Triangular, (b) Vertical e (c) Horizontal .	7
Figura II.2.- Função da linha: (a) Torre de suspensão e (b) Torre de ancoragem.....	8
Figura II.3 – Elemento finito de treliça tridimensional	9
Figura II.4 – Elemento finito pórtico tridimensional.....	11
Figura II.5 – Representação gráfica dos perfis de velocidade.....	14
Figura II.6 – Vão de vento e vão de peso.....	15
Figura II.7 – Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura	16
Figura II.8 – Relação entre carga e resistência	21
Figura II.9 – Relação entre carga e resistência – (a),(b),(c) e (d).....	24
Figura II.10: Cantoneira de abas iguais.....	27
Figura II.11 – Estações Meteorológicas do SIMEPAR e IAPAR.....	30
Figura II.12 – Isótacas da média das velocidades máximas anuais em m/s	31
para o período de 1989 A 2003.....	31
Figura II.13 – Velocidades básicas do vento em m/s, resolução de 30 s	32
para o período de retorno de 50 anos – terreno rugosidade B.....	32
Figura II.14 – Parâmetro alfa de Gumbel em $m^{-1}s$	33
Figura II.15 – Parâmetro beta de Gumbel em $m s^{-1}$	33
Figura III.1: função densidade de probabilidade.....	37
Figura III.2: função de distribuição acumulada.....	37
Figura III.3:Representação de $f(x)$ – f.d.p normal e $F(X)$ – f.d.a normal	40
Figura III.4: funções de densidade de probabilidade normais	41
Figura III.5:FDP normal – $N(\mu, \sigma)$	42

Figura III.6 f.d.p Lognormal	44
Figura III.7: f.d.a Lognormal	44
Figura III.8 f.d.p para valores máximos de uma variável inicial exponencial	47
Figura III.9: Definição do parâmetro de locação u	49
Figura III.10: f.d.p – Tipo I Figura III.11: f.d.a – Tipo I.....	50
Figura III.12 : f.d.p's da solicitação $f_s(S)$ e resistência $f_R(R)$	53
Figura III.13: Transformação para normal equivalente.....	56
Figura IV.1: Função de Falha	57
Figura IV.3: Função de falha pelo método FORM.....	60
Figura IV.4: Função de falha pelo método SORM/FORM	67
Figura IV.5: Corte de uma torre metálica	69
Figura V.1 – Torre de suspensão 138 kV.....	75
Figura V.2 – Representação das cargas na torre.....	77
Figura V.3: Tela do SAP 2000 para os coeficientes da carga de vento	81
Figura V.4:TTEE – Barras mais solicitadas.....	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Relação de queda de torres de transmissão no Paraná desde 1997.....	3
Tabela 2 - Escala de Intensidade da Velocidade do Vento	12
Tabela 3. - Coeficientes de rugosidade do terreno.....	16
Tabela 4- Coeficiente n	17
Tabela 5: Confiabilidade anual para quatro casos de Q x R	23
Tabela 6 - Níveis de confiabilidade versus período de retorno para cargas limites...25	
Tabela 7: Valores arbitrados para resistência e solicitações.....	70
Tabela 8: Resultados finais do processo iterativo pelo método HLRF	73
Tabela 9: Resultados finais do processo iterativo pelo método iHLRF	74
Tabela 10 - Tipos de Cantoneira da Torre	77
Tabela 11 - Cálculo do Peso dos Condutores e Pára-raios	78
Tabela 12 - Cálculo das Cargas nos Condutores e Pára-raios sob a Ação do Vento	79
Tabela 13 - Combinações de Carga.....	83
Tabela 14 - Solicitação Calculada (Pu)	86
Tabela 15 - Verificação do dimensionamento das barras	86
Tabela 16 - Esforços Internos Nominais de Projeto	89
Tabela 17 - Confiabilidade de algumas barras da TTEE	89

LISTA DE SÍMBOLOS

FORM - First Order Reliability Method

SORM - Second Order Reliability Method.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia S.A

ASCE – American Society Civil Engineer

NBR – Norma Brasileira Registrada

IEC – International Electrotechnical Commission

TTEE – Torre de Transmissão de Energia Elétrica

$V_t(z)$ - velocidade média sobre t segundos, a “z” m de altura do solo

$V_t(10)$ - velocidade média sobre t segundos, a 10 m de altura do solo

p – expoente que depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo

T - Período de Retorno

V_b - Velocidade básica do vento

V_p - Velocidade do vento de projeto

K_r – Coeficiente de rugosidade do terreno

K_d - fator que permite a conversão da velocidade em um determinado tempo de integração para outro tempo de integração

V_{10} – velocidade de vento a 10 m de altura

V_H – velocidade de vento à altura H

n – o coeficiente n depende da rugosidade do terreno e do período de integração t

A_c – Força devido a ação do vento nos cabos

q_0 - Pressão dinâmica de referência

ρ - massa específica do ar

C_{xc} – coeficiente de arrasto = 1.0

α - fator de efetividade, adimensional.

d – diâmetro do cabo em metros

Z – comprimento do vão em metros

θ - ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão

COV - Coeficiente de variação ou dispersão

COV_r - Covariância da resistência

COV_Q - Covariância da carga

$e\%$ - Limite de exclusão de uma variável
 f_Q - função densidade de probabilidade da solicitação
 f_R - função densidade de probabilidade da resistência
 F_R - função de distribuição acumulada da resistência
 Q_T - carga para um determinado período de retorno
 R_c – resistência característica
 F_a – tensão de compressão de projeto
 F_y – tensão de escoamento mínima garantida
 E – módulo de elasticidade
 L – comprimento da barra
 r – raio de giração
 k – coeficiente efetivo de comprimento
 w - largura da aba da cantoneira
 t - espessura da cantoneira
 F_t – tensão de tração de projeto
 P – força de compressão axial
 A - área da seção transversal da barra
 P_y – força de compressão de escoamento
 M_x e M_y – momento com relação ao eixo x e y respectivamente
 M_{ax} e M_{ay} – corresponde ao momento admissível em relação ao eixo x e y .
 f_{dp} – função densidade de probabilidade
 FDA – função de distribuição acumulada
 σ – desvio padrão
 μ_x – média da variável aleatória x
 λ Média da fdp lognormal
 ξ - desvio padrão da fdp lognormal
 u – parâmetro de locação da fdp assintótica Tipo I
 α – parâmetro de escala da fdp assintótica Tipo I
 R – variável aleatória resistência
 S – variável aleatória solicitação
 $G(U)$ - função de falha da variável aleatória U
 P_f – probabilidade de falha

$\Phi(\cdot)$ - distribuição cumulativa normal padrão

β - índice de confiabilidade

$F_{X_i}(x_i^*)$ - FDA original de X_i , avaliada em x_i^*

$\Phi(-)$ - FDP da distribuição normal padrão

U – variável aleatória com fdp qualquer

V – variável aleatória com fdp normal estatisticamente independente

λ - tamanho do passo a ser dado a cada iteração em busca do ponto de projeto

\mathbf{d} – vetor de direção de pesquisa

\mathbf{v}^{next} - novo ponto de projeto

\mathbf{J} – matriz Jacobiana

TOL – tolerância admitida

U^{next} – novo ponto de projeto no espaço original

a - constante e seu valor típico é igual a 0.5

\mathbf{m} - função de mérito sugerida por Zhang e Der Kiureghian

∇m - gradiente da função mérito

Rel – confiabilidade

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 Tema do Estudo

A análise de confiabilidade estrutural tem como objetivo a avaliação da segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada durante a sua vida útil. Não existe uma estrutura 100% confiável, porém o risco de falha deve estar dentro de margens aceitáveis de segurança [14].

A ocorrência de ventos fortes tem-se verificado na área de concessão da Companhia Paranaense de Energia – COPEL e também em outras regiões brasileiras. Em alguns casos tem ocasionado a queda de torres de transmissão de energia elétrica, afetando o escoamento de energia produzida pelas usinas geradoras.

Estes eventos ocorrem de forma aleatória em regiões distintas do estado do Paraná. Existem mapeamentos dos parâmetros meteorológicos como as temperaturas máximas, mínimas e velocidade básica dos ventos em todas as regiões brasileiras, os quais são utilizados pelas áreas de projetos de linhas de transmissão. Percebe-se que há uma variabilidade regional destes parâmetros meteorológicos. O parâmetro de maior interesse para a análise de confiabilidade das torres de transmissão é a velocidade do vento.

O enfoque probabilístico dado para análise da confiabilidade de estruturas se deve ao fato da maioria dos parâmetros envolvidos nos processos de danos das torres de transmissão ser de natureza aleatória, principalmente as condições ambientais.

A variável climática a ser considerada na análise de confiabilidade é a carga devido ao vento sobre as torres de transmissão de energia. Deve ser considerados a velocidade máxima anual e também o período de retorno do evento da velocidade de ventos fortes.

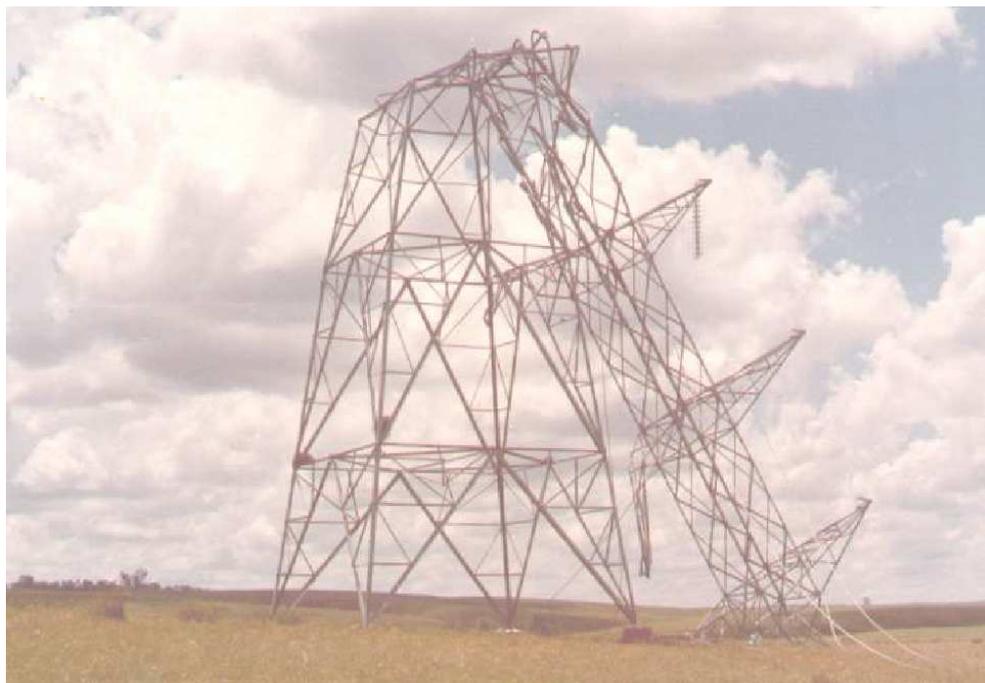


Figura I.1: Colapso de Torre de Transmissão de Energia Elétrica

A figura I.1 é um exemplo de como uma torre de transmissão de energia pode entrar em colapso, quando os efeitos das solicitações sobre a torre superam as resistências de projeto da mesma.

I.2 Motivação para o desenvolvimento do trabalho

Serão relacionados abaixo, alguns eventos recentes que levaram ao colapso torres de transmissão de energia na região do estado do Paraná, os quais mostram que as ocorrências destes eventos não são tão raras e causam sérios prejuízos, principalmente pela interrupção do fornecimento de energia.

Os fatos relacionados de ocorrência destes eventos serviram como fator de motivação para a investigação da confiabilidade de estruturas metálicas, com aplicação específica para torres de transmissão de energia.

A tabela 1 adiante mostra os municípios de ocorrência da queda das torres, os nomes das linhas de transmissão, o nível de tensão das linhas, a quantidade de torres que caíram e a data dos acontecimentos.

Tabela 1: Relação de queda de torres de transmissão no Paraná desde 1997.

MUNICÍPIO	LINHA DE TRANSMISSÃO	TENSÃO (kV)	QUANT. TORRES	DATA
Laranjeiras do Sul	Quedas do Iguaçu – Laranjeiras do Sul	69	1	06/97
Cianorte	Cianorte - Maringá	138	2	09/97
Campo Mourão	Santos Dumont - Cianorte	138	3	10/99
Cianorte	Cianorte - Maringá	138	3	08/00
Capitão Leônidas Marques	Salto Caixas – Salto Santiago	500	2	07/01
Capitão Leônidas Marques	Salto Caixas – Salto Santiago	500	2	10/01
Campo Mourão	Santos Dumont - Cianorte	138	9	10/02
Campo Largo	Bateias – Ponta Grossa Norte	230	3	07/03
Campo Largo	Bateias – Ponta Grossa Norte	230	2	10/03
Assis Chateaubriand	Cascavel – Assis Chateaubriand	138	10	05/04
Assis Chateaubriand	Assis Chateaubriand - Umuarama	138	2	10/05
Medianeira	Medianeira – Santa Helena	138	1	10/05
Cascavel	Cascavel - Olimpico	138	2	09/06
Cascavel	Cascavel - Toledo	138	2	09/06
Ponta Grossa	Figueira – Ponta Grossa Norte	230	6	11/06



Figura I.2: Queda de torre de transmissão de energia no Paraná em 2003

Outra motivação foi o desafio em quantificar a confiabilidade de uma estrutura metálica quando as variáveis solicitações (força do vento, peso da estrutura) e também a resistência dos membros da torre têm o seu comportamento representado por funções densidade de probabilidades.

A seguir serão apresentados os objetivos, o escopo do trabalho e a

organização dos capítulos que compõem esta dissertação.

I.3 Objetivos

Estabelecer uma metodologia usando o método FORM, para análise de confiabilidade de estruturas metálicas sob o enfoque probabilístico, quando as mesmas estão sujeitas as solicitações de natureza aleatória, como a intensidade da velocidade dos ventos e também se considerando a variabilidade do peso e da resistência da estrutura.

Selecionar um tipo de torre de transmissão de energia elétrica da COPEL e aplicar o método de análise de confiabilidade estabelecido.

Gerar uma ferramenta computacional baseada em confiabilidade estrutural para análise de estruturas metálicas.

I.4 Escopo

Estabelece uma metodologia para análise de confiabilidade de torres metálicas utilizando-se o método analítico FORM (First Order Reliability Method).

A análise foi executada para uma estrutura estática, elástica linear e o equilíbrio foi estudado na sua configuração indeformada, apesar da solicitação causada por ventos fortes na estrutura possuir comportamento dinâmico. Não se considerou o efeito da variável temperatura neste trabalho.

I.5 Organização

O capítulo II apresenta os aspectos relevantes sobre projetos de torres de transmissão de energia elétrica, com relação ao dimensionamento da estrutura e também apresenta uma síntese das principais normas nacionais e internacionais que são utilizadas em projetos de linhas e torres de transmissão de energia elétrica. Abaixo se relacionam os principais tópicos do capítulo II:

- Método de análise para cálculo de forças para os membros da estrutura;
- Considerações sobre o vento em projetos de estruturas de transmissão de energia;

- NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica;
- IEC 60826 – Design Criteria of Overhead Transmission Lines;
- ASCE 10-97 – Design of Latticed Steel Transmission Structures.
- Parâmetros meteorológicos utilizados em projetos;

No capítulo III apresentam-se definições fundamentais da teoria da confiabilidade estrutural e também alguns aspectos conceituais sobre a teoria de probabilidades que são necessários na análise de confiabilidade de estruturas metálicas. Alguns tópicos deste capítulo são destacados abaixo:

- Variáveis aleatórias e seus principais descritores;
- Distribuições de probabilidades mais usuais;
- Avaliação da confiabilidade;
- Distribuições normais equivalentes.

No capítulo IV fez-se a explanação dos métodos analíticos para a avaliação da confiabilidade estrutural. Apresentam-se os métodos analíticos FORM (First Order Reliability Method) e SORM (Second Order Reliability Method). O método FORM foi mais detalhado, pois este método é utilizado para a avaliação da confiabilidade da estrutura em estudo. Apresenta-se um algoritmo onde se mostra passo a passo a aplicação do método FORM. Nesse capítulo destacam-se os seguintes tópicos:

- Método analítico FORM;
- Transformação de variáveis aleatórias quaisquer para variáveis normais padrões;
- Determinação do ponto de projeto – algoritmo HLRF e iHLRF;
- Algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM;
- Exemplo de aplicação do método FORM.

No capítulo V é apresentado um estudo de caso de análise de confiabilidade

para um tipo de torre de transmissão de energia elétrica da COPEL. Faz-se a modelagem geométrica da torre escolhida para estudo, verificação do dimensionamento da estrutura em função da combinação de carga imposta à torre e finalmente a aplicação do método analítico FORM para avaliação da confiabilidade desta torre. Destacam-se os seguintes tópicos deste capítulo:

- Modelagem geométrica da torre de transmissão da COPEL;
- Definição das cargas de projeto e suas combinações;
- Verificação do dimensionamento e estabilidade da torre;
- Análise da confiabilidade da torre de transmissão de energia COPEL.

O capítulo VI apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO DE LITERATURA

CAPÍTULO II - PROJETO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar aspectos relevantes sobre projeto de torres de transmissão de energia elétrica no tocante às variáveis que influenciam no dimensionamento destas estruturas, os quais são responsáveis por suportar as linhas de transmissão de energia elétrica.

Para efeito de simplificação da redação, toda vez que for necessário mencionar torres de transmissão de energia elétrica será escrito a sigla TTEE.

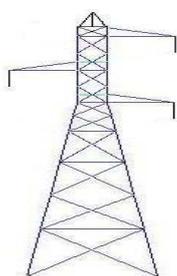
Os projetos de TTEE seguem orientações de normas brasileiras e estrangeiras, bem como tecnologia das empresas transmissoras de energia elétrica.

Será apresentada uma síntese das principais normas e considerações sobre o vento em projetos de TTEE.

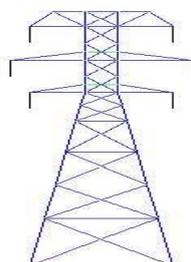
II.1 Tipos de torres

As torres de transmissão de energia elétrica podem ser classificadas quanto à disposição dos condutores, quanto ao número de circuitos e quanto à função na linha.

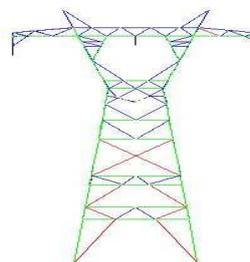
- Quanto à disposição dos condutores podem ser:



(a)



(b)



(c)

Figura II.1 - Disposição dos condutores: (a) Triangular, (b) Vertical e (c) Horizontal

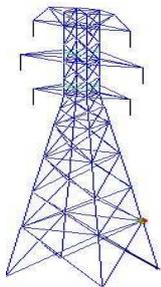
Os condutores são fixados na extremidade dos isoladores, os quais estão representados nas torres acima, como barras verticais e estas por sua vez estão fixadas nos braços das torres que são chamadas de mísulas.

A figura II.1 (a) os condutores estão dispostos triangularmente, pois dois condutores estão dispostos do lado direito e um no lado esquerdo e deste modo formam geometricamente um triângulo. Quanto a figura II.1 (b), esta torre possui três condutores do lado esquerdo e três do lado direito. Como se observa pela figura, em ambos os lados os condutores estão dispostos verticalmente. A figura II.1 (c) os três condutores estão linearmente dispostos na horizontal.

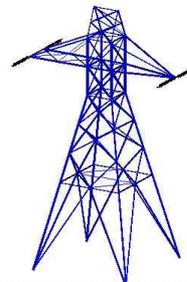
- Quanto ao número de circuitos podem ser classificadas:

A Figura II.1.(a) e II.1.(c) são torres de circuito simples e estes são representados por três condutores de energia. A figura II.1.(b) é uma torre de circuito duplo, pois apresenta um circuito com três condutores do lado esquerdo da torre e outros três pelo lado direito.

- Quanto à função da linha:



(a)



(b)

Figura II.2.- Função da linha: (a) Torre de suspensão e (b) Torre de ancoragem

A figura II.2.(a) representa uma estrutura de suspensão e observa-se que os isoladores onde são fixados os cabos condutores e o cabo pára-raios estão na posição vertical. Esse tipo de torre geralmente é mais utilizado em redes de transmissão em traçados sem ângulos.

A figura II.2.(b) representa uma torre de ancoragem e nota-se que os isoladores estão na posição horizontal e geralmente são utilizadas em final de linha

ou entre duas torres de suspensão. São estruturas mais robustas e podem evitar o efeito cascata de queda de torres.

Estruturas em ângulo são utilizadas onde ocorra a mudança de direção da linha.

Estrutura de derivação serve para derivar uma outra linha desta torre.

Estruturas de transposição são utilizadas para assegurar a simetria entre as fases, quando da rotação das fases.

- Quanto ao nível de tensão elétrica da linha

No Brasil as tensões utilizadas são: 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV e 765 kV.

II.2 Métodos de análise para cálculo das forças nos membros da estrutura

As torres de transmissão de energia podem ser modeladas computacionalmente pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com elementos de treliça tridimensional. Este elemento está representado pela figura II.3:

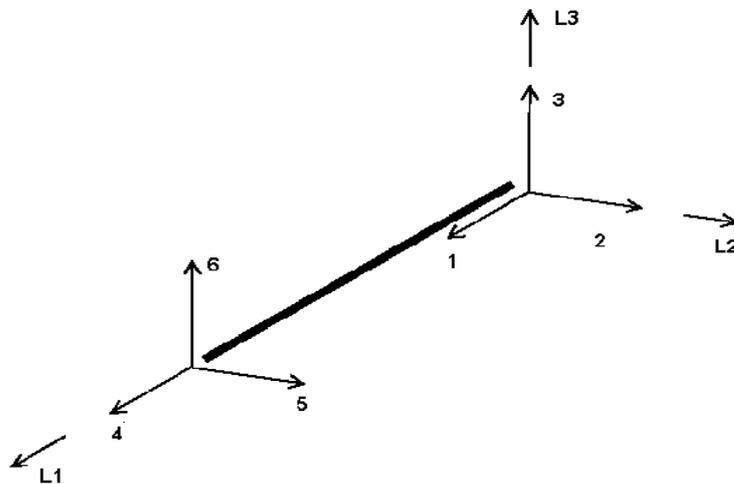


Figura II.3 – Elemento finito de treliça tridimensional

Observa-se pela figura que este elemento possui seis graus de liberdade e a análise utilizando-se este tipo de elemento produz como resultados, deslocamentos nodais, tensões de compressão e tração nos membros. A adoção deste modelo é indicada no Guide for Design of Steel Transmission Tower da ASCE (American

Society of Civil Engineer), pois os momentos existentes nos membros da torre são desprezíveis comparando-se com os esforços causados pelas forças axiais de tração e compressão. Os momentos causados são devido à excentricidade da barra, cargas de peso próprio, forças laterais devido ao vento e outros. As torres são analisadas praticamente como treliças ideais.

A modelagem com treliças espaciais pode sofrer dificuldades de cálculo dos esforços quando ocorrer a existência de nós hipoestáticos no modelo de torre [11].

Os nós hipoestáticos aparecem devido à existência de barras concorrentes situadas em um mesmo plano e não possuem rigidez na direção normal ao plano. Estes nós hipoestáticos provocam singularidade na matriz de rigidez. Para solução deste problema na modelagem, podem-se adotar alguns recursos tais como:

- Adição física de barras fictícias – esta barra fictícia deve ser inserida, unindo o nó hipoestático a outro nó da estrutura de tal forma que a barra criada não permaneça no mesmo plano onde está o nó hipoestático. A barra fictícia deve ter baixa rigidez, de tal modo que ela não interfira na determinação das ações sofridas pelas barras adjacentes a ela. Em estruturas complexas, com grande número de barras, este método se torna inviável, caso seja inserido manualmente. O programa deve estar preparado para encontrar estes nós e criar as barras fictícias de forma automática.
- Adição simulada de barras fictícias – o programa identifica a singularidade na matriz de rigidez causada por um nó hipoestático e através de um algoritmo simula a criação de uma barra fictícia, eliminando a singularidade na matriz de rigidez.
- Modelagem da estrutura como pórtico espacial – esta modelagem suprime total ou parcialmente as rótulas e as substitui por ligações rígidas. Através desta técnica, aumenta-se o número de graus de liberdade comparativamente ao da treliça espacial e conseqüentemente o tempo de processamento.

