

ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
SUBMETIDAS A AÇÃO DO VENTO

Ruy Carlos Ramos de Menezes

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre
Setembro de 1988

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Jorge Daniel Riera
orientador

Prof. Jarbas Milititsky
Coordenador do Curso
de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

Banca:

- Prof. Jorge Daniel Riera (orientador)
Ph.D. pela Princeton University - USA
- Prof. Edgar Pereira
Ph.D. pela University of Missouri - USA
- Prof. José Carlos Ferraz Hennemann
Ph.D. pela Southern Methodist University - USA
- Prof. Luis Fernando Nanni
M.Sc. pela Princeton University - USA

Aos meus pais, Ruy e Thereza,
a minha irmã, Maria Thereza,
aos meus sogros, Carlos e Carmen Maria
e em especial a minha esposa Cecilia e
aos meus filhos Alvaro e Eduardo.

AGRADECIMENTOS:

Ao professor Jorge Daniel Riera pela dedicada orientação, amizade e em especial pelos ensinamentos e exemplo de competência transmitidos.

Aos professores do CPGEC da UFRGS, nas pessoas de seus coordenadores, Prof. José Carlos Ferraz Hennemann e Prof. Jarbas Milititsky e em especial ao Prof. Luis Fernando Nanni.

Aos colegas de curso pela amizade, união e excepcional ambiente de trabalho proporcionado.

A todos competentes funcionários do CPGEC.

Ao apoio e cooperação dos colegas da CEEE: engenheiros Binz, Bruno, Cabral, Castro, Guilherme, Janice, Joaquim, Joel, Juarez, Raul, Ricardo, Schuch, Simão e Virgílio e desenhista Petry, e de forma especial à compreensão, incentivo, confiança e incomum capacidade de discernimento dos engenheiros Iracy Louzada de Abreu e Vilson Renato da Silva, os quais, desta forma, possibilitaram a realização do curso e do trabalho de pesquisa.

A CIGRE/Brasil, na pessoa do líder do GT 08 do CE 22, Engenheiro João Batista Guimarães Ferreira da Silva, pelo fornecimento de dados e incentivo.

Aos colegas da CEMIG, CESP, COPEL, CPFL, ELETRONORTE e ELETROSUL pelo fornecimento de dados.

Ao CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro proporcionado.

SUMARIO:	Pág
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 . INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Antecedentes.....	1
1.2 - Definição do Problema de Confiabilidade Estrutural...	2
1.3 - O Caso das Linhas de Transmissão.....	4
1.4 - A Importância dos Estudos de Confiabilidade de LT's..	6
1.5 - Objetivo do Trabalho.....	8
2 . DESCRIÇÃO DO MODELO E PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA P_f	10
2.1 - Considerações Básicas.....	10
2.2 - Aplicação da Teoria de Valores Extremos.....	11
2.3 - Desenvolvimento do Modelo.....	14
2.4 - Processo Numérico Adotado - Programa FALHAEPS.....	17
3 . DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DA RESISTÊNCIA DE TORRES DE LT'S.....	18
3.1 - Sistemática de Testes de Protótipos.....	18
3.2 - Coleta de Resultados de Ensaios em Protótipos e Ajuste da Correspondente Distribuição de Probabilidade...	20
3.3 - Modelo para a Determinação da Carga de Ruptura Obtida em Ensaio de Protótipos, Segundo a Sistemática de Projeto Adotada no Brasil.....	27
3.4 - Processo de Simulação de Resultados de Ensaios, Através do Programa Computacional SIMULA.....	30
3.5 - Determinação da Distribuição da Resistência das Torres Típicas.....	31
3.6 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação.....	44
4 . CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DE VENTOS EXTREMOS.....	50
5 . LEVANTAMENTO DE ACIDENTES EM LT'S.....	53
6 . EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	71
6.1 - Observações Sobre a Aplicação.....	71
6.2 - Análise da LT 230kV Camaquã - Seci.....	73

7 . ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	76
8 . CONCLUSÕES.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	82

LISTA DE FIGURAS:

<u>Figura</u>	Pág.
1.3.1 - Esquema do Modelo Global da Confiabilidade de Linhas de Transmissão.....	5
1.4.1 - Diagrama de Risco x Custo de Alternativas de Projeto.....	8
3.2.1 - Planilha Padrão da Coleta de Dados dos Ensaios de Protótipos.....	21
3.2.2 - Relação Carga-deslocamento Ajustada para a Torre BZ.....	23
3.2.3 - Esquema da Transformação de Variável.....	25
3.2.4 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade da Resistência dos Protótipos.....	26
3.5.1 - Função Densidade de Probabilidade para os Ensaios de Protótipos e Resultados Gerados.....	34
3.5.2 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade da Resistência de Torres Típicas.....	36
3.5.3 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência em Termos da Velocidade de Vento de Projeto.....	39
3.5.4 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência com Redução do Erro de Análise em 50 %	40
3.5.5 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência sem Erro de Análise.....	41
3.5.6 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência da Torre sem a Subavaliação da Resistência do Material.....	42
3.5.7 - Evolução do Valor Médio da Resistência da Torre com o Número de Barras.....	43

3.6.1 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação para a Condição: Carga Projeto Fundação = Carga Projeto Torre.....	46
3.6.2 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação para a Condição: Carga Projeto Fundação = 1.25 x Carga Projeto Torre.....	47
3.6.3 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação para a Condição: Carga Projeto Fundação = 1.46 x Carga Projeto Torre.....	48
3.6.4 - Evolução do Valor Médio da Resistência do Conjunto Torre-Fundação.....	49
4.1 - Função Densidade de Probabilidade Ajustada para Porto Alegre - TS - no Setor 3	52
5.1a-j - Acidentes com Quedas de Estruturas em Linhas de Transmissão Devidos à Ação do Vento.....	59
6.2.1 - Funções Densidade de Probabilidade da Veloci- dade Média do Vento e da Resistência do Con- junto Torre-Fundação.....	75

LISTA DE TABELAS:

<u>Tabela:</u>	Pág.
3.2.1 - Comparação entre Valores Observados e Valores Ajustados	24
3.2.2 - Nível Aproximado de Significância do Teste de Kolmogorov	25
3.5.1 - Resumo das Simulações Realizadas	33
5.1 - Acidentes com Quedas de Estruturas em Linhas de Transmissão Causados pelo Vento	54
5.2 - Dimensões dos Sistemas de Transmissão	69
5.3 - Maiores Acidentes em LT's	69
5.4 - Incidência de Falhas em LT's	70
6.2.1 - Resultados do Cálculo da P_f	74
7.1 - Parâmetros das Distribuições de Ventos Extremos ...	76
7.2 - Influência da Localização e Orientação da Linha de Transmissão	77
7.3 - Influência do Número de Torres	78
7.4 - Influência da Escolha do Vão de Projeto	78

RESUMO:

O trabalho descreve o desenvolvimento de um modelo para o cálculo da probabilidade de falha de linhas de transmissão de energia elétrica quando submetidas a ação do vento. Com relação ao carregamento, o modelo faz a abordagem para cargas causadas por ventos do tipo EPS (Extended mature pressure system). Para ventos deste tipo, a abordagem é feita tendo-se como ponto de partida, o conhecimento da distribuição de probabilidades das flutuações da velocidade do vento em torno de seu valor médio. A partir desse ponto, com base na teoria de valores extremos, chega-se às expressões para o cálculo da probabilidade de falha condicionada à ocorrência de uma dada velocidade média e, com o conhecimento da distribuição de probabilidades desta, é possível obter-se a probabilidade anual de falha.

É também apresentado um processo desenvolvido para chegar-se a função de probabilidade da resistência de torres típicas de LT's para ser usada no modelo de cálculo da probabilidade de falha. Para isto, foram coletados e tratados os resultados de ensaios, realizados no Brasil, de protótipos de torres metálicas para LT's. Também foi desenvolvido um outro modelo teórico objetivando representar, através de variáveis aleatórias, a sistemática de projeto usual. Para a calibragem deste modelo, foram necessárias algumas simulações de resultados de ensaios adotando-se, como informações iniciais, sugestões encontradas na literatura, para tipos de distribuições e seus parâmetros.

Por último, é feita uma aplicação do modelo desenvolvido com a avaliação da probabilidade de falha da LT 230 kV Camaquã - Seci, pertencente a Companhia Estadual de Energia Elétrica. Como exemplo de aplicação, também são feitos alguns estudos paramétricos.

ABSTRACT:

The thesis describes a model developed to obtain the probability of failure of transmission lines exposed to wind action. Concerning the loading, the model takes into account the loads caused by type EPS winds (Extended mature pressure system). For this kind of wind, there is a procedure which takes into consideration the knowledge of the probability distribution of wind velocity around its own mean value. Finally, after specifying the probability distribution of the mean wind velocity, it is possible to obtain the anual probability of failure.

A procedure of obtaining the probability function for the strength of steel transmission towers to be used in the model is also shown. For this purpose, the results of tests on steel tower prototypes carried out in Brasil, were compiled. Another theoretical model was created that tries to represent the design practice by using stochastic variables. In order to calibrate the model, simulation results of prototype tests were obtained by taking into account suggestions advanced in the literature for the distribution types and parameters.

Finally, the probability of failure of an actual transmission line named TL 230 kV Camaquã - Seci, that is located in Rio Grande do Sul, Brasil, is evaluated. The parametric studies to determine the influence of various relevant factors is also performed.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 - Antecedentes:

Na engenharia, de forma geral, o desenvolvimento da teoria clássica de confiabilidade está fortemente relacionado com o projeto de sistemas eletrônicos, para fins bélicos na segunda guerra mundial, no início da década de 40. Nesta época, os sistemas eletrônicos experimentaram um grande salto em complexidade, ocasionando preocupações com o desempenho de alguns equipamentos que os usavam. Afetadas por isso, as forças armadas dos países em guerra incentivaram a investigação do problema da confiabilidade.

No campo da engenharia estrutural, Schueller³⁶ relata que já na década de 20, um engenheiro alemão, e não um pesquisador universitário como poderia se supor, levantou sérias dúvidas sobre os procedimentos de projeto da época, os quais ignoravam a natureza estatística das propriedades dos materiais. Na década de 40, muitos estudos foram desenvolvidos, respondendo algumas daquelas dúvidas, e resultaram no que hoje chama-se a teoria de confiabilidade de A.M. Freudental³⁷⁻⁴⁰. Com o desenvolvimento dos conceitos da teoria da confiabilidade, as indagações sobre as características estatísticas dos materiais e das cargas puderam ser tratadas, e assim, fez-se a ligação entre os altamente sofisticados meios de análise estrutural, que têm tido grande desenvolvimento com o aumento da velocidade dos computadores, e a análise mais profunda dos materiais e das cargas. Assim, hoje a teoria de confiabilidade tem conseguido prover meios com os quais é possível quantificar a probabilidade de que um sistema estrutural cumprirá satisfatoriamente a sua função, durante a sua vida útil. Os conceitos decorrentes disto têm sido a inspiração para muitos projetos de pesquisa e estão sendo empregados com crescente frequência em códigos de projeto por todo o mundo.

O mesmo tem acontecido no projeto de linhas de transmissão, se bem que, nesta área, o início da aplicação se deu com os problemas de desempenho elétrico, como o enfoque da natureza aleatória da suportabilidade dos isolamentos frente às sobretensões elétricas. Com respeito a aplicação nos aspectos estruturais, importantes abordagens ao problema da confiabilidade têm sido feitas no âmbito da International Electrotechnical Commission - IEC²⁹, e da Conférence Internationale des Grands Réseaux Eletrique à Haute Tension - CIGRE³⁰. Contribuições de Mehta e Norville²⁶⁻²⁸, Riera, Ponte Jr. e Nanni^{5,8,21,22}, e White¹⁴ têm proporcionado grande impulso às pesquisas do tema nos últimos anos.

1.2 - Definição do Problema de Confiabilidade Estrutural:

A conceituação de termos, como probabilidade de falha, função de confiabilidade e outros, estão fortemente ligados a conceitos estatísticos sobre as incertezas no conhecimento do real comportamento dos sistemas de engenharia.

Bignoli, na referência 18, observa que deve-se ter sempre presente que a razão mais a intuição, que juntas totalizam o nosso conhecimento, nunca alcançam a verdade, ou seja, ao conhecimento total e exato das leis que regem os acontecimentos naturais. Fica uma diferença que é a ignorância no seu real sentido, fato que origina a incerteza em tal conhecimento. Tem-se portanto, um conhecimento incerto das leis naturais e das magnitudes que elas vinculam. No caso particular dos projetos de engenharia, as incertezas aparecem nas diferentes etapas em que o projeto se desenvolve, devido a que se realizam modelagens da realidade e cujo grau de aproximação não pode, em geral, quantificar-se exatamente. A consequência prática de que uma magnitude seja incerta é que a mesma pode tomar valores entre um mínimo e um máximo, as vezes desconhecidos, ou ainda, não finitos, não se podendo, a priori, atribuir-lhe um valor real.

No caso de sistemas estruturais, é bem sabido que as suas propriedades, como resistência mecânica, por exemplo, revelam características estatísticas. O mesmo pode ser atribuído

às cargas que nelas agem, e com mais razão ainda, a seus efeitos. Também é perfeitamente admissível que sistemas oriundos de populações supostamente idênticas e expostos a condições similares, ocasionalmente falham com carregamentos distintos. Resulta disso que o fenômeno da falha só pode ser descrito em termos probabilísticos. De fato, o risco de falha está geralmente implícito em todos os sistemas estruturais, pois não é praticamente possível alcançar segurança absoluta de desempenho de uma estrutura ou de um elemento estrutural. Segurança é claramente uma função das cargas que agem na estrutura e da sua resistência e só pode ser, de forma realista, expressada em termos da probabilidade de que a resistência superará a máxima carga que irá atuar na sua vida útil. Note-se que o termo "falha", de forma geral, é bastante abrangente, significando a interrupção no cumprimento de uma pretendida função e não necessariamente a ocorrência de ruína.

A fim de modelar o comportamento dessas incertezas, em confiabilidade estrutural usa-se expressar as variáveis básicas como variáveis aleatórias.

Para o caso fundamental, consistente de duas variáveis aleatórias R (resistência) e S (carga), a probabilidade de falha, P_f , da estrutura, pode ser definida pela probabilidade de que $(R-S) \leq 0$, ou seja:

$$P [(R-S) \leq 0] \quad (1.2.1)$$

o que significa, a probabilidade de R ser menor ou igual a S .

Note-se que o estado de falha, como definido pela equação 1.2.1, também pode ser expressado por:

$$P [(R/S) \leq 1] \quad (1.2.2)$$

a qual refere-se diretamente ao coeficiente de segurança ν , que justamente é definido por essa razão.

A confiabilidade, C , ou seja, $P [(R-S) > 0]$ ou $P [(R/S) > 1]$, resulta em:

$$C = 1 - P_f \quad (1.2.3)$$

Mais precisamente, se são conhecidos os tipos de distribuição de probabilidade e seus parâmetros para os efeitos

das cargas $f_S(x)$ e para a resistência estrutural $f_R(x)$, a probabilidade de falha pode ser calculada por qualquer uma das seguintes integrais^{3,4}:

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (1.2.4)$$

$$P_f = \int_0^{\infty} (1 - F_S(x)) f_R(x) dx \quad (1.2.4)$$

onde $F_R(x)$ denota a função distribuição de probabilidade da resistência e $f_S(x)$ a função densidade de probabilidade dos efeitos das cargas. A formulação da equação (1.2.4) é conhecida como integral de convolução com respeito a x .

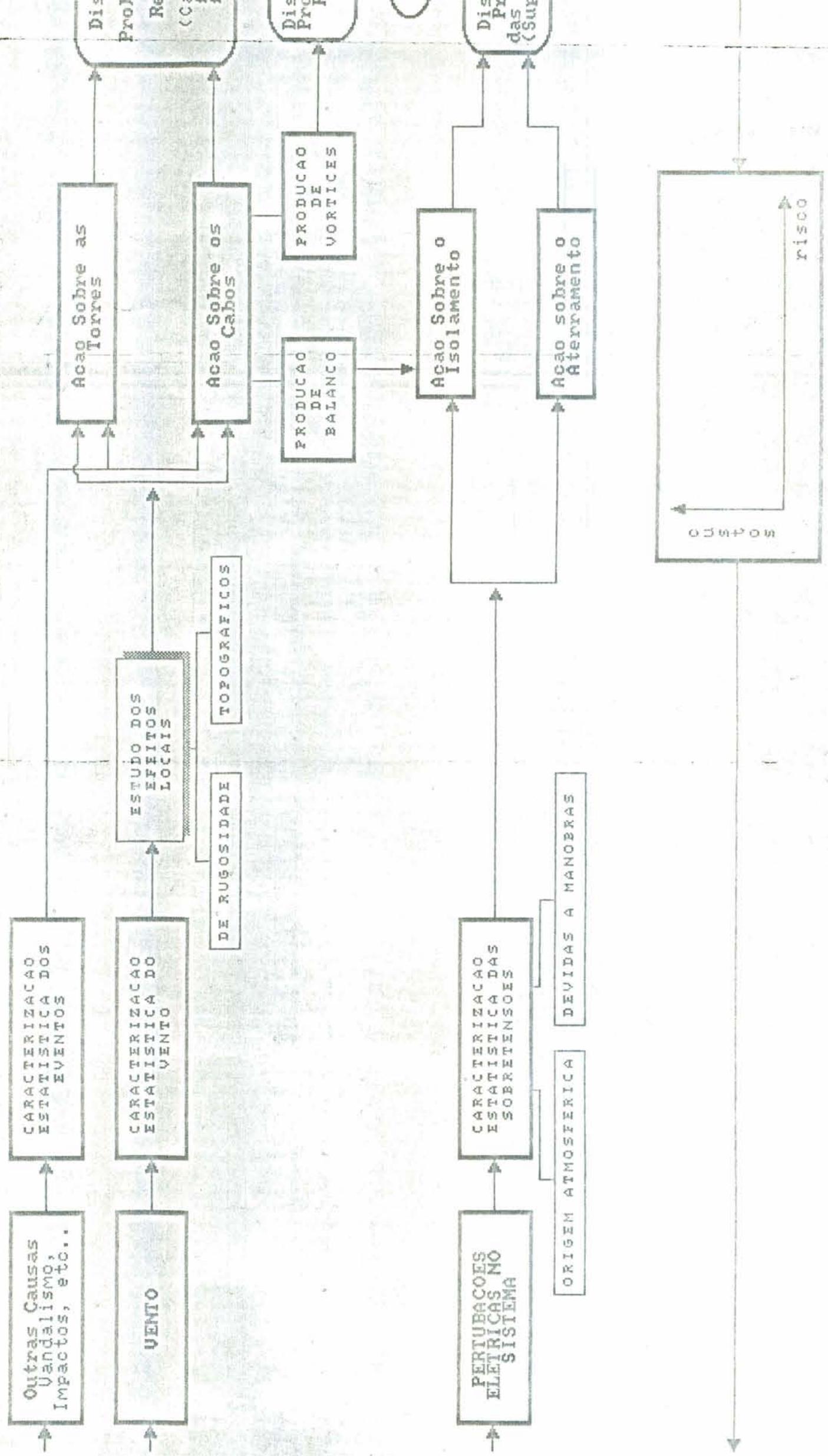
Estas integrais podem ser facilmente avaliadas por processos numéricos. Entretanto, em aplicações, deve-se atentar que ligeiras mudanças nos comportamentos das caudas das funções afetam significativamente as estimativas da probabilidade de falha. Ressalta-se dessa forma que a modelagem dessas variáveis significam um ponto chave para os problemas da teoria da confiabilidade, inspirando vários pesquisadores a se dedicarem ao tema.

1.3 - O Caso das Linhas de Transmissão:

Uma linha de transmissão de energia elétrica deve ser vista como um sistema cuja função é fornecer energia aos consumidores na forma e com a continuidade que estes têm o direito de esperar. Assim sendo, a confiabilidade da linha de transmissão pode ser definida como a sua aptidão em garantir essa função. Analisando-a como um todo, de imediato identificam-se várias possíveis origens de falhas.

Como uma tentativa de esquematizar o modelo global da confiabilidade de LT's, veja-se, por exemplo, a figura 1.3.1. Simplificadamente podemos dividir as origens de falhas em dois grupos, não totalmente independentes: Um grupo relacionado com o desempenho estrutural e outro relacionado com o desempenho elétrico da LT. Qualquer que seja a origem da falha, resulta para o consumidor como um descumprimento da função da LT, ou seja, uma falta de energia. Entretanto a dimensão dos danos, e portanto, as suas consequências, estão intimamente ligadas a

MODELO GLOBAL DE CONFIABILIDADE DE LINHAS



CONFIA BILIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSAO

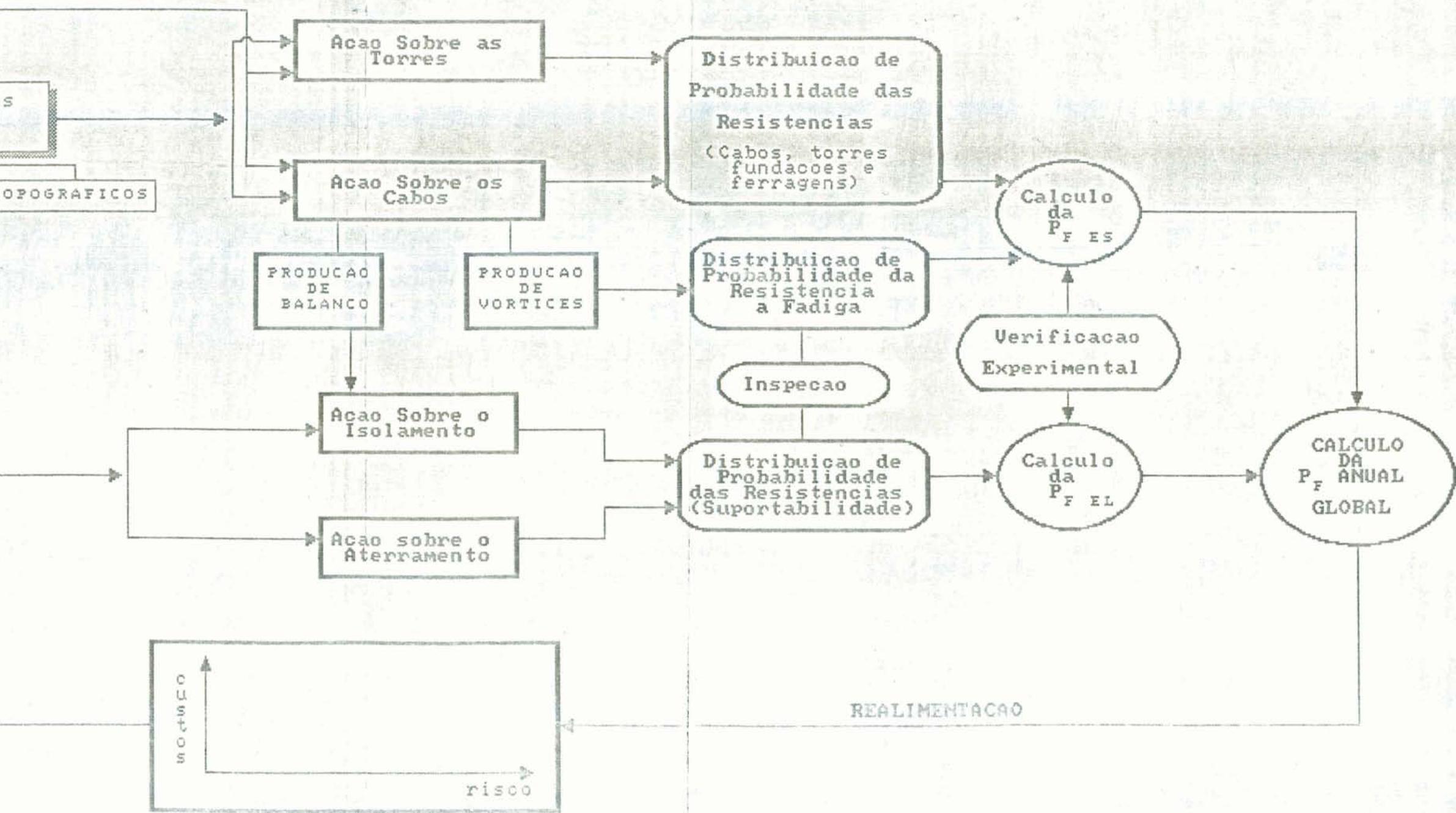


Figura 1.3.1 - Esquema do Modelo Global da Confiabilidade de Linhas de Transmissao

sua origem.

No que concerne aos aspectos estruturais, evidenciam-se alguns pontos de necessária abordagem:

- a caracterização do vento, por ser o principal agente causador de cargas;
- os estudos sobre a ação do vento nos componentes estruturais;
- o tratamento da variabilidade da resistência dos componentes estruturais;
- o desenvolvimento de modelos teóricos para a avaliação, a priori, da probabilidade de falha, e,
- a aferição dos modelos com a observação, ou seja, o cálculo da probabilidade de falha com base no real desempenho das LT's.

Obviamente a abordagem a qualquer um destes pontos resulta complexa, implicando que os avanços, em geral, são obtidos através de sucessivos estudos que aprimoram abordagens anteriores relativamente mais simples.

Qualquer que seja o aspecto abordado, o modelo de cálculo da probabilidade de falha deve considerar a LT como um sistema e não mais como o caso elementar apresentado em 1.2. De fato, a LT consiste num conjunto de componentes onde a falha de qualquer um deles implica na falha do conjunto, caracterizando de forma global, o caso fundamental de um sistema em série. Evidentemente não existem modelos padrões de avaliação da P_f para os casos gerais. O desenvolvimento do modelo para cada caso, deve levar em conta as particularidades da forma como agem os carregamentos e as resistências dos elementos.

1.4 - A Importância dos Estudos de Confiabilidade de Linhas de Transmissão:

A importância da aplicação dos conceitos de confiabilidade fica evidenciada pelo fato desta ser uma poderosa ferramenta nas tomadas de decisões racionais nos projetos de linhas de transmissão. Decisões estas que englobam

aspectos técnicos, econômicos ou ainda estratégicos e que frequentemente são necessárias nas distintas etapas do projeto.

Com efeito, custo e risco são sempre os parâmetros básicos das tomadas de decisões nos projetos de linhas de transmissão. O risco, como já foi mencionado, é inevitável. Por outro lado, o aumento de segurança usualmente implica em acréscimo de custos. Entretanto, em geral, as metas de segurança e economia não são mutuamente exclusivas.

Como ilustração, é conveniente a visualização da figura 1.4.1. O projeto A, o mais seguro, tem um baixo risco de falha e conseqüentemente, um baixo valor esperado para os custos com as falhas. O valor esperado do custo com as falhas é simplesmente o produto da probabilidade de falha pelo seu custo, incluindo substituição de estruturas e reparos. Entretanto, o projeto A apresenta também um alto custo inicial. O custo total do projeto A é o resultado da soma do custo inicial e o custo com as falhas. O projeto B, com o maior risco de falha, terá o menor custo inicial mas terá também um alto valor esperado para o custo com as falhas. Assim, o projeto otimizado será um projeto C que apresenta um balanço ideal entre o custo inicial e o valor esperado do custo das falhas. Os projetos A e B, o mais seguro e o de maior risco, respectivamente, apresentam maior custo na vida útil do sistema.

