



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Análise de Confiabilidade de Torres de Transmissão de Energia Elétrica quando Sujeitas a Ventos Fortes via Método Análítico FORM

Luiz Seiti Hatashita	Manoel R. Justino F^o	João Elias Abdalla F^o
Copel Distribuição S.A	Promon Engenharia Ltda	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
luiz.seiti@copel.com	manoel.justino@promon.com.br	joão.abdalla@pucpr.br

Palavras-chave

Confiabilidade
Método FORM
Ventos Fortes

Resumo

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

O método FORM foi implementado a fim de obter-se a confiabilidade de uma estrutura, considerando-se que há uma variabilidade de natureza probabilística dos efeitos das solicitações, bem como da resistência dos perfis tipo cantoneiras que compõe a torre.

Selecionou-se um tipo de torre e seguindo-se as orientações das normas de projeto definiram-se as cargas impostas sobre a mesma (peso próprio, peso dos cabos e cargas de vento) e com o software SAP 2000 foi realizada a análise do dimensionamento da estrutura. Estes resultados serviram como dados de entrada para a rotina computacional desenvolvida no software Matlab, para o cálculo da confiabilidade para todas as barras da torre.

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

1. Introdução

A análise de confiabilidade estrutural tem como objetivo a avaliação da segurança de uma estrutura, ou a avaliação da probabilidade de que a mesma não falhe em atender aos objetivos para os quais ela foi projetada durante a sua vida útil. Não existe uma estrutura 100% confiável, porém o risco de falha deve estar dentro de margens aceitáveis de segurança [15].

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

Estes eventos ocorrem de forma aleatória em regiões distintas do Estado do Paraná e serviram como fator de motivação para a investigação da confiabilidade de estruturas metálicas, com aplicação prática para torres de transmissão de energia.

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

Figura 1: Queda de torre de transmissão de energia no Paraná em 2003



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

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

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

2. Desenvolvimento

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

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

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

R – variável aleatória resistência;

S – variável aleatória solicitação.

O objetivo da confiabilidade é assegurar que o evento ($R > S$) ocorra durante a vida útil ou tempo especificada para um sistema de engenharia. O evento complementar ($R < S$) representa uma medida de não confiabilidade.

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

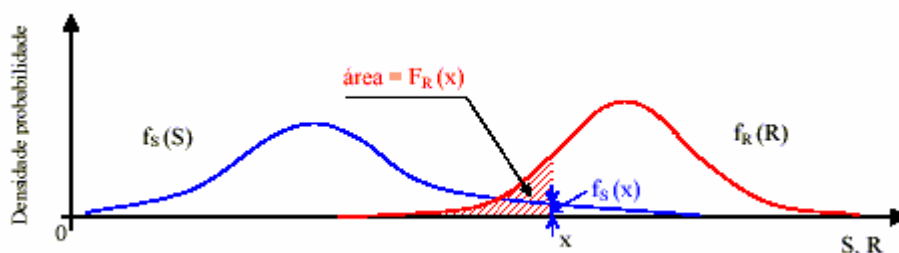
$$G(U) = Z = R - S \quad (2.1)$$

Consideremos que as funções densidades de probabilidades (FDP) e funções densidade acumulada (FDA) de R e S sejam conhecidas, então as probabilidades associadas aos eventos acima podem ser relacionadas pela equação da probabilidade de falha P_f dada por:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^s f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (2.2)$$

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

Figura 2.1 : FDP's da solicitação $f_S(S)$ e resistência $f_R(R)$



A figura 2.1 mostra a sobreposição das curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ que representa uma medida qualitativa da probabilidade de falha P_f .

Da observação da figura 2.1, nota-se que a sobreposição entre as duas curvas depende da posição relativa entre elas. Logo, se as curvas $f_S(S)$ e $f_R(R)$ estão mais distantes, a P_f diminui, por outro lado, se elas estão mais próximas a P_f aumenta.

A região de sobreposição depende do grau de dispersão de $f_S(S)$ e $f_R(R)$ e estas dispersões podem ser

expressas em termos das covariâncias de R e S.

Considerando-se R e S independentes e com distribuições do tipo gaussiana ou normal e são representadas por $N(\mu_R, \sigma_R)$ e $N(\mu_S, \sigma_S)$.