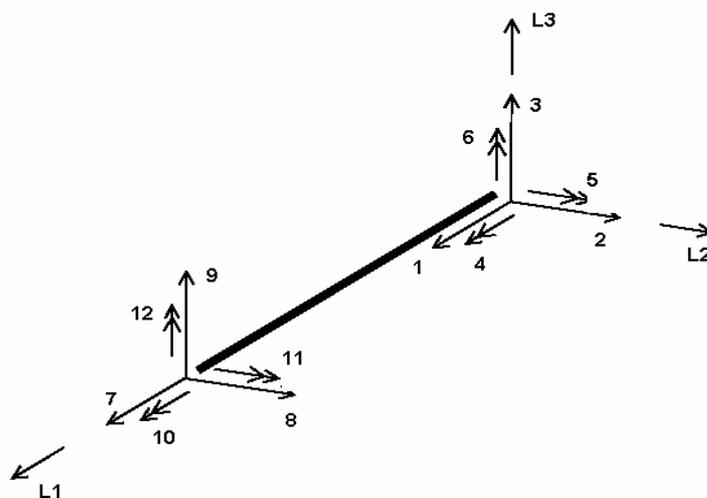


Figura II.4 – Elemento finito pórtico tridimensional

Observa-se pela figura II.4 que este elemento possui doze graus de liberdade, sendo seis deles ocasionando momentos na barra, representado pelos graus 4, 5, 6, 10, 11 e 12. Quanto aos demais graus de liberdade causam deslocamentos nodais e forças de compressão ou tração.

II.3 Considerações sobre o vento em projetos de TTEE

O vento é responsável em provocar carregamentos diretos sobre a TTEE e sobre os cabos. De forma indireta, os esforços dinâmicos sobre os cabos são transmitidos à torre. As normas indicam como devem ser considerados os esforços causados pela força do vento. Posteriormente, será abordado este tópico quando serão analisadas as diversas normas sobre projetos de TTEE e de estruturas metálicas.

É importante saber que o vento é o movimento do ar sobre a superfície terrestre e têm como causa principal, a diferença na pressão atmosférica causadas pela energia proveniente do sol, que origina variações na temperatura do ar [38]. Devido ao desequilíbrio de pressões, são originadas forças que deslocam parte do ar atmosférico das zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão [37].

As percepções de ventos fortes ou fracos podem ser classificadas de acordo com a escala de intensidade das velocidades dos ventos os quais estão apresentados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Escala de Intensidade da Velocidade do Vento

Intensidade	Velocidade	
	km/h	m/s
Fraco	0 - 9	0 - 2.5
Leve	10-40	2.8 - 11.1
Moderado	41-60	11.4 - 16.7
Forte (Vendaval)	61-90	16.9 - 25
Muito Forte	maior 91	maior 25.3
Furacão	maior 115	maior 31.9

Fonte: University of Western Ontario, London, Canada, <http://www.blwtl.uwo.ca>

Neste trabalho serão analisados os ventos fortes que ocorrem no Brasil, focando especificamente sobre o estado do Paraná.

Na engenharia estrutural é importante conhecer sobre a velocidade média do vento e as flutuações em torno desta média. As determinações das velocidades médias são obtidas em função de um histórico de observações de no mínimo 20 a 25 anos. A velocidade média é obtida para um intervalo de tempo de 10 minutos e 1 hora. As flutuações em torno da média em intervalos na ordem de segundos são denominadas de rajadas de vento.

Neste trabalho foram obtidas as máximas velocidades médias do vento ou velocidade básica do vento do “Mapeamento de Isótagas no Brasil” da norma NBR 5422. Esta pesquisa foi regionalizada para o estado do Paraná, pois o estudo de caso de confiabilidade de uma TTEE foi para uma estrutura da Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Também se buscaram informações mais recentes sobre mapeamentos de velocidades básicas de ventos sobre o estado do Paraná.

II.4 Parâmetros de rugosidade da superfície terrestre

A rugosidade da superfície terrestre influi na ação dos ventos sobre a estrutura e conseqüentemente, nos esforços por eles causados. Estas rugosidades são representadas por obstáculos naturais ou criadas artificialmente.

As rugosidades são caracterizadas pela forma, dimensões e densidade dos elementos, tais quais: terrenos naturais e cultivados, vegetação rasteira e alta, bosques, florestas, lagos, mares, muros, casas, edifícios e outros.

A força de arrasto causada pela rugosidade superficial ocasiona a frenagem do vento junto à superfície. Quanto mais rugosa a superfície terrestre, maior a turbulência, altura da camada limite atmosférica e a frenagem do vento. Exemplificando: Em uma cidade, a velocidade média será menor e a turbulência será maior a uma dada altura acima do terreno, do que em um campo aberto.

Deste modo, as normas aplicáveis a projetos de linhas de transmissão de energia elétrica, quantificam coeficientes de rugosidade por tipo de terreno.

II.5 Perfil vertical das velocidades médias

A lei de potencial pode ser adotada como sendo o perfil vertical da velocidade média a grandes intervalos de tempo (10 min, 1h) e também aplicável em curtos espaços de tempo. A expressão que representa esta lei que é válida dentro da camada limite atmosférica é:

$$\bar{V}_t(z) = \bar{V}_t(10) \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (\text{II.1})$$

Onde,

$\bar{V}_t(z)$ - velocidade média sobre t segundos, a “z” m de altura do solo;

$\bar{V}_t(10)$ - velocidade média sobre t segundos, a 10 m de altura do solo;

p – expoente que depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo

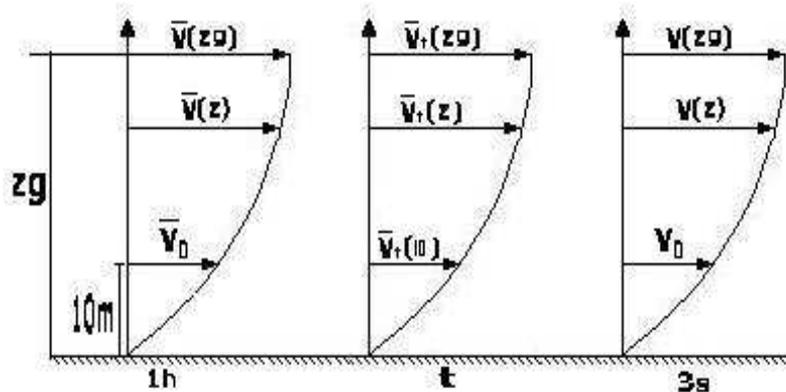


Figura II.5 – Representação gráfica dos perfis de velocidade

A figura II.5 mostra o perfil vertical da velocidade do vento para um período de integração de 1 hora, 3 s e um período genérico t , respectivamente.

A seguir apresentar-se-ão as principais normas aplicadas em projeto de linhas de transmissão de energia elétrica, atendo-se aos tópicos principais, dos quais este trabalho faz uso. Caso haja necessidade de maiores detalhes, as normas podem ser consultadas em sua íntegra em suas respectivas entidades responsáveis mantenedoras.

II.6 Síntese da NBR 5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica

A origem da norma é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Esta norma tem como objetivo fixar condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima acima de 38 kV e não superior a 800 kV, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas.

II.6.1 Definições

- Vão de vento (de um suporte) – média aritmética dos vãos adjacentes ao suporte, representada algebricamente pela equação $(d_1+d_2)/2$, conforme se observa na figura II.6 adiante;

- Vão de peso (de um suporte) – distância entre os pontos com tangente das catenárias dos vãos adjacentes ao suporte (d_3);

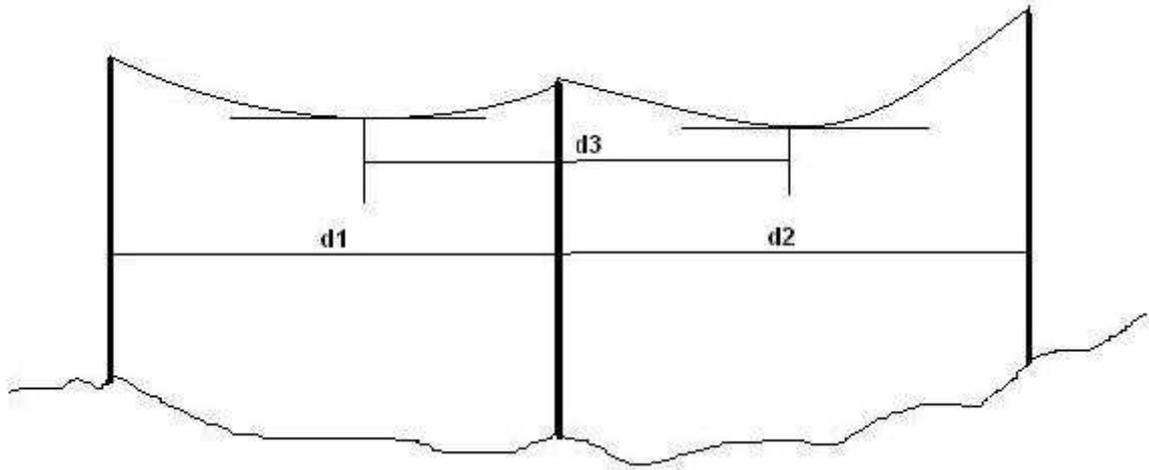


Figura II.6 – Vão de vento e vão de peso

A figura II.6 mostra as distâncias a serem consideradas no cálculo dos vãos de vento e vãos de peso.

- Período de Retorno (T) – Intervalo médio de ocorrências sucessivas de um mesmo evento durante um período de tempo indefinidamente longo;
- Velocidade básica do vento (V_b) – Velocidade do vento referida a um período de retorno de 50 anos, a 10 m de altura do solo, com período de integração de 10 minutos e medida em um terreno com grau de rugosidade B ;
- Velocidade do vento de projeto (V_p) – Valor determinado a partir da velocidade básica do vento (V_b), corrigida de modo a levar em conta o grau de rugosidade da região de implantação da linha, o intervalo de tempo necessário para que o obstáculo responda à ação do vento, a altura do obstáculo e o período de retorno adotado;
- Correção da rugosidade – Quatro categorias de terreno são aqui definidas com seus respectivos coeficientes de rugosidade (K_r), obtidos na tabela 3 abaixo:

Tabela 3. - Coeficientes de rugosidade do terreno

Categoria do Terreno	Características do terreno	Coeficiente de rugosidade Kr
A	Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos	1.08
B	Terreno aberto com poucos obstáculos	1.00
C	Terreno com obstáculos numerosos e pequenos	0.85
D	Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas	0.67

Fonte: NBR 5422

- Correção do período de integração (t)

A figura II.7 apresenta o fator de correção K_d entre os valores médios de vento a 10 metros de altura do solo, para diferentes períodos de integração e rugosidade de terrenos. O K_d é o fator que permite a conversão da velocidade de um determinado tempo de integração para outro tempo de integração, que está sob o eixo das ordenadas.

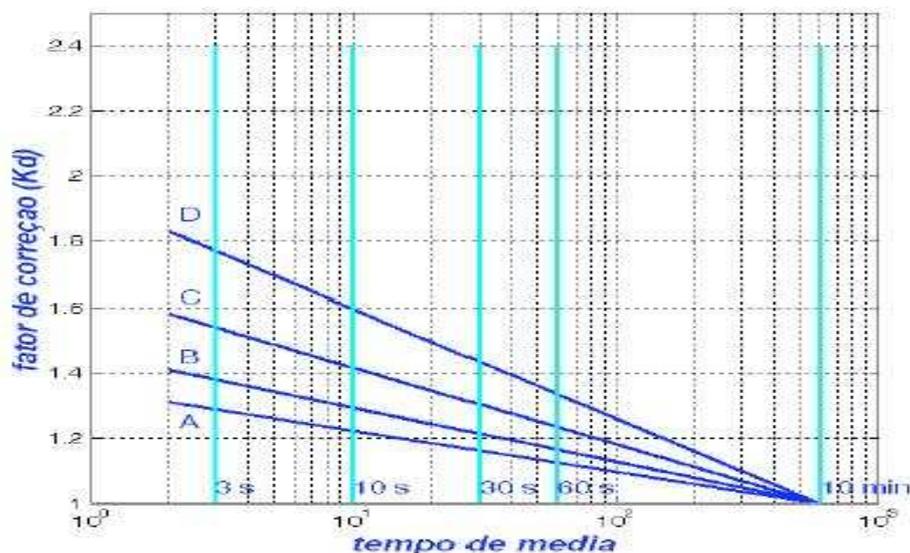


Figura II.7 – Relação entre as velocidades médias a 10 m de altura

A figura II.7 mostra no eixo das abscissas o tempo de integração que varia de 3 s a 10 minutos.

- Correção de altura

A correção da velocidade de vento para alturas diferentes é dada pela fórmula:

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (II.2)$$

Onde:

V_{10} – velocidade do vento a 10 m de altura;

V_H – velocidade do vento à altura H

n – coeficiente que depende da rugosidade do terreno e do período de integração t, conforme a tabela 4 abaixo:

Tabela 4- Coeficiente n

Categoria do Terreno	n	
	t = 2 s	t = 30 s
A	13	12
B	12	11
C	10	9.5
D	8.5	8

Fonte: NBR5422

- Velocidade do vento de projeto

$$V_p = K_r K_d \left(\frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{n}} V_b \quad (II.3)$$

onde:

K_r – coeficiente de rugosidade por tipo de terreno;

K_d – fator de conversão do tempo de integração;

V_b – velocidade básica do vento.

Parâmetros que afetam a determinação de V_p :

- 1) Período de integração:

Adoção de 2 segundos para a ação do vento nos suportes e nas cadeias de isoladores;

Adoção de 30 segundos para a ação do vento nos cabos.

- 2) Período de retorno:

Adoção do valor mínimo de 50 anos para as cargas de vento utilizadas para dimensionamento mecânico dos suportes.

II.6.2 Esforços Mecânicos

II.6.2.1 Tipos de esforços mecânicos a que o suporte está sujeito

- 1) Cargas de vento: atuam sobre os suportes, cadeia de isoladores e cabos;
- 2) Cargas permanentes: peso dos cabos, ferragens e esforços transversais devido aos cabos em suportes de ângulo e de ancoragem;
- 3) Cargas especiais: ocorrem durante a construção e manutenção da linha.

II.6.2.2 Cargas de vento

- Pressão dinâmica de referência (q_0)

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho V_p^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{II.4})$$

Onde: ρ - massa específica do ar, em kg/m^3

V_p - velocidade de vento de projeto em m/s .

II.6.2.3 Ação do vento nos cabos

A ação do vento nos cabos é determinada pela seguinte fórmula:

$$A_c = q_0 C_{xc} d \frac{Z}{d} \text{sen}^2 \theta \quad (\text{N}) \quad (\text{II.5})$$

Onde:

q_0 - pressão dinâmica de referência;

C_{xc} - coeficiente de arrasto = 1.0;

α - fator de efetividade adimensional;

d - diâmetro do cabo em metros;

Z - comprimento do vão em metros;

θ - ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão;

II.7 IEC 60826 – Design criteria of overhead transmission lines

A sigla IEC significa Comitê Internacional de Eletrotécnica que foi fundada em 1906 em Londres. É uma organização mundial composta de 51 países que prepara e publica padrões internacionais com relação a assuntos sobre a tecnologia em eletricidade e eletrônica.

A norma IEC 60826 trata de critérios sobre projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, terceira edição com atualização em 2003. Da mesma forma como foi tratado na NBR 5422 serão colocados os tópicos importantes para a elaboração deste trabalho.

Esta norma recomenda métodos probabilísticos para projeto de linhas de transmissão de energia elétrica em vez dos métodos determinísticos, porque existe uma variabilidade tanto nas cargas de solicitação como na resistência dos membros da estrutura, de tal forma que não é possível garantir 100 % de confiabilidade.

Esta norma parte de um determinado nível de confiabilidade desejado e propõe técnicas para assegurar que este nível de confiabilidade escolhido seja atingido.

A confiabilidade alvo depende do período de retorno adotado para o projeto (50, 150 e 500 anos) de eventos climáticos.

Apesar de existir uma formulação para determinação da velocidade básica do vento, existe uma incerteza em fatores que são adotados para determinar estas velocidades. Há também incertezas nos fatores adotados relativos ao tipo de terreno.

A IEC 60826 aplica-se para linhas de transmissão com tensões nominais acima de 45 kV.

A proposta desta norma é apresentar uma relação entre cargas impostas nas linhas de transmissão e a resistência dos componentes desta linha, de tal modo a obter um projeto econômico e seguro.

II.7.1 Definições

- Resistência Característica (R_c)

Este valor é chamado de resistência garantida, resistência mínima, carga mínima de falha e corresponde a um limite de exclusão de 2% a 5%, sendo 10% o limite superior adotado na prática;

- Coeficiente de variação ou dispersão (COV)

É a relação entre o desvio padrão e a média. O COV da resistência e carga são respectivamente denotados por COV_R e COV_Q ;

- Limite de exclusão ($e\%$) de uma variável

O valor de uma variável tomada de uma função de distribuição de probabilidade e corresponde a uma probabilidade de $e\%$ de não ser excedido;

- Confiabilidade estrutural

É uma medida de sucesso de um sistema para executar uma determinada função. O complemento da confiabilidade é a probabilidade de falha;

II.7.2 Avaliação da confiabilidade da linha

A confiabilidade de uma linha pode ser assegurada seguindo os seguintes procedimentos:

- a) Para cada tipo de carga climática estabelecer uma função densidade de probabilidade, f_Q . Esta função é ajustada para refletir a máxima intensidade de carregamento que pode ocorrer dentro de um espaço coberto pela linha;
- b) Estabelecer uma função densidade acumulada de probabilidade para a resistência F_R da linha ou sistema;
- c) Definir a posição relativa das duas curvas f_Q e F_R . Esta posição relativa pode ser definida por uma carga cuja probabilidade de ocorrência $1/T$ é ajustada para uma resistência com 10% de limite de exclusão, ou de forma analítica:

$$Q_T = (10\%) R$$

(II.6)

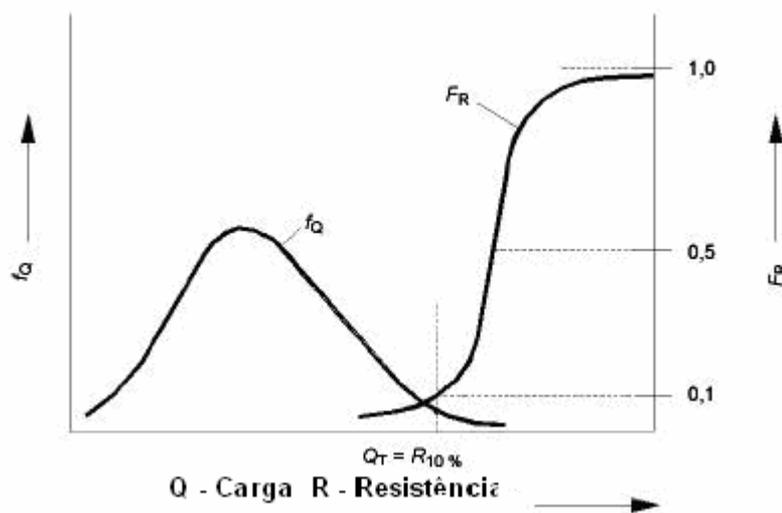


Figura II.8 – Relação entre carga e resistência

Na figura II.8 f_Q é a função densidade de probabilidade de cargas máximas anuais, F_R é a função de distribuição acumulada da resistência e Q_T é a carga para um determinado período de retorno, no caso 50 anos.

Esta figura II.8 representa a posição relativa da função densidade de probabilidade da carga com relação à função de distribuição acumulada da resistência. As funções F_R e f_Q são arranjadas de tal forma que a carga Q_T para um período de retorno de T é igual à resistência com um limite de exclusão de 10% ($F_R=0.1$).

II.7.2.1 Resistência Característica R_c

A resistência característica R_c é o valor garantido ou simplesmente um valor especificado em padrões relevantes. Para estabelecer a resistência característica, dois casos são considerados:

- Sem testes – muitos componentes são especificados para padrões nacionais, utilizando as resistências nominais, mínimas ou garantidas.
- Com testes – sempre que os testes são ajustados para determinar a resistência de um componente e a distribuição estatística, a resistência característica pode ser obtida dos resultados dos testes, após os cálculos de \bar{R} (resistência média) e

COV_R (covariância). A resistência R para uma limite de exclusão de $e(\%)$ pode ser obtida da distribuição estatística. Para uma distribuição normal para a resistência tem-se:

$$R_e \% = \bar{R}(1 - u_e COV_r) \quad (II.7)$$

O fator u_e é a variável da distribuição de Gauss $F_R(u)$ que corresponde para o limite de exclusão e . É o número do desvio padrão da variável R abaixo do valor médio de R .

Por exemplo: $F_R(u_e) = \frac{e(\%)}{100} \quad (II.8)$

$$e = 2\% \quad u_e = 2.054$$

$$e = 5\% \quad u_e = 1.645$$

$$e = 10\% \quad u_e = 1.282$$

Portanto, para um limite de exclusão de 10% corresponde a um desvio padrão abaixo da média de 1,28. Deste modo tem-se:

$$R_c = (10\%)R \quad (II.9)$$

$$R_c = \bar{R}(1 - 1,28 COV_r) \quad (II.10)$$

II.7.3 Cálculo da Confiabilidade

II.7.3.1 Combinações de carga e resistência

A confiabilidade depende dos parâmetros de carga Q e resistência R . Abaixo são admitidos quatro casos hipotéticos:

- a) carga (Q) e resistência (R) têm valores constantes;
- b) carga (Q) é constante e resistência (R) variável;
- c) carga (Q) é variável e resistência (R) tem valores constantes;
- d) carga (Q) e resistência (R) têm valores variáveis;

Os valores da confiabilidade para estes casos são apresentados na tabela 5 a seguir apresentado:

Tabela 5: Confiabilidade anual para quatro casos de Q x R

Caso	Carga Q			Resistência R			Confiabilidade Rel
	Valor Médio	COV	Carga Projeto	Valor Médio	COV	Resistência Projeto	
a)	Q = constante	0	Q	R = constante	0	R>Q	1.0
b)	Q = constante	0	Q	\bar{R}	COV _r	$\bar{R}(1 - u_e v_r)$	$1 - \int_{-\infty}^{R_c} f_R dL$
c)	\bar{Q}	COV _Q	Q _T	R = constante	0	R	$1 - \int_{Q_T}^{+\infty} f_Q dL$
d)	\bar{Q}	COV _Q	Q _T	\bar{R}	COV _r	$\bar{R}(1 - u_e v_r)$	$1 - \int_{-\infty}^{+\infty} f_Q F_R dL$

Fonte: IEC 60826

f_Q – função densidade de probabilidade da solicitação Q

F_R – função distribuição acumulada da resistência

Q_T – carga correspondente ao período de retorno T.

Será visto no capítulo III que a probabilidade de falha é dada pela seguinte equação:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) f_Q(s) dr dq = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(r) f_Q(q) dq$$

e a confiabilidade definida por:

$$Rel = 1 - P_f$$

Rel - Confiabilidade

Para a obtenção da confiabilidade no caso “a”, com R e Q constantes e se R>Q a confiabilidade é 1,0 ou 100%;

Para o caso “b”, como Q é constante e R variável, o Q sai do integrando e a pf é calculada em função de f_R como aparece na expressão resultante da tabela acima;

Para o caso “c”, como R é constante e Q variável, o R sai do integrando e a Pf é calculada em função de f_Q de acordo com a expressão resultante da tabela acima;

Para o caso “d”, como Q e R estão variando e a Pf é calculada em função de f_Q e F_R e a confiabilidade é obtida conforme a expressão resultante da tabela acima, sendo o caso mais genérico.