Neste processo de otimização de projeto, os conceitos de confiabilidade, como o cálculo da probabilidade de falha da linha de transmissão devida à ação do vento, constituem-se em importantes ferramentas de análise.

Obviamente a avaliação dos custos envolvidos, principalmente os que se referem ao custo global das falhas, é de grande complexidade. Especificamente neste aspecto, a discussão do custo da energia deixada de ser fornecida ao consumidor, devido a falhas nos sistemas de transmissão, é um dos pontos mais complexos do planejamento de sistemas de potência.

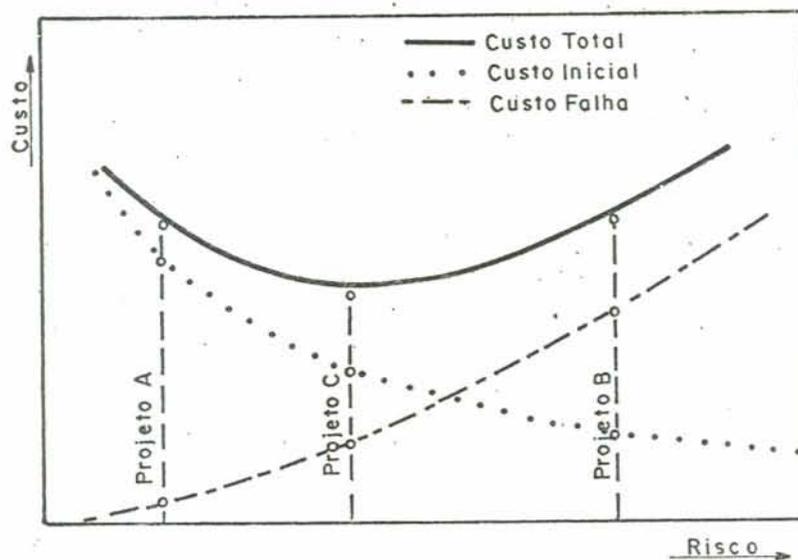


Fig.1.4.1 - Diagrama de risco X custo de alternativas de projeto

1.5 - Objetivo do Trabalho:

O principal objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um modelo de avaliação da probabilidade de falha de linhas de transmissão submetidas à ação de ventos, originados por tormentas extratropicais, usualmente denotadas pela sigla EPS (extended mature pressure system), considerando-se a variabilidade da resistência das estruturas. Com esse desenvolvimento, apresentado no capítulo 2, pretende-se obter uma ferramenta de análise para futuros estudos de identificação das variáveis significativas nos projetos e suas influências.

Também é objetivo deste trabalho a realização de um estudo sobre a distribuição da resistência das torres típicas de LT's. No capítulo 3, é proposto um procedimento para avaliar o tipo de distribuição de probabilidade e os parâmetros básicos a partir de resultados de ensaios em protótipos de torres.

No capítulo 4 são feitas algumas considerações sobre as distribuições de ventos extremos, indicando-se como estão sendo tratados os aspectos relacionados a influência da orientação, tipo de tormenta e a obtenção de parâmetros básicos

das distribuições de probabilidade para locais distantes das estações de coleta de dados.

No capítulo 5, é apresentado um banco de dados, montado com informações coletadas sobre acidentes com quedas de estruturas devidos à ação do vento em linhas de transmissão situadas na região sul e sudeste do Brasil.

Por fim, são realizados exemplos de aplicação do modelo de cálculo da probabilidade de falha. No capítulo 6 é avaliada a probabilidade de falha de uma LT do sistema da Companhia Estadual de Energia Elétrica. No capítulo 7, são realizados alguns estudos paramétricos sobre algumas variáveis significativas no projeto.

CAPÍTULO 2: DESCRIÇÃO DO MODELO E PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA P_f

2.1 - Considerações Básicas:

No desenvolvimento apresentado a seguir admitir-se-á que os esforços atuantes nas torres que constituem o sistema podem ser determinados através de uma análise estática. Efeitos dinâmicos não são importantes em estruturas com frequência fundamental superior a 1 Hz, condição usualmente satisfeita pelas estruturas autoportantes em linhas de até 230 kV, como foi verificado experimentalmente conforme relato da referência (16). Por outro lado o amortecimento usual nestas estruturas é relativamente alto e contribui a reduzir a parcela da resposta ressonante na resposta total. Entretanto, estruturas maiores e mais esbeltas, caracterizadas por frequências menores, podem apresentar efeitos dinâmicos consideráveis.

Consequentemente, as cargas de vento são determinadas mediante um procedimento simplificado descrito, entre outros, por Blessmann¹⁰, no qual emprega-se a velocidade média sobre Δt segundos, onde Δt é escolhido de acordo com a dimensão da estrutura. Observe-se que a dimensão que interessa para a escolha do intervalo de tempo é uma dimensão típica da estrutura que pode ser um valor ponderado entre a altura da torre e o vão dos cabos. No caso de estruturas treliçadas de linhas de transmissão, a solicitação atuante numa barra é uma combinação de esforços provenientes da ação do vento sobre a torre e da ação do vento sobre os cabos. Sendo assim, o intervalo de tempo considerado deve adequar-se a contribuição relativa de cada parcela.

Uma segunda hipótese relaciona-se com a caracterização do fenômeno meteorológico. Considera-se que, para o caso de tormentas do tipo extratropical ou EPS (Extended mature pressure system), o fenômeno atinge uma região suficientemente grande para envolver toda a LT, ou ao menos uma

secção da mesma, e tem uma duração da ordem de dezenas de minutos. Apresenta uma velocidade média \bar{V} com amplitude e direção constantes durante o temporal.

Admite-se também que a linha de transmissão é aproximadamente reta, possui vãos uniformes e está situada numa região de rugosidade superficial também uniforme.

Desta forma, pode-se considerar a distribuição de probabilidade da velocidade máxima do vento associada a uma direção e fazer-se a avaliação da probabilidade de falha da LT como um todo. Caso qualquer uma das hipóteses anteriores não for satisfeita, a linha deve ser dividida em setores.

2.2 . Aplicação da Teoria de Valores Extremos.

Seja $X(t)$ um processo aleatório estacionário com média zero, que representa a parte flutuante da componente longitudinal da velocidade do vento.

Para que um processo aleatório seja descrito de forma completa é necessário que sejam conhecidas as distribuições de probabilidades de todas as ordens (finitas) de $X(t)$ para todo t , embora em aplicações práticas seja usualmente suficiente o conhecimento das distribuições até a de segunda ordem. O processo aleatório $X(t)$ também pode ser descrito por meio dos momentos de diversas ordens, dos quais são especialmente importantes os de primeira e segunda ordem, designados como valor médio e função de autocorrelação respectivamente, sendo indicados pelos símbolos μ_x e R_x , onde:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) X(t+\tau) dt \quad (2.2.1)$$

O valor de $R_x(\tau)$ na origem ($\tau = 0$) é igual ao valor quadrático médio do processo $X(t)$.

Para determinar o carregamento atuante, interessa a velocidade média sobre Δt segundos. Para tanto, é definido a seguir um novo processo $Y(t)$ que representa a média da

velocidade sobre Δt segundos e é obtido da seguinte forma:

$$Y(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} X(\xi) d\xi \quad (2.2.2)$$

De acordo com a referência (11), o processo $Y(t)$ terá sua função de autocorrelação dada pela integral:

$$R_Y(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(\xi) \delta(\xi-\tau) d\xi \quad (2.2.3)$$

onde $\delta(\tau)$ é um pulso triangular de base Δt e altura $2/\Delta t$. O valor quadrático médio de $Y(t)$, $\sigma_Y^2 = R_Y(0)$ será:

$$R_Y(0) = 2 \int_0^{+\infty} R_X(\xi) \delta(\xi-0) d\xi \quad (2.2.4)$$

Para obter-se uma expressão simples para σ_Y^2 , adota-se para $R_X(\tau)$ a seguinte expressão aproximada:

$$R_X(\tau) = \begin{cases} \sigma_X^2 \left(1 - \frac{\tau}{t_0}\right) & \text{para } 0 \leq \tau \leq t_0 \\ 0 & \text{para } \tau \geq t_0 \end{cases} \quad (2.2.5)$$

a qual, substituída na equação (2.2.4), resulta:

$$\sigma_Y^2 = \left(1 - \frac{\Delta t}{6t_0}\right) \sigma_X^2 \quad \text{para } \Delta t/2 < t_0 \quad (2.2.6a)$$

e

$$\sigma_Y^2 = \left(\frac{2t_0}{\Delta t} \left[1 - \frac{2t_0}{3\Delta t}\right]\right) \sigma_X^2 \quad \text{para } \Delta t/2 > t_0 \quad (2.2.6b)$$

Sendo o desvio de $X(t)$, de acordo com Riera¹¹, dado por

$$\sigma_X = 2,58 \sqrt{k \bar{x}} \quad (2.2.7)$$

onde k é um coeficiente que depende da rugosidade superficial e \bar{x} é a média horária da componente da velocidade do vento.

A série discreta Y_j , onde $j = 1, \dots, N$ e $N = T/\Delta t$, pode ser considerada equivalente a uma amostra de duração T do processo aleatório estacionário $Y(t)$. Em certos casos, os parâmetros da distribuição de probabilidade do valor máximo $Y_{(N)} = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ podem ser determinados em função dos parâmetros da distribuição de origem. Existem na teoria de valores extremos soluções para certas distribuições de origem. A seguir são resumidas algumas dessas soluções conhecidas,

necessárias ao desenvolvimento do modelo.

No caso de que Y_j tenha uma distribuição normal, o valor esperado de $Y_{(N)}$ será:

$$E [Y_{(N)}] = \bar{Y} + \xi(N) \sigma_Y \quad (2.2.8)$$

e o desvio padrão:

$$\sigma_{Y(N)} = \eta(N) \sigma_Y \quad (2.2.9)$$

onde ξ e η são coeficientes adimensionais que dependem do número de elementos N . Na referência (7) são apresentadas as seguintes expressões ajustadas para ξ e η .

$$\xi = \left\{ \ln(N-0,918) \right\} 0,604(1-0,866/N^2) \quad (2.2.10)$$

$$\eta = \frac{1 + 0,0267 \ln N}{1 + 0,3486 \ln N} \quad (2.2.11)$$

Sabe-se que a distribuição de $Y_{(N)}$ tende assintoticamente a uma distribuição do tipo I, com parâmetros de forma e de escala definidos por:

$$E [Y_{(N)}] = u_0 + \gamma \alpha_0 \quad (2.2.12)$$

$$\sigma_{Y(N)} = 1,282 \alpha_0 \quad (2.2.13)$$

onde $\gamma = 0,5772$ é a constante de Euler. Substituindo-se (2.2.12) e (2.2.13) em (2.2.8) e (2.2.9) respectivamente, chega-se para $\bar{Y} = 0$ a

$$\alpha_0 = 0,78 \eta \sigma_Y \quad (2.2.14)$$

$$u_0 = (\xi - 0,45 \eta) \sigma_Y \quad (2.2.15)$$

Da mesma forma, também sabe-se que se Y_j tem distribuição do tipo I, com parâmetros α_0 e u_0 , $Y_{(N)}$ também será do tipo I com parâmetros:

$$u = u_0 + \alpha_0 \ln(N) \quad (2.2.16)$$

$$\alpha = \alpha_0 \quad (2.2.17)$$

2.3 - Desenvolvimento do Modelo:

O modelo é desenvolvido para uma LT, com 'M' torres, que satisfaz as hipóteses descritas em 2.1. Para cada uma das torres, por exemplo a torre 'i', a flutuação máxima Δv_i , normal ao eixo da LT, será $\Delta v_i = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ onde $N=T/\Delta t$ e Y_j é uma série discreta equivalente a uma amostra de duração T do processo $Y(t)$, como já foi definido no item anterior. Consequentemente a velocidade flutuante máxima sobre qualquer uma delas será $\Delta v_{\max} = \max(\Delta v_1, \Delta v_2, \dots, \Delta v_M)$.

Desta maneira chega-se a que Δv_{\max} é uma variável aleatória que, como mostrado anteriormente, recai num problema de distribuições de extremos.

Admitindo-se que as flutuações Y_j tenham distribuições do tipo normal, Δv_i tenderá assintoticamente a uma distribuição do tipo I. Assumindo que Δv_i é do tipo I, a distribuição de Δv_{\max} também será do tipo I pelo que foi exposto no item 2.2. Representando a função densidade de probabilidade de Δv_{\max} , com um deslocamento de \bar{v} , por $f_s(v)$ onde $v = \bar{v} + \Delta v_{\max}$, esta terá parâmetros de forma e de escala

$$u_s = (\xi - 0,45 \eta + 0,78 \eta \ln(CM)) \sigma_Y \quad (2.3.1)$$

$$\alpha_s = 0,78 \eta \sigma_Y \quad (2.3.2)$$

lembrando que $\xi = \xi(N)$ e que $\eta = \eta(N)$.

Desta forma, conhecendo-se o tipo de exposição, o intervalo (Δt) de cálculo da velocidade média, a duração do temporal, o intervalo de correlação t_o e o número de torres da LT, u_s e α_s podem ser calculados em termos da velocidade média \bar{v} e terão as seguintes expressões:

para $\Delta t/2 < t_o$:

$$u_s = 2,58 \sqrt{k} \left[\xi - 0,45 \eta + 0,78 \eta \ln(CM) \right] \left[1 - \frac{\Delta t}{\delta t_o} \right]^{1/2} \bar{v} \quad (2.3.3a)$$

para $\Delta t/2 > t_o$:

$$u_s = 2,58 \sqrt{k} \left[\xi - 0,45 \eta + 0,78 \eta \ln(CM) \right] \left[\frac{2 t_o}{\Delta t} \left(1 - \frac{2 t_o}{3 \Delta t} \right) \right]^{1/2} \bar{v} \quad (2.3.3b)$$

para $\Delta t/2 < t_o$:

$$\alpha_s = 2,01 \sqrt{k} \eta \left(1 - \frac{\Delta t}{6 t_o} \right)^{1/2} \bar{v} \quad (2.3.4a)$$

para $\Delta t/2 > t_o$:

$$\alpha_s = 2,01 \sqrt{k} \eta \left[\frac{2 t_o}{\Delta t} \left(1 - \frac{2 t_o}{3 \Delta t} \right) \right]^{1/2} \bar{v} \quad (2.3.4b)$$

Conhecendo-se a distribuição de probabilidade da resistência da estrutura em termos de velocidade de vento, tem-se para a probabilidade de falha a seguinte expressão:

$$P_f = \int_0^{+\infty} f_s(v) F_R(v) dv \quad (2.3.5)$$

onde $f_s(v)$ é a função densidade de probabilidade de Δv_{\max} , ou seja, da máxima velocidade de vento atuante sobre uma estrutura da linha de transmissão durante a ocorrência de um temporal de velocidade média \bar{v} . Para o tipo I é dada pela expressão:

$$f_s(v) = \frac{1}{\alpha_s} \exp \left\{ - \frac{1}{\alpha_s} \left[v - (\bar{v} + u_s) \right] - \exp \left[- \frac{1}{\alpha_s} \left[v - (\bar{v} + u_s) \right] \right] \right\} \quad (2.3.6)$$

e $F_R(v)$ é a função distribuição de probabilidade da resistência de uma estrutura típica da LT referida a velocidade de vento. Observe-se que $F_R(v)$ em vez de carga tem velocidade como unidade ou seja, a velocidade de vento que causa os esforços que provocam a falha da torre. Maiores detalhes sobre a determinação de $F_R(v)$ são apresentados no capítulo 3.

A expressão (2.3.5) permite avaliar a probabilidade de falha condicionada à ocorrência de uma dada velocidade média \bar{v} . Entretanto, é de maior importância prática a determinação da probabilidade de falha anual P_{fa} , a qual pode ser calculada conhecendo-se a função densidade de probabilidade de \bar{v} , $f_{\bar{v}}(v)$.

$$P_{fa} = \int_0^{+\infty} P_f f_{\bar{v}}(\bar{v}) d\bar{v} \quad (2.3.7)$$

resultando assim a expressão:

$$P_{fa} = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_S(v) F_R(v) f_{\bar{v}}(\bar{v}) dv d\bar{v} \quad (2.3.8)$$

Na referência (19), Riera e Nanni encontraram que as séries de velocidades extremas de ventos do tipo EPS no Rio Grande do Sul com orientação dada são bem ajustadas pela distribuição do tipo I. Admitindo-se que a distribuição da velocidade média de vento \bar{v} também seja do tipo I, $f_{\bar{v}}(\bar{v})$ será dada por:

$$f_{\bar{v}}(\bar{v}) = \frac{1}{\alpha_{\bar{v}}} \exp \left\{ -\frac{1}{\alpha_{\bar{v}}} \left[\bar{v} - u_{\bar{v}} \right] - \exp \left[-\frac{1}{\alpha_{\bar{v}}} \left(\bar{v} - u_{\bar{v}} \right) \right] \right\} \quad (2.3.9)$$

e $u_{\bar{v}}$ e $\alpha_{\bar{v}}$ denotam respectivamente os parâmetros de forma e de escala da distribuição.

Dependendo do tipo das distribuições envolvidas, pode ser conveniente expressar P_{fa} através da função distribuição de probabilidade da máxima velocidade de vento agindo sobre uma estrutura da LT, $F_S(v)$, e da função densidade de probabilidade da resistência da estrutura, $f_R(v)$. Assim P_{fa} fica:

$$P_f = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} (1 - F_S(v)) f_R(v) f_{\bar{v}}(\bar{v}) dv d\bar{v} \quad (2.3.10)$$

onde

$$F_S(v) = \exp \left\{ -\exp \left[-\frac{1}{\alpha_s} \left(v - (\bar{v} + u_s) \right) \right] \right\} \quad (2.3.11)$$

Também é de grande interesse o cálculo da probabilidade de falha durante um certo período, geralmente a vida útil da LT. Representando por P_{fm} a probabilidade de falha em m anos, esta pode ser avaliado por:

$$P_{fm} = 1 - (1 - P_{fa})^m \quad (2.3.12)$$

Em geral, as expressões (2.3.8) e (2.3.10) não têm soluções analíticas conhecidas, sendo necessário, em

aplicações, o uso de métodos numéricos para a sua avaliação.

2.4 - Processo Numérico Adotado - Programa FALHAEPS.

Considerando-se o tipo de distribuição de probabilidade encontrado para a resistência das torres, como está descrito no capítulo 3, é conveniente adotar-se a expressão 2.3.10 para a avaliação da probabilidade anual de falha.

Para isso, foi confeccionado um programa computacional que foi designado pelo nome de FALHAEPS. Neste programa, a expressão 2.3.10 é avaliada através de uma integração numérica, onde a dupla integral é substituída por um duplo somatório. Os limites para a integração numérica são convenientemente escolhidos de forma que o somatório seja processado na faixa de interesse.

No procedimento, dado o número de passos de integração de v e \bar{v} , avalia-se o limite inferior da probabilidade anual de falha, calculando-a com os valores de F_s e f_v^- em $v + \Delta v$ e $\bar{v} + \Delta \bar{v}$ respectivamente, e o seu limite superior, calculando-a para os valores de F_s e f_v^- em v e \bar{v} , onde Δv e $\Delta \bar{v}$ são os respectivos passos de integração. Assim, a precisão alcançada com o número de passos de integração pode ser medida pela diferença entre estes limites e assim orientar a escolha de um novo número de passos para alcançar a precisão desejada.

A metodologia adotada no programa FALHAEPS foi comparada com os resultados obtidos em programa similar, usado na referência (5), onde se considera deterministicamente a resistência da estrutura. Para simular condição semelhante, na comparação feita considerou-se um pequeno coeficiente de variação, igual a 0,2%, para a resistência da torre. Nesta comparação os resultados obtidos entre as metodologias apresentaram uma diferença máxima de 16,2%.

No capítulo 6 são feitas aplicações do programa em análises de situações típicas de uma linha de transmissão da Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE.

CAPÍTULO 3: DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES DA RESISTÊNCIA DE TORRES DE LT'S

3 . 1 - Sistemática de Testes de Protótipos.

Em estudos de confiabilidade, como já foi citado nos capítulos anteriores, é de grande importância o conhecimento da distribuição de probabilidade da resistência dos elementos estruturais. No caso de LT's, o conhecimento da distribuição de probabilidade da resistência das estruturas (torres metálicas, postes metálicos, de concreto ou de madeira) constitui-se em tarefa onerosa. A preocupação pelo conhecimento do tipo de distribuição e correspondentes parâmetros tem sido manifestada em numerosos trabalhos^{24,27,29}. Entretanto não foi encontrado na bibliografia consultada relato de algum experimento consistente em ensaios destrutivos sobre uma amostra representativa de estruturas de LT's.

A seguir, descreve-se um modelo proposto para a determinação da distribuição de probabilidade da resistência de torres projetadas e fabricadas no Brasil. Tal modelo foi desenvolvido para aproveitar resultados disponíveis de ensaios destrutivos e não destrutivos, e chegar-se, a partir de ensaios em protótipos a simulação de ensaios em torres típicas.

O desenvolvimento desta pesquisa, que nos itens a seguir será apresentado em detalhes se deu na seguinte sequência: Em primeiro, lugar determinou-se a distribuição de probabilidade da resistência dos protótipos de torres. A partir desta, através de simulações, pôde-se determinar a distribuição de probabilidade da resistência de torres típicas de LT's e finalmente, tomando-se indicações encontradas na bibliografia para a resistência de fundações típicas, foi possível chegar-se a determinação da distribuição de probabilidade da resistência do conjunto torre-fundação.

A realização de testes de carga em protótipo, isto é, no primeiro exemplar de um tipo de torre a ser fabricado em série, é uma exigência usual entre as concessionárias de energia elétrica.

Estes testes são classificados em Destrutivos e em Não-destrutivos. Os destrutivos são aqueles nos quais se atinge a ruptura do protótipo. Os ensaios não-destrutivos permitem unicamente verificar se o protótipo resiste 100% do carregamento especificado no projeto. Observe-se que nestes últimos a ruptura pode ou não ser alcançada.

A partir de 1981 o procedimento de ensaios foi padronizado com a edição da NBR 8842 : "Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão - Métodos de Ensaios", procedimento este que teve sua implantação e estabelecimento facilitado, entre outros fatores, pelo reduzido número de fabricantes de estruturas de LT's no Brasil que possuem campo de ensaios.

O procedimento padronizado consiste no ensaio de um protótipo de cada tipo de estrutura a ser fornecido. O protótipo é montado sobre uma base muitas vezes mais resistente que as fundações usuais em LT's, de forma que a probabilidade da fundação falhar durante o teste seja desprezável. É realizado um programa onde são selecionadas aquelas hipóteses de carga que dimensionam maior número de barras, visto que usualmente a torre é projetada para resistir distintas hipóteses de cargas tais como condições de operação normal, de manutenção, de montagem e etc.. Assim como é considerado no projeto, no teste são aplicadas cargas concentradas na estrutura, o que implica que cargas de vento atuantes na mesma, por exemplo, são representadas como carga concentradas equivalentes em determinados pontos.

A aplicação das cargas para cada hipótese testada é feita em etapas. Em ensaios não-destrutivos, usualmente inicia-se com 50% do carregamento, prosseguindo-se com 75%, 90% e 95% até alcançar-se 100% do carregamento de projeto. Em ensaios destrutivos, após alcançada a etapa de 100% , os avanços passam a ser de 5% até alcançar-se a ruptura.

Observe-se que em cada uma destas etapas, cada uma das componentes do sistema de carga corresponde a respectiva percentagem de seu valor de projeto.

A seqüência de aplicação das hipóteses de carga é estabelecida de forma a simplificar as operações necessárias desde que não prejudiquem os objetivos do teste. Usualmente procede-se no sentido da hipótese menos severa para a mais severa, ou seja, da hipótese que dimensionou menor número de barras para a que dimensionou maior número de barras.

A transmissão das cargas, dos equipamentos de aplicação para a estrutura, é efetuada por meio de cabos, sendo continuamente monitorada, na maioria das vezes por células de carga colocadas junto ao ponto de aplicação.

Uma vez ajustado o carregamento, este é mantido durante um determinado intervalo de tempo fazendo-se a seguir as medições dos deslocamentos ocorridos em pontos pré-estabelecidos da estrutura. Normalmente são escolhidos quatro pontos para medições, anotando-se para cada um os deslocamentos do eixo transversal e do eixo longitudinal da estrutura. A medição é feita a distância, por meio de teodolitos, com visadas em réguas previamente fixadas na estrutura.

Tanto nos ensaios do tipo destrutivo como nos ensaios do tipo não destrutivo, se houver falha numa etapa inferior a de 100% do carregamento de projeto, a estrutura é reprojetada e novamente testada até que alcance com sucesso a etapa de 100%.

3.2 - Coleta de Resultados de Ensaios em Protótipos e Ajuste da Correspondente Distribuição de Probabilidades.

Como primeiro passo para determinar uma função de distribuição de probabilidade da resistência de torres típicas de LT's, procedeu-se a coleta de resultados de ensaios de protótipos. Estes resultados estão disponíveis nos relatórios de cada ensaio em poder do fabricante e da concessionária usuária da torre. A compilação deles foi possível graças a um esforço do grupo de trabalho 08 do comitê de estudos 22 da CIGRE/Brasil - Conférence Internationale des Grands Réseaux

Figura 3.2.1 - Planilha Padrão da Coleta de Dados dos Ensaios de Protótipos

LEVANTAMENTO DE DADOS DE ENSAIOS DE TORRES												
IDENTIFICAÇÃO				RESULTADOS DO ENSAIO						DESCRIÇÃO DA FALHA		
DO ENSAIO	DA ESTRUTURA		DO CARREGAMENTO		% CARGA	DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS (cm)						
Número de Ordem <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> autoportante - Tronco <input type="checkbox"/> autoportante - Delta <input type="checkbox"/> estaiada <input type="checkbox"/> chainette		<input type="checkbox"/> transversal <input type="checkbox"/> longitudinal (2) <input type="checkbox"/> torção (2)			TOPO		NÍVEL INTERM.		NÍVEL INFERIOR		
						Transv.	Longit.	Transv.	Longit.	Transv.	Longit.	
Número de Referência(1) <input type="text"/>	<input type="radio"/> suspensão <input type="radio"/> angular <input type="radio"/> terminal		<input type="radio"/> limite (100%) (3) <input type="radio"/> destrutivo (>100%)									<input type="checkbox"/> não houve <input type="checkbox"/> do braço <input type="checkbox"/> da parte superior <input type="checkbox"/> do tronco <input type="checkbox"/> da perna <input type="checkbox"/> do mastro <input type="checkbox"/> do estai
Data / /						Tensão <input type="text"/> kV Número de circuitos <input type="text"/> Altura total <input type="text"/> m Abertura base <input type="text"/> m		<input type="checkbox"/> carregamento severo (4) <input type="checkbox"/> intermediário (5) <input type="checkbox"/> secundário (6)				
			1º ensaio <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/> reteste (c/carreg. igual)		RESIDUAL							

Número de Ordem <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> autoportante - Tronco <input type="checkbox"/> autoportante - Delta <input type="checkbox"/> estaiada <input type="checkbox"/> chainette	<input type="checkbox"/> transversal <input type="checkbox"/> longitudinal (2) <input type="checkbox"/> torção (2)	<input type="radio"/> limite (100%) (3) <input type="radio"/> destrutivo (>100%)	<input type="checkbox"/> carregamento severo (4) <input type="checkbox"/> intermediário (5) <input type="checkbox"/> secundário (6)	1º ensaio <input type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não <input type="checkbox"/> reteste (c/carreg. igual)	% CARGA RESIDUAL	DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS (cm) TOPO NÍVEL INTERM. NÍVEL INFERIOR Transv. Longit. Transv. Longit. Transv. Longit.	<input type="checkbox"/> não houve <input type="checkbox"/> no braço <input type="checkbox"/> da parte superior <input type="checkbox"/> do tronco <input type="checkbox"/> da perna <input type="checkbox"/> do mastro <input type="checkbox"/> do estai <input type="radio"/> no montante <input type="radio"/> na diagonal <input type="radio"/> no tirante <input type="radio"/> na ligação <input type="checkbox"/> por tração <input type="checkbox"/> por compressão
---	--	--	---	---	---	------------------------	--	---

Legenda: (1) Identificação interna do relatório do ensaio ou apenas montantes
 (2) Não considerar cargas pequenas, como diferença de tração
 (3) Objetivo do ensaio: não destrutivo
 (4) Carregamento que dimensiona muitas barras
 (5) Carregamento que dimensiona algumas barras
 (6) Carregamento que dimensiona uma ou outra barra, eventualmente nenhuma

EMPRESA	RESPONSÁVEL	DATA
		/ /

Életrique à Haute Tension, seção brasileira.