Estes casos podem ser representados graficamente conforme será exposto a seguir.

A confiabilidade anual dada na tabela 5 acima aplicado para projetos com limite de exclusão de 10% pode ser representado pela figura II.6 abaixo:

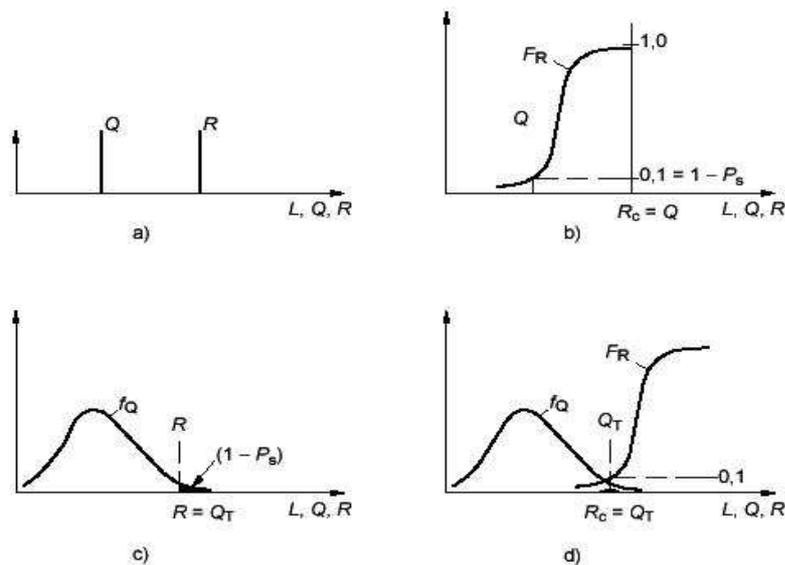


Figura II.9 – Relação entre carga e resistência – (a),(b),(c) e (d)

Da figura II.9 observa-se:

- a) Carga Q e resistência R são constantes, $R > Q$;
- b) Carga Q é constante e a resistência R é variável, logo: $\bar{R} \cdot (1 - u_e \cdot v_r) = Q$;
- c) Carga Q é variável e resistência R é constante, logo: $R = Q_T$;
- d) Carga Q e resistência R são variáveis, tem-se: $\bar{R} \cdot (1 - u_e \cdot v_r) = Q_T$;

II.7.4 Seleção do nível de confiabilidade

Linhas de transmissão podem ser projetadas com diferentes níveis de confiabilidade dependendo das características do local, bem como da importância desta linha no sistema de transmissão da empresa. Projetistas podem adotar níveis de confiabilidade obtidos de linhas existentes, que têm apresentado bom desempenho historicamente. A norma recomenda que, para todos os casos, pelo menos o nível de confiabilidade para um período de retorno de 50 anos deve ser atendido.

O grau de importância a ser definido para diversos tipos de linhas de transmissão pode seguir as seguintes regras:

- a) A norma recomenda um nível de confiabilidade para um período de retorno de 150 anos para linhas de transmissão com tensão até 230 kV. Pode ser adotado para níveis inferiores de tensão, desde que a linha seja a principal fonte de alimentação à carga importante;
- b) A norma recomenda um nível de confiabilidade para um período de retorno de 500 anos para linhas de transmissão com tensão superior a 230 kV e cuja linha seja a principal fonte de alimentação à carga relevante.

Na tabela abaixo, relacionam-se o nível de confiabilidade e o período de retorno para cargas limites recomendados pela norma.

Tabela 6 - Níveis de confiabilidade versus período de retorno para cargas limites

Período de retorno para cargas limites em anos	50	150	500
Nível mínimo de confiabilidade	0.98 a 0.99	0.993 a 0.997	0.998 a 0.999
Probabilidade de falha anual	0.02 a 0.01	0.0067 a 0.0033	0.002 a 0.001

Assim como na NBR 5422 a IEC 60826 adotam parâmetros de rugosidade do terreno, fator de conversão do período de integração e outros dados que foram mencionados na NBR 5422 que podem ser consultados diretamente na norma. Objetivou-se mostrar os tópicos mais importantes que embasam o desenvolvimento deste trabalho.

II.8 ASCE 10-97 Design of Latticed Steel Transmission Structures

Assim como a IEC 60826, a ASCE 10-97 é muito utilizada em projetos de torres de transmissão de energia elétrica. Em 1971, a American Society of Civil Engineers publicou o Guia para Projeto de Torres de Transmissão em Aço. Este manual serviu como base para a norma ASCE 10, que teve sua primeira edição em 1991. Esta norma especifica requisitos para projeto, fabricação e teste dos membros e conectores das estruturas de transmissão. Estes requisitos são aplicados para aços laminados a quente e conformados a frio.

Para o dimensionamento das barras da torre é utilizado o método dos estados limites, que é a aplicação de fatores de ponderação nas cargas solicitantes nominais, bem como diversas combinações entre fatores e cargas. A verificação do dimensionamento das barras é feita através da comparação destas solicitações ponderadas e combinadas com a resistência de cálculo das barras.

Neste tópico serão abordados aspectos relativos ao dimensionamento das barras da torre, os quais foram objetos de estudo deste trabalho.

II.8.1 Dimensionamento de membros da torre sob compressão

A tensão de compressão de projeto F_a é a tensão admissível a ser calculada para que a barra não entre em colapso quando em compressão, e é obtida pelas equações abaixo:

$$\text{Peças curtas} \Rightarrow \text{Se } \frac{KL}{r} \leq C_c \quad F_a = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{KL}{r}}{C_c} \right)^2 \right] F_y \quad (\text{II.11})$$

ou

$$\text{Peças longas} \Rightarrow \text{Se } \frac{KL}{r} > C_c \quad F_a = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (\text{II.12})$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (II.13)$$

Onde: F_a – tensão de compressão de projeto;
 F_y – tensão de escoamento mínima garantida;
 E – módulo de elasticidade;
 L – comprimento da barra;
 r – raio de giração;
 K – coeficiente efetivo de comprimento;
 C_c – Índice crítico de flambagem de colunas

Para evitar a flambagem localizada, deve-se também verificar a máxima relação w/t

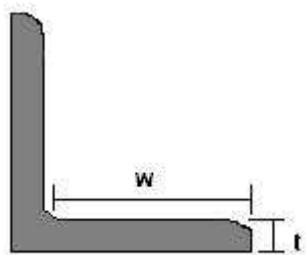


Figura II.10: Cantoneira de abas iguais

A figura II.10 representa um tipo de cantoneira, onde “ w ” é a largura da aba da cantoneira e “ t ” a espessura.

$$\text{Se } \frac{w}{t} \leq 25$$

F_a pode ser obtida pelas equações II.11 ou II.12.

$$\text{Se } \frac{w}{t} > 25$$

$$\text{Determina-se } \left(\frac{w}{t} \right)_{\text{lim}} = \frac{80\psi}{\sqrt{F_y}} \quad (II.14)$$

$\psi = 1$ para F_y em ksi ou

$\psi = 2,62$ para F_y em MPa

$$F_{cr} = \left[1,677 - 0,677 \frac{\frac{w}{t}}{\left(\frac{w}{t}\right)_{\text{lim}}} \right] F_y \quad (\text{II.15})$$

$$\left(\frac{w}{t}\right)_{\text{lim}} \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\psi}{\sqrt{F_y}} \quad (\text{II.16})$$

Após a verificação da condição dada na (II.16), determina-se F_{cr} (II.15), que deve ser substituído na eq. II.11 ou II.12 no lugar de F_y para determinação de F_a .

$$\text{Se } \frac{w}{t} > \frac{144\psi}{\sqrt{F_y}} \text{ determina-se } F_{cr} \text{ por: } F_{cr} = \frac{0,0332 \pi^2 E}{\left(\frac{w}{t}\right)^2} \quad (\text{II.17})$$

II.8.2 Dimensionamento de membros da torre sob tração

Para determinação da tensão de tração de projeto utiliza-se a seguinte equação:

$$F_t = 0,9 F_y \quad (\text{II.18})$$

Onde: F_t – tensão de tração de projeto;

F_y – tensão de escoamento mínima garantida;

A força de tração é calculada pela seguinte equação:

$$P = F_t A \quad (\text{II.19})$$

II.8.3 Verificação do dimensionamento de barras sob compressão

Após o cálculo da tensão de compressão de projeto para as barras componentes da estrutura, conforme item II.8.1, faz-se a verificação do dimensionamento das barras através da seguinte equação:

$$\frac{P}{P_y} + \frac{M_x}{M_{ax}} + \frac{M_y}{M_{ay}} \leq 1 \quad (\text{II.20})$$

Onde:

P – força de compressão axial calculada de projeto ($P=F_a \cdot A$);

A - área da seção transversal da barra;

P_y – força de compressão de escoamento ($P_y= F_y \cdot A$);

M_x e M_y – momento com relação ao eixo x e y respectivamente;

M_{ax} e M_{ay} – correspondem ao momento admissível em relação ao eixo x e y.

Quando os momentos são desprezíveis e na análise são considerados somente os efeitos axiais (tração/compressão), a equação fica reduzida a:

$$\frac{P}{P_y} \leq 1 \quad (\text{II.21})$$

II.9 Parâmetros meteorológicos aplicáveis para o projeto de linhas de transmissão no Paraná.

O título deste item é o trabalho de pesquisa desenvolvido entre a COPEL e o Instituto Tecnológico SIMEPAR (responsável por dados e previsões de natureza meteorológica, hidrológica e ambiental), que foi apresentado no XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica em Outubro de 2005 [12].

Na pesquisa COPEL/SIMEPAR, foram analisados os dados de temperatura e vento de 33 estações meteorológicas do IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná) e 37 do SIMEPAR em períodos distintos, com o intuito de produzir as séries de máximas anuais destas variáveis. Disto resultou o mapeamento das velocidades de

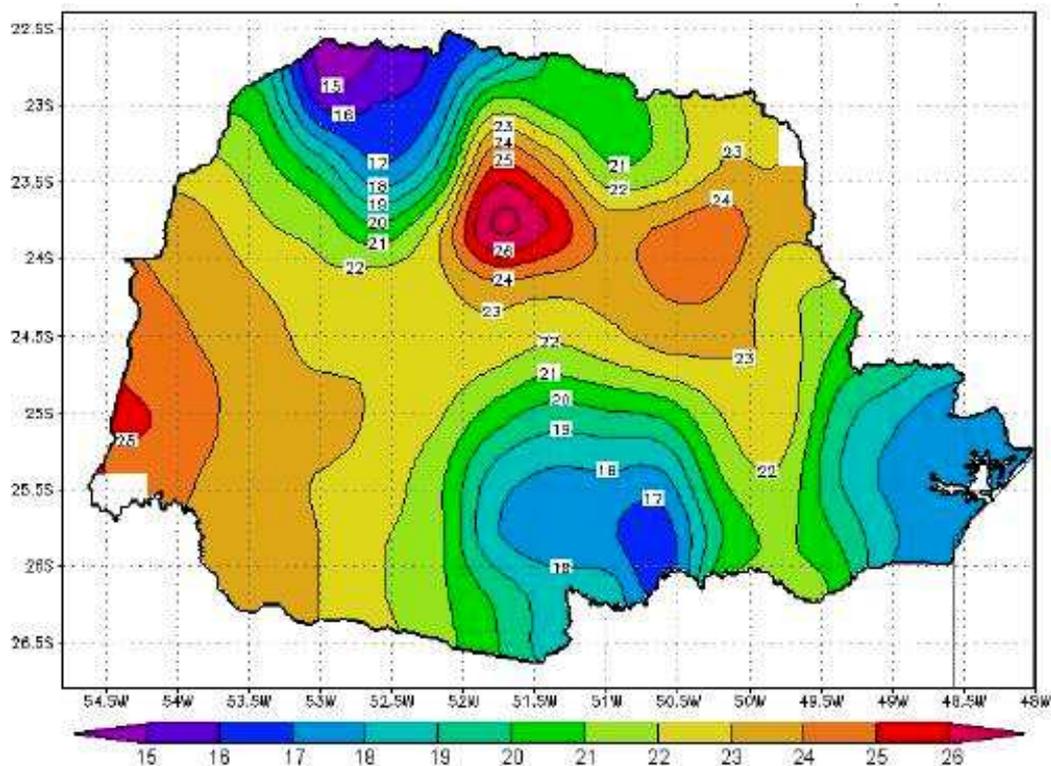


Figura II.12 – Isótacas da média das velocidades máximas anuais em m/s para o período de 1989 A 2003.

A figura II.12 representa as isótacas da média das velocidades máximas anuais em m/s para o período de 1989 a 2003 no estado do Paraná. Na ordenada tem-se a variação da latitude e na abscissa à variação da longitude. As cores indicam a variação da média da velocidade máxima anual e nota-se a variação entre 15 a 26 m/s.

O estudo COPEL / SIMEPAR obteve o mapeamento das isótacas da velocidade básica do vento para o tempo de retorno de 50 anos, para um terreno de rugosidade tipo B, ilustrado na figura II.13 adiante. Este mapa é importante, pois seus dados são utilizados no projeto de uma TTEE. O mapa complementa os dados de velocidade básica dos ventos obtidos da NBR 5422 do mapeamento do Brasil.

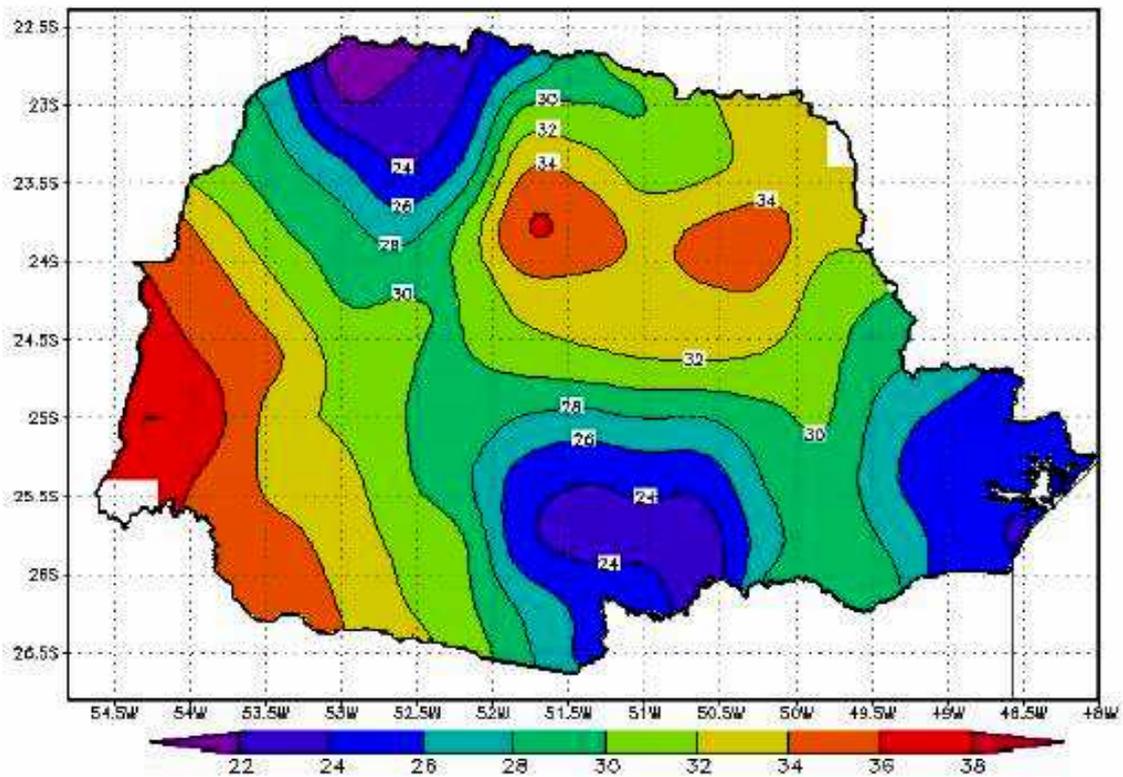


Figura II.13 – Velocidades básicas do vento em m/s, resolução de 30 s para o período de retorno de 50 anos – terreno rugosidade B.

Uma importante classe de problemas em engenharia estrutural que envolve probabilidade são aquelas de valores extremos (máximos e mínimos) de variáveis aleatórias. Dentro desta classificação [1], Gumbel em 1958 definiu que determinadas variáveis aleatórias importantes na engenharia poderiam ser enquadradas em funções de distribuição de probabilidade de valores extremos. No presente caso, a variável aleatória de interesse para o projeto de TTEE é a máxima velocidade anual do vento. Esta variável se enquadra na função de distribuição de probabilidade de Gumbel Tipo I (máximos) que será definida no capítulo III. Esta distribuição estatística de extremos apresenta dois parâmetros denominados de α e β , que são visualizados no mapa do Brasil na NBR 5422. Da mesma forma, a pesquisa entre COPEL e SIMEPAR fez uma complementação à NBR 5422 chegando a uma distribuição espacial destes parâmetros de Gumbel para o estado do Paraná.

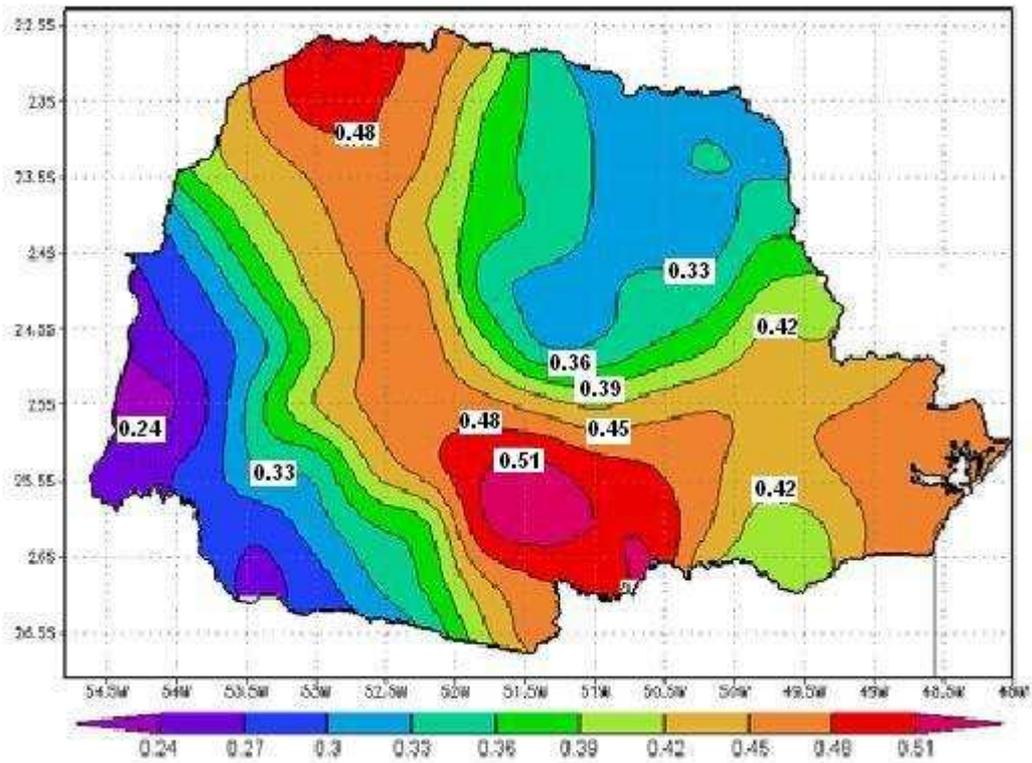


Figura II.14 – Parâmetro alfa de Gumbel em $m^{-1}s$

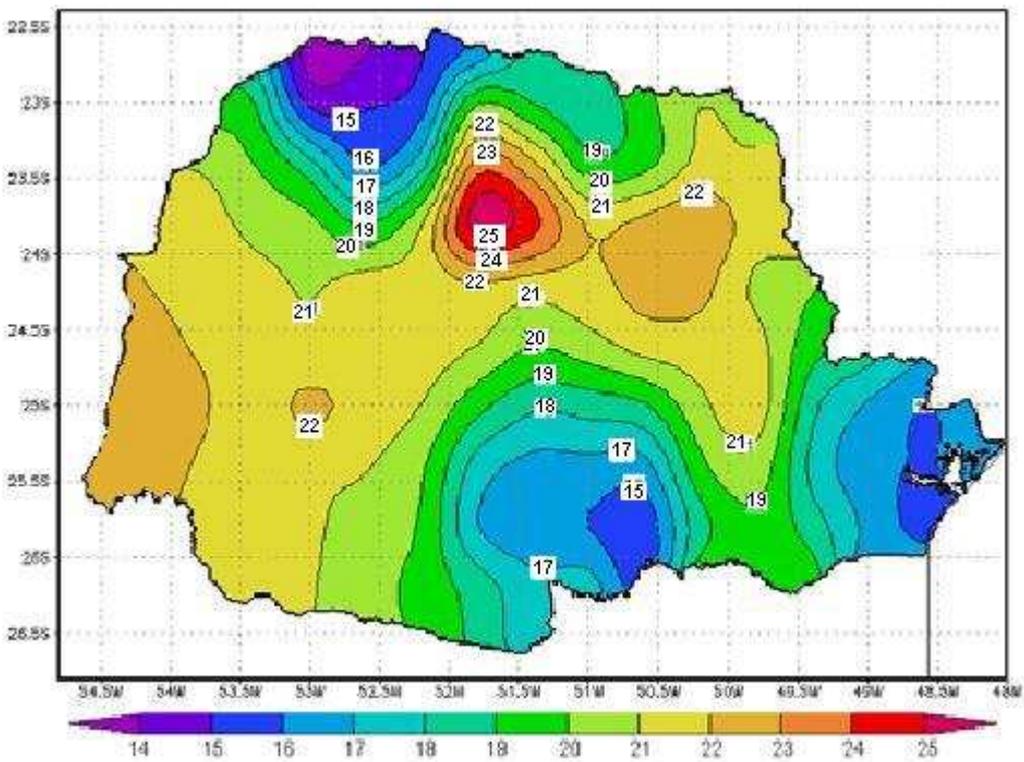


Figura II.15 – Parâmetro beta de Gumbel em $m s^{-1}$

As figuras II.14 e II.15 representam respectivamente os parâmetros alfa e beta de Gumbel, obtidas através das séries de velocidades máximas anuais entre 1989 e 2003. Os parâmetros alfa e beta referem-se a um vento de 30 s, medido a 10 metros de altura para um terreno de rugosidade tipo B. Nas figuras observa-se que o alfa varia de 0.24 a 0.51 e o beta de 14 a 26.

CAPÍTULO III - CONFIABILIDADE ESTRUTURAL EM ENGENHARIA

Este capítulo apresenta alguns conceitos fundamentais da teoria da confiabilidade estrutural. Serão abordados os aspectos mais relevantes que serviram de base para este trabalho.

O cálculo estrutural em engenharia tem como princípio básico assegurar o desempenho satisfatório da estrutura, de acordo com as solicitações definidas no projeto, durante sua vida útil, de tal forma a obter um nível aceitável entre segurança e o custo do empreendimento [15]. Garantir um nível aceitável de segurança com custos mínimos, não é uma tarefa fácil, pois tanto as ações como as resistências máximas das estruturas são difíceis de serem previstas com exatidão.

Na estrutura em estudo, que é uma TTEE, a principal ação imposta é a devida aos esforços causados pela velocidade máxima do vento nos elementos estruturais, que é um fenômeno meteorológico e que tem um comportamento de natureza aleatória. Também há uma variabilidade da resistência e do peso dos elementos componentes da estrutura em função do tipo do material e do processo de fabricação utilizados.

Em geral, na prática, os problemas de engenharia não possuem valores quantitativos exatos para que se possa equacionar e resolver o problema de maneira direta e precisa. Nota-se que existe uma natureza probabilística tanto da ação como da resistência e do peso no caso em estudo. Deste modo, apresentar-se-ão inicialmente os principais conceitos sobre a teoria da probabilidade que serão necessários para o entendimento da metodologia probabilística para avaliação da confiabilidade estrutural.

III.1 Variáveis aleatórias

Na engenharia e outras ciências, muitos fenômenos aleatórios de interesse estão associados a resultados numéricos de alguma quantidade física [1]. Em alguns casos, os resultados de um evento podem ser identificados através de valores de uma função, tais como valores de uma função de variáveis aleatórias, os quais geralmente são representados por letras maiúsculas. Em resumo, variável aleatória é uma função que associa elementos de conjuntos reais a evento do espaço

amostral de um experimento. Sendo X uma variável aleatória, $(X=a)$ ou $(X<b)$ pode ser a representação de eventos desta variável aleatória.

Conforme [1], a função distribuição de probabilidade é uma regra para descrever medidas de probabilidades associadas a valores de variáveis aleatórias.

Dada uma variável aleatória X, sua função densidade de probabilidade fdp é expressa por $f(x)$ e a probabilidade da v.a (variável aleatória) assumir um valor entre a e b e é dado por:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x)dx \quad (\text{III.1})$$

Essa expressão indica a probabilidade da variável X assumir valores entre a e b. Para ser considerada uma f.d.p, algumas condições devem ser atendidas. Assim, a definição de f.d.p de uma v.a X implica em:

- $f_X(x) \geq 0,0$ para qualquer valor de x;
- $\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)dx = 1,0$ (III.2)
- $\int_a^b f_X(x)dx = P(a \leq X \leq b)$

Se X é uma variável aleatória, a distribuição de probabilidade pode ser caracterizada por sua função distribuição acumulada f.d.a, que pode ser indicada por:

$$F_X(a) = \int_{-\infty}^a f_X(x)dx \quad (\text{III.3})$$

$F_X(a)$ indica que a probabilidade da variável X assumir valores menores ou iguais a "a". A função de distribuição acumulada f.d.a, possui as seguintes propriedades:

- $F_X(-\infty) = 0,0$;
- $0 \leq F_X(x) \leq 1,0$

- $F_X(\infty) = 1,0$

A função densidade de probabilidade de uma variável X pode ser representada graficamente pela figura III.1 abaixo:

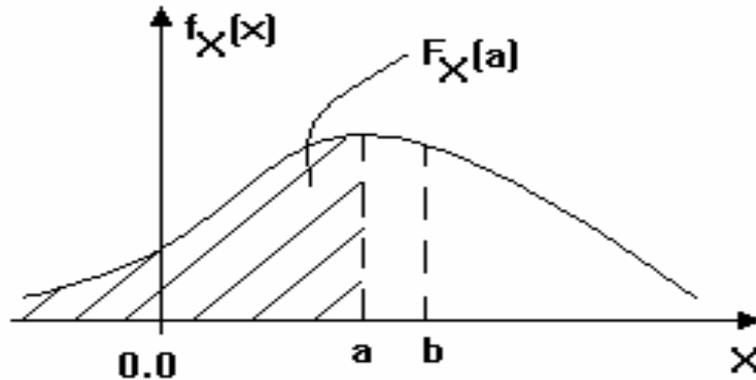


Figura III.1: função densidade de probabilidade

Da figura III.1 observa-se que a área sombreada sobre a f.d.p, representa a $P(X \leq a) = F(a)$, que é a probabilidade da variável aleatória X assumir valores menores ou iguais a “a”.

A função de distribuição acumulada pode ser indicada como na figura abaixo:

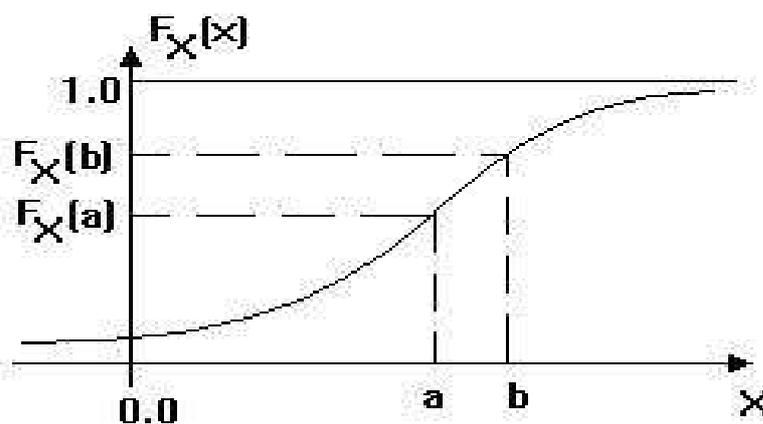


Figura III.2: função de distribuição acumulada

Observa-se pela figura III.2 o seguinte:

1. Para $X = a$ tem-se $F_X(a) = P(X \leq a)$;
2. Para $X = \infty$, $F_X(\infty) = 1$;
3. Para $X = -\infty$, $F_X(-\infty) = 0$.

III.2 Principais parâmetros de uma variável aleatória

As características probabilísticas de uma variável aleatória seriam completamente descritas se a forma da f.d.p e os parâmetros associados fossem plenamente conhecidos. Nem sempre é conhecida a forma que representa a função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, de tal modo que certas aproximações são necessárias. Neste caso, esta variável aleatória pode ser descrita por sua média e por uma medida de dispersão da variável aleatória.

- MÉDIA

Se X é uma variável aleatória discreta, tem-se a seguinte equação para o valor esperado ou a média de X :

$$\mu_X = E(X) = \sum_{x_i} x_i p_x(x_i) \quad (\text{III.4})$$

Se X é uma variável aleatória contínua, com f.d.p $f_x(x)$, o valor médio é dado por:

$$\mu_X = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad (\text{III.5})$$

- VARIÂNCIA

É uma quantidade que dá uma medida da dispersão dos dados em relação a média. A variância é definida por:

$$V(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_x)^2 f_X(x) dx \quad (\text{caso contínuo}) \quad (\text{III.6})$$

Expandindo o integrando obtém-se:

$$V(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f_X(x) dx - 2\mu_x \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx + \mu_x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) dx$$

$$V(x) = E(x^2) - 2\mu_x E(X) + \mu_x^2 = E(x^2) - [E(x)]^2$$

A relação usual para a variância é, então:

$$V(x) = E(x^2) - \mu_x^2 \quad (\text{III.7})$$

A medida de dispersão mais indicada é a raiz quadrada da variância que é chamada de desvio padrão σ e definido por:

$$\sigma_x = \sqrt{V(X)} \quad (\text{III.8})$$

- COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Somente com a variância e o desvio padrão é difícil mensurar se a dispersão é grande ou pequena. O indicativo desta amplitude é dado pelo coeficiente de variação (COV), definido por:

$$\text{COV} = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (\text{III.9})$$

III.3 Distribuições de Probabilidades Importantes

Muitas funções podem ser utilizadas para descrever a distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias, desde que se enquadrem nas condições

expostas nas equações III.2. Através de análise e pesquisa de dados históricos de fenômenos físicos, algumas funções tiveram sucesso em representar tais fenômenos e são largamente utilizados na engenharia. Neste item apresentam-se as principais distribuições de probabilidade utilizadas neste trabalho.

III.3.1 Distribuição Normal ou Gaussiana

É uma das distribuições mais conhecidas e aplicadas para representar uma variedade de variáveis aleatórias. A função densidade de probabilidade desta distribuição é dada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right)} \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{III.10})$$

Onde σ_x e μ_x são o desvio padrão e a média, respectivamente da f.d.p. Uma notação resumida desta distribuição é $N(\mu, \sigma)$. A distribuição normal é simétrica em relação à média. Adiante, tem-se na figura III.3 o gráfico da f.d.p e da f.d.a de uma v.a. $N(0,1)$ padrão.

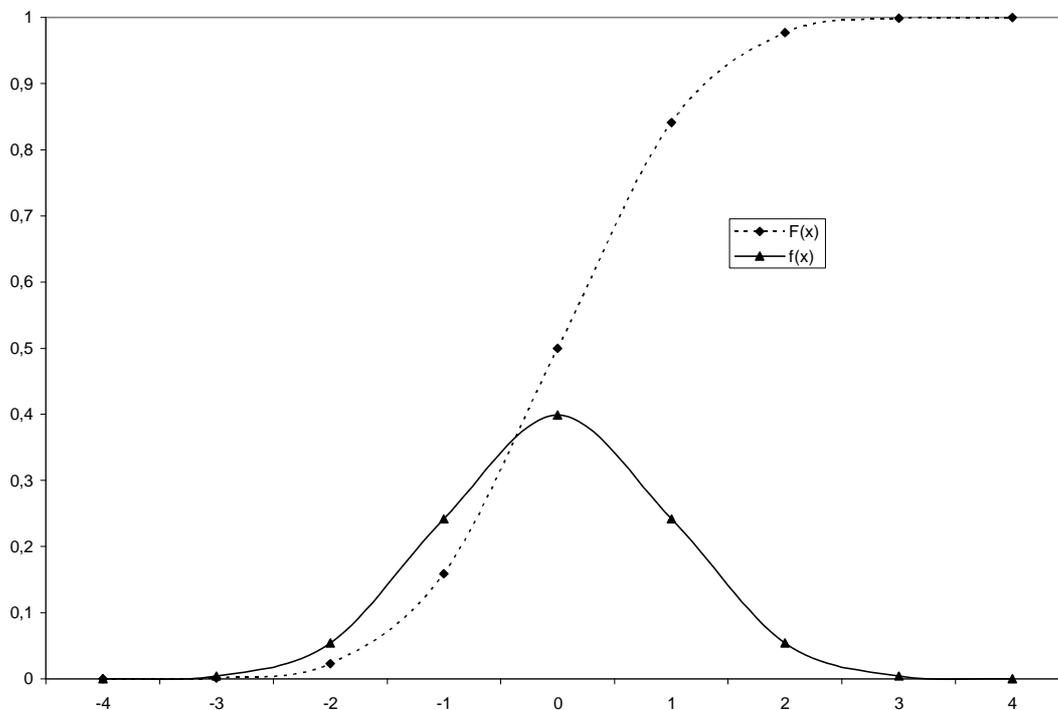


Figura III.3: Representação de $f(x)$ – f.d.p normal e $F(X)$ – f.d.a normal

A figura III.3 apresenta a forma da função densidade de probabilidade normal $f(x)$ e sua função de distribuição acumulada $F(X)$.

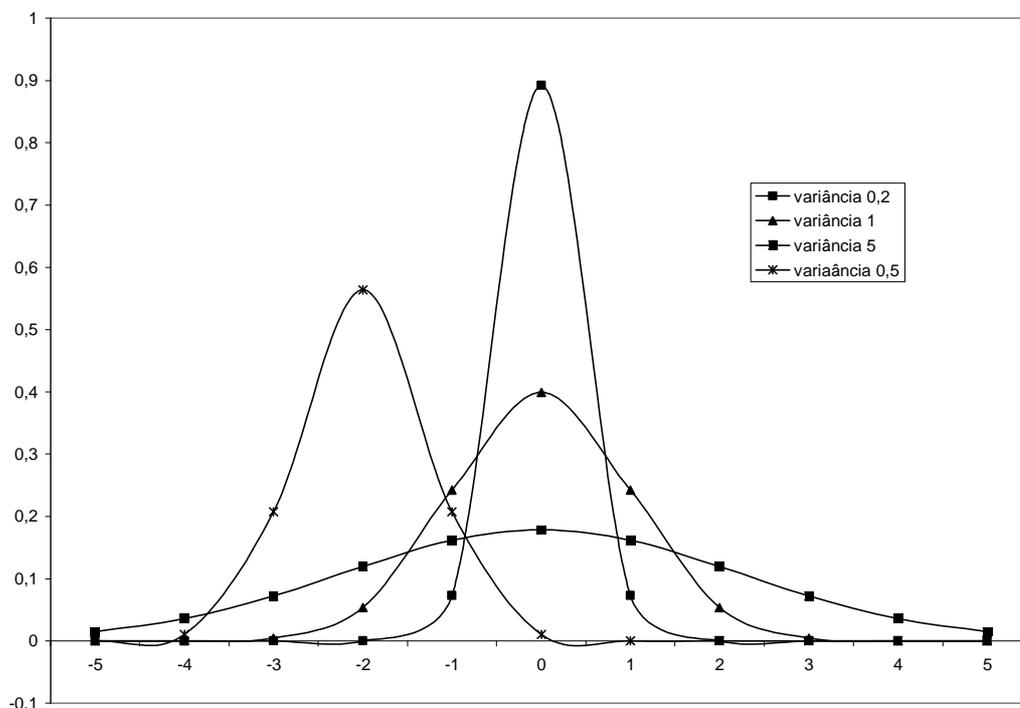


Figura III.4: funções de densidade de probabilidade normais

A figura III.4 mostra quatro funções de densidade de probabilidade normal com diferentes variâncias (0,2 ; 1; 5; 0,5) e médias (0 e -2). Quanto mais dilatada é a base da f.d.p maior é a dispersão com relação à média.

III.3.2 Distribuição Normal Padronizada

Esta distribuição é uma particularidade da função distribuição de probabilidade normal e apresenta média zero e desvio padrão igual a 1. É denotada como $N(0,1)$. A equação da f.d.p é:

$$f_Y(y) = \varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}y^2} \quad -\infty < y < \infty \quad (\text{III.11}).$$

A função densidade f_x da figura III.3 e a função com variância igual a 1 da figura III.4 são funções de distribuição normais padronizadas. Note que estas funções são simétricas em relação a zero, que representa sua média.

Devido a grande utilização desta variável normal padronizada y , definiu-se uma notação especial para representar sua função de distribuição que é $\Phi(y)$ representada pela equação (III.12) a seguir:

$$\Phi(y) = \int_{-\infty}^y f_Y(y) dy \quad (III.12)$$

Devido a grande aplicabilidade da função distribuição normal padronizada $\Phi(y)$, foram tabelados valores de $\Phi(y)$ para $y \geq 0$.

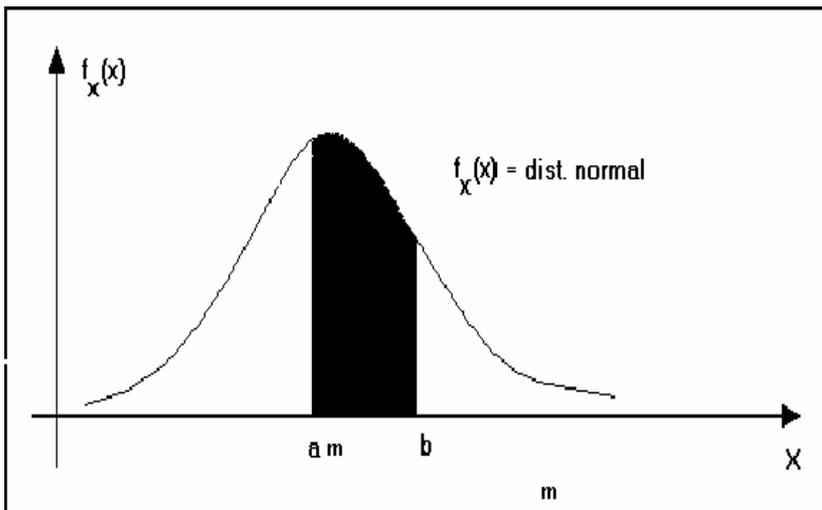


Figura III.5:FDP normal – $N(\mu, \sigma)$

Suponha uma variável X com distribuição de probabilidade $N(\mu, \sigma)$. A probabilidade entre a e b mostrada na figura III.5, representada pela área escura, é dada pela seguinte equação:

$$P(a < X \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (III.13)$$

Integrando-se esta equação obtém-se a probabilidade para valores de X entre a e b. Para facilitar a solução desta integral, faz-se uma mudança variável, a qual é conhecida como variável reduzida e representada pela seguinte equação:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{e} \quad dx = \sigma dz$$

Então,

$$P(a \leq X \leq b) = P\left(\frac{a - \mu}{\sigma} \leq \frac{x - \mu}{\sigma} \leq \frac{b - \mu}{\sigma}\right) = P\left(\frac{a - \mu}{\sigma} \leq Z \leq \frac{b - \mu}{\sigma}\right)$$

e assim, tem-se:

$$P(a < X \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{(a-\mu)}{\sigma}}^{\frac{(b-\mu)}{\sigma}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz$$

O resultado desta integral também pode ser representado como:

$$P(a < X \leq b) = \Phi\left(\frac{b - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right) \quad (\text{III.14})$$

III.3.3 Distribuição Lognormal

Uma variável X tem uma distribuição lognormal se a v.a. Y= ln X é normal. A f.d.p dessa variável aleatória é apresentada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2} \quad 0 < x < \infty \quad (\text{III.15})$$

Onde $\lambda = E(\ln X)$ e $\zeta = \sqrt{V(\ln X)}$ são, respectivamente, a média e o desvio padrão de Y=ln X, os quais são os parâmetros dessa distribuição. Há uma relação entre λ e ζ com a média e o desvio padrão da variável X e obtida assim:

$$\zeta^2 = \ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_x}{\mu_x} \right)^2 \right] \quad \text{e} \quad \lambda = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (\text{III.16})$$

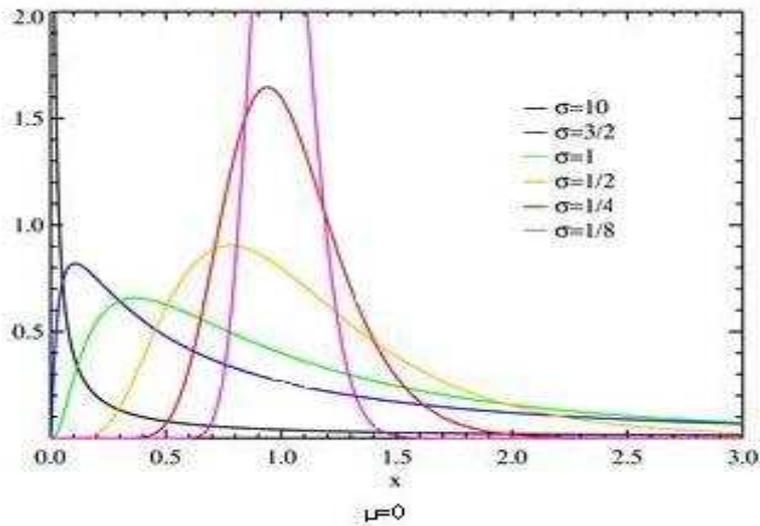


Figura III.6 f.d.p Lognormal

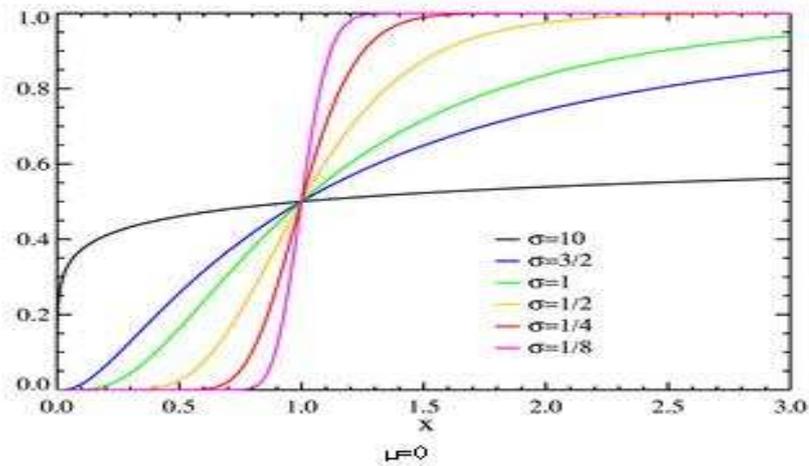


Figura III.7: f.d.a Lognormal

A figura III.6 apresenta a função densidade de probabilidade da v.a. lognormal para diferentes desvios padrões, bem como a figura III.7 representa a função de distribuição acumulada lognormal. Percebe-se que a f.d.p admite valores somente para $X \geq 0$, ou seja, somente valores positivos, conforme se observa nas figuras.

Se X é uma variável lognormal, a probabilidade entre a e b pode ser obtida por:

$$P(a < X \leq b) = \Phi\left(\frac{\ln b - \lambda_X}{\zeta_X}\right) - \Phi\left(\frac{\ln a - \lambda_X}{\zeta_X}\right) \quad (\text{III.17})$$

III.3.4 Estatística de Valores Extremos

Problemas de probabilidade envolvendo valores extremos (máximos ou mínimos) de variáveis aleatórias são importantes, pois têm sua aplicação na engenharia, conforme será visto nesse item.

Ajustando observações amostrais de um determinado fenômeno que se comporta como uma variável aleatória, separando-se os valores máximo e mínimo, estes valores por serem aleatórios em amostra, podem ser modelados como variáveis aleatórias com suas respectivas distribuições de probabilidades [1].

A teoria estatística de valores extremos foi descrita em um trabalho de Gumbel (1958) e exemplos de aplicação para fenômenos físicos foram estudados, também por Gumbel (1954).

Um exemplo de aplicação importante da estatística de extremos é na consideração sobre segurança estrutural. Altos valores de carregamento, baixa resistência estrutural são os valores mais relevantes para assegurar o nível de confiabilidade da estrutura.

A previsão das condições futuras é freqüentemente requisitada pelo planejamento e projetos na engenharia. Nestes casos, podem envolver a previsão de valores máximos e mínimos de uma determinada variável aleatória.

III.3.4.1 Distribuição de Probabilidades de Valores Extremos

Os valores máximo e mínimo de uma amostra de tamanho n são também variáveis e, portanto, têm suas distribuições de probabilidades próprias.

Considere uma variável aleatória X com função de distribuição acumulada $F_x(x)$. De uma amostra de tamanho n tomada de uma população (valores de x), cada amostra será (x_1, x_2, \dots, x_n) , onde os índices representam os valores observados em cada uma das observações. Desde que cada valor observado é imprevisível a priori com relação à observação atual, assume-se que cada observação é um valor de uma variável aleatória e ajustam-se as observações (x_1, x_2, \dots, x_n) como uma realização de variáveis aleatórias (X_1, X_2, \dots, X_n) . Portanto, os valores extremos de uma amostra de tamanho n , considerando-se os máximos e mínimos serão também variáveis aleatórias:

$$Y_n = \text{Max}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{e} \quad Y_1 = \text{Min}(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Se Y_n é o maior valor entre (X_1, X_2, \dots, X_n) e é menor que um valor y , logo todas as outras variáveis aleatórias da amostra serão menores que y também. Para efeito de simplificação, assume-se que X_1, X_2, \dots, X_n são estatisticamente independentes e identicamente distribuídas como variável inicial X , logo:

$$F_{x1}(x) = F_{x2}(x) = \dots = F_{xn}(x) = F_x(x)$$

Nestas condições, a função acumulada de Y_n é:

$$\begin{aligned} F_{Y_n}(y) &= P(Y_n \leq y) \\ F_{Y_n}(y) &= P(X_1 \leq y, X_2 \leq y, \dots, X_n \leq y) \\ F_{Y_n}(y) &= [F_x(y)]^n \end{aligned} \tag{III.18}$$

A correspondente função densidade de Y_n é:

$$f_{Y_n}(y) = \frac{\partial F_{Y_n}(y)}{\partial y} = n [F_x(y)]^{n-1} f_x(y) \tag{III.19}$$

Da equação III.18, observa-se que para um dado y a probabilidade $[F_x(y)]^n$ decresce com n , o que significa que as funções $F_{Y_n}(y)$ e $f_{Y_n}(y)$ serão posicionadas para a direita do diagrama com o aumento dos valores de n .

A equação III.18 é uma distribuição de probabilidade exata de valores extremos (máximos) de uma amostra de tamanho n tomados de uma população X . Esta distribuição depende de uma distribuição inicial $F_x(x)$ da população e também da amostra n . As distribuições Y_n e Y_1 são difíceis de obter ou derivar de forma analítica. Variáveis iniciais com distribuição exponencial são uma das exceções.