A figura 3.2.1 mostra a planilha padrão que foi usada na coleta dos resultados. A criação da planilha, na forma apresentada, visou facilitar a coleta e ordenar os dados para atender os objetivos mais imediatos desta pesquisa e, ao mesmo tempo, organizá-los para estudos complementares posteriores.

Foram coletados resultados de um total de 111 ensaios, correspondentes a 56 protótipos distintos, dos quais 12 correspondem a ensaios destrutivos, realizados a partir de 1978.

Considerando que a grande maioria dos ensaios são do tipo não-destrutivo e que mesmos nos destrutivos não se conhece o valor exato do carregamento no momento da falha, foi necessário introduzir uma hipótese sobre a relação entre o nível de carregamento e o correspondente deslocamento observado no ensaio, admitindo-se que tal relação pode ser descrita por um polinômio do segundo grau. Assim sendo, a relação entre o deslocamento percentual e o carregamento pode ser expressa por:

$$p = a d^2 + b d + c \quad (3.2.1)$$

sendo d o deslocamento normalizado em um dado local da estrutura que tem como norma o valor médio dos deslocamentos observados no ensaio e p é a correspondente fração do carregamento de projeto.

Tomando-se o conjunto de observações realizadas em cada ensaio, é possível, através de uma regressão não-linear, ajustar-se um polinômio e assim determinar o ponto teórico onde acontece a ruptura, ou seja, o vértice da parábola.

A figura 3.2.2 ilustra a hipótese adotada. No caso, os dados correspondem ao ensaio não-destrutivo de uma torre da CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica, designada pela sigla BZ. Os pontos assinalados por quadrados correspondem as observações dos deslocamentos normalizados nas etapas de 75%, 95% e 100% do carregamento de projeto. A curva ajustada é representada pela linha cheia e seu vértice, indicando o ponto teórico da ruptura, corresponde a 106,9% do carregamento de

projeto.



Figura 3.2.2 - Relação Carga-deslocamento Ajustada para a Torre BZ

O procedimento proposto foi avaliado através da comparação das previsões com resultados dos ensaios destrutivos. Nestes, não se tem leituras do valor preciso do percentual do carregamento no momento da ruptura sendo apenas conhecido em que faixa ocorreu. A validade da hipótese fica evidenciada na tabela 3.2.1, onde são confrontados os valores do percentual da carga de ruptura obtidos pelo ajuste com as faixas onde esta ocorreu nos ensaios.

Ensaio	Valor Ajust	Observ. Ensaio	Erro em relação ao centro do intervalo (%)
a	108,9	105 - 110	+1,3
b	123,6	120 - 125	+0,9
c	100,9	100 - 105	-1,6
d	104,5	105 - 110	+2,0
e	109,4	100 - 105	+6,7
f	116,3	115 - 120	-1,0
g	123,6	115 - 120	+5,2
h	119,6	120 - 125	-2,4

Tabela 3.2.1 - Comparação entre Valores Observados e Valores Ajustados

Contando-se com a validade do procedimento, é possível a determinação de uma série de estimadores da capacidade portante, isto é, da resistência das torres, baseados nas leituras de deslocamentos nos ensaios não destrutivos, visando a complementação dos resultados obtidos nos ensaios destrutivos. A regressão apresentou resultados coerentes em 74 ensaios. Os 37 restantes, nos quais não houve coerência no ajuste, correspondem ou a ensaios com carregamentos não importantes, isto é, que no projeto da estrutura dimensionam poucas barras, ou a ensaios com carregamentos de torção, onde o modelo mostrou-se inadequado.

Através do programa STATGRAPHICS para microcomputadores, buscou-se o ajuste de uma distribuição de probabilidade aos dados. Dependendo do tipo de distribuição pesquisada, é conveniente uma mudança de variável, como ilustra esquematicamente a figura 3.2.3, visto que apresentam melhor ajuste para valores positivos agrupados próximos a zero. Sendo assim, para as distribuições Chi-quadrado, Erlang, Exponencial, Gamma, Lognormal e Weibull adotou-se a seguinte mudança de variável:

$$\text{Rupturades\%} = \text{Ruptura\%} - 97\% \quad (3.2.1)$$

onde Ruptura% é o valor percentual do resultado do ensaio do protótipo; 97% é o valor inferior adotado para que o teste seja

dado como satisfatório considerando-se eventuais erros nas medições e Rupturades% é o valor da variável com o deslocamento da origem.

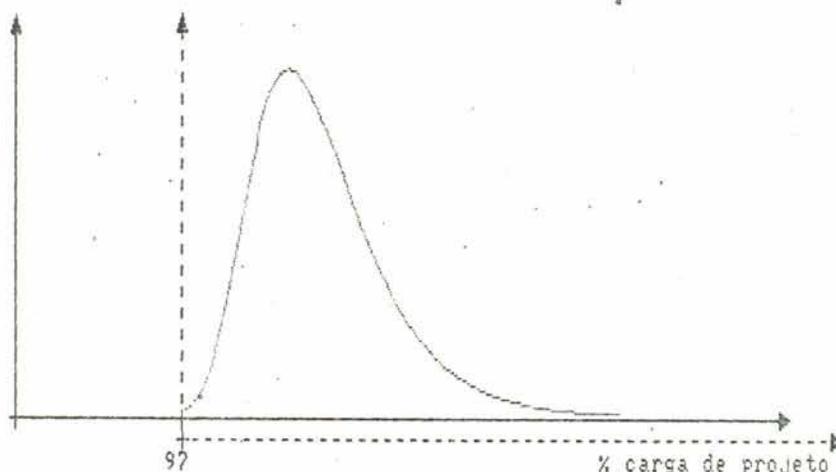


Figura 3.2.3 - Esquema da Transformação de Variável

Conforme pode-se observar na tabela 3.2.2, onde estão tabelados os resultados do nível aproximado de significância do teste de Kolmogorov para as distribuições pesquisadas, a distribuição Gamma foi a que apresentou melhor ajuste. Assim sendo, adotou-se a distribuição Gamma como a distribuição dos resultados dos ensaios de protótipos, tendo como parâmetros de forma igual a 1,69 e de escala igual a 0,14.

Distribuição	Nível de Significância Kolmogorov
Chi-quadrado	0,000084
Erlang	0,533215
Exponencial	0,533208
Gamma	0,999981
Lognormal	0,279567
Weibull	0,999924

Tabela 3.2.2 - Nível Aproximado de Significância do Teste de Kolmogorov.

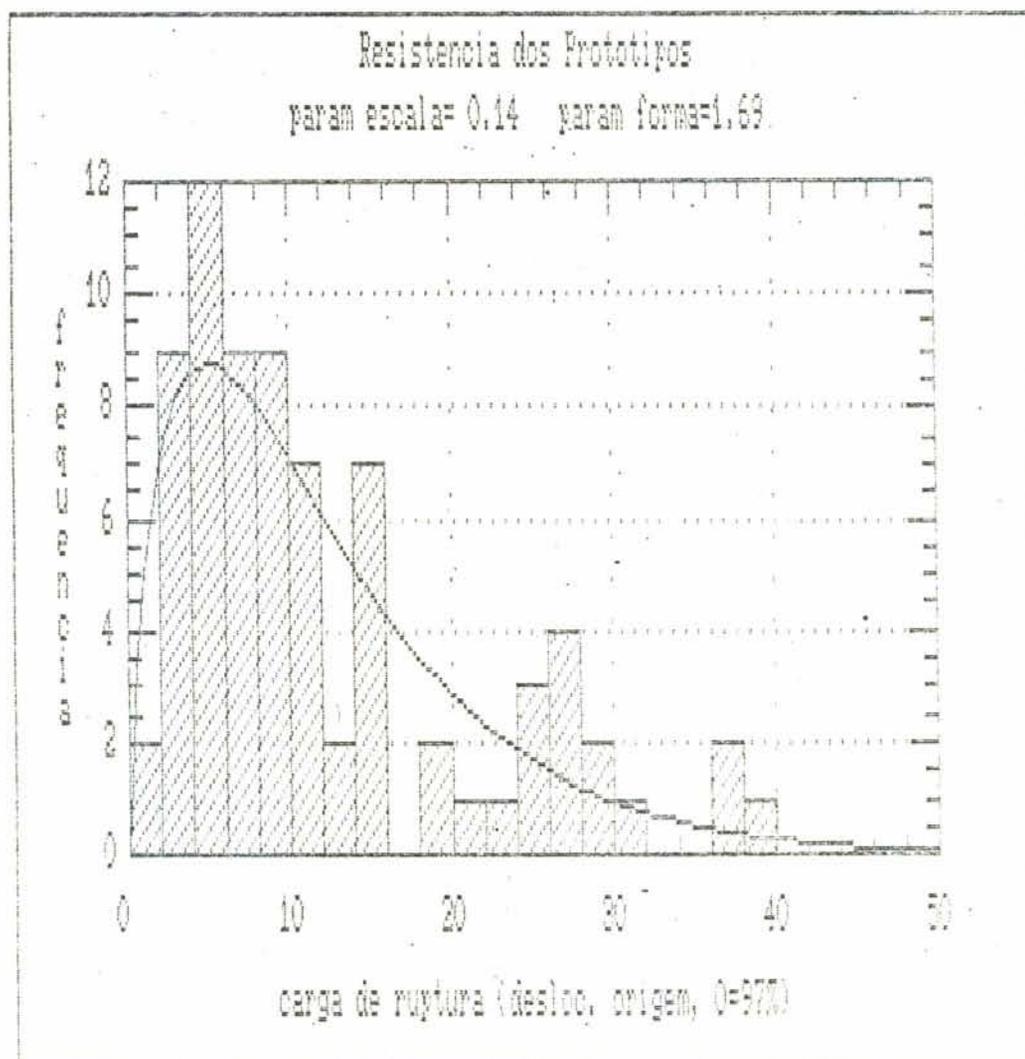


Figura 3.2.4 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade da Resistência dos Protótipos.

A figura 3.2.4 mostra o histograma dos resultados dos ensaios, a correspondente função densidade de probabilidade ajustada e também indica-se os parâmetros.

A função densidade de probabilidade para a distribuição do tipo Gamma é dada pela expressão:

$$f(x) = \delta^{\zeta} x^{\zeta-1} e^{-\delta x} / \Gamma(\zeta) \quad \text{para } x > 0 \quad (3.2.2)$$

onde δ é o parâmetro de escala e ζ é o parâmetro de forma.

É importante salientar que a distribuição determinada, devido ao particular esquema de ensaios, representa a distribuição da resistência dos protótipos, após terem sido reforçados se necessário. Com efeito, se a torre ensaiada falha para uma carga inferior à 100% da carga de projeto, a barra (ou barras) afetadas é modificada, sendo a torre reconstruída e testada novamente até atingir a resistência especificada. O banco de dados disponível não inclui informação completa sobre ensaios preliminares, no caso de falha inicial ocorrer num nível de carga inferior a 100%. A omissão é atribuída a diversas causas, entre elas, a interpretação incorreta do questionário e a relutância do projetista de revelar a existência de potenciais erros construtivos ou de projeto.

3.3 - Modelo para a Determinação da Carga de Ruptura Obtida em Ensaios de Protótipos, Segundo a Sistemática de Projeto Adotada no Brasil:

Considere-se uma torre de linha de transmissão com 'N' barras. O procedimento de projeto desta torre, como usualmente é efetuado no Brasil, pode ser modelado teoricamente da seguinte forma:

Seja X_j o esforço real na barra j da estrutura. Assumindo linearidade, pode-se expressar que:

$$X_j = a_j P \quad (3.3.1)$$

onde:

a_j é o coeficiente que relaciona a carga P de projeto com o esforço na barra j em questão. Observe-se que P representa, em geral, um parâmetro de escala que define a intensidade do sistema de cargas que atua sobre a estrutura, por exemplo, a pressão dinâmica do vento à altura de referência.

O esforço calculado, segundo o modelo matemático adotado pelo projetista será designado por X_j^* , sendo:

$$X_j^* = a_j^* P \quad (3.3.2)$$

onde:

a_j^* é o coeficiente que relaciona a carga P com o esforço na barra j em questão, segundo o procedimento de cálculo adotado. Observe-se que, devido a erros e/ou imprecisões no modelo matemático, ter-se-á que, em geral, $a_j \neq a_j^*$.

Designando Y_j^t a resistência nominal da barra j , o processo de projeto implica na satisfação da condição $Y_j^t \leq X_j^*$. Isto é, o projetista escolhe o elemento estrutural j , de forma que sua resistência nominal seja igual ou superior ao esforço calculado. Tem-se então:

$$Y_j^t = X_j^* + \Delta_j \quad (3.3.3)$$

na qual Δ_j denota a diferença entre a resistência teórica da barra adotada no desenho e o esforço calculado. Esta diferença, deve-se, na maioria das vezes, a bitolagem comercial existente.

É conveniente expressar Δ_j como uma fração de X_j^* , então:

$$\Delta_j = \frac{\Delta_j}{X_j^*} X_j^* \quad (3.3.4)$$

Chamando ξ_j a fração $\frac{\Delta_j}{X_j^*}$ tem-se:

$$Y_j^t = (1 + \xi_j) X_j^* \quad (3.3.5)$$

Para cada barra da torre projetada, existirá uma carga externa P_j^t que causaria nominalmente a sua ruptura, igual a

$$P_j^t = \frac{Y_j^t}{a_j} \quad (3.3.6)$$

Substituindo (3.3.5) em (3.3.6) tem-se

$$P_j^t = \frac{1 + \xi_j}{a_j} X_j^* \quad (3.3.7)$$

Substituindo (3.3.2) em (3.3.7), chega-se a que:

$$P_j^t = \frac{a_j^*}{a_j} P + \xi_j \frac{a_j^*}{a_j} P \quad (3.3.8)$$

Chamando η_j a razão $\frac{a_j^*}{a_j}$, a expressão (3.3.8)

fica:

$$P_j^t = \eta_j P + \xi_j \eta_j P = (1 + \xi_j) \eta_j P \quad (3.3.9)$$

Considerando-se agora, a resistência real Y_j da barra j , pode ser escrita como

$$Y_j = \alpha_j Y_j^t \quad (3.3.10)$$

onde α_j é um coeficiente aleatório, que vincula a resistência teórica e a resistência real, devido as dispersões da resistência do material, etc. Assim, a carga P_j que realmente causaria a ruptura da barra j , será dada pela expressão:

$$P_j = (1 + \xi_j) \eta_j \alpha_j P \quad (3.3.11)$$

Considerando a torre como um sistema estrutural em série, composto de N elos, a ruptura global dar-se-á quando o primeiro elo, ou seja, a primeira barra alcançar a carga de ruptura. Desta forma, a carga de ruptura da torre, segundo o modelo acima desenvolvido será dada pela seguinte expressão:

Carga de Ruptura da torre = mínimo $\langle P_j \rangle$ onde $j = 1..N$

caracterizando um problema de valores extremos. P_j é dada pela expressão (3.3.11) na qual η é uma variável aleatória que define o grau de aproximação do método de projeto usado, incluindo a determinação dos esforços nas barra e da resistência teórica das mesmas enquanto ξ representa também uma variável aleatória que mede a folga adotada na escolha da barra devido a série comercial de bitolas, ou ao arredondamento de dimensões. A variável aleatória α mede a relação entre a resistência real da barra e a sua resistência nominal, devido a variabilidade do material, dimensões, tensões residuais, etc..

3.4 - Processo de Simulação de Resultados de Ensaios, Através do Programa Computacional SIMULA:

Como se sabe, os problemas de valores extremos em geral não possuem soluções simples. Por este fato, utilizou-se o método de simulação, por meio do qual foi possível encontrar o tipo e os parâmetros da função de distribuição da carga de ruptura obtida em ensaios quando a sistemática de projeto obedecida é a anteriormente descrita.

Para realizar-se a simulação, confeccionou-se o programa SIMULA, com o qual, definindo-se os tipos de distribuição e os parâmetros básicos das variáveis envolvidas, foram geradas séries de resultados de ensaios de protótipos.

O processo de simulação usado e descrito no seguinte roteiro:

- a - Define-se o tipo de distribuição e os correspondentes parâmetros das variáveis η , ξ e α , bem como o número de barras por torre, número de simulações e a razão mínima admissível entre carga observada de ruptura e a carga de projeto para que o ensaio seja considerado satisfatório;
- b - Toma-se, como semente de um gerador de números randômicos de distribuição uniforme, a hora do dia, em segundos;
- c - Com a semente geram-se três números aleatórios;
- d - Com esses três números, através das distribuições assumidas para cada uma das variáveis, obtêm-se os valores de η , ξ e α ;
- e - Calcula-se a percentagem da carga de projeto com que rompe a barra j ;
- f - Repetem-se os passos c, d e e para cada uma das N barras da torre;
- g - Seleciona-se, das N barras da torre a que apresentar a menor relação entre a carga de ruptura e o valor de projeto;
- h - Caso este percentual seja igual ou superior ao limite inferior tomado como satisfatório para que o protótipo da torre seja considerado aprovado no teste, passa-se diretamente ao

passo j;

i - Caso contrário, o que caracterizaria um insucesso do projeto em estudo, toma-se a barra que apresentar a menor relação entre a carga de ruptura e o valor de projeto que seja superior ao limite inferior de aceitação do teste. Esta situação reproduz a condição de que, havendo falhas no teste, as barra colapsadas são substituídas por barras mais resistentes até que seja alcançada a resistência de projeto;

j - Gera-se uma nova semente do gerador randômico;

l - Retorna-se ao passo c até que sejam simulados os resultados das M torres pretendidas.

De posse dessa série simulada de resultados de ensaios, é possível confeccionar-se o seu histograma e ajustar-se uma distribuição de probabilidades.

3.5 - Determinação da Distribuição da Resistência de Torres Típicas:

Fazendo-se uso do processo de simulação anterior, foram determinados estimadores dos parâmetros das distribuições das variáveis aleatórias η , ξ e α do modelo descrito em 3.3. A partir de valores iniciais, através de um processo iterativo consistente na seqüência de simulação, avaliação dos resultados, correção dos valores de entrada e nova simulação, pode-se chegar a valores dos parâmetros que tornam o modelo capaz de produzir séries de resultados com distribuição de probabilidade semelhante a correspondente aos resultados obtidos nos ensaios de protótipos.

Para essas simulações com o citado modelo, admitiu-se que as distribuições de probabilidade de η , que define o grau de aproximação do método de projeto usado, e de α , que mede a relação entre a resistência real e a nominal da barra, são do tipo normal. Para a variável ξ , que mede a folga adotada na escolha da barra, admitiu-se uma distribuição uniforme.

O processo iterativo, de forma mais detalhada, consiste em:

a - adotar parâmetros iniciais para as C no caso dois

parâmetros) distribuições de η , ξ e α ;

b - gerar, através do processo de simulação, segundo o modelo, séries de valores de resistência observada dos protótipos;

c - construir o histograma da série gerada e determinar os correspondentes parâmetros para a distribuição GAMMA;

d - com base nos resultados obtidos em c, mediante tentativas e erros, orientar uma nova escolha dos parâmetros das distribuições de η , ξ e α e retornar ao passo b até que os parâmetros da distribuição GAMMA da série simulada sejam próximos aos da série com os resultados dos ensaios dos protótipos.

A tarefa não é fácil, já que um número considerável de tentativas foi necessário até atingir-se uma convergência satisfatória. Também é surpreendente a sensibilidade do esquema, pois pequenas variações nos parâmetros das distribuições de η , ξ e α resultam em variações significativas nos parâmetros da resistência fator que leva a fazer-se a inferência que no entorno dos parâmetros encontrados a única solução possível deve ser a encontrada. A tabela 3.5.1 mostra o resumo das simulações realizadas com os parâmetros adotados para as distribuições de η , ξ e α , bem como os parâmetros da distribuição Gamma resultante.

Procedendo-se assim chegou-se aos seguintes resultados:

- para a variável aleatória η (distribuição normal):

valor médio $\bar{\eta} = 1,0$ e desvio padrão $\sigma_{\eta} = 0,18$
 ou seja: em média os métodos de projeto reproduzem sem tendência os esforços atuantes e resistências das barras quando suas características são conhecidas, apresentando um coeficiente de variação $CV = 18 \%$. Este resultado apresenta-se compatível com trabalho anterior da CIGRE³⁰, no qual, para um grupo internacional de projetistas de estruturas de linhas de transmissão, obteve-se um coeficiente de variação

CV = 11 % para a determinação dos esforços atuantes nas barras de uma estrutura padrão e um CV = 14 % para a determinação das resistências das mesmas barras segundo a interpretação dos códigos de projeto. De fato, para a variável η , que no modelo incorpora simultaneamente os dois itens, é lícito admitir-se um coeficiente de variação seja por $CV = \sqrt{0,11^2 + 0,14^2} = 0,18$.

• variável aleatória ξ :

uniformemente distribuída entre 0 e 1,05

ou seja, o projetista na escolha das barras calculadas da estrutura adota, de maneira uniforme, desde barras sem folga até barras com 105 % de folga segundo o seu método de projeto. Segundo pesquisa realizada em memórias de cálculo de 13 torres metálicas da CEEE, o resultado é também compatível com a prática usual de projeto.

N ^o	$\bar{\eta}$	σ_{η}	ξ_1	ξ_2	$\bar{\alpha}$	σ_{α}	N ^o Ens	Forma	Escal
01	1,00	0,10	0	0,10	1,40	0,11	100	3,94	0,32
02	1,00	0,10	0	0,10	1,30	0,11	100	2,34	0,35
03	1,00	0,10	0	0,15	1,20	0,15	100	1,32	0,50
04	1,00	0,10	0	0,25	1,25	0,15	1200	1,73	0,34
05	1,05	0,10	0	0,25	1,25	0,15	400	2,10	0,29
06	1,05	0,07	0	0,30	1,25	0,15	1200	2,67	0,27
07	1,05	0,07	0	0,35	1,20	0,15	1200	2,32	0,30
08	1,05	0,05	0	0,35	1,22	0,15	1200	2,44	0,26
09	1,00	0,05	0	0,40	1,30	0,15	1200	3,62	0,29
10	1,00	0,05	0	0,40	1,22	0,15	1500	2,24	0,31
11	1,00	0,05	0	0,50	1,25	0,15	1500	2,72	0,27
12	1,00	0,05	0	0,60	1,30	0,20	1500	2,25	0,22
13	1,00	0,10	0	0,70	1,30	0,22	1500	1,83	0,20
14	1,00	0,15	0	0,80	1,35	0,22	2000	1,83	0,19
15	1,00	0,18	0	0,90	1,40	0,25	2000	1,75	0,17
16	1,02	0,18	0	1,00	1,40	0,25	2000	1,79	0,14
17	1,02	0,16	0	1,00	1,40	0,25	2000	1,96	0,15
18	1,00	0,18	0	1,00	1,40	0,25	2000	1,70	0,15
19	1,00	0,18	0	1,05	1,40	0,25	2000	1,68	0,14
20	1,00	0,18	0	1,05	1,40	0,25	4000	1,68	0,14

Tabela 3.5.1 - Resumo das Simulações Realizadas

• variável aleatória α (distribuição normal) :

valor médio $\bar{\alpha} = 1,4$ e desvio padrão $\sigma_{\alpha} = 0,25$ ou seja, as barras apresentam, em média, resistência real 40% superior a resistência nominal, com um coeficiente de variação

CV = 18 % . A primeira vista, o valor de 18% para o coeficiente de variação de α parece alto para os padrões internacionais de estruturas metálicas²⁹, entretanto, pelo fato de que a variável α incorpora também dispersões devidas a existência de furos, de variações de dimensões e processos de montagem, o valor é razoável, segundo a opinião de projetistas da área.

A figura 3.5.1 mostra a comparação entre a função densidade de probabilidade dos ensaios dos protótipos e a função densidade de probabilidade dos valores gerados adotando-se os valores anteriores para os parâmetros das distribuições das variáveis aleatórias do modelo.

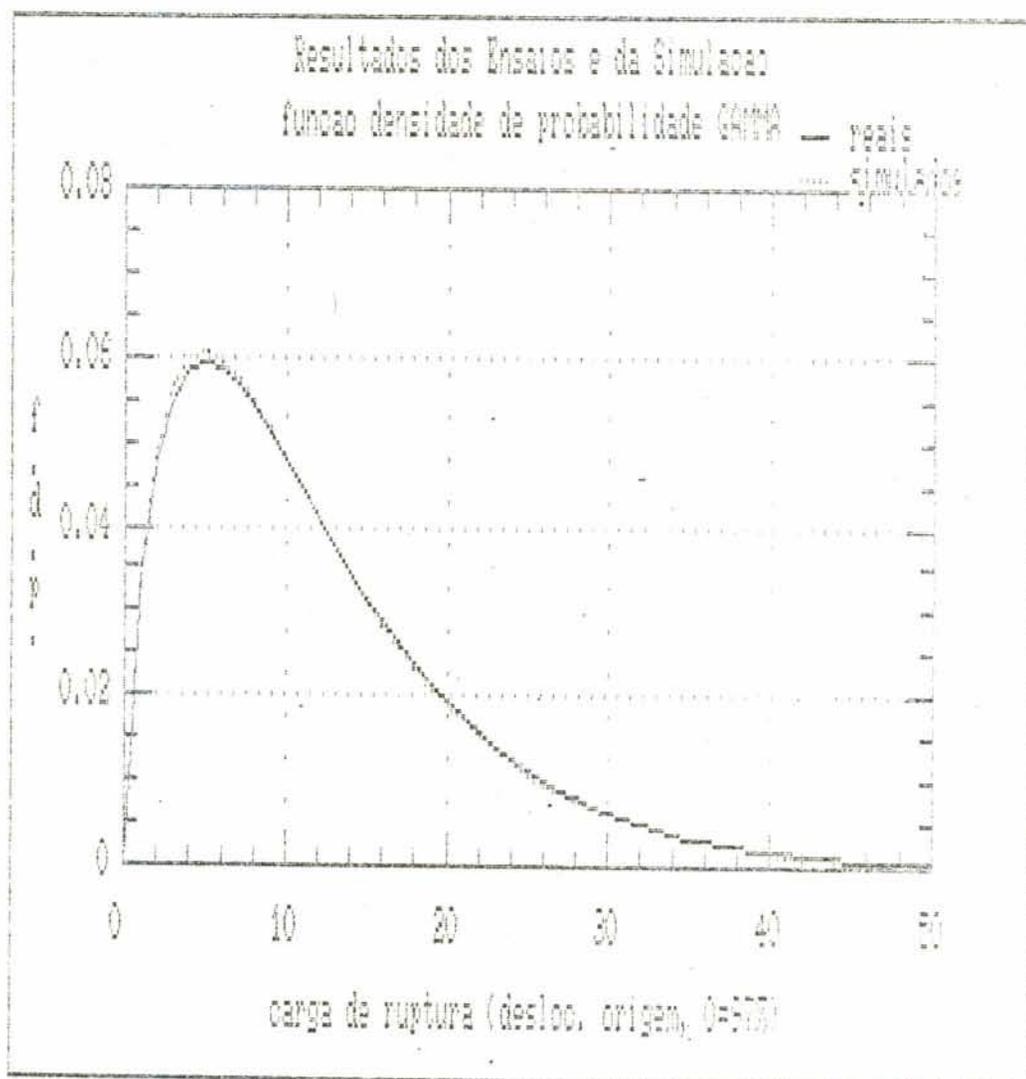


Figura 3.5.1 - Função Densidade de Probabilidade para os Ensaios de Protótipos e Resultados Gerados

Como já foi salientado anteriormente, a distribuição determinada, pela particularidade da sistemática dos ensaios, representa apenas a resistência dos protótipos e não a resistência de torres típicas com as quais são montadas as linhas de transmissão. Para chegar-se a determinação da distribuição de probabilidade da resistência de torres típicas são relevantes, entre outras, as seguintes considerações:

- os ensaios de protótipos não eliminam as inexatidões de projeto. Apenas erros muito grosseiros podem ser detectados;

- as falhas nos ensaios de protótipo, quando ocorrem, não podem ser atribuídas, com precisão, a erros de projeto ou a falhas de material;

- erros por falta no método de projeto podem eventualmente estarem cobertos por excessos na resistência do material, dimensões, escolha da barra, forma de montagem, etc. O mesmo pode ser dito na ordem inversa dos fatores;

- uma torre de um tipo que teve sucesso no ensaio de protótipo não está isenta de falhar com menos de 100% da carga da seu projeto;

- a probabilidade de que uma torre típica de uma série falhar antes de 100% da carga de projeto é praticamente a mesma de que o protótipo falhe na primeira vez que for ensaiado. Isto pode ser admitido pois, mesmo no caso quando há uma alteração do protótipo, ou seja, a substituição de 'm' barras colapsadas por outras 'm' barras de resistência bem superior, pode-se supor que a resistência da torre passa de um problema de mínimo entre N barras para um problema de mínimo entre (N-m) barras, o que não traduz alteração prática, pois $N \gg m$. Para torres usuais em linhas de transmissão, N é da ordem de 60 barras e m é da ordem de 1 barra.

Sendo assim, após feita a calibragem da variáveis, é possível obter-se a distribuição da resistência de torres típicas, através de simulações com o modelo apresentado. Para isto basta admitir-se no processo de simulação descrito em 3.4, passo h, que o limite inferior para a resistência da torre é

livre, pois não se trata mais de ensaio. Fazendo-se a simulação desta forma, gerou-se uma série de resultados aos quais ajustou-se uma distribuição de probabilidades. Das distribuições pesquisadas para o ajuste, via programa computacional STATGRAPHICS, a que apresentou melhor ajuste visual foi a distribuição de Weibull com parâmetros de escala e de forma iguais a 99,7 e 6,3, respectivamente.

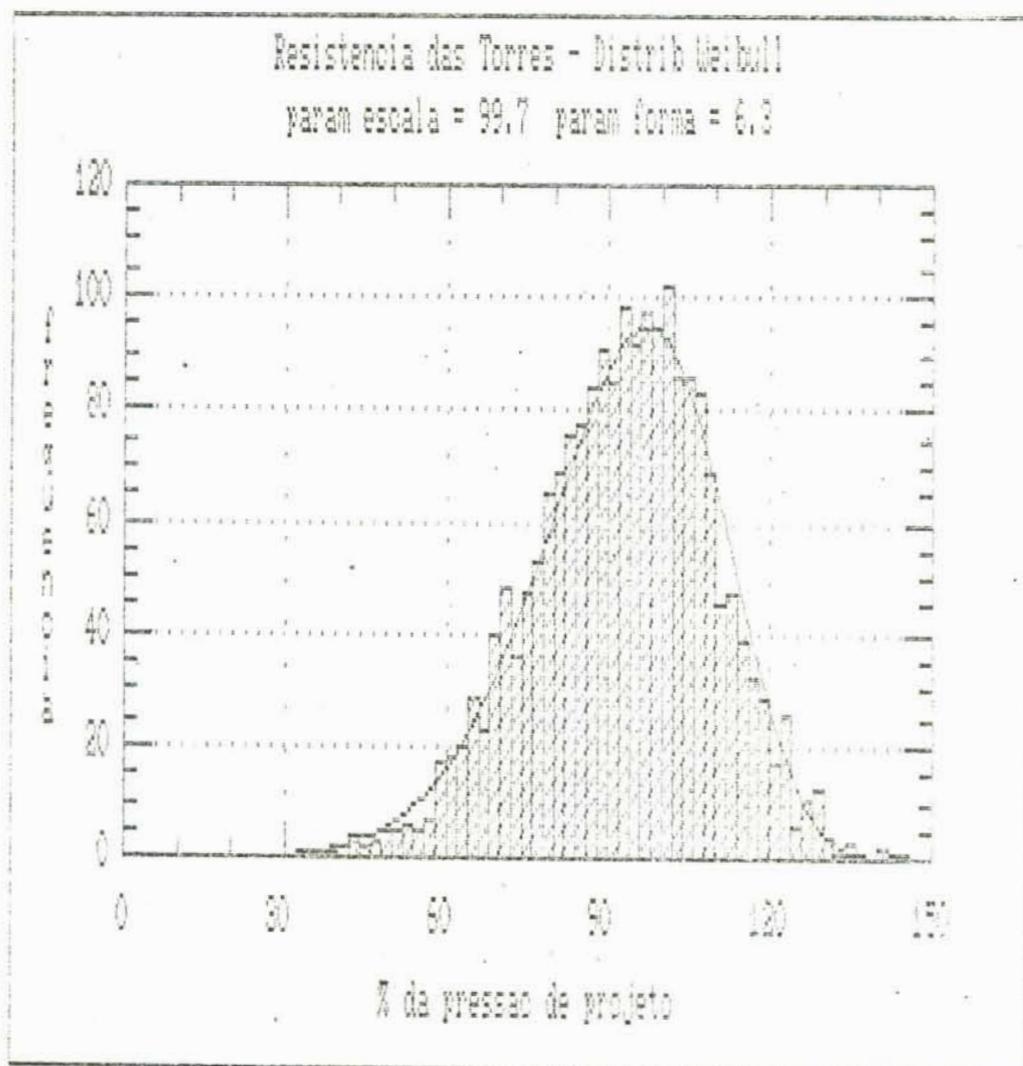


figura 3.5.2 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade da Resistência de Torres Típicas

A figura 3.5.2 apresenta o histograma dos resultados gerados e a respectiva função densidade de probabilidade de Weibull ajustada para a resistência de torres típicas.

A função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull é dada pela expressão:

$$f(x) = \gamma \beta^{-\gamma} x^{\gamma-1} e^{-(x/\beta)^\gamma} \quad (3.5.1)$$

onde γ é o parâmetro de forma e β é o parâmetro de escala.

Observe-se que os resultados até aqui obtidos são percentuais de carga de projeto e conseqüentemente estão expressos em termos de força. Em problemas de confiabilidade, quando as ações são provenientes da ação do vento, é usual expressar-se a distribuição da resistência também em termos de velocidades para ter-se unidades compatíveis.

Sendo a força atuante em um elemento estrutural proporcional ao produto de um coeficiente aerodinâmico pelo quadrado da velocidade do vento, ou seja:

$$\text{Força} = K C_a V^2 \quad (3.5.2)$$

onde C_a é o coeficiente aerodinâmico e K é um coeficiente de proporcionalidade que depende da área de obstrução do elemento estrutural e características físicas do ar.

Admitindo-se que K é uma variável determinística, ao coeficiente C_a podem ser atribuídas características de uma variável aleatória pois é sabido que, para condições similares, não é possível em experiências, reproduzir-se o mesmo valor de C_a .

Com isso chega-se a que:

$$V = \frac{1}{\sqrt{k}} \sqrt{\text{Força} / C_a} \quad (3.5.3)$$

A partir da hipótese de que C_a é uma variável aleatória, é possível obter-se resultados para a resistência de torres típicas, expressos em percentagem da velocidade de projeto, através da expressão 3.5.3, tomando-se os valores expressos em termos de força anteriormente obtidos e

dividindo-os por uma variável aleatória obtida por simulação. Adotou-se, para a variável aleatória C_a , uma média igual a 1,0 e desvio padrão igual a 0,15, sugeridos por Blessmann, chegando-se então a uma nova série de resultados para a resistência das torres típicas de linhas de transmissão, desta vez expressos em termos de percentuais da velocidade de projeto, e conseqüentemente levando-se em consideração a variável aleatória C_a .

Reproduzindo-se procedimentos já descritos, através do uso do programa STATGRAPHICS, procedeu-se o ajuste de uma distribuição de probabilidade para a resistência das torres expressada em termos de velocidades. Relaxando-se análises teóricas mais rígidas, chegou-se que a distribuição de melhor ajuste é uma distribuição do tipo Lognormal, com média igual a 98,7 e desvio padrão igual a 18,8. O tipo de distribuição assim ajustado coincide com sugestão apresentada na referência (29).

A distribuição Lognormal tem a sua função densidade de probabilidade dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Y x} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu_Y}{\sigma_Y} \right]^2} \quad \text{para } x > 0 \quad (3.5.4)$$

onde μ_Y e σ_Y^2 são respectivamente média e variância da distribuição da variável Y , que resulta da mudança de variável $Y = \ln X$. Conhecendo-se μ_X e σ_X^2 , média e variância da distribuição de X :

$$\sigma_Y^2 = \ln \left[\frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} + 1 \right] \quad (3.3.5)$$

$$\mu_Y = \ln \mu_X - \frac{1}{2} \sigma_Y^2 \quad (3.3.6)$$

A figura 3.5.3 apresenta o histograma para os resultados gerados em termos de velocidades bem como a correspondente função densidade de probabilidade do tipo lognormal ajustada.

O modelo assim desenvolvido permite a análise de sensibilidade das variáveis que influem na resistência da torre. Por exemplo, na figura 3.5.4 é apresentado o histograma e a correspondente função densidade de probabilidade para um projeto hipotético onde o erro de análise fosse reduzido a 50 % do erro encontrado anteriormente, ou seja, em lugar de $\sigma_{\eta} = 0,18$ ter-se $\sigma_{\eta} = 0,09$ no modelo.

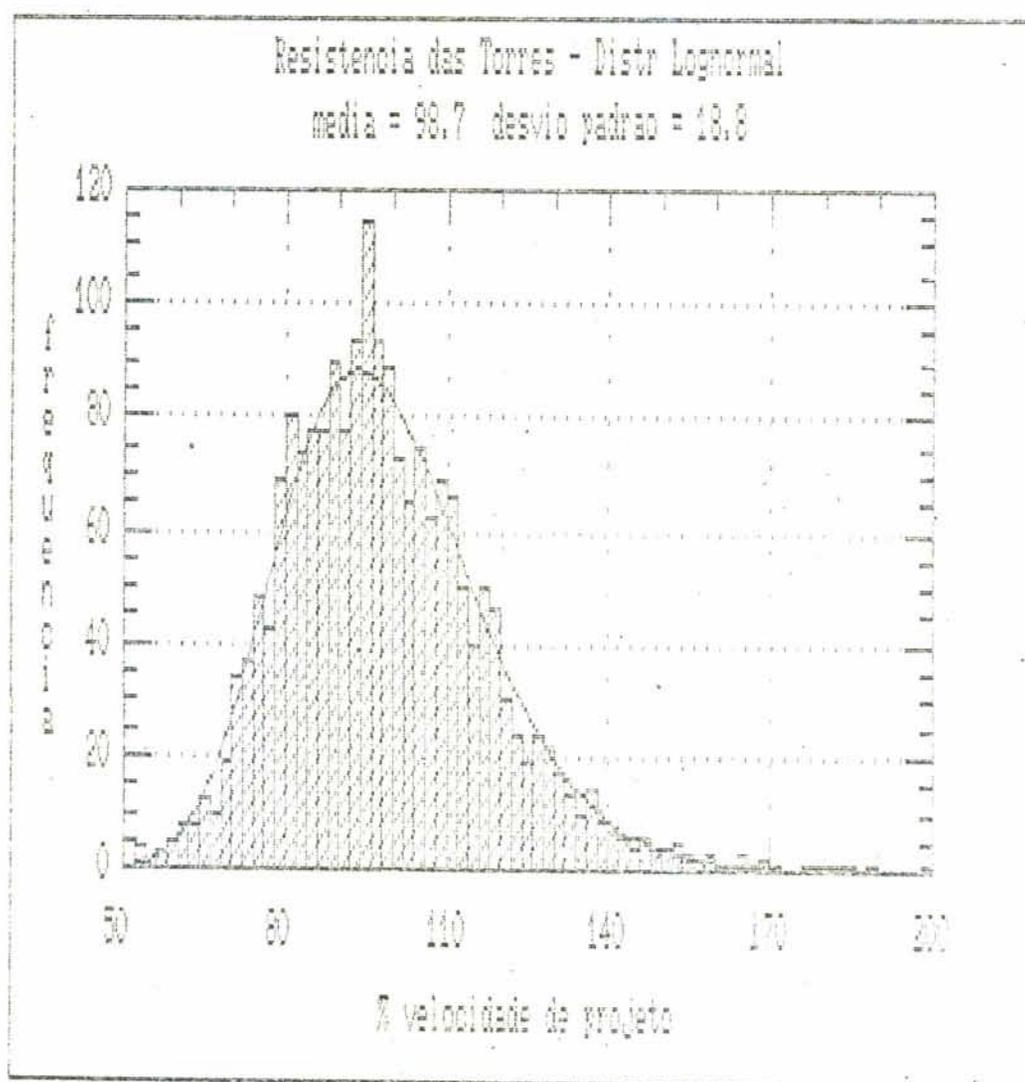


Figura 3.5.3 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência em Termos de Velocidade de Vento de Projeto.

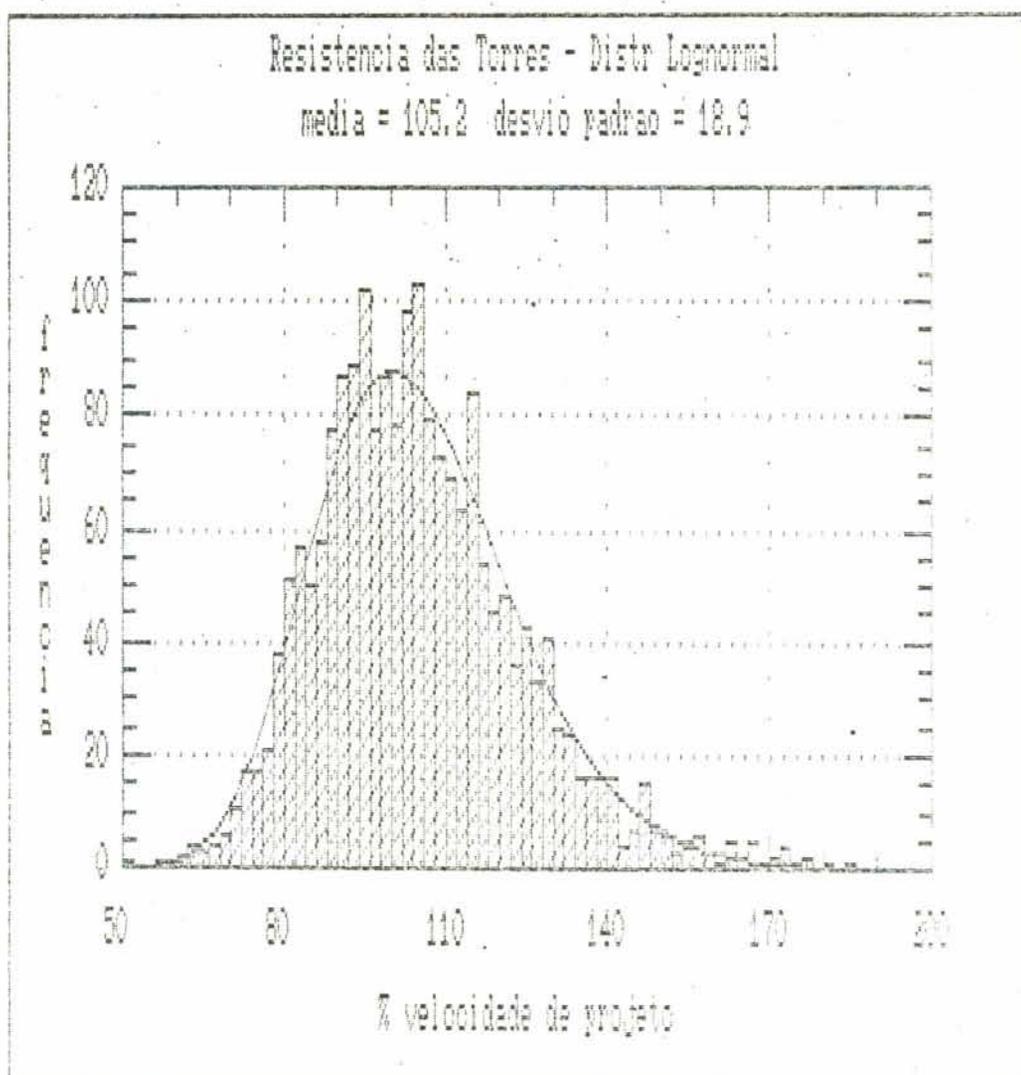


Figura 3.5.4 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência com Redução do Erro de Análise em 50% .

Através do mesmo expediente, na figura 3.5.5 supõe-se que não exista erro de análise, ou seja $\sigma_{\eta} = 0$ e finalmente na figura 3.5.6 adota-se que $\bar{\alpha} = 1,0$ o que indica um projeto sem subavaliação da resistência.

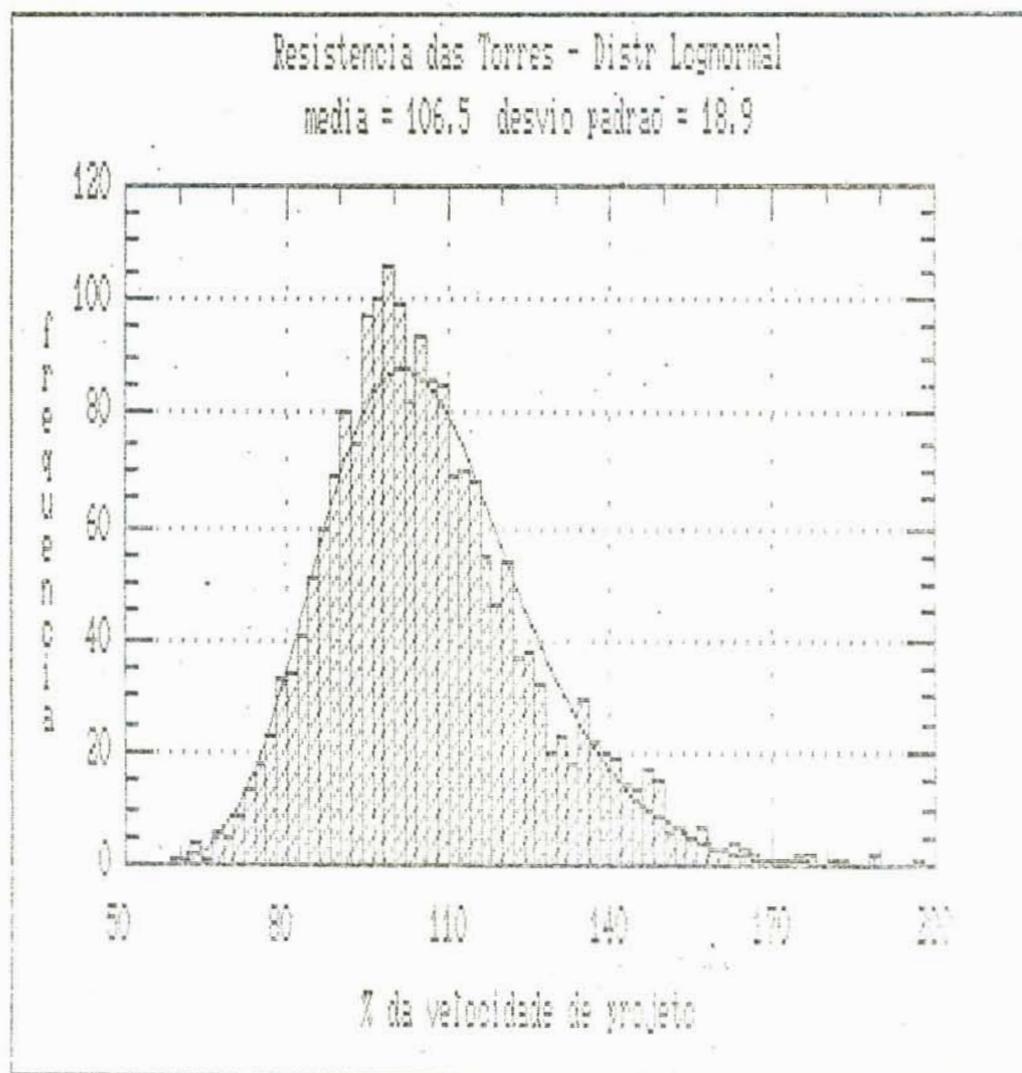


Figura 3.5.5 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência sem Erro de Análise .

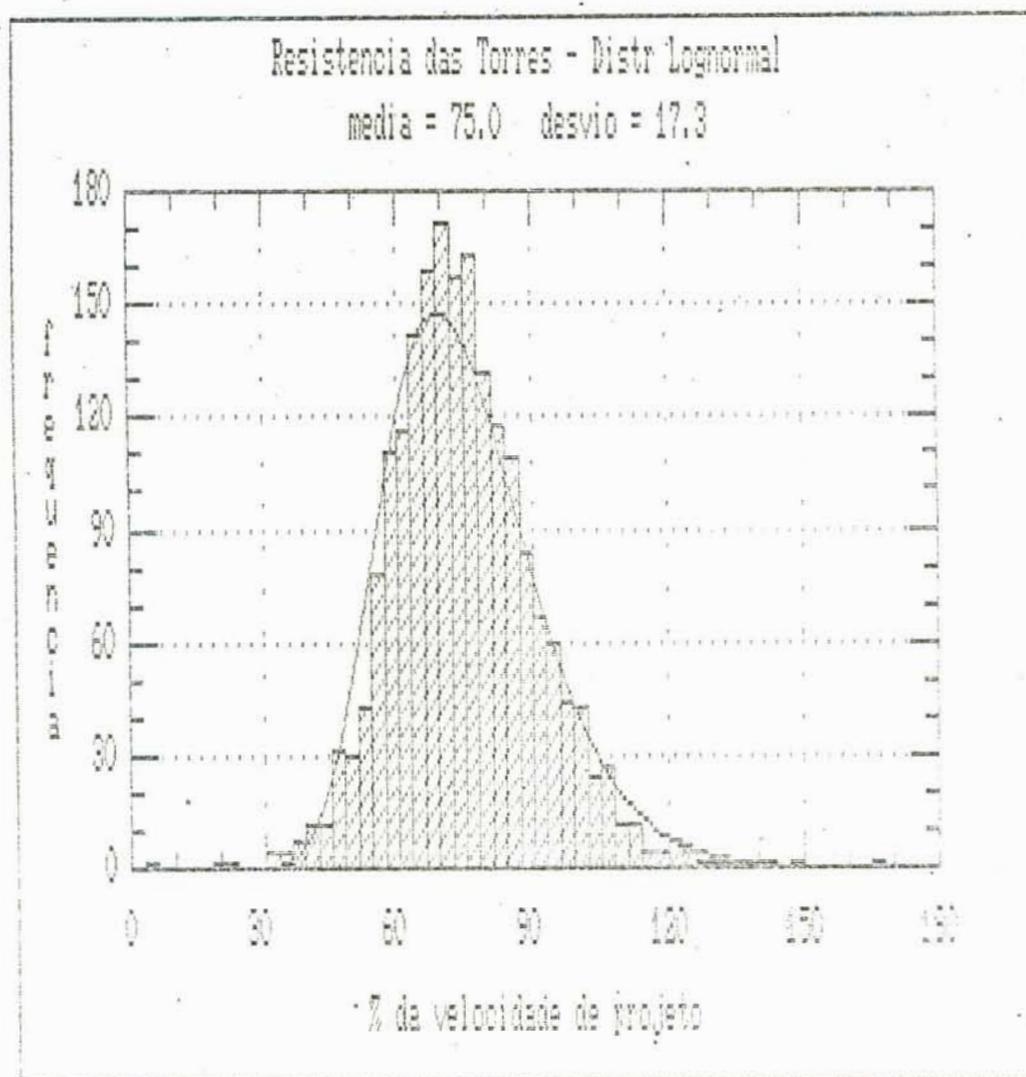


Figura 3.5.6 - Histograma e Função Densidade de Probabilidade para a Resistência da Torre sem a Subavaliação da Resistência do Material

Os resultados da figura 3.5.6 indicam que os procedimentos e critérios usuais de projeto conduzem a valores razoáveis da resistência da torre, o que não aconteceria caso o projeto fosse desenvolvido considerando o real valor da resistência do material.

O modelo permite avaliar também a influência do número de barras no valor esperado da resistência da torre. Pachén, Pezard e Zago³¹ observaram que o valor esperado da resistência, expressa em termos da carga de projeto, de protótipos ensaiados de torres, diminuía para LT's de maior tensão elétrica. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato

de que usualmente o número de barras da estrutura típica aumenta a medida que cresce o nível de tensão da LT. Sendo o valor da resistência da estrutura um problema típico de valor extremo mínimo, entre N barras, a medida que N aumenta, o valor esperado para o mínimo tende a diminuir. A figura 3.5.7 mostra este comportamento obtido das simulações realizadas com números de barras calculadas por torre na faixa usual de projeto.

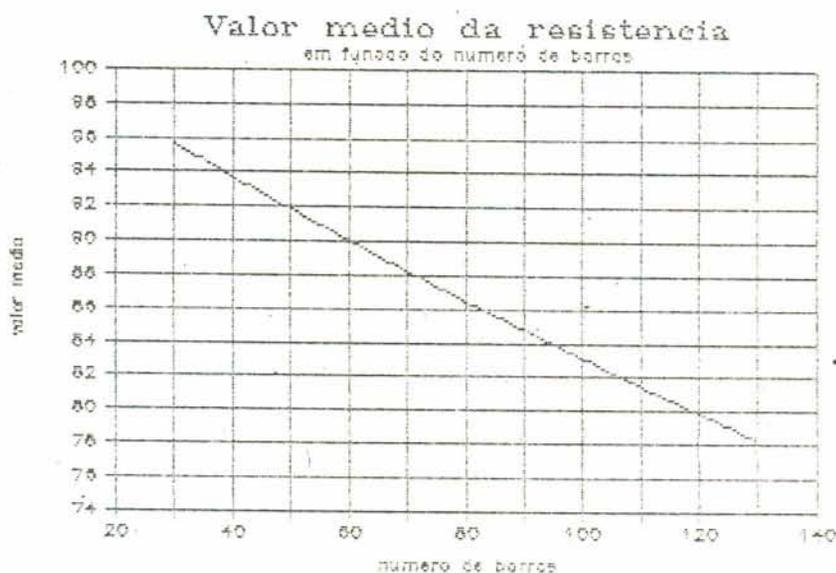


Figura 3.5.7 - Evolução do Valor Médio da Resistência da Torre com o Número de Barras

Pachen 'et al'³¹ encontraram que as torres para níveis de tensão entre 150 kV e 350 kV apresentam resistência média igual a 94 % da resistência média de torres para LT's com tensão inferior a 150 kV. Já para LT's com tensões maiores de 350 kV esta percentagem foi encontrada igual a 92 % .