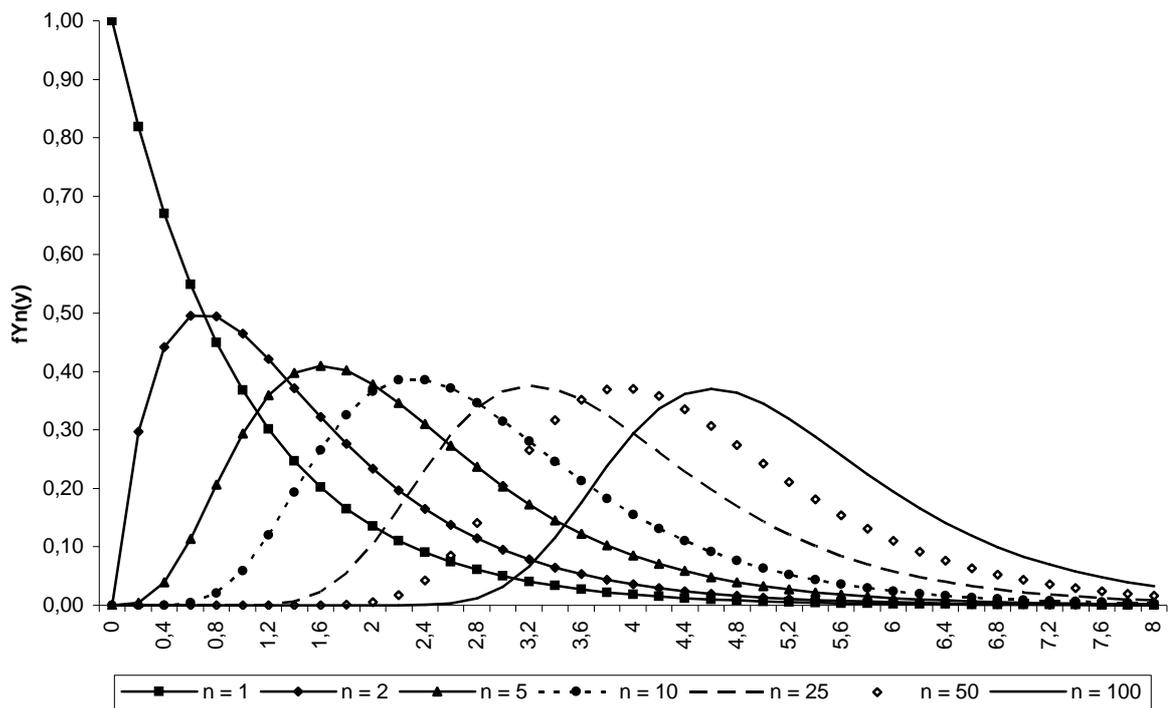


Figura III.8 f.d.p para valores máximos de uma variável inicial exponencial

A figura III.8 representa a equação III.20 para diferentes valores de n ($n=1...100$). Visualiza-se claramente que a função se desloca para direita quando n aumenta.

Considerando a variável inicial X tendo a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0$$

Cuja f.d.a é dada por:

$$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0$$

Portanto os valores máximos para uma amostra de tamanho n , apresentará a seguinte f.d.a:

$$F_{Y_n}(y) = (1 - e^{-\lambda y})^n; y \geq 0 \quad \text{e sua correspondente f.d.p é:}$$

$$f_{Y_n}(y) = \lambda n (1 - e^{-\lambda y})^{n-1} e^{-\lambda y} \tag{III.20}$$

III.3.4.2 Distribuição de Probabilidades Assintóticas

Fisher e Tippett (1927) e Gnedenko (1943) estudaram o comportamento das distribuições de extremos e chegaram à conclusão de que estas tendem a distribuições assintóticas quando n tende a infinito. O significado prático da forma assintótica de uma distribuição de extremos não depende da forma exata da distribuição inicial. Depende grandemente do comportamento da calda da distribuição inicial na direção do extremo. Os parâmetros extremos são funções da forma inicial da distribuição.

Através de observações de muitas distribuições assintóticas de valores extremos, estas tendem a convergir para certas formas para grandes valores de n . Especificamente, para a forma da dupla exponencial ou duas diferentes formas de exponenciais. Gumbel (1958) classificou como formas assintóticas do Tipo I, II e III:

- Tipo I: Exponencial dupla – $e^{[-e^{-A(n)y}]}$;
- Tipo II: Forma exponencial – $e^{[-A(n)/y]^k}$
- Tipo III: Forma exponencial - $e^{[-A(n)(w-y)]^k}$

III.3.4.3 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo I

A função distribuição acumulada (FDA) da assintótica do Tipo I para distribuição para valores máximos pela classificação de Gumbel é dada por:

$$F_{X_n}(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (III.21)$$

Onde u e α são o parâmetro de localização e escala, respectivamente, e a média e o desvio padrão são dados por:

$$\mu = u + \frac{0.5772}{\alpha} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6}\alpha} \quad (III.22)$$

E a correspondente função densidade de probabilidade (f.d.p) é:

$$f_x(x) = \alpha e^{-\alpha(x-u)} e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (III.23)$$

O valor de u é uma medida de localização central dos possíveis valores máximos. Em uma amostra de tamanho n de uma variável inicial X , o número esperado de valores da amostra que são maiores que x é $n[1-F_X(x)]$.

O parâmetro de locação u é definido como um valor de X tal que em uma amostra de tamanho n de uma variável inicial X , o número esperado de valores da amostra maior que u é um, ou seja:

$$n[1 - F_X(u)] = 1,0 \quad \longrightarrow \quad F_X(u) = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{III.24})$$

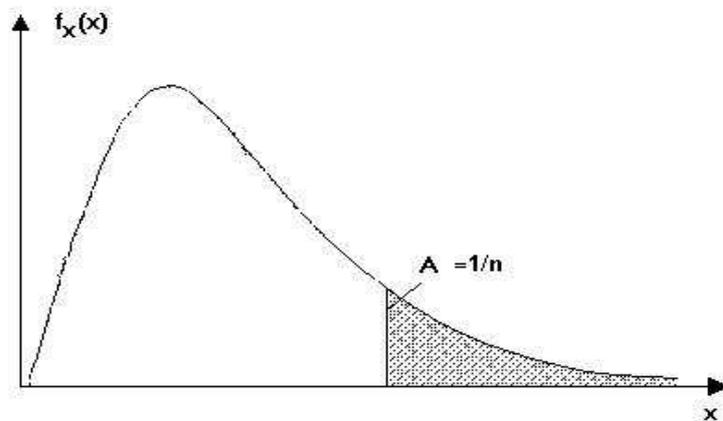


Figura III.9: Definição do parâmetro de locação u

Do mesmo modo, u é o valor de X com a probabilidade de exceder de $1/n$. Substituindo-se a equação III.24 na equação. III.18 tem-se:

$$F_{X_n}(u_n) = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^n, \text{ aplicando-se a função de logaritmo neperiano } \ln \text{ em}$$

ambos os lados da equação e para o resultado, determinando-se o limite com n tendendo a infinito, chega-se a:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln\left(1 - \frac{1}{n}\right)}{\frac{1}{n}} = -1,$$

Logo:

$$\ln F_{X_n}(u_n) = -1$$

Então:

$$F_{X_n}(u_n) = e^{-1} \cong 0,368,$$

Logo:

$$P(X_n > u_n) \cong 0,632$$

Isto significa dizer que entre a população de possíveis valores máximos da amostra de tamanho n aproximadamente 37% são menores que u_n , ou 63% maior que u_n .

Esta distribuição assintótica do tipo I será utilizada neste trabalho para representar a variável aleatória de velocidade máxima de vento no estado do Paraná. Esta velocidade máxima por sua vez é a principal responsável pelas solicitações nos elementos da TTEE.

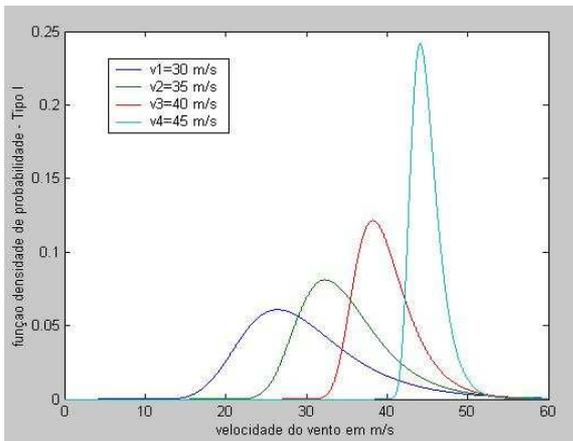


Figura III.10: f.d.p – Tipo I

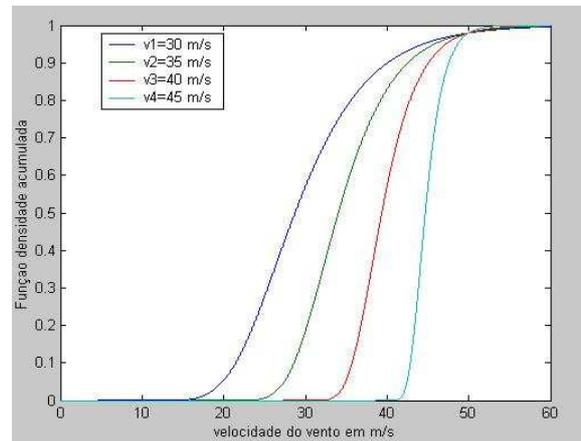


Figura III.11: f.d.a – Tipo I

A figura III.10 representa a função densidade de probabilidade de valores máximos anuais para velocidades de vento hipotéticas, considerando-se quatro valores médios de velocidades de vento (30, 35, 40 e 45 m/s).

A figura III.11 representa as respectivas funções acumuladas das f.d.p.

III.3.4.4 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo II

Também conhecida como distribuição de Frechet, tem seu uso para representar eventos aleatórios de hidrologia e meteorologia. Para valores máximos sua FDA é:

$$F_{Y_n}(Y) = e^{-\left(\frac{v_n}{y}\right)^k} \quad (\text{III.25})$$

Onde:

v_n : valor máximo característico da variável inicial X;

k : parâmetro de forma; $1/k$ é a medida de dispersão. A FDP é representada por:

$$f_{Y_n}(y) = \frac{k}{v_n} \left(\frac{v_n}{y}\right)^{k+1} e^{-\left(\frac{v_n}{y}\right)^k} \quad (\text{III.26})$$

III.3.4.5 Distribuição de Probabilidades Assintóticas Tipo III

Esta distribuição é também bastante conhecida como distribuição assintótica de Weibull e sua f.d.a é dada por:

$$F_{Z_n}(z) = e^{-\left(\frac{w-z}{w-w_n}\right)^k}; \quad z \leq w \quad (\text{III.27})$$

Onde:

k – parâmetro de forma;

w_n – valor máximo característico da variável X que é definida por:

$$F_X(w_n) = 1 - \frac{1}{n} \text{ e sua f.d.p é dada por:}$$

$$f_{Z_n}(z) = \frac{k}{w - w_n} \left(\frac{w - z}{w - w_n} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{w-z}{w-w_n} \right)^k} \quad \text{com } z \leq w. \quad (\text{III.29})$$

III.4 Avaliação da Confiabilidade

A confiabilidade de estruturas ou de sistemas de engenharia pode ser entendida como sendo a capacidade de resistência da estrutura durante sua vida útil em relação à solicitação imposta à mesma.

Comumente a avaliação da confiabilidade de sistemas de engenharia é obtida através do uso de fatores ou margens de segurança e suposições conservadoras adotadas no projeto. Procura-se adequar a resistência mínima da estrutura com a solicitação máxima. Através de julgamentos subjetivos são definidos os extremos da resistência e solicitação, devido à dificuldade de quantificação destes valores. Estas dificuldades são inerentes em sistemas de engenharia por causa da falta de informações completas.

Desta forma, a confiabilidade pode ser mensurada mais realisticamente em termos de probabilidades. Com este intuito, definem-se as seguintes variáveis aleatórias:

R – variável aleatória correspondente à resistência;

S – variável aleatória correspondente à solicitação.

O objetivo da confiabilidade é expressar que a probabilidade de que o evento ($R > S$) ocorra durante toda a vida útil ou tempo especificada para um sistema de engenharia. O evento complementar ($R < S$) corresponde a falha.

Deste modo a função de falha $G(U)$, com $U(R,S)$ é dada por:

$$G(U) = Z = R - S \quad (\text{III.30})$$

Considera-se que as f.d.p's e f.d.a's de R e S sejam conhecidas, então as probabilidades associadas aos eventos acima podem ser definidas da seguinte forma:

$$Pf = P(R < S) = \sum_{\text{todos } S} P(R < S | S = s) P(S = s) \quad (\text{III.31})$$

Assumindo-se que R e S são estatisticamente independentes e portanto:

$$P(R < S | S = s) = P(R < s)$$

A equação III.31 para R e S contínuos e a P_f pode ser representada como:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (III.32)$$

Onde $f_R(r)$ e $f_S(s)$ são as funções densidade de probabilidades da resistência e solicação respectivamente, e $F_R(r)$ é a função cumulativa de probabilidades da resistência.

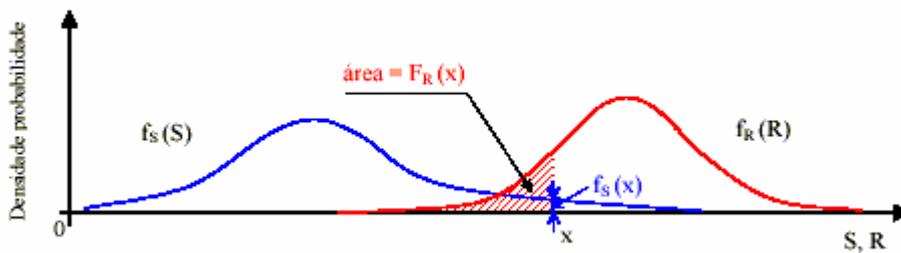


Figura III.12 : f.d.p's da solicação $f_S(S)$ e resistência $f_R(R)$

A figura III.12 mostra a sobreposição das curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ que representa uma medida qualitativa da probabilidade de falha P_f .

Da observação da figura III.12, nota-se que a sobreposição entre as duas curvas depende da posição relativa entre elas. Logo, se as curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ estão mais distantes, a P_f diminui, por outro lado, se elas estão mais próximas a P_f aumenta.

A região de sobreposição depende do grau de dispersão de $f_S(S)$ e $f_R(R)$ e estas dispersões podem ser expressas em termos das covariâncias de R e S.

Considerando-se R e S independentes e com distribuições normais $N(\mu_R, \sigma_R)$ e $N(\mu_S, \sigma_S)$ respectivamente. Neste caso $Z = R - S$ também é uma distribuição normal $N(\mu_Z, \sigma_Z)$, assim:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \text{ (médias) e } \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \text{ (Desvio Padrão)}$$

Utilizando-se da distribuição normal padronizada, a probabilidade de falha pode ser indicada como:

$$Pf = P(Z \leq 0.0) = \Phi\left(\frac{0.0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad \text{ou} \quad \text{(III.33)}$$

$$Pf = 1 - \Phi(\beta)$$

Onde $\Phi(\cdot)$ é a distribuição cumulativa normal padrão e β é o índice de confiabilidade que é expresso como:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{(III.34)}$$

A probabilidade de falha Pf pode ser obtida pela equação III.32 ou III.34. A resolução das integrais da equação III.32 pode ser complexa devido às equações que representam as f.d.p's da resistência e sollicitação. Através do cálculo do β a obtenção da Pf é muito mais simples devida algumas propriedades das f.d.p normais.

III.5 Distribuições Normais Equivalentes

Caso a distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_n não seja normal, a probabilidade de falha Pf pode ser avaliada pela equação III.32. Porém, devido à complexidade da integral a ser resolvida, muitas vezes é necessária a resolução numérica da integral. Entretanto, segundo Paloheimo (1974) e Rackwitz (1976), a probabilidade de sobrevivência pode ser avaliada fazendo-se uso de uma distribuição normal equivalente.

Tal distribuição normal pode ser obtida através da transformação de Rosenblatt (1952). Considerando-se uma variável individual, a distribuição normal equivalente para uma variável não normal pode ser obtida de tal forma que a função cumulativa e função densidade de probabilidade da distribuição normal equivalente

sejam iguais a aquelas da distribuição não normal para um ponto apropriado x_i^* na superfície de falha.

O equacionamento descrito pode ser representado da seguinte forma:

$$\Phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i}^N}{\sigma_{X_i}^N}\right) = F_{X_i}(x_i^*) \quad (\text{III.35})$$

Onde:

$\mu_{X_i}^N, \sigma_{X_i}^N$ - valor médio e o desvio padrão de uma distribuição normal equivalente para X_i respectivamente;

$F_{X_i}(x_i^*)$ - f.d.a original de X_i , avaliada em x_i^* ;

$\Phi(-)$ - f.d.p da distribuição normal padrão.

Desenvolvendo-se a equação III.35 chega-se a:

$$\mu_{X_i}^N = x_i^* - \sigma_{X_i}^N \Phi^{-1}\left[F_{X_i}(x_i^*)\right] \quad (\text{III.36})$$

Equacionando-se a FDP em x_i^* tem-se:

$$\frac{1}{\sigma_{X_i}^N} \phi\left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i}^N}{\sigma_{X_i}^N}\right) = f_{X_i}(x_i^*) \quad (\text{III.37})$$

Onde $\phi(\)$ é a f.d.p normal padrão e finalmente obtém-se:

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi\left\{\Phi^{-1}\left[F_{X_i}(x_i^*)\right]\right\}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (\text{III.38})$$

A seguir esta transformação pode ser visualizada em forma gráfica.

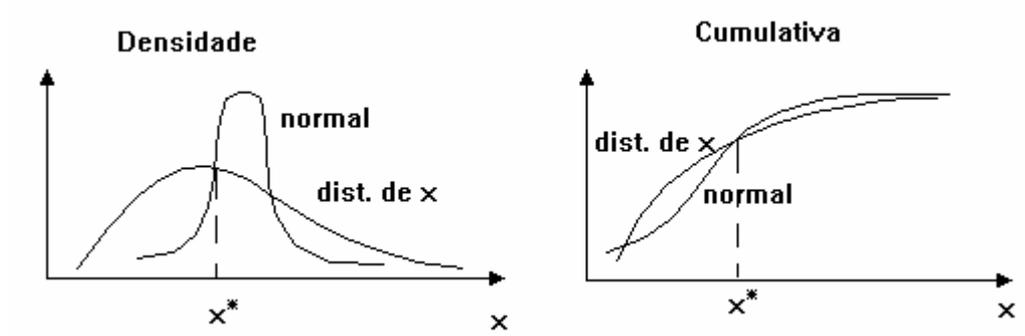


Figura III.13: Transformação para normal equivalente

Observa-se na figura III.13 que no ponto x^* tanto a f.d.p e a f.d.a da distribuição não normal de X é igualado com a distribuição normal.

CAPÍTULO IV - MÉTODOS ANALÍTICOS PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

No capítulo III foi visto que a probabilidade de falha pode ser determinada pela equação III.32, a qual está repetida aqui:

$$Pf = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds$$

Nesta equação, o integrando da Pf está sendo representado pela f.d.a da resistência e f.d.p da solicitação, porém genericamente pode ser representada da seguinte forma:

$$Pf = \int_F f_u(U) du \quad (IV.1)$$

Onde $f_u(\mathbf{U})$ é a f.d.p conjunta de todas as variáveis aleatórias \mathbf{U} envolvidas na análise, ou seja, todas as variáveis que compõem a resistência e solicitação.

A avaliação da probabilidade de falha é baseada na função de falha, ou função de estado limite ou margem de segurança, simbolizada como $G(\mathbf{U})$.

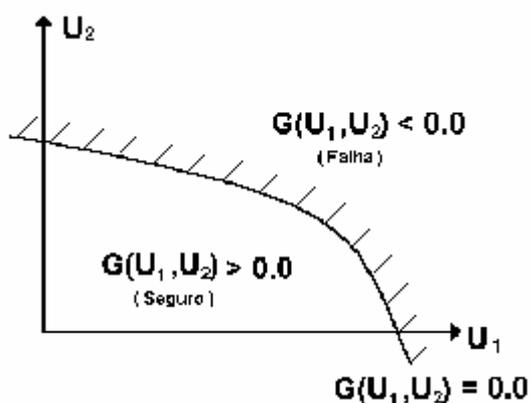


Figura IV.1: Função de Falha

A figura IV.1 mostra uma função de falha bidimensional \mathbf{G} representada pelas variáveis aleatórias \mathbf{U}_1 e \mathbf{U}_2 . Observa-se que a função de falha divide a superfície de falha em duas regiões distintas, uma que é indicada como a região no domínio da falha $\mathbf{G}(\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) < 0$ e outra da segurança $\mathbf{G}(\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) > 0$. A linha que delimita a região de falha com a segura é onde $\mathbf{G}(\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2) = 0$.

Em suma, a Pf é definida como a probabilidade da função de falha assumir valores dentro da região de falha, ou seja:

$$Pf = P(G(U_1, U_2) < 0) \quad (IV.2)$$

Dependendo do número e da complexidade das funções das variáveis envolvidas, a solução da integral se torna bastante difícil, mesmo utilizando-se de recursos numéricos para obtenção da solução. Em função destas dificuldades, foram desenvolvidos métodos analíticos para avaliação da confiabilidade estrutural, que será foco deste capítulo. A seguir apresentam-se os métodos analíticos FORM (First Order Reliability Method) e SORM (Second Order Reliability Method).

IV.1 Método analítico FORM

No capítulo III foi obtido o índice de confiabilidade β considerando-se um sistema tipo R x S (Resistência x Solicitação), onde R e S são variáveis aleatórias com f.d.p's normais e estatisticamente independentes. A equação determinada para β foi:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

Quantitativamente pode-se obter β utilizando-se variáveis reduzidas onde se têm variáveis normais com média zero e desvio padrão um.

O primeiro passo consiste em transformar as variáveis R e S em variáveis reduzidas r e s, obtidas através das seguintes equações:

$$s = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad r = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (IV.3)$$

A função de falha no espaço reduzido \mathbf{Z} ou $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ é representada por:

$Z = R - S$, logo:

$$Z = r\sigma_R + \mu_R - s\sigma_S - \mu_S \quad (\text{IV.4})$$

Após as transformações das variáveis e obtenção da função de falha no espaço reduzido, pode-se representar esta função de falha neste espaço através da figura IV.2:

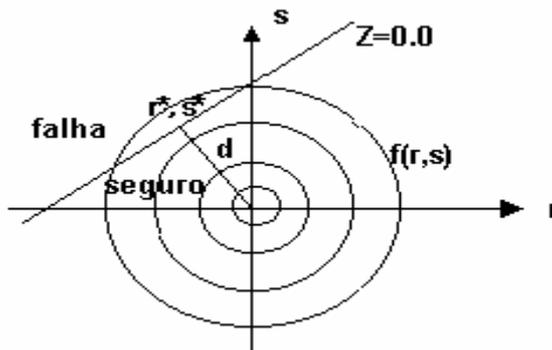


Figura IV.2: Função de falha no espaço reduzido

A figura IV.2 mostra da mesma forma que na figura IV.1, a linha ou superfície de falha $G(\mathbf{U})=Z=0,0$ que separa a região do domínio da falha do domínio seguro. A distância \mathbf{d} representa a menor distância entre a origem e o ponto $(\mathbf{r}^*, \mathbf{s}^*)$ que está sobre a superfície de falha, ou seja, distância mínima entre a equação de estado limite e a origem do espaço normal padrão. Este ponto é chamado de ponto de projeto ou ponto mais provável de falha. Através do cálculo da distância entre dois pontos pela geometria analítica, obtém-se que a distância \mathbf{d} é representada pela seguinte, fórmula:

$$d = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (\text{IV.5})$$

Observa-se que a distância d é idêntica à fórmula do índice de confiabilidade β .

O método FORM adota o processo descrito anteriormente, onde se busca a função de falha no espaço reduzido, através da transformação das variáveis no espaço original para espaço reduzido e, em seguida, calculando-se a menor distância entre a origem e o ponto de projeto sobre a superfície de falha.