Usualmente torres para LT's com menos de 150 kV possuem, em média, 50 barras efetivamente calculadas. Para torres de LT's entre 150 kV e 350 kV , este valor passa para 65 barras e, para LT's com tensões maiores de 350 kV , passa para 90 barras. Assim, como pode-se comprovar na figura 3.5.7, os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam as observações de Pachen 'et al'³¹.

3.6 - Resistência do Conjunto Torre - Fundação:

Uma linha de transmissão pode ser modelada como um sistema estrutural do tipo série. Neste sistema, considerando-se que a probabilidade de falha dos cabos e acessórios seja muito pequena em relação a das torres e fundações, pode-se admitir que cada elo é formado pelo conjunto torre e respectiva fundação. Desta forma, fica evidente a importância do conhecimento da distribuição de probabilidade da mínima resistência, entre torre e fundação, para a avaliação da probabilidade de falha da LT.

Na bibliografia consultada, não foram encontrados estudos dirigidos à determinação da distribuição de probabilidade da resistência do conjunto torre-fundação. Existem pesquisas tratando ambos componentes independentemente³¹⁻³³. O problema também é de difícil abordagem teórica. Assim sendo, optou-se por pesquisar o tipo de distribuição de probabilidade da resistência do conjunto, bem como seus respectivos parâmetros, via simulação.

Para a distribuição de probabilidade da resistência das fundações adotaram-se as recomendações da referência (32), a qual sugere que a resistência de fundações diretas por meio de sapatas independentes apresentam distribuição normal com valor médio igual a 100% da carga de projeto e coeficiente de variação igual a 0,2.

Desta forma, com os parâmetros de resistência expressos em termos de força, e as distribuições de resistência das torres e das fundações em unidades compatíveis, gerou-se uma série de resultados consistente nos valores mínimos de cada par simulado de valores de resistência (um valor para a resistência da torre e outro para a resistência da fundação).

Observe-se que também a resistência das fundações da torre consiste num problema de valor mínimo entre dois valores. Admitindo-se que:

- a ação de vento lateral, numa estrutura de quatro pés, provoca que dois pés sejam tracionados enquanto que os outros sejam comprimidos;

- a falha da fundação se dê por tração e
- as resistências das fundações dos pés sejam independentes e tenham a mesma distribuição de probabilidade.

Conclui-se que

Resistência das Fundações = \min (Resist Fund 1, Resist Fund 2)
de acordo com a referência (7), se a distribuição de probabilidades de cada fundação é do tipo normal e com os mesmos parâmetros, os parâmetros da distribuição do conjunto serão dados por:

$$\bar{R}_F = \bar{R} - \frac{\sigma_R}{2} \quad (3.6.1)$$

$$\sigma_{R_F} = 0,9 \sigma_R \quad (3.6.2)$$

onde R_F representa a resistência das fundações tomadas conjuntamente e R , representa a resistência de cada fundação tomada isoladamente. Com relação ao tipo da distribuição da resistência tomada conjuntamente, por simplificação, adotou-se a distribuição tipo lognormal.

Para o ajuste da distribuição de probabilidade da resistência do conjunto Torre-Fundação a partir da série gerada utilizou-se o mesmo expediente dos itens anteriores, ou seja, a escolha visual entre as distribuições ajustadas pelo programa STATGRAPHICS.

A figura 3.6.1 mostra o histograma, bem como a função densidade de probabilidade ajustada, da série gerada para a resistência do conjunto torre-fundação, simulados para a condição que fundação e torre têm a mesma carga de projeto. Na figura 3.6.2 mostra-se o resultado para a condição que a fundação tenha sido projetada para uma carga equivalente a 1,25 vezes a carga de projeto da torre.

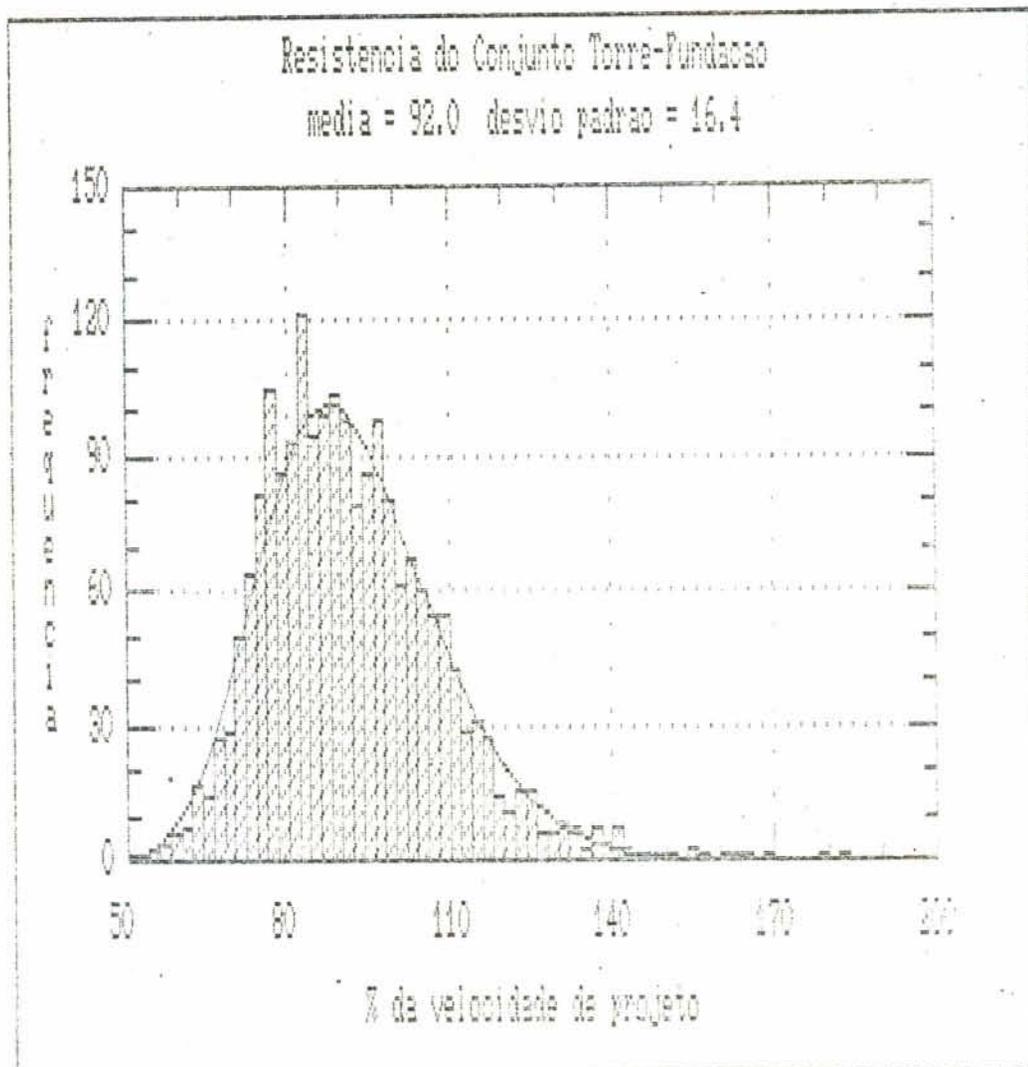


Figura 3.6.1 -Resistência do Conjunto Torre-Fundação para a Condição: Carga Projeto Fundação= Carga Projeto Torre

Caso a fundação tenha carga de projeto igual a 1,46 vezes a carga de projeto da torre, como sugere a referência (33) para atender critérios de coordenação de falhas, o histograma e a função densidade de probabilidade da resistência do conjunto terá a forma indicada na figura 3.6.3.

A figura 3.6.4 mostra a evolução do valor médio, para a distribuição lognormal, da resistência do conjunto com a razão entre carga de projeto da fundação e a carga de projeto da torre. Na figura aparece indicado, como uma reta horizontal, o valor médio da resistência da torre tomada isoladamente. A curva foi ajustada graficamente e os pontos assinalados por

quadrados indicam os resultados obtidos por simulação. Observe-se que o valor médio do conjunto cresce a medida que também cresce a razão entre carga de projeto da fundação e carga de projeto da torre, tendendo assintoticamente ao valor médio da resistência da torre tomada isoladamente. O valor do desvio padrão manteve-se praticamente constante com a variação desta razão. O resultado explica a a recomendação da referência (33) pois deixa claro que, para valores maiores desta razão, os acréscimos na resistência do conjunto não são significativos.

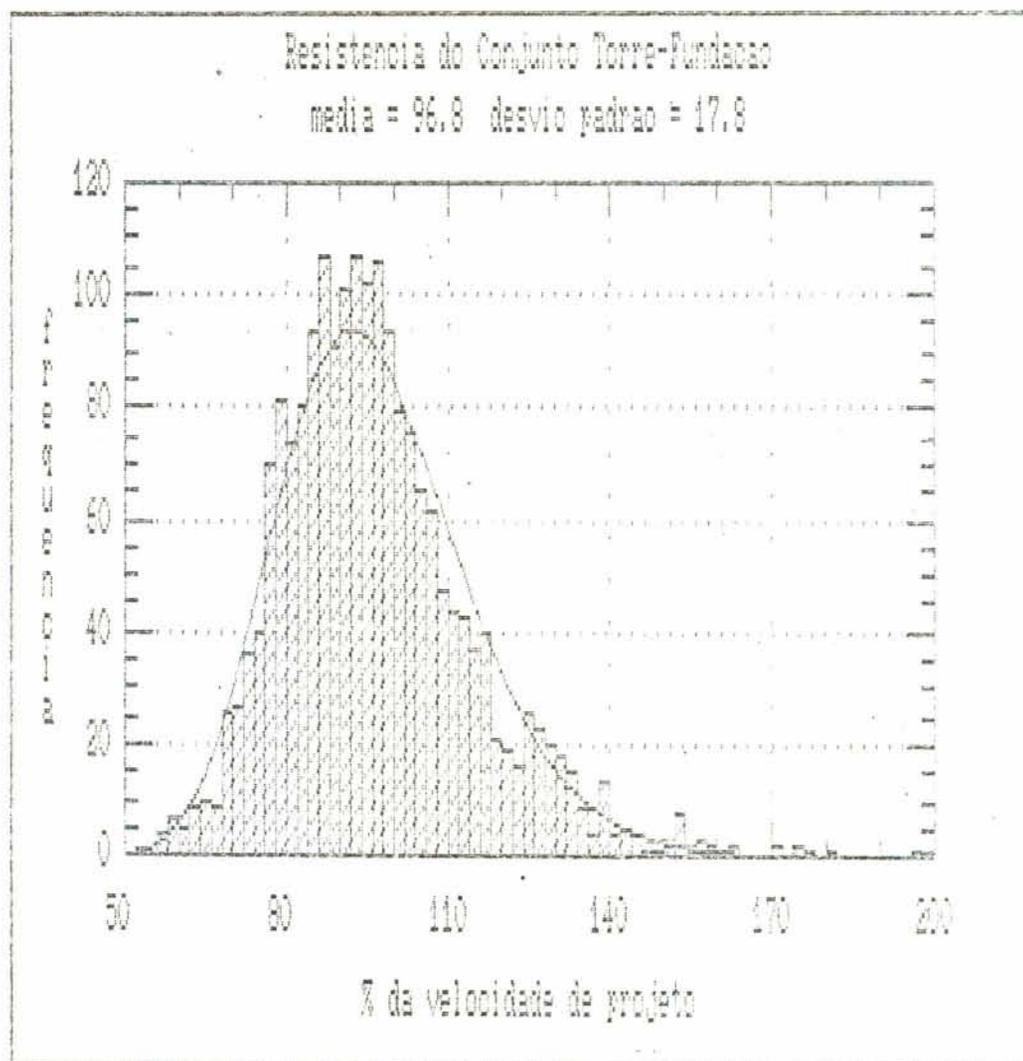


Figura 3.6.2 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação para Condição: Carga Projeto Fundação = 1,25 x Carga Projeto Torre

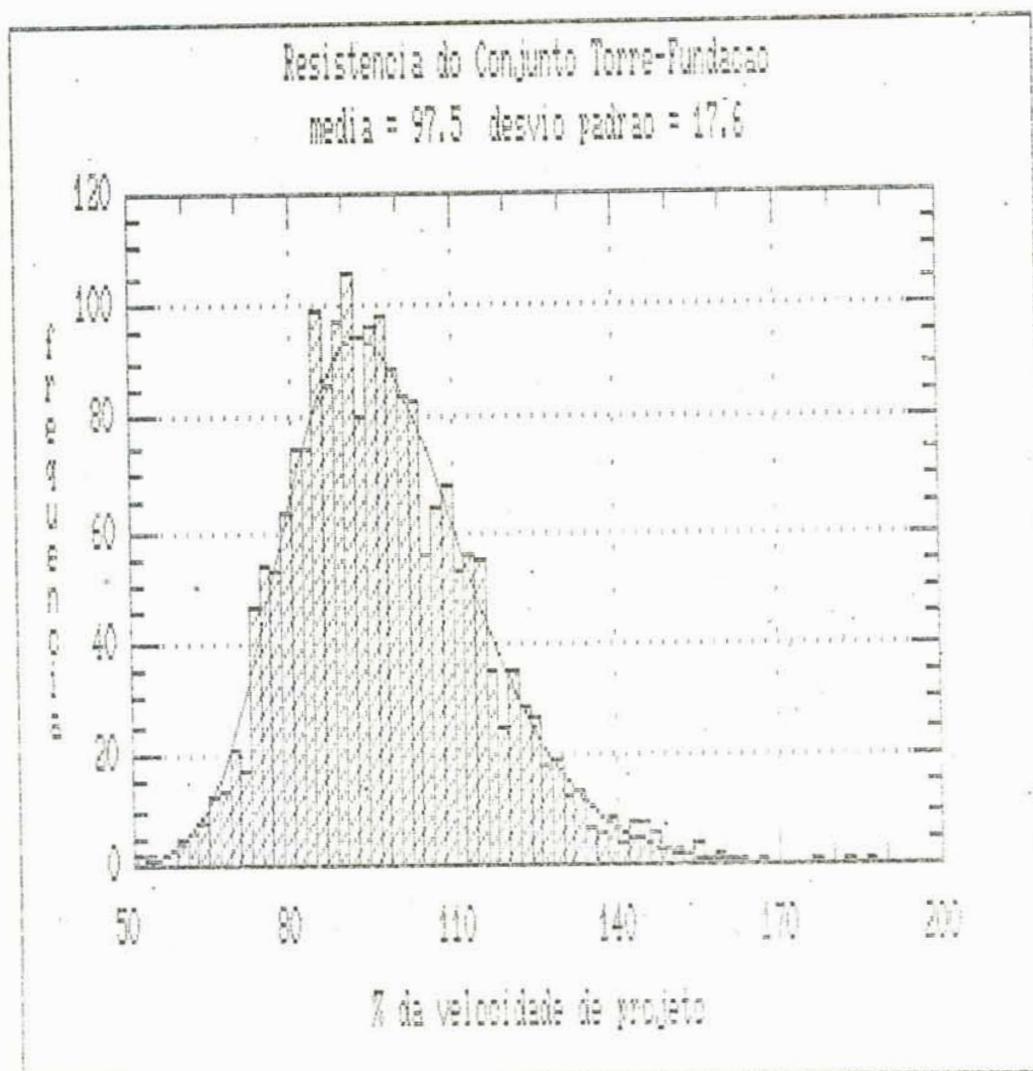


Figura 3.6.3 - Resistência do Conjunto Torre-Fundação
para Condição: Carga Projeto Fundação=
1,46 x Carga Projeto Torre

Os resultados obtidos neste capítulo serviram para a aplicação do modelo de cálculo da probabilidade de falha, as quais são apresentadas no capítulo 6.

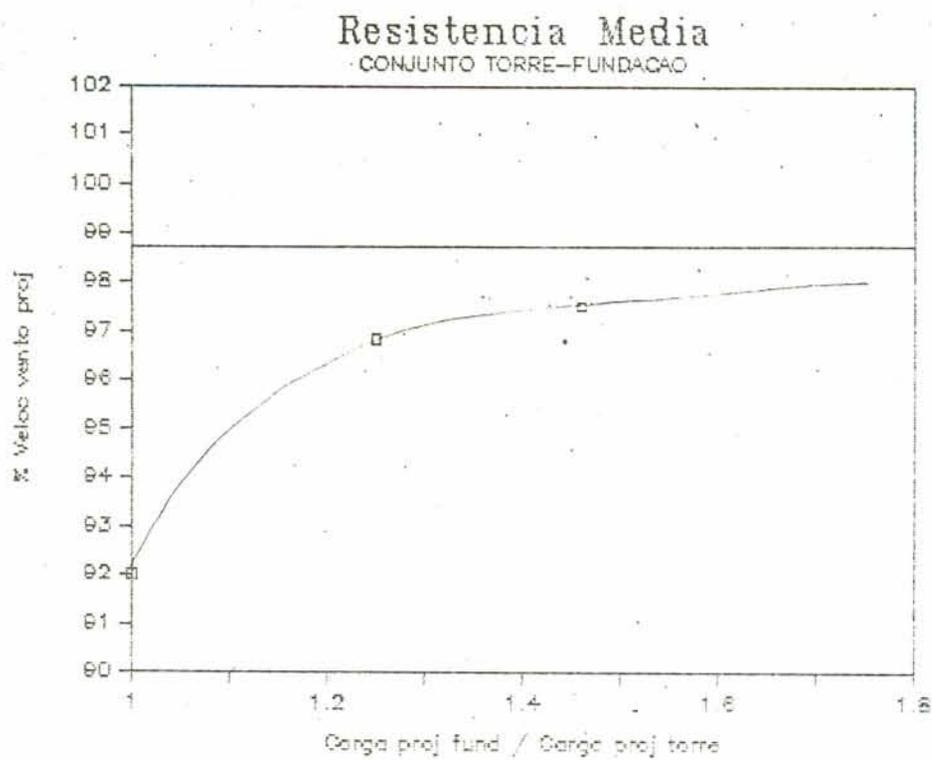


Figura 3.6.4 - Evolução do Valor Médio da Resistência do Conjunto Torre-Fundação

CAPÍTULO 4: CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DE VENTOS EXTREMOS

A avaliação da probabilidade de falha num sistema estrutural, como uma linha de transmissão, no qual o vento é o carregamento mais importante, exige uma completa caracterização probabilística do fenômeno meteorológico em consideração.

Nos últimos 50 anos, a procura dessa caracterização tem levado a modelos que consideram inclusive a influência da orientação de interesse, fato este de enorme importância prática no estudo de linhas de transmissão. Outro fato de relevante importância é a identificação do tipo de vento, pois diferentes fenômenos meteorológicos devem apresentar diferentes distribuições de probabilidade. Sabe-se que, nas latitudes médias da América do Sul, tormentas extratropicais, denotadas pela sigla EPS (extended mature pressure system) e tormentas elétricas, TS (thunderstorm), são responsáveis pela quase totalidade dos registros de ventos extremos. Em algumas áreas, entretanto, pode ser encontrada evidência de tornados, porém com pequeníssima probabilidade de ocorrência.

Os problemas acima mencionados, têm merecido especial atenção no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul²². Estas pesquisas têm levado em conta que muito raramente se dispõe de registros de ventos extremos, em número suficiente para estudos probabilísticos, no local da obra, o que, mais uma vez, constitui um fator importante em relação a linhas de transmissão.

Assim, tem-se estudado também a viabilidade de um esquema para a predição de parâmetros das distribuições de probabilidades de ventos extremos em qualquer local, situado no interior do polígono definido pelas estações pesquisadas, em termos das coordenadas geográficas, tipo de vento e orientação

de interesse.

As conclusões mais importantes destes estudos revelam que:

- existem fortes evidências estatísticas que justificam o processamento independente de ventos do tipo EPS e do tipo TS;

- para cada tipo de vento e orientação, a distribuição de Fisher-Tippet I (Gumbel) mostra em 82% dos casos melhor ajuste para os dados de velocidades extremas do que a distribuição de Fisher-Tippet II (Frechet) ou outras distribuições estudadas como Weibull e Lognormal.

- os parâmetros das distribuições de ventos extremos de tipo EPS são significativamente diferentes dos correspondentes aos de tipo TS. Esta afirmação fica ainda mais evidente com a conclusão de que temperaturas associadas aos ventos extremos são também estatisticamente diferentes, confirmando que estes provêm de populações distintas.

- É viável, através do modelo de regressão proposto, prever os parâmetros das distribuições de probabilidade para qualquer localização geográfica e orientação, no interior dos polígonos descritos pelas estações pesquisadas, para exposição de tipo I.

A figura 4.1 mostra, como exemplo, a função densidade de probabilidade, para a distribuição do tipo I (Gumbel), ajustada para rajadas extremas anuais de ventos do tipo TS, na orientação 3 (de 90° a 135° , no sentido horário, a partir do eixo Sul-Norte), em Porto Alegre, com parâmetros de forma igual a 3,45 e de escala igual a 13,25 .

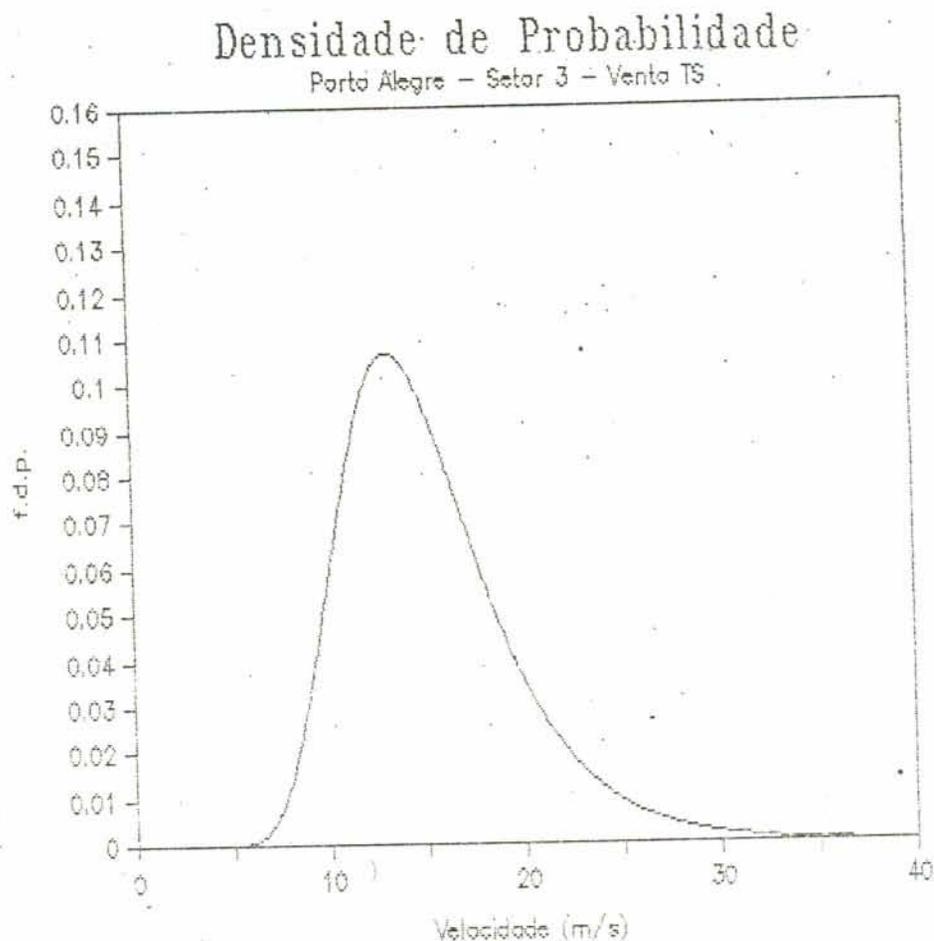


Figura 4.1 - Função Densidade de Probabilidade Ajustada para Porto Alegre - TS - no Setor 3

A função densidade de probabilidade de tipo I é dada pela equação (2.3.9).

Na aplicação do modelo para o cálculo da probabilidade de falha, foram usadas as informações aqui citadas, como pode ser constatado no capítulo 6.

CAPÍTULO 5: LEVANTAMENTO DE ACIDENTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O estudo minucioso dos acidentes assume relevante importância como um critério de avaliação dos métodos de projeto e se constitui no principal meio de avaliação da validade dos modelos matemáticos de análise, tais como o cálculo da probabilidade de falha, por exemplo.

Objetivando inicialmente reunir dados para a análise da validade dos modelos de cálculo da probabilidade de falha em linhas de transmissão, foi feito um levantamento de acidentes, devidos à ação do vento, com quedas de estruturas.

Inicialmente buscou-se a compilação de dados de acidentes ocorridos em todo o Brasil, entretanto, devido a numerosas dificuldades encontradas na pesquisa, o trabalho ficou restrito a área de abrangência do GCOI - Grupo de Coordenação da Operação Interligada, a qual compreende as regiões Sul e Sudeste do Brasil.

O resumo do levantamento de dados é apresentado na tabela 5.1, onde as colunas contêm as seguintes informações:

- Nome da LT: designação da linha de transmissão acidentada;
- Concess. : sigla da concessionária de energia elétrica, responsável pela operação da LT;
- Tensão : tensão elétrica de operação da LT, em kilovolts;
- Compr. : comprimento total da LT, em quilômetros;
- Num Torres : número total de estruturas que compõem a LT;
- Dat Constr : data de finalização da construção, apresentada na forma ano-mês-dia;
- Vel Proj : velocidade de vento, adotada no projeto,

ACIDENTES COM QUEDAS DE ESTRUTURAS NAS REGIOES SUL E SUDESTE DO BRASIL

Nome da LT	Concess	Tensao	Compr	Num	Data	Veloc		No Estr	Datas	Tipo Estrut
						Proj	Caidas			
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01			1	74-06-09	madeira
UHE Passo Real - Santa Marta	CEEE	138	118	293			39	2	74-06-09	metalicas
UHE Passo Fundo - Erechim	CEEE	138	46	92	73-06-21		39	1	74-11-26	metalicas
UTE P.Medice - Camaqua	CEEE	230	197	427	74-08-01		39	3	75-01-15	metalicas
Quinta - Rio Grande 2	CEEE	69	27	137				3	75-01-15	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	75-04-29	madeira
UTE Charqueadas - Areal	CEEE	69	31	145	65-01-01			2	75-09-29	madeira
Bage - Dom Pedrito	CEEE	69	83	408	70-04-01			4	75-10-26	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01			2	76-04-19	madeira
V.Aires - Sao Jeronimo	CEEE	69	57	282	68-06-01			3	76-09-29	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01			2	76-10-31	madeira
Jaguari - S.Pedro do Sul	CEEE	69	56	248	71-01-01			1	76-12-07	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	77-10-03	madeira
Passo Real - C.Industrial	CEEE	230	224	448	73-07-01		39	1	78-01-19	metalicas
Cruz Alta - Panambi	CEEE	69	39	201	68-07-01			1	78-01-31	madeira
Lageado - Encantado	CEEE	69	26	118	69-05-01			1	78-07-20	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			4	79-08-03	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	79-10-27	madeira
Macambara - Itaquí	CEEE	69	48	227	69-07-01			1	79-10-27	madeira
UTE P.Medici - Quinta	CEEE	230	153	334	78-10-01		34	5	79-12-08	metalicas
Sao Sepe - Cacapava	CEEE	69	41	181	69-06-01			2	81-08-27	madeira
Cruz Alta - Tupacireta	CEEE	69	60	266	78-12-01			1	81-11-05	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	81-11-05	madeira
Rosario do Sul - Sao Gabriel	CEEE	69	60	240	69-06-01			1	82-06-28	madeira
Bage - Dom Pedrito	CEEE	69	83	408	70-04-01			1	82-10-17	madeira
Camaqua - SECI	CEEE	230	127	279	74-08-01		39	3	82-10-17	metalicas
Santa Maria 2 - Sao Sepe	CEEE	69	53	243	68-06-01			1	82-10-17	madeira
Rosario do Sul - Sao Gabriel	CEEE	69	60	240	69-06-01			5	82-10-21	madeira
Santa Marta - Guapore	CEEE	138	94	358	76-02-01			1	82-10-22	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01			4	82-10-22	madeira
UTE Alegrete - Macambara	CEEE	69	82	324	69-02-01			1	82-10-87	madeira
Uruguaiana 5 - Uruguaiana 3	CEEE	69	47	221	82-09-15			9	83-01-04	madeira
Sao Vicente do Sul - Jaguari	CEEE	69	23	99	70-07-01			1	83-02-06	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01			2	83-05-16	madeira
Atlantida - Torres	CEEE	69	60	268	75-12-01			2	83-07-02	madeira
Encruzilhada - Capivarita	CEEE	69	28	110	79-10-01			1	83-12-01	madeira
Santo Angelo - Santa Rosa	CEEE	69	54	262	68-01-01			1	84-01-24	madeira
Itauba - Alegrete 2	CEEE	230	266	593	79-07-01		39	3	84-02-10	metalicas
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	84-05-20	madeira
Cruz Alta - Ibiruba	CEEE	69	50	207	80-03-01			1	84-11-30	madeira
Macambara - Itaquí	CEEE	69	48	227	69-07-01			1	84-12-29	madeira
Palmeira Missoes - Sarandi	CEEE	69	39	170	83-06-12			1	85-01-06	madeira
Jaguari - Sao Pedro do Sul	CEEE	69	56	248	71-01-01			1	85-01-20	madeira
Jaguari - Sao Franc de Assis	CEEE	69	44	202	70-12-01			1	85-06-30	madeira
Santa Marta - Lagoa Vermelha	CEEE	138	96	386	79-02-01			1	85-07-08	madeira
Rosario do Sul - Sao Gabriel	CEEE	69	60	240	69-06-01			4	85-12-14	madeira
Jaguari - Sao Franc de Assis	CEEE	69	44	202	70-12-01			1	86-01-04	madeira
Macambara - Itaquí	CEEE	69	48	227	69-07-01			1	86-01-28	madeira
Santa Rosa - Cerro Largo	CEEE	69	41	204	83-08-06			1	86-02-08	madeira
Sao Borja 2 - Sao Borja 1	CEEE	69	4	16	82-12-12			1	86-03-11	madeira
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01			1	86-04-01	madeira

tabela 5.1 - Acidentes com Quedas de Estruturas em Linhas de Transmissao Causados Pelo Vento

ACIDENTES COM QUEDAS DE ESTRUTURAS NAS REGIOES SUL E SUDESTE DO BRASIL

Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01		6	86-05-09	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01		3	86-05-20	madeira
Guarita - Campo Novo	CEEE	69	24	99	76-03-01		1	86-05-20	madeira
Santa Rosa - Horizontina	CEEE	69	33	127	79-10-01		1	86-05-20	madeira
Jaguari - Sao Franc de Assis	CEEE	69	44	202	70-12-01		1	86-11-22	madeira
Santo Angelo - Santa Rosa	CEEE	69	54	262	68-01-01		1	86-11-22	madeira
Uruguaina 5 - Uruguaiiana 3	CEEE	69	47	221	82-09-15		2	86-11-25	madeira
Camaqua - Encruzilhada	CEEE	69	78	316	78-04-01		1	86-11-27	madeira
Santa Maria 2 - Sao Sepe	CEEE	69	53	243	68-06-01		1	86-11-27	madeira
Encruzilhada - Capivarita	CEEE	69	28	110	79-10-01		1	86-11-27	madeira
Santa Marta - Carazinho	CEEE	69	40	167	85-04-28		4	86-12-02	madeira
Atlantida - Torres	CEEE	69	60	268	75-12-01		2	87-01-07	madeira
Uruguaiiana 5 - Uruguaiiana 3	CEEE	69	47	221	82-09-15		3	87-02-07	madeira
Palmeira Missoes - Sarandi	CEEE	69	39	170	83-06-12		2	87-02-26	madeira
Ijuí - Campo Novo	CEEE	69	84	399	69-05-01		2	87-05-13	madeira
Rosario do Sul - Sao Gabriel	CEEE	69	60	240	69-06-01		2	87-07-11	madeira
Harmonia - Quaraí	CEEE	69	48	264	68-03-01		1	87-07-11	madeira
Santo Angelo - S L Gonzaga	CEEE	69	76	296	68-06-01		1	87-07-26	madeira
Rosario do Sul - Sao Gabriel	CEEE	69	60	240	69-06-01		2	87-09-15	madeira
Alegrete 2 - Uruguaiiana 5	CEEE	230	127	292	83-12-18	39	13	87-09-31	metalicas
Ramal PIND - PIND 3 geracao	CEEE	69	2	7	81-01-01	39	2	87-10-11	metalicas
Quinta - Pelotas 3	CEEE	230	43	103	83-01-29	39	3	87-12-11	metalicas
Macambara - Sao Borja 1	CEEE	69	59	287	69-02-01		1	88-01-14	madeira
Tubarao - Lages	CELESC	138					3	78-02-02	
Xanxere - Chapeco	CELESC	69					1	81-11-09	
Faxinal - Arabuta	CELESC	69					1	82-06-28	
Cach Dourada - Quirinopolis	CELG	138					1	72-01-09	
Cach Dourada - Quirinopolis	CELG	138					3	72-10-26	
Cach Dourada - Quirinopolis	CELG	138					4	76-10-29	
Cach Dourada - Quirinopolis	CELG	138					2	76-11-25	
Anhanguera - Fabrica Cimento	CELG	69					6	78-02-07	
Barro Alto - Uruacu	CELG	69					6	80-02-19	
Lavras - Tres Pontas	CEMIG	69	60	290	59-04-01	31	3	68-01-04	madeira
L.Ferreira - D.Indaia	CEMIG	69	68	292	64-06-01	31	2	68-05-10	madeira
Lavras - Campo Belo	CEMIG	69	57	118	63-01-01	31	1	69-04-15	madeira
T.Maria - Joao Pinheiro	CEMIG	138	126	324	69-01-01	31	2	69-04-24	metalicas
Itutinga - Lavras	CEMIG	138	37	135	61-01-01	31	3	70-01-26	concreto
G.Valadares - T.Otoni	CEMIG	69	129	421	63-11-01	31	2	70-08-31	madeira
Lavras - Campo Belo	CEMIG	69	57	118	63-01-01	31	1	70-10-09	metalicas
Lavras - Campo Belo	CEMIG	69	57	118	63-01-01	31	1	70-10-20	metalicas
Patrocínio - M. Carmelo	CEMIG	69	71	291	65-07-01	31	6	70-10-21	concreto
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	154	57-01-01	31	9	70-10-25	madeira
Ipatinga - Caratinga	CEMIG	161	65	132	66-12-01	31	4	70-11-19	metalicas
Patos Minas - Patrocínio	CEMIG	138	71	304	62-04-01	31	5	70-11-19	madeira
G.Valadares - Mascarenhas	CEMIG	230					2	70-11-19	
Uberaba - Frutal	CEMIG	69	119	317	67-12-01	31	38	70-11-21	metalicas
T.Marias - J.Pinheiros	CEMIG	138	126	324	68-10-01	31	3	70-12-09	metalicas
Nova Linha - Lafaiete	CEMIG	69	82	332	59-01-01	31	4	70-12-13	madeira
Itutinga - Lavras	CEMIG	138	37	135	61-01-01	31	10	71-01-07	concreto
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	57-01-01	31	2	71-02-08	madeira
Lavras - T.Pontas	CEMIG	69	60	290	59-04-01	31	1	71-02-09	madeira
G.Valadares - T.Otoni	CEMIG	69	129	421	63-11-01	31	1	71-02-25	madeira
Itabirito - Lafaiete	CEMIG	69	47	213	53-01-01	31	2	71-06-18	madeira

tabela 5.1 - Acidentes com Quedas de Estruturas em Linhas de Transmissao Causados Pelo Vento

ACIDENTES COM QUEDAS DE ESTRUTURAS NAS REGIOES SUL E SUDESTE DO BRASIL

T.Marias - Barreiro	CEMIG	345	225	625	62-07-01	31	3	71-09-27	metalicas
Lafaiete - Barbacena	CEMIG	138	61	143	65-01-01	31	6	71-10-01	metalicas
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	57-01-01	31	1	71-11-11	madeira
Curvelo - Cordisburgo	CEMIG	69	42	90	57-01-01	31	10	71-12-06	concreto
T.Marias - Barreiro	CEMIG	345	225	625	62-07-01	31	3	72-02-14	metalicas
G.Valadares - Poguim	CEMIG	69	99	345	63-11-01	31	1	72-07-10	madeira
Peixoto - Sacramento	CEMIG	138	23	60	63-05-01	31	5	72-09-30	metalicas
Garatinga - Ipanema	CEMIG	69	52	146	66-12-01	31	1	72-10-25	madeira
Gafanhoto - L.Ferreira	CEMIG	69	42	266	63-02-01	31	1	72-10-28	madeira
L.Ferreira - D.Indaia	CEMIG	69	68	292	64-06-01	31	1	72-12-06	madeira
Itabirito - Lafaiete	CEMIG	69	47	213	58-01-01	31	1	72-12-18	madeira
T.Marias - J.Pinheiro	CEMIG	138	126	324	59-01-01	31	3	73-01-08	metalicas
Itabirito - Lafaiete	CEMIG	69	47	213	58-01-01	31	1	73-01-29	madeira
Nova Lima - Itabirito	CEMIG	69	35	119	57-01-01	31	1	73-01-31	madeira
Lavras - T. Pontas	CEMIG	69	60	290	59-04-01	31	2	73-02-26	madeira
Itabirito - Ouro Preto	CEMIG	69	35	138	67-01-01	31	1	73-02-27	madeira
Lavras - T. Pontas	CEMIG	69	60	290	59-01-01	31	4	73-03-02	madeira
Sacramento - Araxa	CEMIG	138	67	273	63-01-01	31	1	73-08-01	madeira
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	58-01-01	31	1	73-09-25	madeira
Gafanhoto - L. Ferreira	CEMIG	69	42	266	63-01-01	31	1	73-10-28	madeira
S.Vitoria - S.Simao	CEMIG	138	45	199	73-01-01	31	1	73-11-09	concreto
L.Ferreira - D.Indaia	CEMIG	69	68	292	64-01-01	31	1	73-12-06	madeira
Itauna - Para Minas	CEMIG	69	25	90	64-01-01	31	1	73-12-09	madeira
Uberaba - Frutal	CEMIG	69	119	317	67-01-01	31	4	73-12-13	metalicas
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	58-01-01	31	5	74-01-30	madeira
Sacramento - Araxa	CEMIG	138	67	273	63-01-01	31	1	74-03-18	madeira
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	58-01-01	31	3	74-05-29	madeira
Bonsucesso - Nova Lima	CEMIG	69	15	62	73-01-01	31	1	74-10-21	metalicas
G.Valadares - T.Otoni	CEMIG	69	129	421	60-01-01	31	2	76-09-09	madeira
T.Marias - Barreiro	CEMIG	345	226	625	72-01-01	31	3	76-09-19	metalicas
T.Marias - J.Pinheiro	CEMIG	138	126	324	68-01-01	31	4	77-09-03	metalicas
Nova Lima - Itabirito	CEMIG	69	35	119	57-01-01	31	3	78-05-18	madeira
T.Marias - Felixlandia	CEMIG	69	73	157	58-01-01	31	1	78-09-01	madeira
Patrocínio - Patos Minas	CEMIG	138	71	304	64-01-01	31	4	78-12-27	madeira
Sacramento - Araxa	CEMIG	138	67	273	63-01-01	31	5	81-10-15	madeira
Mogi Guacu - Euc. Cunha	CEMIG	138			61-01-01		6	70-11-21	metalicas
Rio Claro - P.Ferreira	CEMIG	138			59-01-01		3	72-02-27	
Jupia - Ilha Solteira	CEMIG	138			66-01-01		4	72-10-09	
Jupia - Valparaiso	CEMIG	138			63-01-01		5	74-10-26	
P.Prudente - S.Grande	CEMIG	88			58-01-01		3	75-10-07	
Itarare - Itapeva	CEMIG	69			70-11-14		3	76-11-05	
Jurumirim - Capao Bonito	CEMIG	138			69-11-19		1	77-09-07	
Capivara - Assis	CEMIG	460			76-08-21		6	78-11-23	metalicas
Jupia - Ilha Solteira	CEMIG	138			66-01-01		6	79-04-29	
Assis-Londrina	CEMIG	230			73-12-27		3	80-06-25	
Ilha Solteira - Bauru	CEMIG	460			76-03-14		18	81-10-12	metalicas
Valparaiso - Promissao	CEMIG	138			63-01-01		16	81-10-12	metalicas
Jupia - Bauru	CEMIG	460			69-06-19	41	31	81-10-12	metalicas
Bauru - Cabreuva	CEMIG	460			69-11-03	41	27	81-11-17	metalicas
Santa Fe do Sul - Jales	CEMIG	69			60-01-01		4	81-12-15	
Taubate - Campos do Jordao	CEMIG	138			82-05-26		3	82-06-26	
Itaporanga - Itarare	CEMIG	69			78-11-19		1	82-06-28	
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	1	66-07-01	metalicas

Tabela 5.1 - Acidentes com Quedas de Estruturas em Linhas de Transmissao Causados Pelo Vento

ACIDENTES COM QUEDAS DE ESTRUTURAS NAS REGIOES SUL E SUDESTE DO BRASIL

Guarapuava - Laranj.Sul	COPEL	69	100	413	70-01-29	28	2	71-01-01	concreto
Florestopolis - Vera Cruz	COPEL	92	49	133	70-12-15	28	1	71-01-01	metalicas
Florestopolis - Vera Cruz	COPEL	92	49	133	74-12-15	28	5	71-06-01	metalicas
Laranj.Sul - Julio de M.Fo.	COPEL	69	81	300	70-01-29	28	4	72-01-01	concreto
Guarapuava - Laranj.Sul	COPEL	69	100	413	70-01-29	28	1	72-01-01	concreto
Ponta Grossa Norte - Irati	COPEL	69					1	74-10-01	
Guarapuava - Laranj.Sul	COPEL	69	100	413	70-01-29	28	5	74-10-01	concreto
Barbosa Ferraz - Mourao I	COPEL	69	32	87	67-06-02	28	3	75-10-01	metalicas
Pinheiros - Toledo	COPEL	138	40	101	68-05-21	28	4	75-10-01	metalicas
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	4	76-06-05	metalicas
Foz do Iguacu - Medianeira	COPEL	138					2	76-06-26	
A.Chateaubriand - Umuarama	COPEL	138					4	76-10-04	
Pinheiros - A.Chateaubriand	COPEL	138					2	76-11-05	
Uberaba - Morretes	COPEL	69	48	169	70-03-16	28	1	77-02-01	concreto
Apucarana - Figueira	COPEL	230	115	251	67-11-21	28	1	79-10-06	metalicas
Apucarana - Figueira	COPEL	230	115	251	67-11-21	28	5	80-06-25	metalicas
Figueira - T.Borba	COPEL	138	62	152	67-12-18	28	2	80-06-25	metalicas
Guarapuava - Irati	COPEL	69	84	195	67-12-21	28	1	80-06-25	metalicas
Irati - Rio Azul	COPEL	69	28	66	66-05-11	28	2	80-06-25	metalicas
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	1	80-06-25	metalicas
Apucarana - Ivaipora	COPEL	138	97	230	81-09-03	31	5	82-06-25	metalicas
Apucarana - Figueira	COPEL	230	115	251	67-11-21	28	5	82-06-25	metalicas
Xavantes - Figueira	COPEL	230	105	234	69-11-14	28	3	82-07-17	metalicas
Florestopolis - Capivara	COPEL	138	26	72	78-07-12	31	2	83-05-01	metalicas
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	1	83-05-01	metalicas
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	1	83-06-01	metalicas
Florestopolis - Capivara	COPEL	138	26	72	78-07-12	31	1	83-06-01	metalicas
Pinheiros - A.Chateaubriand	COPEL	138	76	199	78-08-28	31	4	86-05-01	
Figueira - P.Grossa Norte	COPEL	230	137	309	64-04-16	28	1	87-05-08	metalicas
Xavantes - Figueira	COPEL	230	105	234	69-11-14	28	1	87-05-21	
Carioba(US) - Trevo	CPFL	138			54-01-01		5	60-01-10	
Carioba(US) - Trevo	CPFL	138			54-01-01		1	77-04-08	
Lencois - Pederneiras	CPFL	69					3	78-01-21	
Norro Cipo - V.Albertina	CPFL	138			74-04-21		5	78-01-26	
Rondonopolis - Coxipo	ELETRONOR	230	188	462			3	82-08-04	metalicas
C.Magalhaes - Rondonopolis	ELETRONOR	138	178	447	75-12-17		4	84-02-02	metalicas
S.J.Campos - Aparecida	ELETROPAU	230					1	74-04-30	
S.J.Campos - Taubate	ELETROPAU	88					7	74-04-30	
S.J.Campos - Mogi I	ELETROPAU	230					1	76-06-05	
Mogi - Vila Olivia	ELETROPAU	88					13	78-01-05	
Aparecida - Taubate	ELETROPAU	88					2	82-06-26	
Sideropolis - Farroupilha	ELETROSUL	230					1	77-07-23	
Passo Fundo - Farroupilha II	ELETROSUL	230					1	78-07-20	
Sideropolis - Farroupilha	ELETROSUL	230					2	78-07-20	
Assis - Londrina	ELETROSUL	230					2	80-06-25	
C.Mourao - Apucarana	ELETROSUL	230					1	82-06-25	
Furnas - Itutinga I	FURNAS	345					5	78-06-08	
Furnas - Itutinga II	FURNAS	345					4	78-06-08	
Furnas - Itutinga I	FURNAS	345					1	79-10-28	
Furnas - Itutinga	FURNAS	345					3	80-06-25	
Itabera - T.Preto	FURNAS	765					3	82-06-26	
Taubate - Cach.Paulista	FURNAS	500					6	82-06-26	

para o cálculo do carregamento último das estruturas da LT. Deve-se salientar que este dado, por si só, não contém as informações necessárias sobre as cargas de projeto. Com efeito, devido aos diferentes critérios de projeto, iguais velocidades de vento, por exemplo, tomadas por diferentes projetistas, podem resultar em carregamento distintos.

- No Estr Caídas : número de estruturas colapsadas no mesmo evento;

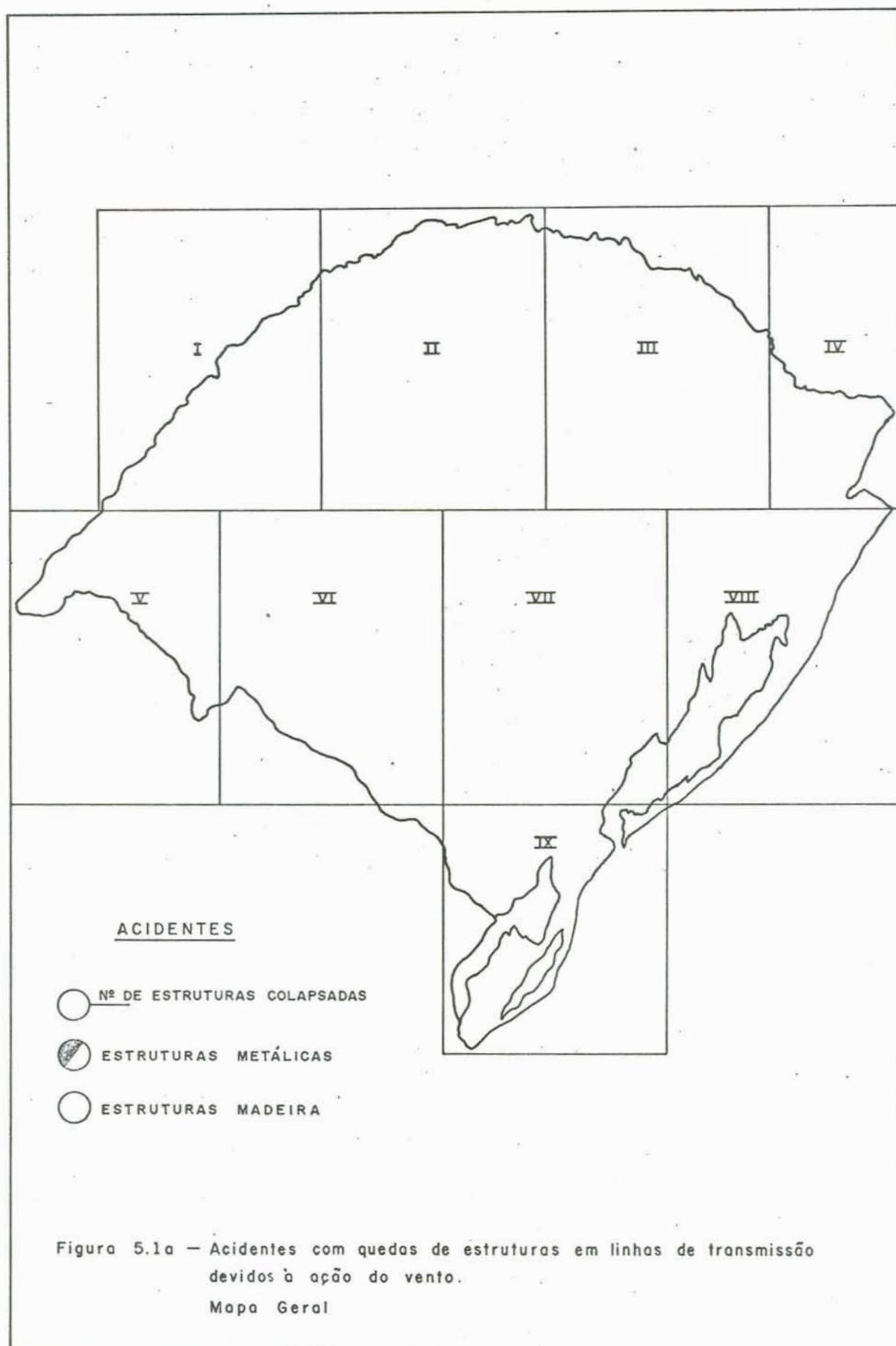
- Datas Eventos : data da ocorrência do acidente, apresentada na forma ano-mês-dia;

- Tipo Estrut : designa o tipo de estrutura predominante na LT, que pode ser torre metálica treliçada, poste de concreto ou poste de madeira.

As figuras 5.1a a 5.1j indicam a localização dos acidentes registrados, com quedas de estruturas, causados pela ação do vento em linhas de transmissão do sistema da CEEE. Os mapas foram obtidos a partir do mapa "Sistema CEEE de Linhas de Transmissão - Acidentes com Queda de Estruturas", revisão de 22/07/88, confeccionado pela Seção de Estudos de Linhas de Transmissão da CEEE.

O banco de dados assim montado apresenta-se incompleto. A falta de algumas informações em determinados acidentes, pode ser atribuída, entre outras causas, a eventuais faltas de documentação mais precisa do projeto ou do acidente e a relutância das empresas em revelar dados, principalmente de projeto, de falhas ocorridas em seu sistema de transmissão.

A tabela 5.2 mostra, em valores aproximados, os números de estruturas e o comprimento total em quilômetros, das linhas de transmissão das principais concessionárias, obtidos de um levantamento, não publicado, do Grupo de Coordenação da Operação Interligada, realizado em 1984.