A seguir serão apresentados de forma ampla os principais passos do método FORM:

- As variáveis aleatórias \mathbf{U} (com distribuições quaisquer) são transformadas em variáveis \mathbf{V} (normais do tipo padrão estatisticamente independentes);
- A função de falha $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ passa a ser função da variável \mathbf{V} como $\mathbf{g}(\mathbf{V})$;
- A superfície de falha $\mathbf{g}(\mathbf{V})=0.0$ é aproximada para uma superfície linear no ponto da menor distância com a origem chamado de \mathbf{V}^* , que é o ponto de projeto;
- Cálculo do β , que é representado pela distância da origem ao ponto \mathbf{V}^* e é obtido por: $\beta = |\mathbf{V}^*|$.

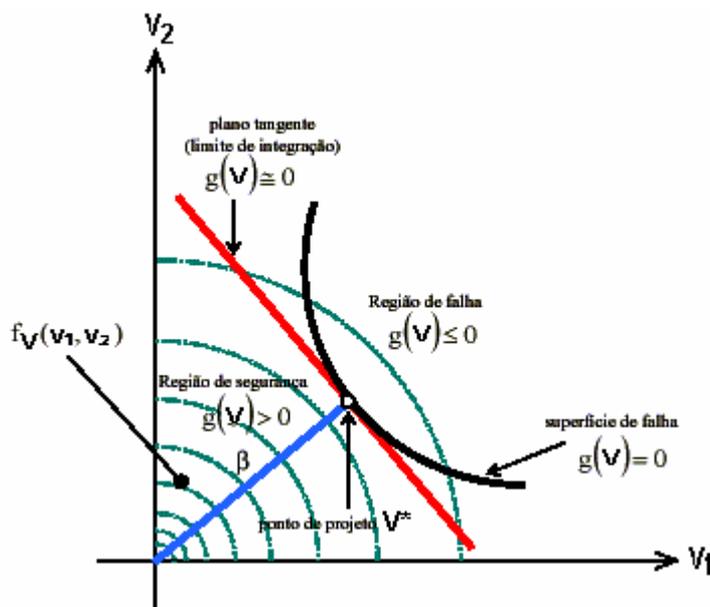


Figura IV.3: Função de falha pelo método FORM

Na figura IV.3, observa-se que a superfície de falha é convexa onde $g(V)=0$, já representada com as variáveis no espaço reduzido, que separa a região de falha $g(V) \leq 0$ da região de segurança $g(V) > 0$. A reta tangente à superfície de falha original em vermelho é a aproximação obtida pelo método para uma superfície linear. O ponto de tangência representa a menor distância da origem à superfície de falha e denomina-se ponto de projeto.

Em função do exposto, nota-se que há dois passos relevantes para a obtenção da probabilidade de falha P_f pelo método FORM, que são a transformação das variáveis aleatórias com distribuições quaisquer para distribuições normais padrões e a determinação do ponto de projeto.

IV.1.1 Transformação das variáveis U para variáveis normais padrão V

A transformação de variáveis mais utilizadas na engenharia estrutural é conhecida como transformação de Nataf, o qual transforma variáveis normais correlacionadas em variáveis estatisticamente independentes.

Esquemáticamente a transformação de Nataf pode ser apresentada como:

- Verificar se as variáveis aleatórias **U** são normais. Caso não sejam, há necessidade de obterem-se as normais equivalentes, como foi detalhado no capítulo III, item 3.5. Em seguida será indicada a formulação para estes dois casos:

Resistência – Distribuição lognormal

Parâmetros da distribuição:

$$\zeta_R = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\frac{\sigma_R}{\mu_R} \right)^2 \right]} \quad \text{e} \quad \lambda_R = \ln \mu_R - \frac{1}{2} \zeta_R^2$$

Onde ξ e λ são o desvio padrão e a média respectivamente.

Normais equivalentes:

$$\mu_R^N = R(1 - \ln R + \lambda_R) \quad \text{e} \quad \sigma_R^N = R \zeta_R$$

Solicitação – Distribuição de Gumbel Tipo I

Parâmetros da distribuição:

$$\text{f.d.a : } F_{X_n}(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

$$\text{f.d.p: } f_x(x) = \alpha e^{-\alpha(x-u)} e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

$$\text{Onde: } \alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sigma_x} \quad \text{e} \quad u = \mu_x - \frac{0.5772}{\alpha}$$

Determinação da f.d.p e f.d.a para o ponto \mathbf{x} (valor médio original da distribuição).

Resolução das equações: $\Phi^{-1}[F_x(x)]$ e $\phi\{\Phi^{-1}[F_x(x)]\}$

Onde Φ^{-1} é a inversa da FDA e ϕ a FDP normal padrão.

Finalmente:

$$\sigma_{X_i}^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\}}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad \text{e} \quad \mu_{X_i}^N = x_i^* - \sigma_{X_i}^N \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]$$

- Após a obtenção das variáveis aleatórias \mathbf{U} como normais ou normais equivalentes, correlacionadas ou não entre si, as variáveis normais padrão e estatisticamente independentes podem ser obtidas pela equação:

$$V = \Gamma \sigma^{-1}(U - m) \quad (\text{IV.6})$$

Onde: \mathbf{m} – vetor com as médias normais ou normais equivalentes da variável \mathbf{U} ;

σ – matriz diagonal dos desvios padrões normais da variável \mathbf{U} ;

$\Gamma = L^{-1}$ - \mathbf{L} matriz triangular inferior da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de \mathbf{U} .

IV.1.2 Determinação do ponto de projeto

A determinação do ponto de projeto \mathbf{V}^* no método FORM é condição essencial para a obtenção da probabilidade de falha e conseqüentemente a confiabilidade do sistema. Por definição, o ponto de projeto \mathbf{V}^* é o ponto sob a função de estado limite no espaço reduzido com a maior densidade de probabilidade, ou seja, o ponto mais próximo entre a origem e a superfície de falha.

Para determinação deste ponto de projeto foram desenvolvidos vários algoritmos, porém o algoritmo HLRF talvez seja o mais conhecido, o qual foi desenvolvido inicialmente por Hasofer e Lind (1974) e, posteriormente, foi estendido para variáveis aleatórias não normais por Rackwitz e Fiessler (1978).

O ponto de projeto é a solução de um problema de otimização sujeita a uma restrição que é obtida por:

$$\mathbf{V}^* = \arg \min \{ \|\mathbf{V}\| \mid g(\mathbf{V}) = 0 \} \quad (\text{IV.7})$$

Onde:

\mathbf{V}^* - ponto de projeto;

argmin – argumento de uma função minimizante;

\mathbf{V} – vetor da variável aleatória no espaço normal padrão;

$g(\mathbf{V})$ – função de falha no espaço reduzido.

A determinação do ponto de projeto \mathbf{V}^* expressa pela equação IV.7 é um problema de otimização, onde se busca localizar o ponto que está a uma menor distância da origem, que representa o ponto de projeto, desde que a condição $g(\mathbf{V})=0$ seja atendida.

O algoritmo HLRF pode ser resumido pela seguinte expressão recursiva:

$$\mathbf{V}^{K+1} = \frac{1}{\|\nabla g(\mathbf{V}^K)\|^2} \left[\nabla g(\mathbf{V}^K)^T \mathbf{V}^K - g(\mathbf{V}^K) \right] \nabla g(\mathbf{V}^K) \quad (\text{IV.8})$$

Onde: $\nabla g(\mathbf{V}^K)$ é o gradiente da função de falha no espaço reduzido no ponto \mathbf{V}^K ;

$g(\mathbf{V}^K)$ – valor da função de falha no ponto \mathbf{V}^K

A seguir será apresentado um algoritmo do método FORM, onde será detalhado o processo de transformação de variáveis e implementação do HLRF, para obtenção da confiabilidade do sistema de engenharia.

IV.1.3 Algoritmo de análise de confiabilidade pelo método FORM

Para efeito de exemplificação, admite-se um sistema hipotético do tipo R x S, para o qual se deseja determinar a confiabilidade, cuja função de falha $G(\mathbf{U}) = R - S$, e para qual o algoritmo será aplicado, utilizando-se uma rotina computacional desenvolvida no software Matlab. Abaixo se apresenta, passo a passo o fluxo de cálculo do algoritmo:

- a) Verificação das correlações entre as variáveis para a obtenção da matriz Γ ;
- b) Assumir como ponto de partida as médias da variável \mathbf{U} no espaço original;
- c) Obter as médias e desvios padrões das normais equivalentes no ponto de partida, conforme descrito em IV.1.1 e montar as matrizes σ e \mathbf{m} ;
- d) Avaliação da função de falha e seus gradientes no espaço original e reduzido:

$$G(\mathbf{U}) = R - S \rightarrow \text{espaço original}$$

$$G(\mathbf{V}) = G(\mathbf{U})$$

$$\mathbf{V} = \Gamma \sigma^{-1} (\mathbf{U} - \mathbf{m}) \rightarrow \text{espaço reduzido}$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{U}} = \Gamma \cdot \sigma^{-1} \rightarrow \text{matriz Jacobiana} \quad (\text{V.9})$$

$$\nabla g(\mathbf{V}) = (\mathbf{J}^{-1})^T \nabla G(\mathbf{U}) \quad (\text{IV.10})$$

- e) Avaliar novo ponto de projeto, dado pela equação do HLRF:

$$\mathbf{V}^{K+1} = \frac{1}{|\nabla g(\mathbf{V}^K)|^2} \left[\nabla g(\mathbf{V}^K)^T \mathbf{V}^K - g(\mathbf{V}^K) \right] \nabla g(\mathbf{V}^K)$$

f) Determinar o índice de confiabilidade β dado por:

$$\beta = |V^{K+1}|$$

g) V^{next} será o novo ponto de projeto. Pelo critério de convergência assumido, se avaliará se este ponto convergiu satisfatoriamente. Um dos critérios de convergência pode ser:

$$\frac{|V^{K+1}| - |V|}{|V^{K+1}|} \leq TOL \quad (IV.12)$$

Onde TOL é a tolerância admitida.

Caso a relação seja superior a TOL, o processo inicia-se novamente, agora com V^{next} como novo ponto de partida e calculam-se as médias e desvios padrões equivalentes e todo restante do processo.

h) Determinar o novo ponto de projeto U^{next} no espaço original pela expressão:

$$U^{next} = U + (J^{-1})^T (V^{K+1} - V) \quad (IV.11)$$

i) Após a obtenção da convergência, calcula-se a probabilidade de falha p_f , dado por:

$$P_f^{FORM} = \Phi(-\beta)$$

A experiência tem mostrado que o algoritmo HLRF na sua forma original é instável e em alguns casos pode não convergir. Este algoritmo foi aperfeiçoado por Liu e Der Kiureghian (1991) e Zhang e Der Kiureghian (1997) através de alteração no esquema de busca do ponto de projeto e foi chamado de iHLRF.

O algoritmo apresentado no item IV.1.3 sofre modificação a partir do item “e”, que é a etapa da avaliação do novo ponto de projeto pelo HLRF. Portanto todo o processo até este item permanece o mesmo. A seguir será apresentado a seqüência do algoritmo pelo iHLRF a partir do item “e” do HLRF:

a) O novo ponto de projeto será obtido pela seguinte expressão:

$$V^{next} = V + \lambda d \quad (IV.13)$$

Onde: λ - tamanho do passo a ser dado a cada iteração em busca do ponto de projeto;

d – vetor de direção de pesquisa, que é dado pela seguinte equação:

$$d = \frac{1}{\|\nabla g(V)\|^2} [\nabla g(V)^T V - g(V)] \nabla g(V) \quad (\text{IV.14})$$

b) O iHLRF é uma melhoria do método HLRF, com relação ao cálculo do λ (tamanho do passo da iteração). No método HLRF, o λ é igual a 1, ao passo que no iHLRF o λ é variável, de tal forma a obter o ponto de projeto ideal. Para que isso seja possível, foi implementada na rotina computacional desenvolvida no software Matlab, a regra de Armijo, que é dada pela seguinte equação:

$$m(V^{next}) - m(V) \leq +a\lambda (\nabla m(V)^T d) \quad (\text{IV.15})$$

Onde: a - é uma constante e seu valor típico é igual a 0.5;

m é uma função de mérito sugerida por Zhang e Der Kiureghian (1997) dada pela equação:

$$m(V) = \frac{1}{2} \|V\|^2 + c|GV| \quad (\text{IV.16})$$

$$m(V^{next}) = \frac{1}{2} \|V^{next}\|^2 + c|GV| \quad (\text{IV.17})$$

∇m - gradiente da função mérito

$$\nabla m = V + c \nabla g V \text{sign}(GV) \quad (\text{IV.18})$$

$$c = \gamma \frac{\|V\|}{\nabla g V} + \eta \quad (\text{IV.19})$$

sendo

$$\gamma = 2 \quad \text{e} \quad \eta = 10$$

- c) A cada iteração é verificada se a regra de Armijo é atendida pela equação IV.15 e posteriormente são obtidos os resultados das equações IV.16 à IV.19. De posse destes resultados, obtém-se o novo λ , dada pela própria regra de Armijo abaixo:

$$\lambda = \frac{m(V^{next}) - m(V)}{+ a(\nabla m(V)^T d)} \quad (IV.20)$$

- d) Este novo valor de λ será utilizado na equação (IV.13) para se obter o novo ponto de projeto V^{next} .
- e) Os próximos passos são os mesmos do item IV.1.3 a partir do item “f”.

IV.2 Método analítico SORM

O método SORM (Second Order Reliability Method) é semelhante ao FORM, porém a diferença fundamental está na aproximação feita pela superfície de falha no ponto de projeto V^* no espaço reduzido. No FORM, a aproximação é uma superfície linear, e, no SORM é uma superfície quadrática, conforme se pode ver na figura IV.4:

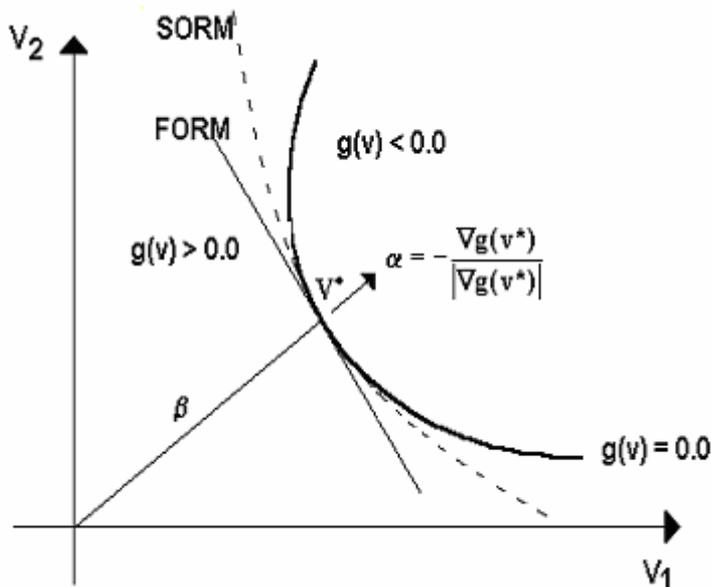


Figura IV.4: Função de falha pelo método SORM/FORM

A figura IV.4 mostra a superfície linear do FORM e a quadrática do SORM, separando a região de falha com a região de segurança.

No método FORM, a avaliação da probabilidade de falha envolve a avaliação da função de falha e também das derivadas nos pontos sob análise para composição do vetor gradiente.

No SORM, como a função de aproximação é uma função quadrática, é necessária derivada de segunda ordem da função de falha para a avaliação das curvaturas no ponto de projeto.

IV.3 Exemplo de aplicação do método FORM

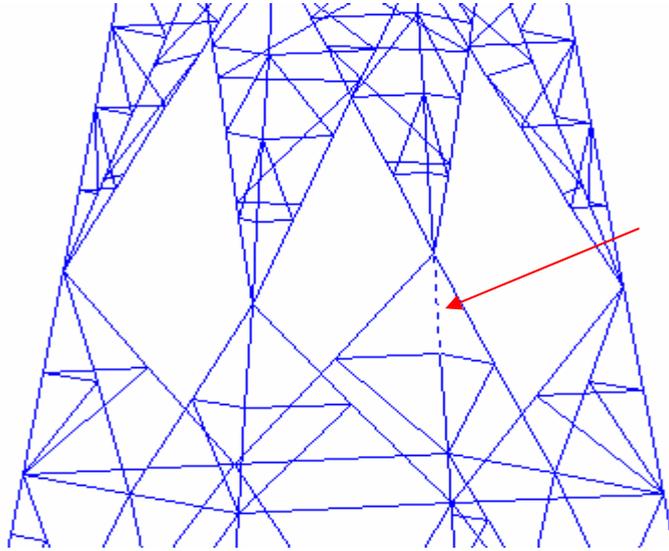


Figura IV.5: Corte de uma torre metálica

A figura IV.5 representa parte de uma estrutura metálica treliçada, projetada em perfis do tipo cantoneira em aço carbono. As solicitações sobre esta estrutura são compostas das seguintes parcelas:

- Solicitação devido ao peso próprio;
- Solicitação de outros elementos suportados pela estrutura;
- Solicitação devido aos esforços causados pela força do vento.

O objetivo deste exemplo é mostrar a aplicação do método FORM de maneira detalhada, a fim de obter a confiabilidade estrutural, considerando-se que há uma variabilidade de natureza probabilística tanto dos efeitos das solicitações, bem como da resistência das cantoneiras que compõe a estrutura.

O cálculo da confiabilidade pode ser estendido para todos os elementos componentes da estrutura, porém, neste exemplo somente, será realizado para uma cantoneira qualquer da estrutura, que está representada como a barra pontilhada na figura acima.

Dados do problema:

Resistência R : variável aleatória (v.a) com distribuição lognormal;

Solicitações totais devido ao peso S_p : v.a. com distribuição normal;

Solicitação devido ao vento S_v : v.a. com distribuição Gumbel Tipo I;

Tabela 7: Valores arbitrados para resistência e solicitações

Resistência (kN)		Solicitação Sp (kN)		Solicitação Sv (kN)	
média	cov	média	cov	média	cov
249,78	0,10	19,86	0,05	78,84	0,20

A tabela 7 apresenta os valores médios e a covariância, os quais foram arbitrados para a resistência e solicitações devido ao peso da estrutura Sp e a solicitação do vento sobre a estrutura Sv.

Solução:

- Definição da função de falha

$$\mathbf{U}=(R,Sp,Sv)$$

$$G(\mathbf{U}) = R - Sp - Sv$$

- Parâmetros da distribuição de R - lognormal

$$\zeta_R = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_R^2}{\mu_R^2}\right)} = 0,0998 \quad e \quad \lambda_R = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\zeta_R^2 = 5,5156$$

$$\mu_R = 249,78\text{kN} \quad \sigma_R = 0,10 \cdot 249,78 = 24,98\text{kN}$$

- Parâmetros da distribuição da Sv – Gumbel Tipo I

$$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma_{Sv}} = 0,0813 \quad e \quad u = \mu_{Sv} - \left(\frac{0,5772}{\alpha}\right) = 71,7476$$

$$\mu_{Sv} = 78,84\text{kN} \quad \sigma_{Sv} = 0,20 \cdot 78,84 = 15,77\text{kN}$$

- Parâmetros da distribuição da Sp – normal

$$\mu_{Sp} = 19,86\text{kN} \quad \sigma_{Sp} = 0,05 \cdot 19,86 = 0,99\text{kN}$$

- Normais equivalentes

Com as equações de transformações de variáveis quaisquer para normais equivalentes do item IV.1.1 têm-se:

$$\text{Para R: } \mu_R^N = 248,54\text{kN} \quad \sigma_R = 24,85\text{kN};$$

$$\text{Para Sp: } \mu_{Sp}^N = 19,86\text{kN} \quad \sigma_{Sp}^N = 0,99\text{kN};$$

$$\text{Para Sv: } \mu_{Sv}^N = 76,17\text{kN} \quad \sigma_{Sv}^N = 15,08\text{kN};$$

- Etapas do algoritmo HLRF

a) Obtenção da matriz Γ :

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b) Ponto de partida: $\mathbf{U}^T = (249,78; 19,86; 78,84)$

c) Matriz das médias e desvios padrões normais equivalentes

$$\mathbf{m}^T = (248,54; 19,86; 76,17);$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} 24,85 & 0 & 0 \\ 0 & 0,99 & 0 \\ 0 & 0 & 15,08 \end{bmatrix}$$

d) Avaliação da função de falha e seus gradientes no espaço original e reduzido:

$$G(\mathbf{U}) = R - S_p - S_v = 249,78 - 19,86 - 78,84 = 151,08$$

$$G(\mathbf{V}) = G(\mathbf{U}) = 151,08$$

$$\mathbf{J} = \Gamma \sigma^{-1} = \begin{bmatrix} 0,04 & 0 & 0 \\ 0 & 1,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,06 \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{J}^{-1})^T = \begin{bmatrix} 24,92 & 0 & 0 \\ 0 & 0,99 & 0 \\ 0 & 0 & 15,07 \end{bmatrix}$$

$$\nabla G = \frac{\partial G}{\partial R} e_R + \frac{\partial G}{\partial S_p} e_{S_p} + \frac{\partial G}{\partial S_v} e_{S_v}$$

$$\nabla G(\mathbf{U})^T = (1, -1, -1)$$

$$\nabla g(\mathbf{V}) = (\mathbf{J}^{-1})^T \nabla G(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 24,92 \\ 0,99 \\ -15,07 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \Gamma \sigma^{-1}(\mathbf{U} - \mathbf{m}) = \begin{bmatrix} 0,05 \\ 0 \\ 0,17 \end{bmatrix}$$

e) Novo ponto de projeto

$$\mathbf{V}^{K+1} = \frac{1}{|\nabla g(\mathbf{V}^K)|^2} [\nabla g(\mathbf{V}^K)^T \mathbf{V}^K - g(\mathbf{V}^K)] \nabla g(\mathbf{V}^K) = \begin{bmatrix} -4,4750 \\ 0,1784 \\ 2,7079 \end{bmatrix}$$

f) Índice de confiabilidade β

$$\beta = |\mathbf{V}^{K+1}| = 5,2336$$

g) Verificação da tolerância – $TOL = 10^{-5}$

$$\frac{|\mathbf{V}^{K+1}| - |\mathbf{V}|}{|\mathbf{V}^{K+1}|} \leq TOL \quad 0,9648 > TOL$$

h) Como nesta iteração a tolerância obtida é superior a adotada, obtém-se o novo ponto de partida \mathbf{U}^{next} no espaço original:

$$\mathbf{U}^{next} = \mathbf{U} + (\mathbf{J}^{-1})^T (\mathbf{V}^{K+1} - \mathbf{V}) = \begin{bmatrix} 137,04 \\ 20,04 \\ 116,99 \end{bmatrix}$$

Como não ocorreu a convergência nesta primeira iteração, o processo começa novamente a partir do item “b” .

A seguir se apresentam as tabelas com todas as iterações e resultados finais:

A tabela 8 apresenta os valores obtidos pelo método HLRF e a tabela 9 pelo método iHLRF.

Estes resultados foram obtidos através de rotina computacional desenvolvida no software Matlab.

Os resultados finais para ambos os métodos são os mesmos, porém pelo iHLRF foram necessárias mais 6 iterações, sem apresentar vantagens de convergência, em relação ao HLRF para o exemplo apresentado. Neste caso, ambos os métodos convergem sem dificuldades.

Tabela 8: Resultados finais do processo iterativo pelo método HLRF

Iteração	Variável	Ponto de Projeto U	Beta β	Novo Ponto Projeto	lambda λ	Probabilidade de Falha - P_f	Confiabilidade R_{el}
1	R	249,78	5,2336	137,04	1,00	8,3283E-08	1,0000E+00
	Sp	19,86		20,04			
	Sv	78,84		117,00			
2	R	137,04	4,3149	193,58	1,00	7,9896E-06	9,9999E-01
	Sp	20,04		20,00			
	Sv	117,00		173,58			
3	R	193,58	4,1792	210,66	1,00	1,4636E-05	9,9999E-01
	Sp	20,00		19,95			
	Sv	173,58		190,71			
4	R	210,66	4,1786	211,50	1,00	1,4674E-05	9,9999E-01
	Sp	19,95		19,94			
	Sv	190,71		191,56			
5	R	211,50	4,1786	211,50	1,00	1,4674E-05	9,9999E-01
	Sp	19,94		19,94			
	Sv	191,56		191,56			

Tabela 9: Resultados finais do processo iterativo pelo método iHLRF

Iteração	Variável	Ponto de Projeto U	Beta β	Novo Ponto Projeto	lambda λ	Probabilidade de Falha - P_f	Confiabilidade R_{el}
1	R	249.78		137.04			
	Sp	19.86	5.2336	20.04	1.00	8.3283E-08	1.0000E+00
	Sv	78.84		117.00			
2	R	137.04		138.06			
	Sp	20.04	6.2251	20.04	0.02	2.4163E-10	1.0000E+00
	Sv	117.00		118.02			
3	R	138.06		140.07			
	Sp	20.04	6.1099	20.04	0.04	5.0039E-10	1.0000E+00
	Sv	118.02		120.03			
4	R	140.07		143.96			
	Sp	20.04	5.8966	20.04	0.07	1.8615E-09	1.0000E+00
	Sv	120.03		123.92			
5	R	143.96		151.18			
	Sp	20.04	5.5316	20.03	0.14	1.5906E-08	1.0000E+00
	Sv	123.92		131.15			
6	R	151.18		163.64			
	Sp	20.03	5.0037	20.02	0.25	2.8165E-07	1.0000E+00
	Sv	131.15		143.62			
7	R	163.64		181.85			
	Sp	20.02	4.4713	19.99	0.44	3.8907E-06	1.0000E+00
	Sv	143.62		161.85			
8	R	181.85		200.61			
	Sp	19.99	4.2129	19.97	0.69	1.2614E-05	9.9999E-01
	Sv	161.85		180.65			
9	R	200.61		210.18			
	Sp	19.97	4.1791	19.95	0.90	1.4642E-05	9.9999E-01
	Sv	180.65		190.23			
10	R	210.18		211.48			
	Sp	19.95	4.1786	19.94	0.99	1.4674E-05	9.9999E-01
	Sv	190.23		191.54			
11	R	211.48		211.50			
	Sp	19.94	4.1786	19.94	1.00	1.4674E-05	9.9999E-01
	Sv	191.54		191.56			

APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS

CAPÍTULO V - ESTUDO DE CASO: TORRE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DA COPEL

Desde o início do trabalho foi definido que a metodologia para a análise da confiabilidade a ser desenvolvida seria aplicada em um modelo real de estrutura, a fim de se obterem resultados qualitativos e quantitativos.

Dentro deste conceito, foi escolhida uma torre de transmissão de energia elétrica – TTEE da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.

V.1 Descrição da torre de transmissão do estudo

A TTEE escolhida é do tipo suspensão, circuito duplo, disposição vertical dos condutores e nível de tensão de 138 kV, conforme se observa nas figuras abaixo:

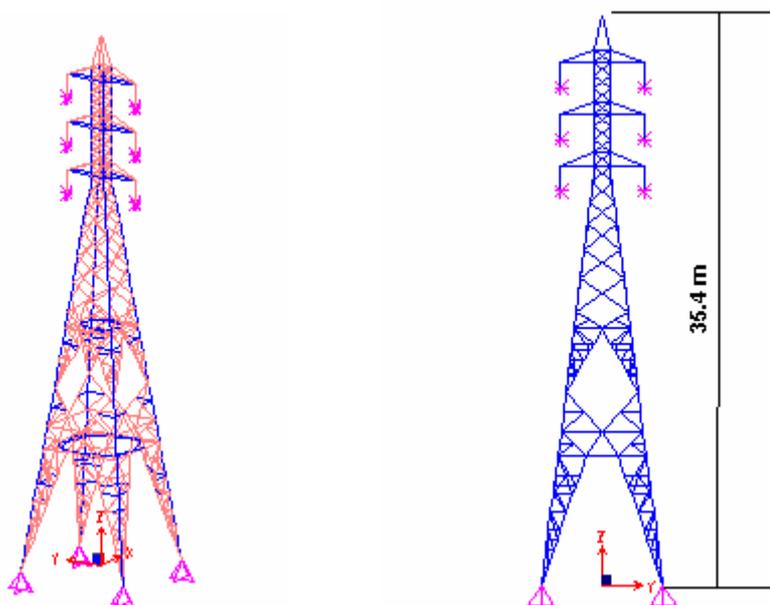


Figura V.1 – Torre de suspensão 138 kV

Esta torre é composta por 598 perfis cantoneiras de aço carbono ASTM A36 e de 276 de aço de alta resistência A572 – 50. Observa-se na figura V.1 a TTEE em perspectiva, o material das cantoneiras em aço ASTM A572 – GR.50 está sendo representado em cor azul, o qual é utilizado nas pernas, na parte inferior das mísulas da torre e em outras partes, onde existir maior solicitação da estrutura. O aço ASTM

A36 está representado na cor vermelha para o restante das barras.

V.2 Modelagem geométrica da TTEE

Na área de projetos de linhas de transmissão da COPEL obtiveram-se as coordenadas de cada junta nodal de cada barra, bem como o tipo e o material utilizado nas seções do tipo cantoneira das barras da estrutura.

A COPEL utiliza o software TOWER, que foi desenvolvido pela empresa americana Power Line Systems para análise e projeto de estruturas de transmissão. O programa TOWER é utilizado por uma centena de organizações e empresas em mais de oitenta países em todo mundo.

Com os dados geométricos e propriedades dos materiais de cada barra, a modelagem foi realizada no software SAP2000 versão 10.0. Não foi possível passar de forma automática os dados fornecidos pelo TOWER para o SAP2000. O processo de migração é trabalhoso, sendo feito por meio de tabelas do programa Excel. No TOWER as juntas são parafusadas e no SAP2000, para efeito de simplificação, consideraram-se juntas nodais de barras, sem a verificação das ligações (ainda não disponível na versão atual do SAP2000).

Como o TOWER é um software específico de análise e projeto de torres de transmissão de energia, já possui algumas facilidades que o SAP2000 não tem. Por exemplo, no TOWER, já existe desenvolvido o modelo de cadeia de isoladores a ser utilizado na torre de transmissão. O SAP2000 é um software de projeto mais geral, havendo necessidade de implementação deste elemento para sua representação na torre. No SAP2000, este elemento foi representado como uma barra, onde a deflexão máxima devido à ação do vento foi restringida convenientemente através de uma mola com um coeficiente de elasticidade específico e a influência deste esforço sobre a cadeia de isoladores é transmitida e transferida à torre.

Os tipos de cantoneiras utilizados nesta torres estão representados na tabela 10:

Tabela 10 - Tipos de Cantoneira da Torre

Tipo Cantoneira	Material	Tipo Cantoneira	Material
L40X3	A36	L40X3a	A572-50
L45X45X3	A36	L45X45X3a	A572-50
L45X45X4	A36	L45X45X4a	A572-50
L50X4	A36	L50X4a	A572-50
L50X50X6	A36	L50X5a	A572-50
L60X4	A36	L65X65X5a	A572-50
L65X65X5	A36	L75X75X5a	A572-50
		L75X75X6a	A572-50

Após a montagem do modelo da torre de suspensão no SAP2000, as cargas atuantes na torre foram definidas.

V.3 Definição das cargas de projeto

A torre em estudo está sujeita às seguintes cargas de projeto:

- Cargas devidas ao peso próprio;
- Cargas devidas ao peso dos condutores e cadeia de isoladores;
- Carga devido ao peso do pára-raios;
- Cargas devidas aos esforços causados pelo vento na estrutura, nos cabos condutores e cabo pára-raios.

As cargas estão representadas graficamente na figura V.2:

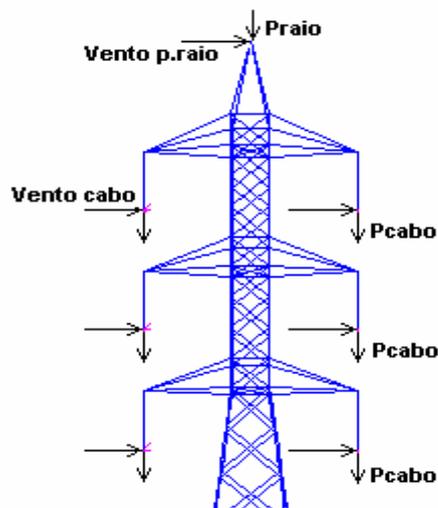


Figura V.2 – Representação das cargas na torre.

As cargas devido ao peso próprio das barras, o SAP2000 se encarrega de calcular automaticamente, através das características específicas de cada cantoneira que compõe a torre. O peso de cada barra é distribuído uniformemente sobre cada uma delas.

Para este tipo de estrutura e nível de tensão, o condutor Íbis 397.5 MCM, cujo diâmetro é de 0.01988 m e o cabo pára-raios Petrel 101.8 MCM com diâmetro de 0.0117 m, são os mais usuais. Com as características geométricas e físicas do condutor e do pára-raios, seus pesos foram determinados de acordo com a tabela 11:

Tabela 11 - Cálculo do Peso dos Condutores e Pára-raios

	unidade	Condutor	Pára-raios
		Íbis 397,5 MCM	Petrel 101,8 MCM
Diâmetro	metros	0,01988	0,0117
Massa	kg/m	0,8139	0,378
g - aceleração da gravidade	m/s ²	9,81	9,81
Peso	N/m	7,98	3,71
Vão de peso máximo	m	900	900
Peso Total	N	7185,92	3337,36
Fator mínimo para cargas verticais k1		1,2	1,2
Peso corrigido	kN	8,62	4,00
Peso cadeia de isoladores	kN	0,6	
Peso projeto	kN	9,22	4,00

Os pesos dos condutores estão representados na figura V.2, como as cargas verticais localizadas na extremidade das cadeias de isoladores e do pára-raios diretamente no ponto mais alto da torre.

Obteve-se o peso do condutor ou pára-raios (N/m) através do produto entre a massa (kg/m) pela aceleração da gravidade (m/s²). O vão de peso máximo de 900 m é um valor característico adotado pela área de projetos da COPEL. O peso total é o produto do peso (N/m) e o vão de peso máximo (m). A norma NBR 5422 recomenda multiplicar o peso total obtido pelo fator mínimo para cargas verticais k1. Deste modo, multiplicando-se o peso total pelo fator k1, obtém-se o peso corrigido. Para os condutores, ainda pode ser considerado o peso da cadeia de isoladores, o qual deve ser adicionado ao peso corrigido, para a obtenção do peso de projeto a ser adotado para os condutores, conforme pode ser visto na tabela 11.

A seguir será apresentada a tabela 12, onde se obteve as cargas sob os

condutores e o cabo pára-raios quando sujeitos à ação do vento. Para a determinação destes valores, foram seguidas as orientações indicadas na NBR 5422. A velocidade básica de vento, ou seja, a 10 metros de altura e com período de integração de 10 minutos, adotada no cálculo é de 30 m/s, de acordo com a experiência da COPEL. Esta velocidade do vento foi tomada como referência, mas os cálculos podem ser obtidos para velocidades superiores ou inferiores, se for necessário, a fim de se obter outras análises e conclusões do efeito do vento sob a torre.

Cabe, neste instante, realçar que o objetivo principal da pesquisa é propor uma metodologia para avaliar a confiabilidade de uma estrutura metálica quando sujeita a esforços de natureza aleatória, como os esforços causados pela força do vento. Deste modo, todo o estudo está baseado nesta velocidade de projeto de 30 m/s. Porém, esta metodologia pode ser aplicada para velocidades mais críticas, a fim de se analisar o efeito da redução da confiabilidade estrutural. A seguir será apresentada a tabela de cálculo das cargas nos condutores e pára-raios quando submetidos à ação do vento.

Tabela 12 - Cálculo das Cargas nos Condutores e Pára-raios sob a Ação do Vento

Características de Projeto	unidade	Condutor	Pára-raios
Velocidade projeto (10 metros e 10 minutos)	m/s	30	30
Kd - fator correção p/velocidade 30 segundos		1,21	1,21
Correção da altura - n (t=30s e terreno B)		11	11
H altura media de atuação do vento no cabo	m	20	30
Diâmetro do condutor	m	0,01988	0,0117
Velocidade corrigida para a altura de projeto	m/s	31,95	33,15
Velocidade com altura corrigida e t=30 s	m/s	38,66	40,11
Pressão dinâmica de referência - q_0	N/m ²	916,23	986,33
Coeficiente de arrasto Cxc		1,00	1,00
Fator de efetividade alfa		0,9	0,9
Vão médio	m	450	450
Ângulo teta	°	90	90
Ação do vento Ac	kN	7,13	4,52
Fator adotado no projeto		1,00	1,00
Ação do vento - Ac - corrigido	kN	7,3	4,52

Observação:

1. A velocidade corrigida de projeto é calculada pela fórmula II.3:

$$V_p = k_r \cdot k_d \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot V_b$$

Onde,

K_r – coeficiente de rugosidade por tipo de terreno;

K_d – fator de conversão do tempo de integração;

V_b – velocidade básica do vento.

2. A carga de vento em condutores é dada pela fórmula II.5 abaixo:

$$A_c = q_0 C_{xc} \alpha d \frac{Z}{2} \text{sen}^2 \theta \text{ (N)}$$

Onde:

q_0 – pressão dinâmica de referência;

C_{xc} – coeficiente de arrasto = 1,0;

α - fator de efetividade adimensional;

d – diâmetro do cabo em metros;

Z – comprimento do vão em metros;

θ - ângulo de incidência do vento ($\leq 90^\circ$) em relação à direção do vão;

As cargas nos condutores e pára-raios quando sujeitas à ação do vento estão representadas na figura V.2, como cargas horizontais sob a extremidade inferior dos isoladores e sob o pára-raios diretamente no ponto de fixação deste cabo.

Primeiramente, foi obtida a velocidade com a correção da altura de aplicação do vento, dada pela fórmula II.2, apresentada no capítulo II, sendo que esta fórmula, também leva em conta o período de integração que neste caso, é 30 segundos. Como pode ser visto na tabela, a altura de atuação média do vento nos cabos é 20 m e no pára-raios de 30 m.

Em seguida, obteve-se a velocidade com a correção do período de integração de 10 minutos para 30 segundos, que é dada pelo coeficiente K_d , obtida do gráfico da figura II.6. De posse desta velocidade, foi calculado a pressão

dinâmica de referência q_0 , dada pela fórmula II.4.

Para a obtenção da ação do vento no condutor ou pára-raios (A_c), dado pela fórmula II.5, é necessário considerar o coeficiente de arrasto, fator de efetividade, vão médio e ângulo de incidência do vento sobre o cabo em relação à direção do vão.

A ação do vento corrigida pode ser obtida aplicando-se mais um fator de correção sob a ação do vento, sendo que este valor é definido de acordo com critérios do projetista da empresa transmissora. No caso desta torre, foi adotado o fator 1.0.

Para determinação dos esforços causados pelo vento sobre as barras da estrutura, utilizou-se o processo de geração automática do SAP 2000. Neste estudo, foi escolhida a norma ASCE 10-97 para ser seguida.

Section	Parameter	Value
Exposure and Pressure Coefficients	Exposure from Extents of Rigid Diaphragms	<input type="radio"/>
	Exposure from Frame and Area Objects	<input checked="" type="radio"/>
	Include Area Objects	<input type="checkbox"/>
	Include Frame Objects (Open Structure)	<input checked="" type="checkbox"/>
Wind Exposure Parameters	Wind Direction Angle	
	Windward Coeff. C_p	
	Leeward Coeff. C_p	
	Case (ASCE 7-02 Fig. 6-9)	
	e1 Ratio (ASCE 7-02 Fig. 6-9)	
	e2 Ratio (ASCE 7-02 Fig. 6-9)	
Wind Coefficients	Wind Speed (mph)	70
	Exposure Type	B
	Importance Factor	0.87
	Topographical Factor, K_{zt}	1
	Gust Factor	0.85
	Directionality Factor, K_d	0.85
	Solid / Gross Area Ratio	0.2

Figura V.3: Tela do SAP 2000 para os coeficientes da carga de vento

A figura V.3 é uma tela do SAP2000, onde foram escolhidos os coeficientes para determinação da carga de vento sobre a estrutura. Sobre os itens escolhidos na tela acima, têm-se os seguintes comentários:

Coeficiente de pressão e exposição

- Foi escolhido o item estrutura aberta, onde as barras estão expostas a pressão do vento;

Coeficiente devido ao vento

- Velocidade do vento: 70 mph que é equivalente a 30 m/s;
- Tipo de exposição: B – categoria do terreno;
- Fator de importância: 0,87 – classificada como categoria I, na escala que varia de I a IV, para regiões sem furacões ou com furacões com velocidades entre 85 a 100 mph;
- Fator topográfico: 1 – depende da categoria do terreno B e da altura da estrutura;
- Fator de rajada:0,85;
- Fator de direcionalidade, k_d :0,85 – fator utilizado para torres treliçadas com base triangular,retangular e quadrada;
- Índice de área exposta: 0.2 – quociente da área líquida / área bruta.

Estas forças estão distribuídas uniformemente em cada barra, sendo que a direção foi definida pelo ângulo de incidência do vento sobre a torre.

V.4 Definição da combinação das cargas para avaliação do dimensionamento da estrutura.

No método dos estados limites aplicam-se fatores de ponderação sobre as cargas solicitantes nominais a fim de verificar o dimensionamento das barras, através da comparação das solicitações ponderadas e combinadas com as respectivas resistências de cálculo (resistências nominais minoradas).

Na tabela 13, indicam-se as duas combinações de carga adotadas no estudo, que representam as condições mais críticas de carregamento.

Tabela 13 - Combinações de Carga

Nome da Combinação	Tipo de Combinação	Tipo de Caso	Nome do Caso	Fator de Ponderação
COMB1	Soma Linear	Estático Linear	Vento_Cabos	1,3
COMB1		Estático Linear	Vento_P_Raios	1,3
COMB1		Estático Linear	Vento_Torre	1,3
COMB1		Estático Linear	Peso Pára-Raios	1,4
COMB1		Estático Linear	Peso Próprio Torre	1,4
COMB1		Estático Linear	Peso Cabos	1,4
COMB2	Soma Linear	Estático Linear	Vento_Cabos	1,3
COMB2		Estático Linear	Vento_P_Raios	1,3
COMB2		Estático Linear	Vento_Torre	1,3
COMB2		Estático Linear	Peso Pára-Raios	0,9
COMB2		Estático Linear	Peso Próprio Torre	0,9
COMB2		Estático Linear	Peso Cabos	0,9

Observa-se na tabela 13 que a combinação de carga COMB1 apresenta o fator de majoração de 1,3 para as cargas dependentes do vento e 1,4 para as cargas devido ao peso próprio. Do mesmo modo, a COMB2 estipula um fator de escala para as cargas devido ao vento de 1,3 e devido ao peso próprio de 0,9.

Após a modelagem geométrica da torre no SAP2000 e definições das cargas de projeto e combinações, passou-se para a verificação do dimensionamento e estabilidade da torre.

V.5 Verificação do dimensionamento e estabilidade da torre

A norma de projeto ASCE 10-97 foi utilizada para verificação do dimensionamento das barras da torre quando sujeita as cargas de projeto previamente definidas. Com a modelagem geométrica da estrutura, o SAP 2000 gera automaticamente um modelo de elementos finitos da torre.

Considerou-se a modelagem da estrutura como pórtico espacial. Assim permite-se uma maior facilidade de estabilização da estrutura, eliminando as juntas singulares (com rigidez nula) que aparecem nos modelos de treliça espaciais de modelos de torres. Esta escolha foi feita, pelos seguintes motivos:

- Os perfis tipo cantoneiras que formam a torre estão conectadas através de juntas parafusadas, que caracterizam estruturas aporticadas;
- O peso de cada barra da torre é calculado pelo SAP e distribuído uniformemente sobre cada uma delas;
- Os esforços causados pelo vento sobre a estrutura também foram obtidos pelo SAP, seguindo a norma escolhida e estas forças são distribuídas uniformemente sobre as barras da estrutura;
- Os momentos obtidos podem ser considerados desprezíveis, quando comparados com os esforços axiais dos elementos componentes da torre, conforme pode ser verificado através dos resultados obtidos nas simulações.

Caso fosse optado analisar a estrutura como treliça espacial, haveria a necessidade de transformar as cargas de peso próprio e a força devido ao vento sobre a estrutura, de cargas uniformes para cargas nodais. Devido à complexidade da estrutura, esta tarefa torna-se inviável.

Outra dificuldade encontrada, caso se desejasse analisar como treliça espacial, observou-se que esta estrutura contém vários nós hipoestáticos, causando singularidade na matriz de rigidez. A solução destas singularidades, como foi visto no capítulo II, é a inserção de barras fictícias no modelo.

No TOWER, a estrutura é analisada como treliça espacial, porém por ser um software de uso específico para projeto de torres de transmissão de energia, já possui recursos de uso de elementos de pórtico espacial, para contornar estas singularidades.

Em função dos argumentos apresentados, optou-se pela análise como pórtico espacial, considerando-se somente os deslocamentos nodais e os esforços axiais nas barras, desprezando-se os momentos solicitantes sobre elas.

Definida a geometria, solicitações impostas e combinação de cargas, o SAP 2000 fez a verificação do dimensionamento de cada barra, com a finalidade de determinar os esforços máximos de compressão e tração em cada uma delas.

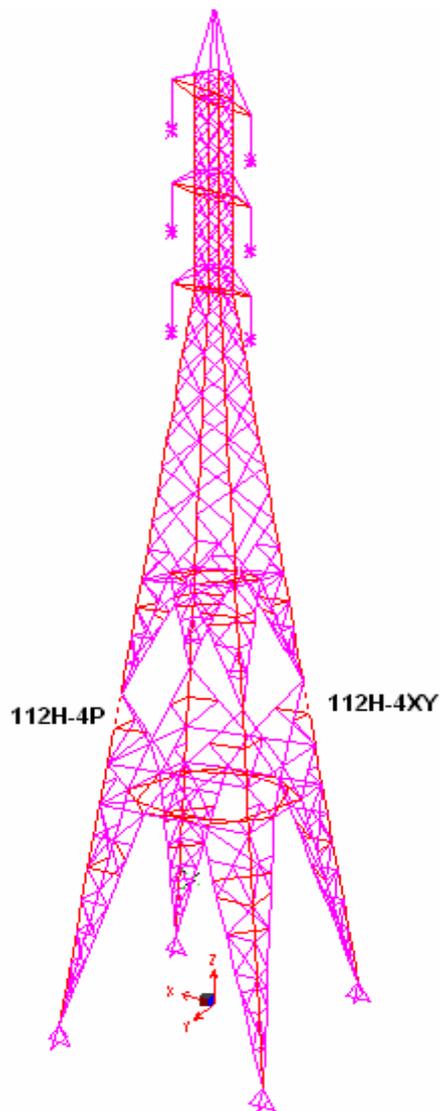


Figura V.4:TTEE – Barras mais solicitadas

Da análise do dimensionamento pelo SAP 2000, para cada barra da estrutura foram determinadas as solicitações de tração ou compressão, em função das combinações de cargas da estrutura. A figura V.4 indica a posição da barra

112H-4P que apresentou maior compressão e a barra 112H-4XY que esta mais tracionada.

A tabela 14 mostra os valores obtidos no dimensionamento via SAP 2000, que a barra 112H-4P apresentou maior compressão, cuja solicitação é de 130.31 kN.

Tabela 14 - Solicitação Calculada (Pu)

Barra	Combinação	Pu (kN)
112H-4P	COMB1	-130,31
112H-4XY	COMB2	84,62

Da mesma forma a barra 112H-4XY é a mais traçãoada, sendo a solicitação de 84.62 kN e a combinação de carga imposta é a COMB2

De posse das solicitações calculadas pelo SAP 2000 para todas as barras, parte delas comprimidas, outras tracionadas, determinou-se para cada barra a resistência de cálculo admissível, obtida através da formulação dada pela norma ASCE 10-97, apresentada no capítulo II, item II.8.1.