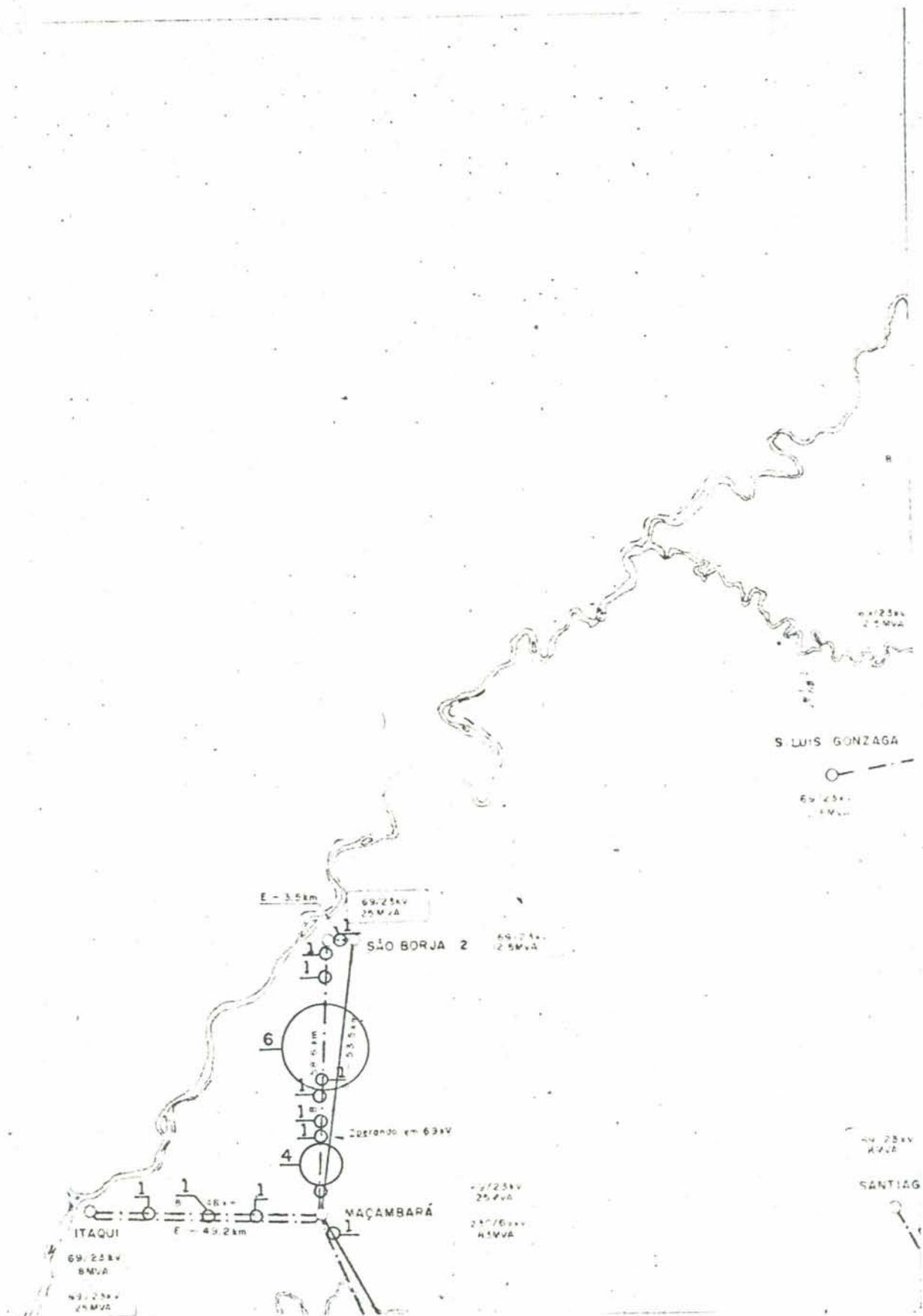


Figura 5.1b - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa I

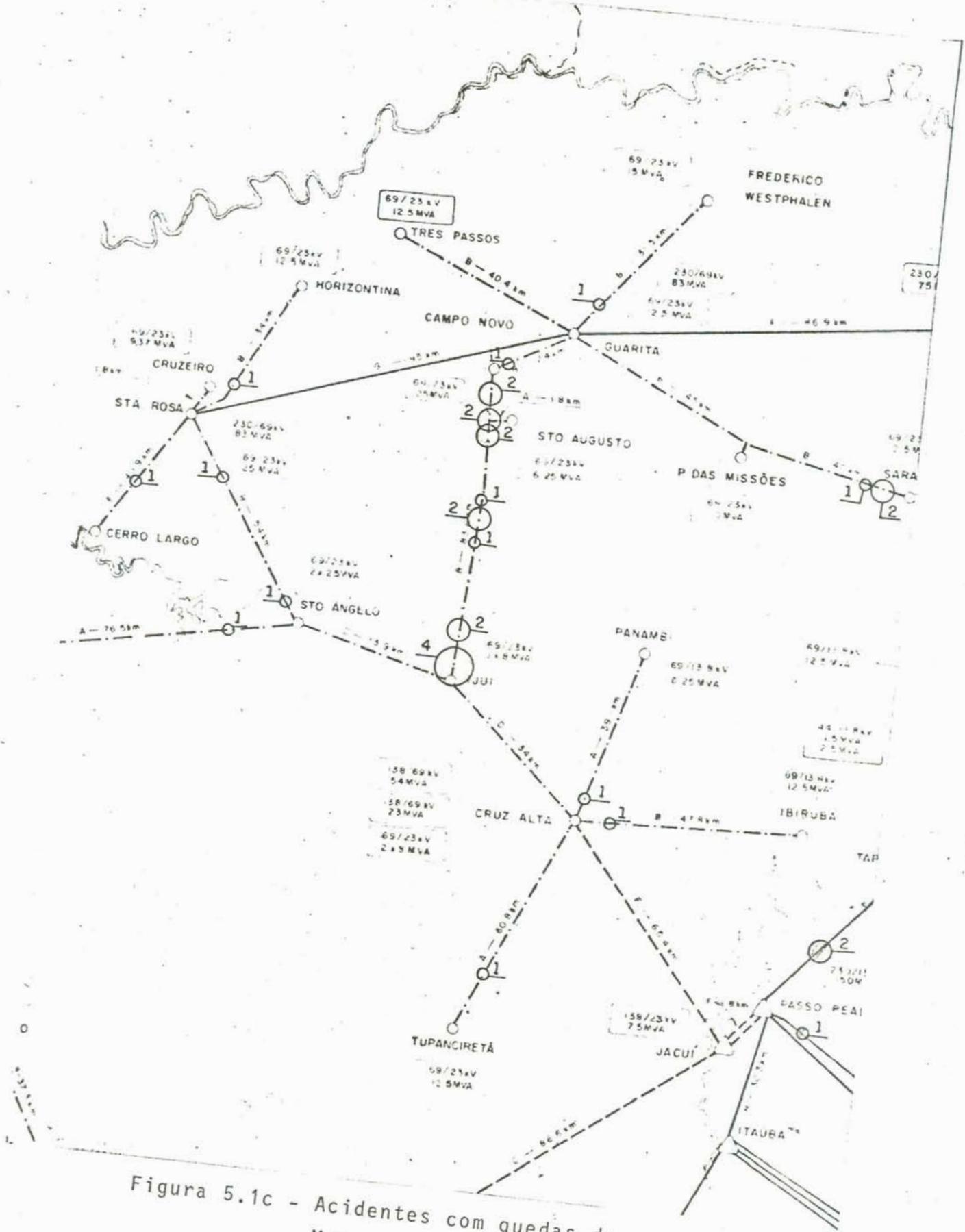


Figura 5.1c - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa II

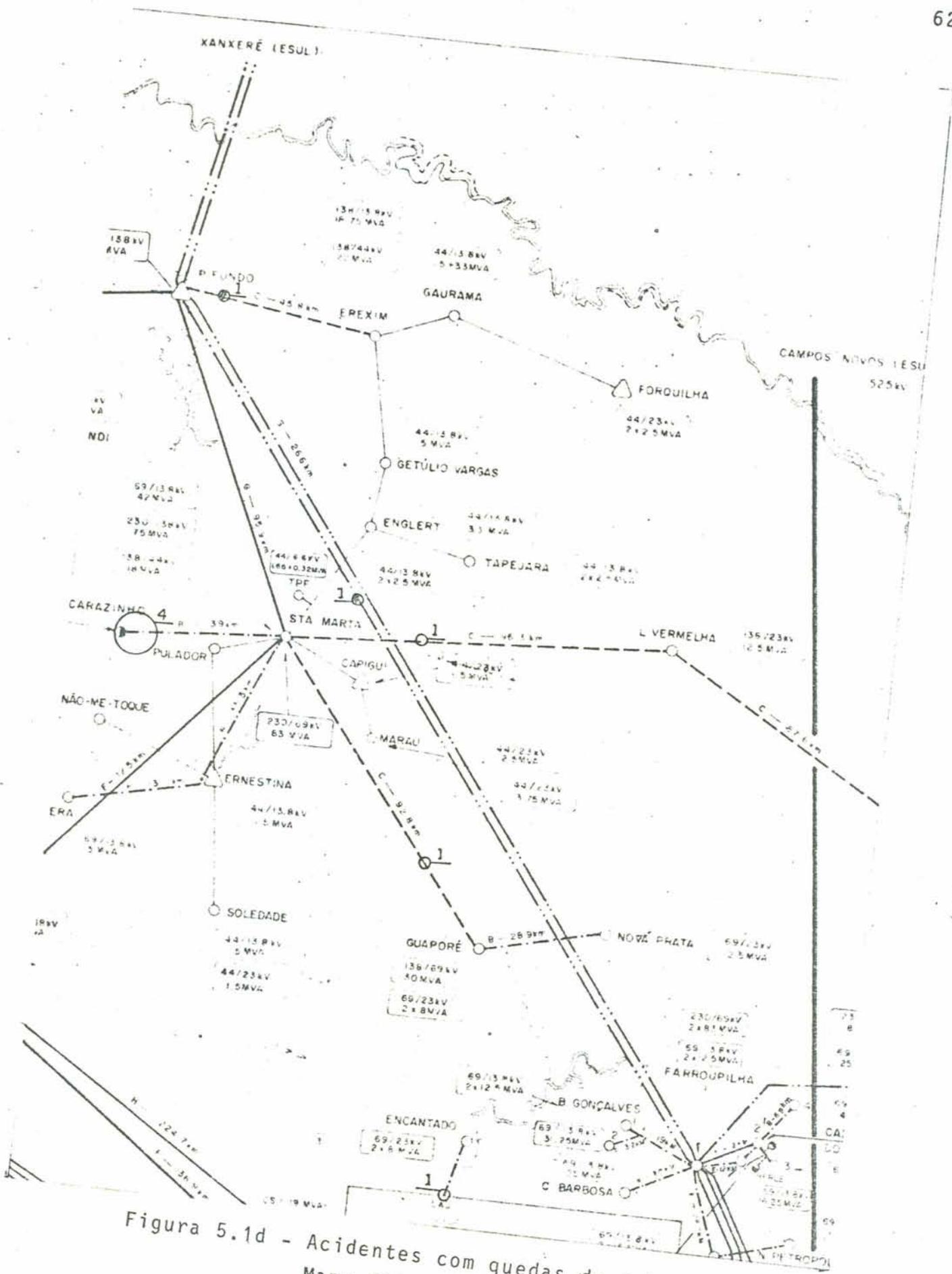


Figura 5.1d - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa III

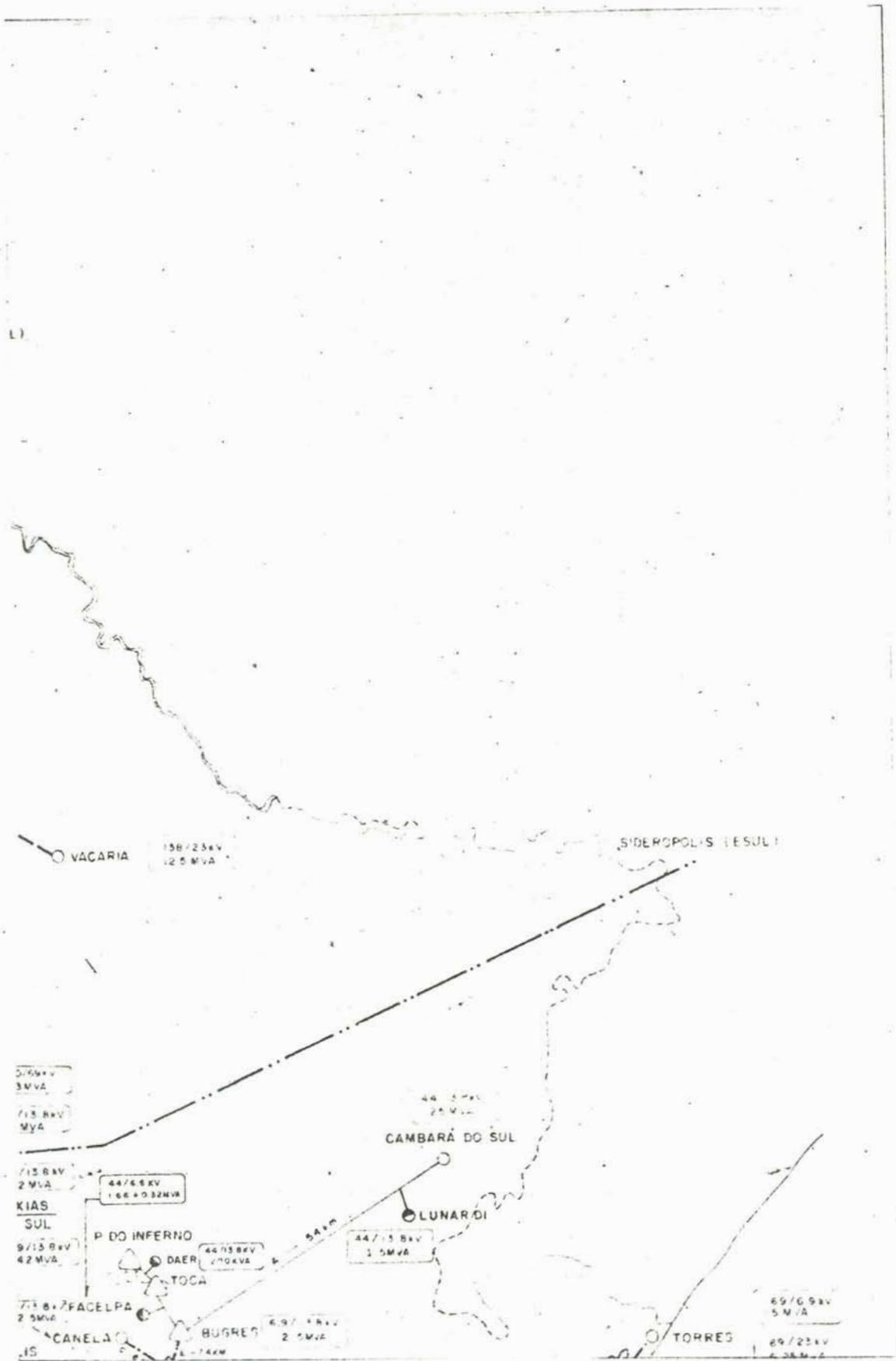


Figura 5.1e - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa IV

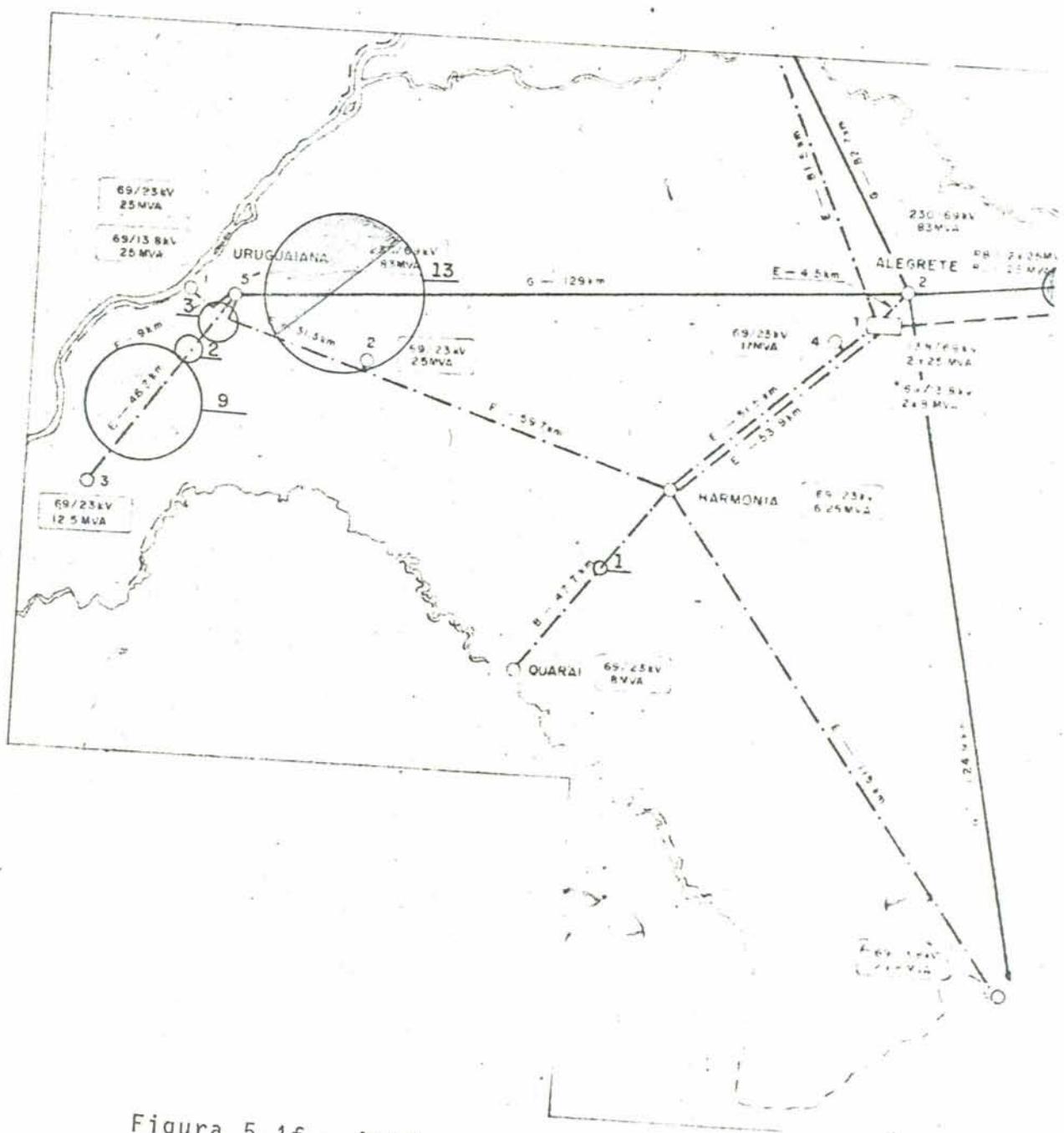


Figura 5.1f - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa V

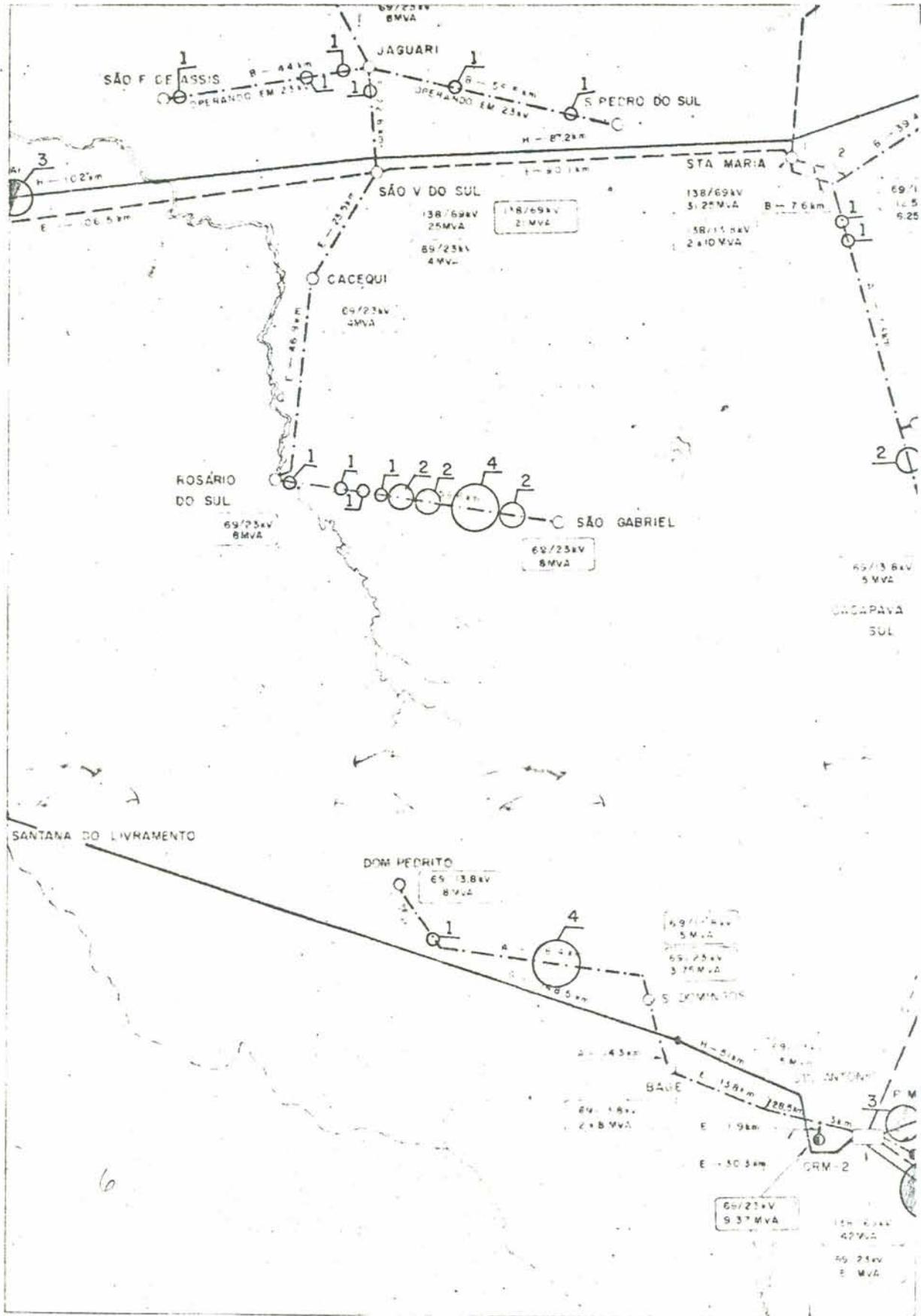


Figura 5.1g - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa VI

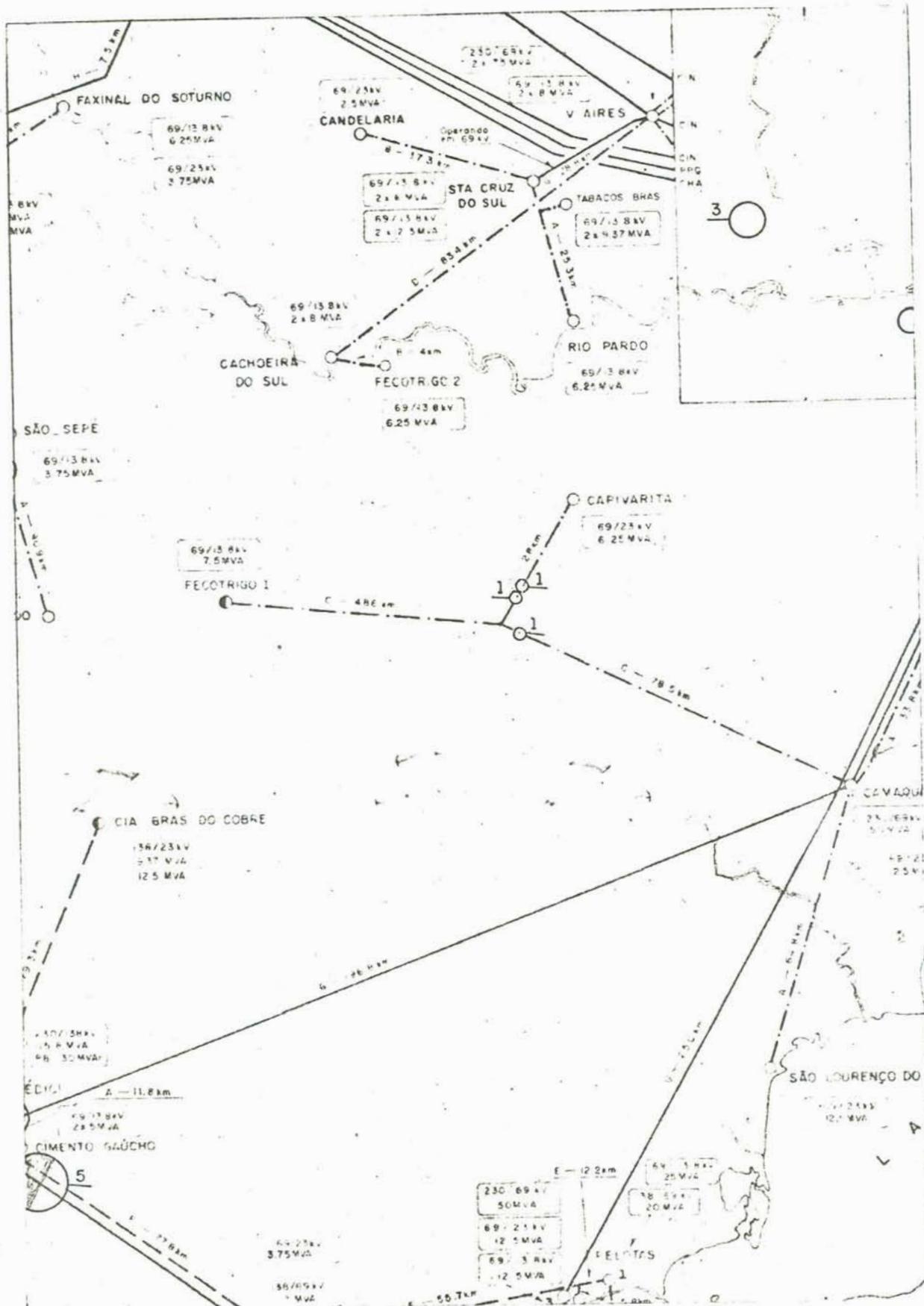


Figura 5.1h - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa VII

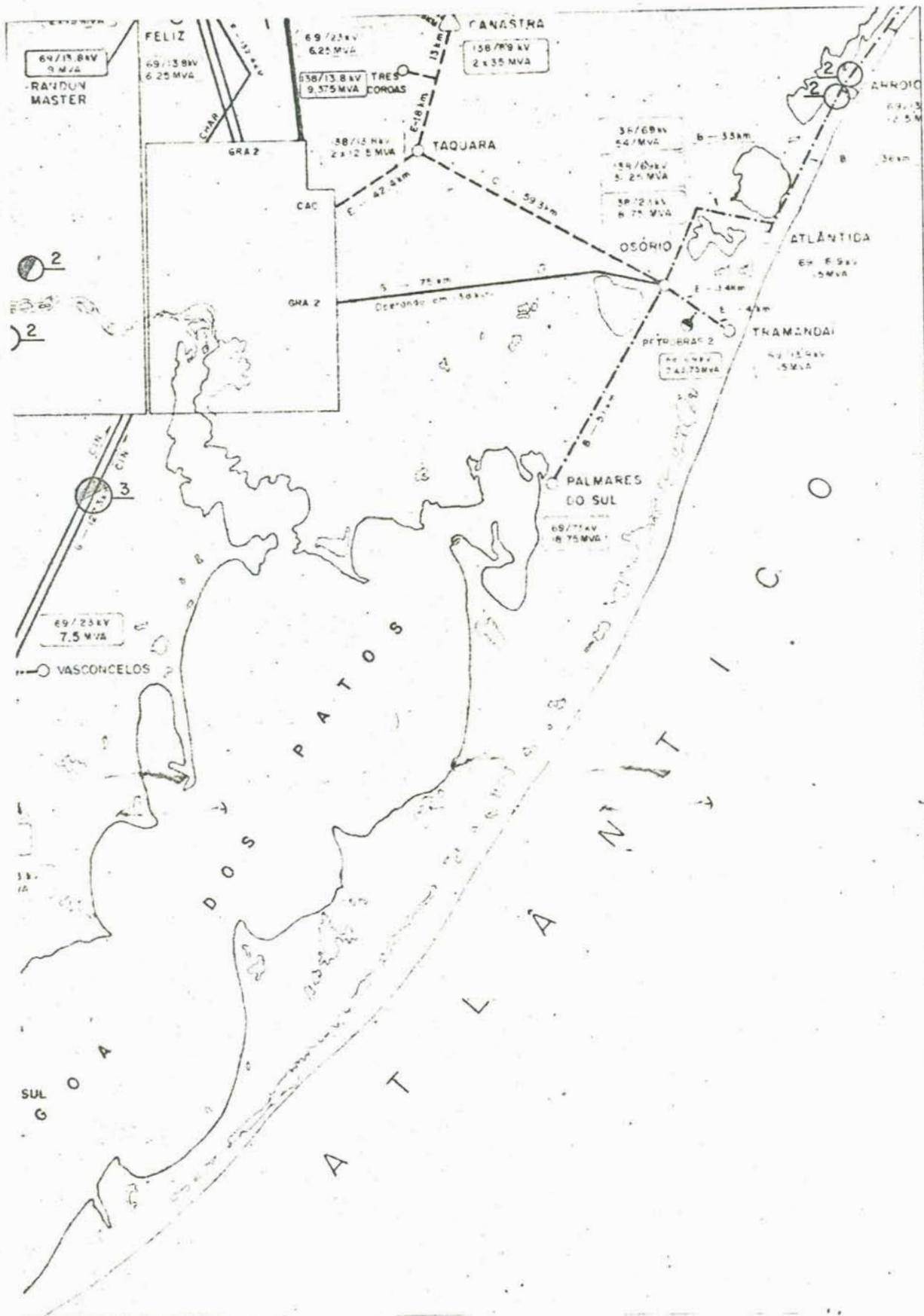


Figura 5.1i - Acidentes com quedas de estruturas
Mapa VIII

Concessionária	km de LT	Num Estrut
CEEE	9350	31000
CEMIG	13200	46800
CESP	17700	42500
COPEL	5000	13400
ELETROPAULO	3100	7200

Tabela 5.2 - Dimensões dos Sistemas de Transmissão

Através de um rápido estudo dos dados da coleta, pôde-se fazer as seguintes observações:

A tabela 5.3 mostra a relação dos maiores acidentes ocorridos, por linha de transmissão, num mesmo evento. Também é indicada a concessionária responsável pela LT atingida e a data da ocorrência.

Concessionária	Num Torres	Data
CEMIG	38	70-11-21
CESP	31	81-10-12
CESP	27	81-11-17
CESP	18	81-10-12
CESP	16	81-10-12
CEEE	13	87-09-31
ELETROPAULO	13	78-01-05
CEMIG	10	71-01-07
CEMIG	10	71-12-06

Tabela 5.3 - Maiores Acidentes em LT's

A tabela 5.4 apresenta os dados de números de estruturas colapsadas, a relação entre este número e o número total de estruturas do sistema e também em relação ao comprimento total do sistema de transmissão da concessionária. Observe-se que há duas concessionárias que possuem estruturas de madeira no seu sistema.

Concession	Num Total Torr Colap	Idem com Estr Mad	torres Num Tot	torres 1000 km
CEEE	150	114	0,47 %	15,6
CEMIG	189	78	0,40 %	14,3
CESP	140	-	0,33 %	7,9
COPEL	77	-	0,58 %	15,4
ELETROPAULO	24	-	0,29 %	7,8

Tabela 5.4 - Incidência de Falhas em LT's

Como pode-se observar, a disponibilidade de um banco de dados como o da tabela 5.1 pode possibilitar numerosos estudos sobre os acidentes, entretanto, neste trabalho, a utilização deste banco de dados ficou restrita a obtenção de um exemplo para aplicação do modelo de cálculo da probabilidade de falha e fazer-se o confronto desta informação, obtida teóricamente, com o desempenho real, o que é apresentado no capítulo 6.

CAPÍTULO 6: EXEMPLO DE APLICAÇÃO

6.1 - Observações Sobre a Aplicação:

Com o propósito de aplicar-se o modelo de cálculo e conceitos anteriormente apresentados, foi calculada a probabilidade de falha para uma linha de transmissão do sistema da CEEE, selecionada da tabela 5.1, utilizando-se para isto, as ferramentas e informações constantes nos capítulos anteriores.

Neste estágio, o enfoque dado a aplicação é a avaliação da viabilidade do modelo. Desta forma, não se espera concluir sobre a precisão da probabilidade de falha obtida através do mesmo, mas sim sobre a sua coerência com a expectativa e com a observação.

Antes de levar-se a efeito a aplicação é conveniente salientar três aspectos:

O primeiro é sobre a importância de atentar que o modelo foi desenvolvido para carregamentos causados por ventos do tipo EPS. Todavia, como foi salientado no capítulo 4, no sul do Brasil, existem dois tipos de tormentas, com características bem distintas, responsáveis pela quase totalidade dos registros de ventos extremos. Por outro lado, os registros de acidentes dificilmente contém informações sobre o tipo de tormenta ocorrido no evento. Assim, nesta aplicação, para alcançar-se uma estimativa global da probabilidade de falha, é necessário que se faça uma abordagem, mesmo preliminar, ao problema da probabilidade de falha de LT's submetidas a ação de tormentas TS.

Com essa intenção, esta abordagem ao problema foi feita através das seguintes considerações:

- para vãos maiores que 350 metros, usuais em linhas de transmissão com torres metálicas, é possível ser admitido que a ocorrência de eventos do tipo tormentas TS nos vãos são

estatisticamente independentes. Assim, a probabilidade de falha de uma LT, P_{fLT} , com 'M' torres é dada por:

$$P_{fLT} = 1 - (1 - P_{fa})^M \quad (6.1.1)$$

onde P_{fa} é a probabilidade anual de falha de uma estrutura isolada.

• a probabilidade anual de falha de uma estrutura da LT pode ser obtida por:

$$P_{fa} = \int_0^{\infty} f_S(v) F_R(v) dv \quad (6.1.2a)$$

$$\text{ou}$$

$$P_{fa} = \int_0^{\infty} (1 - F_S(v)) f_R(v) dv \quad (6.1.2b)$$

onde $f_R(v)$ e $F_R(v)$ denotam as funções densidade de probabilidade e distribuição de probabilidade, respectivamente, para a resistência dos componentes estruturais, expressas em termos da velocidade do vento. A mesma notação têm $f_S(v)$ e $F_S(v)$, porém para velocidade de vento atuante na estrutura. Isto é, $f_S(v)$ e $F_S(v)$ são diretamente as funções de probabilidade da máxima velocidade média sobre um intervalo de Δt segundos. O valor do intervalo de tempo Δt depende das dimensões da estrutura. A integral 6.1.2b, aqui foi avaliada numericamente através de um programa computacional especificamente confeccionado para tanto, designado por FALHATS.

O segundo aspecto, diz respeito a escolha do intervalo de tempo Δt a ser usado no cálculo da velocidade média atuante sobre a torre e cabos. Este é um ponto que ainda não foi satisfatoriamente tratado. Blessmann²⁰ apresenta o roteiro para determiná-lo de acordo com as dimensões de uma estrutura. Entretanto, no caso de LT's temos uma composição de carregamentos provenientes da ação do vento nos cabos e do vento na torre. Se a escolha fosse feita para a torre e para os cabos de maneira independente, ter-se-ia um intervalo de tempo relativamente pequeno para a torre e um outro intervalo de tempo relativamente grande para os cabos. Evidentemente, o intervalo de tempo correto a ser adotado deve ser um valor intermediário. Nesta aplicação, para alcançar-se um valor prático admitiu-se um intervalo de tempo correspondente a média

ponderada dos intervalos de tempo da torre e dos cabos quando obtidos independentemente. Os pesos adotados correspondem a contribuição relativa dos esforços provenientes de cada componente no momento de projeto da torre, ao nível da base.

O terceiro aspecto, fortemente relacionado ao anterior, concerne ao valor do fator de rajada para tormentas TS. Neste aspecto também é evidente que o fator de rajada obtido para tormentas EPS^{10,11} não é aplicável. O valor do comprimento de correlação para tormentas TS é significativamente menor do que para tormentas EPS. Neste ponto, para se chegar a uma avaliação preliminar da probabilidade de falha, foi adotado, por uma inferência, que o valor do fator de rajada para tormentas TS equivale a 90% do fator de fator de rajada correspondente a tormentas EPS.

6.2 - Análise da LT 230 kV Camaquã - SECI:

A linha de transmissão LT 230 kV Camaquã - SECI (Subestação Cidade Industrial), pertencente ao sistema da CEEE, foi selecionada para a avaliação de sua probabilidade de falha por ser uma típica linha de transmissão existente no Rio Grande do Sul. Ela está implantada, em quase sua totalidade, numa região razoavelmente homogênea, que pode ser classificada de rugosidade III, conforme NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações, ou seja, numa região de rugosidade média. Esta LT tem um registro de acidente, em 17 de outubro de 1982, com queda de 3 estruturas, por falha da torre metálica. Segundo relatos de moradores da região, o temporal da ocasião apresentou trovoadas, muitos raios e mudança de direção do vento, o que indica uma tormenta TS. O sentido da queda das torres indicou um temporal de origem no setor 7, normal à LT, segundo a divisão em octantes comentada no capítulo 4.

● Dados da Linha de Transmissão:

Comprimento : 127 km

Número de estruturas : 279 torres

Tipo de estruturas : torres metálicas, autoportantes
do tipo delta, circuito simples horizontal

Data do término da construção : agosto de 1974

Orientação do eixo : predominantemente a 25° de rumo,

o que indica as orientações 3 e 7 para a determinação do carregamento.

Vão médio : 457 m

Velocidade de vento de projeto : 41,3 m/s

● Cálculo de parâmetros:

Resistência do conjunto torre-fundação:

Assumindo-se que as fundações foram projetadas para carga igual a 1,25 vezes a carga de projeto da torre, da figura 3.6.2

$$\bar{V}_u = 0,967 \times 41,3 \text{ m/s} = 40,0 \text{ m/s}$$

$$\sigma_{V_u} = 0,184 \times 40,0 \text{ m/s} = 7,34 \text{ m/s}$$

Cálculo de Δt :

torre típica : 26 m de altura

vão típico : 457 m de comprimento a 22 m de altura segundo a referência (20), para categoria III.

Δt para a torre = 5 segundos

Δt para os cabos = 90 segundos

Sabe-se que no projeto destas torres, as cargas provenientes da torre são responsáveis por 43% do momento atuante ao nível da base, e que as cargas provenientes do cabo, por 57% :

$$\Delta t \text{ do conjunto} = 0,57 \times 90 + 0,43 \times 5 = 54 \text{ segundos}$$

Fator de rajada, para $\Delta t = 54$ seg, segundo Blessmann²⁰, é igual a 0,79 para tormentas do tipo EPS.

Adotando-se para os parâmetros da distribuição da velocidade média do vento, os parâmetros encontrados para Porto Alegre, chega-se aos resultados apresentados na tabela 6.2.1:

Orientação	Tipo Vento	P_f anual	P_f em 14 anos
3	EPS	0,0061	0,082
	TS	0,0029	0,040
7	EPS	0,0286	0,334
	TS	0,0588	0,572

Tabela 6.2.1 - Resultados do Cálculo da P_f

A figura 6.2.1 mostra as funções densidade de

probabilidade para a resistência do conjunto torre-fundação da linha em consideração, em termos de velocidade do vento e, para a velocidade média do vento de tipo EPS no setor 7.

Os resultados encontrados são coerentes com a observação do comportamento da linha de transmissão. Note-se que a probabilidade de falha devida a ventos com origem no setor 7 é significativamente superior ao setor 3, coincidindo com a orientação do vento causador do acidente.

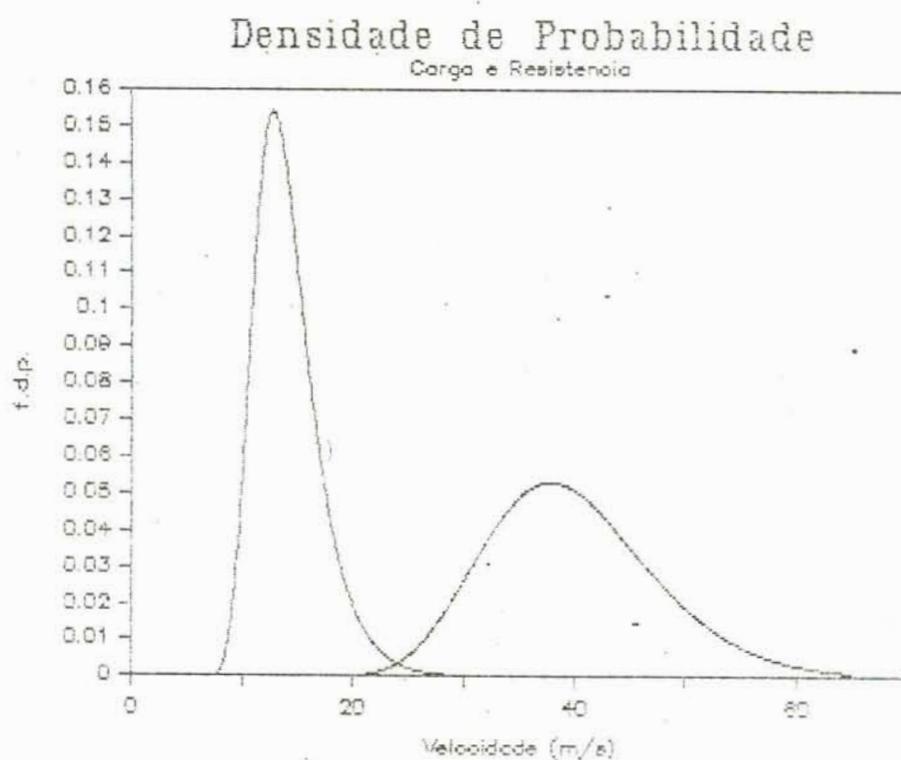


Figura 6.2.1 - Funções Densidade de Probabilidade da Velocidade Média do Vento e da Resistência do Conjunto Torre-Fundação.

CAPÍTULO 7: ESTUDOS PARAMÉTRICOS:

Como exemplo de possíveis estudos de serem realizados em continuação à pesquisa, a seguir são apresentadas algumas análises sobre a influência das variáveis significativas que estão envolvidas nos projetos de LT's.

Os parâmetros das distribuições de probabilidade de ventos, ainda sujeitos a revisão, foram obtidos através do processo de regressão referido no capítulo 4 e constam da tabela 7.1.

Localidade	Param	Setor			
		1	3	5	7
Porto Alegre	∇	14,28	16,61	18,53	17,24
	σ_v	4,27	2,99	4,02	5,37
Santa Maria	∇	12,94	16,51	15,87	14,90
	σ_v	4,10	3,47	4,57	5,12
Bagé	∇	13,03	12,54	14,55	16,08
	σ_v	2,67	2,35	3,17	3,52
Uruguaiana	∇	14,51	16,77	17,98	16,77
	σ_v	2,56	2,85	3,95	3,69

Tabela 7.1 - Parâmetros das Distribuições de Ventos Extremos.

a - Análise da influência da localização e da orientação:

- características constantes:

- número de torres = 100
- tipo de exposição: II
- vão médio = 490 m e torres de 26 m
 $\Delta t = 54$ s
- fator de rajada = 0,82
- resistência das torres
média = 40 m/s

desvio padrão = 7,34 m/s

- variáveis:

- direção A : eixo da LT com rumo = 112°
- direção B : eixo da LT com rumo = 22°

Localidade		Direção A	Direção B
Porto Alegre	P_{f1}	0,014	0,018
	P_{f50}	0,518	0,590
Santa Maria	P_{f1}	0,008	0,010
	P_{f50}	0,329	0,403
Bagé	P_{f1}	0,001	0,003
	P_{f50}	0,061	0,144
Uruguaiana	P_{f1}	0,009	0,007
	P_{f50}	0,378	0,292

Tabela 7.2 - Influência da Localização e Orientação da Linha de Transmissão.

b - Análise da influência do comprimento da linha de transmissão:

- características constantes:

- localização: Uruguaiana
- tipo de exposição: II
- orientação: eixo da LT com rumo = 22°
- vão médio = 490 m e torres de 26 m
 $\Delta t = 54$ s
- fator de rajada = 0,82
- resistência das torres
média = 40 m/s
desvio padrão = 7,34 m/s

Num Torres	P_{f1}	P_{f50}
5	0,002	0,093
10	0,003	0,125
50	0,005	0,232
100	0,007	0,292
200	0,009	0,362

Tabela 7.3 - Influência do Número de Torres

c - Análise da influência da escolha do vão de projeto:

- características constantes:

- localização: Uruguaiana
- tipo de exposição: II
- orientação: eixo da LT com rumo = 22°
- comprimento da LT = 50 km
- vão médio = 490 m e torres de 26 m
- resistência das torres:
desvio padrão = 7,34 m/s

vão	número estrut	resist média	P_{f1}	P_{f50}
300	167	43,5	0,010	0,385
400	125	42,5	0,006	0,246
500	100	41,2	0,004	0,192

Tabela 7.4 - Influência da Escolha do Vão de Projeto

No estudo da influência da escolha do vão de projeto deve-se considerar que a escolha de um vão maior implica num acréscimo no número de barras da torre, devido a necessidade de maior altura. Um maior número de barras, por sua vez, implica na diminuição do valor médio esperado para a resistência da torre, conforme foi comentado em 3.5. Por outro lado, esta opção conduz ao menor número de torres.

Como pode-se constatar, o modelo permite estudar a influência relativa das variáveis significativas no projeto, constituindo-se numa ferramenta de grande utilidade como auxílio para tomadas de decisões de projeto.

CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Como resultado dos trabalhos de pesquisa desta dissertação, obteve-se um modelo para a avaliação da probabilidade de falha de linhas de transmissão submetidas a ação do vento, considerando-se a variabilidade da resistência das estruturas. O enfoque é dado a ventos ocasionados por tormentas extratropicais, usualmente denotadas pela sigla EPS (extended mature pressure system).

Para os estudos sobre a influência relativa das variáveis consideradas, o modelo é uma ferramenta muito útil e em condições de ser aplicado para análises como as exemplificadas no capítulo 7. Entretanto, com relação ao valor da probabilidade de falha obtido através do mesmo, recomenda-se que sejam realizados estudos posteriores de aferição tais como: o confronto dos valores calculados com observações mais criteriosas do desempenho de linhas existentes.

A avaliação do tipo de distribuição de probabilidade da resistência de torres típicas de LT's a partir de resultados de ensaios em protótipos, segundo o processo desenvolvido no capítulo 3, apresenta resultados bastante satisfatórios e coerentes com resultados obtidos por Pachon 'et al'³¹ e pela CIGRE³⁰. Com relação ao assunto, recomenda-se que em estudos posteriores:

- se repita o processo com maior número de ensaios e com dados provenientes de maior número de fabricantes;

- sejam incorporados, com a cooperação dos fabricantes, os resultados dos "pré-testes", assim chamados pelos projetistas, ou sejam, dos testes que apresentaram ruptura com carregamento inferior a 100 % da carga de projeto;

- seja avaliada a influência de características das torres tais como: utilização (suspensão - angular - terminal);

tipo (autoportante delta ou troncopiramidal - estaiada) e dimensões;

- seja avaliada a influência do padrão de qualidade dos projetistas e fabricantes. É possível que a redução da dispersão da resistência das torres seja significativa quando estas pertençam a um lote de um único projetista e/ou fabricante.

- seja feita uma avaliação completa da influência da variabilidade do coeficiente de arrasto real na probabilidade de falha.

Aos projetistas, fabricantes e concessionárias de energia, recomenda-se cautela e reflexão na interpretação dos resultados dos ensaios de protótipos de torres.

Ainda sobre a resistência dos componentes de linhas de transmissão, sugere-se um estudo mais completo sobre a distribuição de probabilidade da resistência do conjunto torre-fundação. No que concerne a aplicação destes conceitos em projeto, o estudo feito nesta dissertação possibilita concluir que a sistemática de coordenação de falhas relatada na referência (33) é bastante adequada ao problema.

A avaliação da validade dos modelos de cálculo da probabilidade de falha exige uma completa análise do comportamento das linhas e, especialmente, dos acidentes. Para este propósito, sugere-se que os acidentes sejam relatados de forma mais criteriosa. Um ponto importante na análise do banco de dados, apresentado no capítulo 5, é a informação sobre a velocidade de vento de projeto, referida a um único critério. Outro ponto importante é a identificação do tipo de vento. Com os dados pesquisados, já é possível a realização de vários estudos tais como: relacionar densidade de acidentes numa região com a velocidade básica de vento para a região fornecida pela norma.

Para o cálculo da probabilidade de falha devida a ventos de tipo TS, o modelo preliminar apresentado no capítulo 6 é um bom ponto de partida para futuros estudos. Entretanto, sugere-se que sejam feitas aferições de parâmetros como o fator

de rajadas para tormentas TS. Com efeito, é necessário a realização de um estudo minucioso da distribuição espacial das tormentas TS em razão da forte evidência deste tipo de tormenta ser significativamente distinto dos ventos de tipo EPS e de não haver suficiente conhecimento a respeito do seu comportamento.

Finalmente, sugere-se o estudo da aplicação dos conceitos de confiabilidade em códigos brasileiros de projeto, de uso em linhas de transmissão, a exemplo das recomendações da IEC^{2º}, incluindo considerações sobre orientação e tipo de tormentas associadas.

BIBLIOGRAFIA:

1. KAPUR, K.C. e LAMBERSON, L.R.; Reliability in Engineering Design; New York, John Wiley, s.d.
2. SOONG, T.T.; Modelos Probabilísticos em Engenharia e Ciências; tradução de Alfredo Alves de Farias, LTC Editora S.A.
3. THOFT-CHRISTENSEN, P. e BAKER, M.J.; Structural Reliability Theory and its Applications; Springer-Verlag, Berlin, 1982.
4. SCHUELLER, G.I. e BOUGUND, U.; Fundamentals in Structural Reliability; Advanced Seminar on Structural Reliability; ISRA Courses.
5. RIERA, J.D. e PONTE Jr, J.; Sobre a Probabilidade de Falha de LT's Submetidas a Ação do Vento; Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Anais; 1985.
6. RIERA, J.D.; Depoimento Pessoal; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre, 1988.
7. RIERA, J.D. E NANNI, L.F.; Sobre as Distribuições de Valores Extremos; Caderno Técnico 83, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, julho de 1986.
8. PONTE Jr, J.; Sobre as Distribuições de Extremos em Problemas de Confiabilidade Estrutural; Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 1985.
9. TIPPET, L.H.C.; On the Extreme Individuals and the Range of Samples Taken from a Normal Population; Biometrika; 17:364-87, 1925.
10. BLESSMANN, J.; Determinação do Intervalo de Tempo e do Perfil de Velocidades Médias do Vento; Revista Brasileira de Engenharia - RBE, Caderno de Engenharia Estrutural número 3, 1984.
11. RIERA, J.D.; Sobre o Cálculo do Fator de Rajada na Consideração de Efeitos do Vento; Relatório Técnico CPGEC-UFRGS, junho de 1987.
12. DAVENPORT, A.G.; Depoimento Pessoal; Porto Alegre, UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, dezembro de 1987.

13. MATHESON, M.J. e HOLEMES, J.D.; Simulation of the Dynamic Response of Transmission Lines in Strong Winds; Eng. Structural, Vol 3 Ap pag 105-110, 1981.
14. WHITE, H.B.; A Practical Approach to Reliability Design; IEEE Transaction on Apparatus and Systems, Vol PAS 104, no 10, pag 2739-2747, October 1985.
15. TWISDALE, L.A.; Wind-loading Underestimate in Transmission Lines Desing; Transmission and Distribution, pag 40-46, december 1982.
16. SILVA, V.R, RIERA, J.D., BLESSMANN, J., NANNI, J.F. e GALINDEZ; Determinação Experimental das Propriedades Dinâmicas Básicas de uma Torre de Transmissão de 230 kV; Relatório FUNDATEC, Porto Alegre, Brasil, 1983.
17. WOJCZYNSKI E. ; Effects of Distribution System Reliability Index Distribution Upon Interruption Cost/Reliability Worth Distribution; IEEE Transaction Power Apparatus and Systems, Vol PAS 104, no 11, pag 3229-35, november 1985.
18. BIGNOLI, A.; Introduccion al Calculo de la Confiabilidad de las Estructuras Civiles; El Ateneo, Argentina, 1986.
19. RIERA, J.D. e NANNI, L.F.; On the Evaluation of Maximum Wind Velocities for Structural Desingn; XXI Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Anais; Santiago, Chile, Nov.1983.
20. BLESSMANN, J.; O Vento na Engenharia Estrutural - 1ª Parte; Caderno de Engenharia n° 10 , Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Abril 1986.
21. RIERA, J.D. e NANNI, L.F.; Estimativa de Parâmetros, Testes de Aderência das Distribuições de Velocidades Extremas de Vento e Temperaturas Associadas e Modelos de Previsão; Caderno Técnico CT.V-56, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Outubro de 1983.
22. RIERA, J.D. e NANNI, L.F.; Pilot Study of Extreme Wind Velocities in a Mixed Climate Considering Wind Orientation; IN:9th Interntional Conference on Wind Engineering; Proceedings pag 21-30,Aachan, GFR, July 1987.

23. VROUWENVELDER, A.C.W.M. e SIEMES, A.J.M.; Probabilistic Calibration Procedure for the Derivation of Partial Safety Factors for the Netherlands Building Codes; KEMA Reports, Netherlands, 1987.
24. EISENGER, W.G. e HASENOEHL, P.J.; Transmission Capacity Can Be Increase with Reliability-Based Design; Transmission and Distribution, pag 23-26, October 1986.
25. KRISHNASAMY, S.G. e RAMANI, N.; Desing Wind Loads for Overhead Power Lines Accounting for Wind Direction; IN: 9th International Conference on Wind Engineering; Proceedings; pag 167-177, Aachen, GFR, July 1987.
26. NORVILLE, H.S., MEHTA, K.C. E VANN, W.P.; Analysis and Interpretation of Field Data of Wind and Response of Transmission Line; 5th U.S. National Conference on Wind Engineering (Lubbock, Texas, November 1985), Texas Tech University, Lubbock, Texas, pp. 3B-33 a 3B-40.
27. NORVILLE, H.S., MEHTA, K.C. e VANN, W.P.; Wind Load Data for Reliability Based Transmission Line Design; International Symposium on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, Toronto, Canada, June 1986.
28. MEHTA, K.C., NORVILLE, H.S. e KEMPNER, L.; Electrical Transmission Structure Response to Wind; International Symposium on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, Toronto, Canada, June 1986.
29. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION; Loading and Strength of Overhead Transmission Lines; Technical Committe 11; IEC Publication, March 1987.
30. CIGRE Working Group 22-08; Experiment to Measure the Variation in Local Design Praticce: Data Analysis; Research Report, January 1987.
31. PACHEN, R., PEZARD, J. e ZAGO, P.; Probabilistic Evaluation on Test Results of Transmission Line Towers; 1988 Session of International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, August 1988.
32. KIESSLING, F., NEFZGER, P., RANGE, K. E RUHNAU, J.; Fondation Design on a Probabilistic Basis; 1986 Session of

International Conference on Large High Voltage Systems, Paris, August 1986.

33. PLOEG, T.J.; Derivation of Strength Factors Related to the Coordination of Transmission Line Components; KEMA Reports, Netherlands, 1987.

34. NANNI, L.F.; Análise Estatística de Dados com Uso de Técnicas Computacionais; Caderno Técnico CT-30/81, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre, revisão 1986.

35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 6123 - Forças Devidas ao Vento em Edificações; (Projeto de revisão) ; Norma Brasileira, 1987.

36. SCHUELLER, G.I.; A Prospective Study of Materials Based on Stochastic Methods; Materials and Structures n^o 20, pag 242-247, 1987.

37. FREUDENTAL, A.M.; The Safety of Structures; Transactions 112, ASCE, pag 125-128, New York, 1945.

38. FREUDENTAL, A.M.; Safety and the Probability of Structural Failure; Transactions 121, ASCE, pag 1337-1397, New York, 1956.

39. FREUDENTAL, A.M.; Reflections on Standard Specifications for Structural Design; Transactions 113, ASCE, pag 268-292, New York, 1948.

40. FREUDENTAL, A.M.; GARRELTS, J.M e SCHINOZUKA, M.; The Analysis of Structural Safety; Journal of Structural Division 92 ST2, ASCE, pag 267-325, New York, 1966.

41. MENEZES, R.C.R.; Programa FALHAEPS - Cálculo da Probabilidade de Falha de LT's; Relatório Técnico; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre (em preparação).

42. RIERA, J.D. e MENEZES, R.C.R.; Determinação da Distribuição de Probabilidade da Resistência de Torres de LT's; Relatório Técnico ;Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, Porto Alegre (em preparação).