A seguir será apresentada uma tabela resumo, onde foram escolhidas quatro barras, sendo a 112H-4XY tracionada e as demais comprimidas.

Tabela 15 - Verificação do dimensionamento das barras

	Barra	Unidades	112H-4XY	112H-4P	278-2Y	278-4Y
1	Perfil Cantoneira		L75X75X6a	L75X75X6a	L45X45X3	L45X45X3
2	Área	m ²	0,000864	0,000864	0,000261	0,000261
3	Comprimento	m	1,270	1,270	1,216	1,216
4	r _{min}		0,015	0,015	0,009	0,009
5	kL/r	k=1		85	135,12	135,12
6	Cc			111,10	131,92	131,92
7	$\frac{144 \psi}{\sqrt{F_y}}$			21,1	25,06	25,06
8	w/t			12,5	15,0	15,0
9	(w/t) _{lim}			11,3	13,3	13,3
10	Fcr	kN/m ²		319918	226722	226722
11	Fa	kN/m ²		226287	108069	108069
12	Pac_Calc.	kN		195,51	28,21	28,21
13	Pu	kN	89,20	-123,16	-20,98	-20,23
14	PRatio		0,3328	0,6299	0,7439	0,7173
15	Pat	kN	268,04			
16	Fy	kN/m ²	344700	344700	248200	248200
17	E	kN/m ²	2,00E+08	2,00E+08	2,00E+08	2,00E+08

Na tabela 15, as linhas de 1 a 5 apresentam as características geométricas de cada barra, que serão descritas a seguir:

1. Tipo de perfil da cantoneira – tipo L de abas iguais;
2. Área da seção transversal da cantoneira;
3. Comprimento da barra;
4. Raio de giração mínimo – r_{\min} ;
5. Índice de esbeltez – kL/r ;

Para a verificação do dimensionamento da barra tracionada 112H-4XY, seguem-se os seguintes passos:

15. Deve-se calcular o P_{at} , que representa a tensão de tração de projeto, dado no capítulo II, pela equação II.18;
14. Calcular o P_{ratio} , que é a relação entre o P_u/P_{at} , dada pela equação II.20 e deve ser menor que 1;

Neste caso o P_{ratio} é igual a 0,3328, o qual está abaixo de 1. Esta barra, sujeita a este nível de tração axial não apresenta problemas.

Quanto à verificação para barras comprimidas, tomando-se como exemplo a barra 112H-4P, seguem-se os passos indicados pelas linhas da tabela, descritas abaixo:

6. Cálculo do coeficiente C_c , dada pela equação II.13;
8. Obtenção do valor de w/t , neste caso igual a 12,5;
9. Obtenção do valor de $(w/t)_{\lim}$, dada pela equação II.14, valor igual a 11,3;
10. Caso o valor de w/t seja maior que $(w/t)_{\lim}$ e menor que $\frac{144, \psi}{\sqrt{F_y}}$, calcula-se o

valor de F_{cr} dada pela equação II.15. Neste caso a condição é verdadeira e segue-se adiante;

11. Em seguida, obtém-se o valor de F_a dada pela equação II.11;
12. Multiplica-se o valor de F_a pela área, dada na linha 2 da tabela e assim chega-se no valor de $P_{ac_Calc.}$;
14. Finalmente, calcula-se o valor de P_{ratio} . Para esta barra o valor encontrado foi 0.6299, que é inferior a 1.

Esta rotina de cálculo foi elaborada para todas as barras, a fim de verificar se as barras suportariam satisfatoriamente quando submetidas as combinações de projeto definidas neste estudo. Os resultados obtidos indicam que para este nível de

carregamento (cargas de peso próprio e de vento) todas as barras passam no dimensionamento.

V.6 Análise da confiabilidade da TTEE da COPEL

Foi aplicado o método analítico FORM, para determinar a confiabilidade da TTEE. As rotinas de cálculo, segundo o método FORM, foram desenvolvidas no software Matlab. Determinou-se a confiabilidade de cada barra da torre em função das cargas de projeto definidas no estudo. Para chegar-se nesses valores de confiabilidade por barra, foram executadas as seguintes etapas:

- Obtenção do peso próprio nominal (peso dos cabos condutores, pára-raio e torre), ou seja, o peso destes componentes sem o fator de majoração de carga;
- Carga nominal devido ao vento (vento nos cabos condutores, pára-raio e torre) sem fatores de majoração;
- A resistência média - $P_{\text{médio}}$ é obtida a partir da $P_{\text{ac_calc}}$, que é a resistência de cálculo, dada pelas seguintes equações:

$$P_{\text{característico}} = \frac{P_{\text{ac_calc}}}{0,9} \quad \text{e} \quad P_{\text{médio}} = \frac{P_{\text{característico}}}{[1 - (1,28.0,1)]}$$

- Transformação de variáveis não normais para variáveis normais equivalentes:
 - Resistência média - $P_{\text{médio}}$ – variável lognormal;
 - Carga nominal devido ao vento – variável Gumbel Tipo I.
- Busca do ponto de projeto, método iHLRF e determinação do índice de confiabilidade β ;
- Cálculo da probabilidade de falha P_f e confiabilidade Rel .

A tabela 16 a seguir apresenta os esforços solicitantes nominais de projeto para algumas barras da torre, os quais foram obtidos dos resultados da simulação no SAP 2000. O esforço solicitante interno total sobre cada barra do modelo foi decomposto em parcelas nominais, devido ao peso próprio (cabos, torre e pára-raios) e de forças de vento (nos cabos, torre e pára-raios).

Tabela 16 - Esforços Internos Nominais de Projeto

Barra	PESO(kN)				FORÇA DO VENTO(kN)			
	TOTAL	CABOS	TORRE	PRAIOS	TOTAL	CABOS	TORRE2	PRAIOS
278-2P	-3,5401	-2,1547	-1,2293	-0,1561	-13,652	-1,8604	-12,625	0,8332
278-2Y	-3,5402	-2,1548	-1,2294	-0,1561	-13,653	-1,8606	-12,625	0,8331
278-4P	-3,7052	-2,1908	-1,3556	-0,1587	-13,032	-1,9295	-11,938	0,8361
278-4Y	-3,7053	-2,1909	-1,3557	-0,1587	-13,032	-1,9297	-11,938	0,836
278-5P	-3,7097	-2,1699	-1,3826	-0,1572	-12,328	-1,8331	-11,346	0,8514
278-5Y	-3,7098	-2,1700	-1,3826	-0,1572	-12,328	-1,8332	-11,346	0,8514
278-7Y	-3,7687	-2,1489	-1,4642	-0,1557	-11,211	-1,7632	-10,309	0,8612

A seguir apresenta-se a tabela 17 com os resultados do cálculo da confiabilidade para algumas barras da TTEE.

Tabela 17 - Confiabilidade de algumas barras da TTEE

	Barra	278-2Y	278-2P	1-2P	112H-4P	71H-2YP
1	Resist. P_Calc (kN)	28,21	28,21	10,48	196,03	174,95
2	Resist. P_Caract.(kN)	31,34	31,34	11,65	217,81	194,39
3	Resist. P_medio(kN)	35,76	35,94	13,36	249,78	222,92
4	Solicit. Ptotais(kN)	-3,54	-3,54	-1,12	-19,86	-17,54
5	Dist.Normal - COV	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
6	Desvio_Padrão	-0,18	-0,18	-0,06	-0,99	-0,88
7	Solicit. VentoTotal(kN)	-13,65	-13,65	-4,23	-78,84	-67,47
8	Dist.Gumbel - COV	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
9	Desvio_Padrão	-2,73	-2,73	-0,85	-15,77	-13,49
10	Pu(kN)	-22,70	-22,70	-7,07	-130,31	-112,26
11	P _{ratio}	0,7439	0,7439	0,6627	0,6283	0,6235
12	Beta (iHLRF)	3,4260	3,4458	4,1445	4,1786	4,3307
13	P _f	0,000306	0,000285	0,000017	0,000015	0,000007
14	Confiabilidade Rel	0,999694	0,999715	0,999983	0,999985	0,999993

Observa-se na tabela acima que a barra 278-2Y resultou em um menor nível de confiabilidade entre todas as barras, que foi 0,999694 (probabilidade de falha de 3.06×10^{-4}). Entretanto, este nível de confiabilidade é alto, e sua probabilidade de falha é praticamente desprezível, considerando-se, por exemplo, o nível de confiabilidade anual de 0,99 para um período de retorno de 50 anos, conforme estabelecido na norma IEC 826.

Tanto a resistência como as cargas devido ao peso e a força do vento estão sendo representadas pelas suas características nominais e também pelas suas respectivas funções densidade de probabilidades.

As linhas 1 a 3 da tabela mostram a transformação da resistência de cálculo de cada barra em resistências médias, já que o método analítico FORM trabalha com resistências e solicitações médias.

A linha 4 mostra o esforço solicitante devido ao peso total nominal e como foi mencionado em capítulos anteriores, a f.d.p normal é a que representa melhor a sua variabilidade. Foi adotado o COV de 5% para o peso, conforme pode ser visto na linha 5, sendo que este valor foi obtido de literaturas e normas (IEC 826).

Na linha 7 a força total nominal devido ao vento é apresentada para cada barra. A FDP de Gumbel Tipo I é representativa para esta variável. O COV de 20% foi assumido em função de consulta em literaturas e normas (IEC 826).

Na linha 10, P_{ratio} (quociente entre solicitação de cálculo e resistência de cálculo) e na linha 11, o P_u (resistência última de cálculo) foram obtidos diretamente pelo SAP2000.

Na linha 12, o beta foi obtido pela rotina desenvolvida no Matlab, utilizando o método iHLRF para determinação do ponto de projeto.

A probabilidade de falha na linha 13 da tabela é obtida pela equação III.33 apresentada no capítulo III.

A confiabilidade na linha 14 é dada pelo valor complementar da P_f , ou seja, $Rel = 1 - P_f$.

Observa-se que a barra que apresenta o maior P_{ratio} tem o menor índice de confiabilidade (beta), respaldando os resultados obtidos na análise do dimensionamento da torre. Na medida em que o valor do índice de confiabilidade beta aumenta, ocorre o aumento da confiabilidade e a conseqüente redução da probabilidade de falha.

COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DA PESQUISA

CAPÍTULO VI

VI.1 Comentários finais

No início da pesquisa, traçou-se como meta, o desenvolvimento de uma metodologia para determinação da confiabilidade de uma torre quando sujeita a esforços de natureza probabilística, o qual foi atingido conforme se observa no desenvolvimento da pesquisa.

Com a evolução do trabalho, foi aprofundado o conhecimento sobre o método analítico FORM, o qual serviu como ferramenta principal para a solução do problema proposto.

Esta dissertação propôs mostrar, de uma forma mais clara, a aplicação do método analítico FORM, tomando-se como exemplo, uma torre metálica de transmissão de energia elétrica da COPEL. A escolha de um tipo de torre da COPEL também fazia parte de um dos objetivos e para este caso, procurou-se mostrar, passo a passo, todo o processo de cálculo e análise da confiabilidade da estrutura.

Foram pesquisadas as principais normas nacionais e internacionais, que têm sua aplicação em projetos de torres e linhas de transmissão de energia elétrica e estão relacionados abaixo:

- NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica;
- IEC 60826 – Design Criteria of Overhead Transmission Lines;
- ASCE 10-97 - Design of Latticed Steel Transmission Structures.

A NBR 5422 apresenta o mapeamento do Brasil das velocidades básicas do vento, para um período de retorno de 50 anos, tempo de integração de 10 minutos, a 10 m de altura e para terreno de rugosidade categoria B. Com o objetivo de complementar os procedimentos desta norma, foi apresentado nesta dissertação, no capítulo II, trabalho recente envolvendo a COPEL / SIMEPAR sobre mapeamento das velocidades de vento no estado do Paraná. Esta regionalização foi importante, pois o estudo de caso foi aplicado para uma TTEE da COPEL.

As áreas de projetos de torres e linhas de transmissão de energia elétrica têm mostrado interesse em obter dados mais atualizados sobre esta importante

variável que é a velocidade básica do vento, os quais servirão como referência para definição de critérios de projeto específicos de região para região.

A norma IEC 60826 relaciona o nível de confiabilidade anual com o período de recorrência de eventos meteorológicos. Para um período de recorrência de 50 anos, o nível de confiabilidade está compreendido entre 0,98 e 0,99, para 150 anos, nível de confiabilidade entre 0,993 e 0,997 e, finalmente, para 500 anos um nível de confiabilidade entre 0,998 e 0,999. A escolha do período de recorrência e nível de confiabilidade a ser assumido depende do grau de importância dada a linha, porém o nível mínimo assumido pela norma é para um período de recorrência de 50 anos.

A norma parte de um período de recorrência e nível de confiabilidade e analisa probabilisticamente os efeitos das solicitações e resistências, e dimensiona-se a estrutura de acordo com estes critérios. Nesta dissertação, foi definido o período de recorrência de 50 anos para evento de velocidade máxima de vento, porém o nível de confiabilidade da estrutura foi determinado em função dos carregamentos impostos.

Da análise de confiabilidade da TTEE da COPEL, considerando-se o período de recorrência de 50 anos, obteve-se o menor nível de confiabilidade de 0,9997 para a barra mais crítica em função da hipótese de carregamento adotada. Comparando-se este nível de 0,9997 com o nível proposto pela norma, estaria na ordem de grandeza de confiabilidade para um período de recorrência de 500 anos, ou seja, alto grau de confiabilidade.

A norma ASCE 10-97 foi utilizada para análise do dimensionamento da TTEE da COPEL, sendo que esta estrutura estava sujeita aos esforços de projeto definidos no capítulo V. Verificou-se através dos resultados obtidos que todas as barras passaram pelo critério de dimensionamento definido pela norma ASCE 10-97. A barra 278-2Y foi a que apresentou o maior quociente entre solicitação e resistência de cálculo – Pratio de 0,7439 obtida pelo SAP 2000.

A determinação da probabilidade de falha – P_f de cada barra e conseqüentemente, as confiabilidades das mesmas, foram obtidas pelo método FORM, através de rotina elaborada no software MATLAB, o qual foi a ferramenta desenvolvida neste trabalho a fim de atingir outro objetivo proposto.

Um ponto relevante no estudo da confiabilidade sob enfoque probabilístico é a definição das funções densidade de probabilidade que caracterizam a resistência e

as solicitações de projeto, bem como sua variabilidade representada pelas covariâncias das variáveis aleatórias. Para o estudo de caso, a TTEE da COPEL, foi definida que a FDP lognormal para resistência dos membros componentes da TTEE, a solicitação devido ao peso com FDP normal e os esforços devido às forças causadas por ventos fortes, com FDP de Gumbel Tipo I, referências obtidas da norma IEC 60826.

Para o exemplo numérico apresentado no capítulo IV de uma estrutura metálica, onde foi obtido a P_f e a confiabilidade de uma barra componente da estrutura, o ponto de projeto foi obtido pelos métodos HLRF e iHLRF e para ambos ocorreu a convergência. O método iHLRF necessitou de 6 iterações a mais que o HLRF para se chegar no ponto de projeto ideal. Neste caso, não apresentou vantagem de convergência, porém o método iHLRF é implementado para os casos, onde o HLRF não atinge a convergência, desta forma apresentará vantagens em relação ao método HLRF.

Para o estudo de caso da TTEE da COPEL, ambos os métodos de busca do ponto de projeto HLRF e iHLRF foram utilizados. Os resultados obtidos foram praticamente idênticos. A barra 278–2Y, que apresentou o maior Pratio é a que resultou em um menor índice de confiabilidade beta (3.4260), obtida pelo método FORM, o qual representa em uma confiabilidade de 99.97%. Manteve-se coerência entre os resultados da análise do dimensionamento com a análise da confiabilidade da estrutura. Portanto, quanto maior o Pratio, menor o índice de confiabilidade e maior a probabilidade de falha P_f .

VI.2 Sugestões para continuidade da pesquisa

As seguintes sugestões de continuidade são apresentadas:

- 1) A análise de confiabilidade para a TTEE da COPEL foi obtida somente para uma hipótese de cálculo, onde se considerou os cabos intactos com vento máximo na direção perpendicular a direção dos condutores.

Podem-se adotar outras hipóteses de cálculo tais como:

- Ruptura do cabo pára-raios e vento transversalmente a direção dos cabos condutores;
- Hipótese de ruptura de um cabo condutor mais vento

transversalmente à direção dos condutores;

- Cargas devidas ao lançamento dos cabos condutores e pára-raios.

- 2) Determinação da Pf e confiabilidade para estas novas hipóteses de solicitações sobre a estrutura em estudo e também para outros modelos de torres, os quais desta forma devem refletir a condição mais crítica entre as hipóteses assumidas;
- 3) Estudo de confiabilidade global de uma linha de transmissão (LT) de energia elétrica, levando-se em consideração os seguintes aspectos:
 - Estudo de confiabilidade da LT, associando-se aspectos de limitação de condução de energia elétrica pelo tipo de condutor usado, bem como limitações mecânicas dos componentes desta LT (torres, condutores, isoladores, conectores e fundações);
 - Levantamento do grau de degradação da LT existente, ocasionada por eventos climáticos, principalmente nas estruturas, tempo de vida atual e tempo de vida útil estimada;
 - Através do estudo de confiabilidade global da LT e censo das características atuais da LT, propor melhorias no projeto da LT, de tal forma a aumentar a confiabilidade das mesmas;
- 4) Estudo de viabilidade econômica do custo adicional para aumentar o nível de confiabilidade da LT em detrimento ao risco existente de interrupção de fornecimento de energia elétrica;
- 5) No presente estudo, o modelo estrutural de pórtico espacial foi utilizado nas análises da torre estudada, porém os momentos gerados pelas forças atuantes na estrutura foram desconsiderados. Sugere-se a inclusão dos efeitos de flexão e de torção na análise estrutural, no dimensionamento das barras e cálculo da confiabilidade estrutural;
- 6) A análise da estrutura do estudo de caso foi elaborada como uma estrutura estática, elástica linear em primeira ordem. Como proposição de continuidade do estudo, análise dinâmica da estrutura, considerando-se a dinâmica existente entre os condutores com relação à torre, quando sujeita a esforços oriundos de ventos fortes, bem como análise não linear dos membros componentes da torre.

REFERÊNCIAS:

- [1]. ANG, A.H.S., TANG, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.1 – Basic Principles, New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [2]. ANG, A.H.S., TANG, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.2 - Decision, Risk and Reliability, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [3]. BARLOW, R. E., PROSCHAN, F., Mathematical Theory of Reliability, SIAM, 1996.
- [4]. DITLEVSEN, O AND MADSEN, H. O., Structural Reliability Methods, Baffins Lane, Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1996 URL: <http://www.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>
- [5]. FISHER, F. E. Probability Applications in Mechanical Design, New York, NY, USA:Marcel Dekker Incorporated, 2000.URL: <http://site.ebrary.com/lib/parana/Doc?id=10051220>
- [6]. FUSCO, P.B.(1976). Introdução ao projeto estrutural. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- [7]. HALDAR, A. AND MAHADEVAN,S., Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis, New York: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [8]. HAUGEN, E.B., Probabilistic approaches to design, New York: John Wiley & Sons Inc, 1968
- [9]. HARR, M.E., Reliability-based in civil engineering, Mineola, New York: Dover Publications, Inc., 1997.
- [10]. HART, G,C., Uncertainty analysis, loads, and safety in structural engineering, Englewood Cliffs,N.J.: Prentice-Hall Inc., 1982.
- [11]. GONTIJO, CARLOS ROBERTO, Cálculo de torres para linhas de transmissão – IEA Editora, 1994.

- [12]. GUETTER, A.K., HOFFMANN, J.N., MELLO, J.L.S – Parâmetro Meteorológicos Aplicáveis para Projeto de Linhas de Transmissão no Paraná, 2005.
- [13]. KRISHNAMOORTHY, K.S., Reliability Methods for Engineers, ASQC Quality Press, 1992.
- [14]. MADSEN, H. O., KRENK, S. AND LINK, N. C., Methods of Structural Safety, Prentice Hall, New Jersey, 1986
- [15]. SAGRILO, L.V.S.; Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM E SORM, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1994.
- [16]. THOFT-CHRISTENSEN, P., MUROTSU Y., Application of structural reliability, Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [17]. COSTA NETO, P.L.O., Estatística, 2ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- [18]. MILONE, G., Estatística Geral e Aplicada, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- [19]. ROSS, S. M., Introduction to Probability Models, San Diego, CA: Academic Press, 2000.
- [20]. ROSS, S. M., Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists, San Diego, CA: Academic Press, 2000.
- [21]. DEOLIYA, R., DATTA, T.K., Reliability of microwave towers against extreme winds, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 6, No. 5, 1998, pp. 555-569.
- [22]. PARK, S., CHOI, S., SIKORSKY, C., STUBBS, Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure, International Journal of Solids and Structures, 41, 2004, pp. 5035-5050.
- [23]. RODRIGUES, R.S., "Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Março de 2004.

- [24].MACHADO, A.C., SOUZA, A.M.L., ROCHA, M.M., "Caracterização das Propriedades Aerodinâmicas de Torres Metálicas Trelaçadas para Determinação da Resposta do Vento", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [25].RUFFIER, A.P., ESTRELLA, L.F., LISBOA, E.F.A., " Uma Avaliação da Influência do Método de Cálculo da Carga de Vento para o Dimensionamento de Estruturas de Linhas de Transmissão", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [26].RODRIGUES, R.S., BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., "Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento – Proposta para Revisão de Normas e Procedimentos de Projeto", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [27].WILHOITE, G.M., "Wind Recommendations for Transmission Towers", Journal of the Structural Division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers – February, 1972.
- [28].PEYROT, A.H., "Microcomputer – Based Nonlinear Structural Analysis of Transmission Line Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, Nº 11, November 1985.
- [29].THOMAS, M.B., PEYROT, A.H., "Dynamic Response of Ruptured Conductors in Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Nº 9, September 1982.
- [30].CARTON, T., PEYROT, A.H., "Computer Aided Structural and Geometric Design of Power Lines", Transactions on Power Systems, Vol.7, Nº 1, February 1992.
- [31].ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice Nº 52, "Guide for Design of Steel Transmission Towers", 1988.
- [32].ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice Nº 74, "Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading", 1991.

- [33]. DAVENPORT, A.G., "The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures" – Discussion on Statistical Concepts in Wind Loading of Structures – Paper N° 6480, 1969.
- [34]. SIMIU, E., FILLIBEN, J.J., "Probability Distributions of Extreme Wind Speeds", Journal of the Structural Division, September 1976.
- [35]. SIMIU, E., "Wind Climate and Failure Risks", Journal of the Structural Division, September 1976.
- [36]. DAVENPORT, A.G., "Gust Loading Factors", Journal of the Structural Division – Proceedings of the American Society of Civil Engineers, June 1967.
- [37]. SIMIU, E., FILLIBEN, J.J., "Sampling Errors in Estimation of Extreme Winds", Journal of the Structural Division, March 1978.
- [38]. BLESSMANN, J., O Vento na Engenharia Estrutural, 1 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- [39]. EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, "Longitudinal Loading Tests on a Transmission Line", September 1978.
- [40]. INTERNATIONAL STANDARD – ISO 4354, "Wind Actions on Structures", July 1997.
- [41]. FORTI, T.L.D., FORTI, N.C.S., REQUENA, J.A.V., "Análise de Projeto de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes, utilizando Software de Perfis Tubulares de Aço", Revista Construção Metálica, 2006.
- [42]. LEI, Y.H., CHIEN, Y.L., "Seismic Analysis of Transmission Towers considering both Geometric and Material Nonlinearities", Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, N° 1, pp. 29-42, 2005.
- [43]. NBR 5422, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985.
- [44]. IEC 826, Loading and Strength of Overhead Transmission Lines, IEC – International Electrotechnical Commission, 2nd Edition, 1991.