Onde μ_R e μ_S são os valores médios da resistência e solicitação respectivamente, assim como σ_R e σ_S são os valores dos desvios padrões destas variáveis. Então ao definir-se a variável Z como função de R e S tem-se:

Z = R - S também será uma distribuição normal $N(\mu_Z, \sigma_Z)$, dado por:

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

Utilizando-se da distribuição normal padronizada, o qual apresenta média zero e desvio padrão igual a um, a probabilidade de falha pode ser indicada como:

$$Pf = P(Z \leq 0.0) = \Phi\left(\frac{0.0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad \text{ou} \quad (2.3)$$

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

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

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.4)$$

A probabilidade de falha Pf pode ser obtida pela equação 2.3 ou 2.4. A resolução das integrais da equação 2.2 pode ser complexa devido às equações que representam as FDP's da resistência e solicitação. Através do cálculo do β a obtenção da Pf é muito mais simples devida algumas propriedades das FDP normais.

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

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

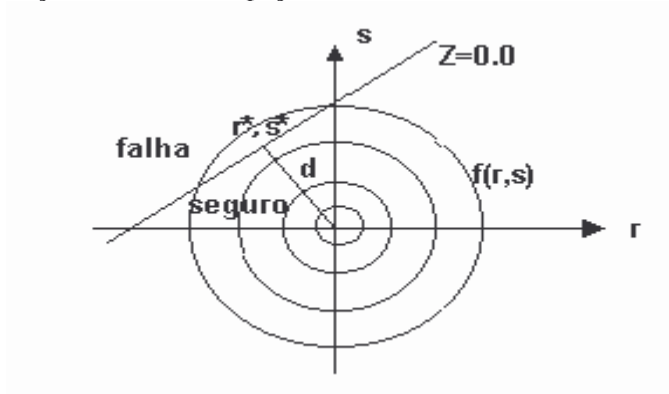
$$s = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad r = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (2.5)$$

Isolando-se os valores de R e S das equações acima, a função de falha no espaço reduzido $Z = R - S$ ou $G(U)$ é representada por:

$$G(U) = Z = r\sigma_R + \mu_R - r\sigma_S - \mu_S \quad (2.6)$$

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

Figura 2.2: Função de falha no espaço reduzido



A figura 2.2 mostra a linha ou superfície de falha $G(U)=Z=0,0$ que separa a região do domínio da falha do domínio seguro. A distância d representa a menor distância entre a origem e o ponto (r^*,s^*) que está sobre a superfície de falha. Este ponto é chamado de ponto de projeto ou ponto mais provável de falha. Através do cálculo da distância entre dois pontos pela geometria analítica, obtém-se que a distância d é representada pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2.7)$$

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

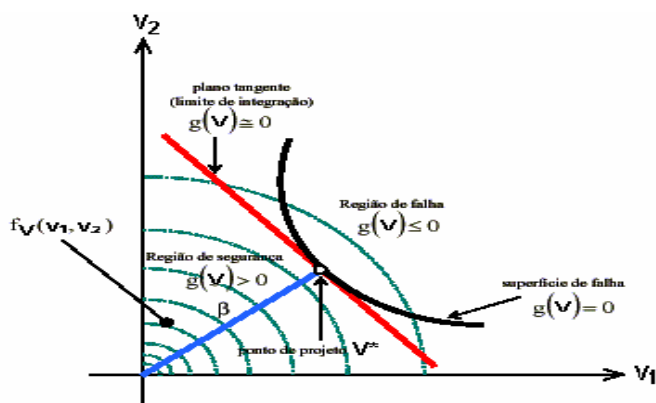
O método FORM adota o processo descrito acima, onde se busca a função de falha no espaço reduzido, através da transformação das variáveis no espaço original para espaço reduzido e, em seguida, calculando-se a menor distância entre a origem e o ponto de projeto sobre a superfície de falha.

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

- As variáveis aleatórias U (com distribuições quaisquer) são transformadas em variáveis V (normais do tipo padrão estatisticamente independentes);
- A função de falha $G(U)$ passa a ser função da variável V como $g(V)$;
- A superfície de falha $g(V)=0,0$ é aproximada para uma superfície linear no ponto da menor distância com a origem chamada de V^* , que é o ponto de projeto;
- Cálculo do β , que é representado pela distância da origem ao ponto V^* e é obtido por:

$$\beta = |V^*|.$$

Figura 2.3: Função de falha pelo método FORM



Na figura 2.3, observa-se que a superfície de falha é convexa onde $g(V)=0$, já representada com as variáveis no espaço reduzido, que separa a região de falha $g(V) \leq 0$ da região de segurança $g(V) > 0$. A reta tangente à superfície de falha original em vermelho é a aproximação obtida pelo método para uma superfície linear. O ponto de tangência representa a menor distância da origem à superfície de falha e denomina-se ponto de projeto.

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

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

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

O algoritmo HLRF pode ser resumido pela seguinte expressão recursiva:

$$V^{k+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^k)|^2} \left[\nabla g(V^k)^T V^k - g(V^k) \right] \nabla g(V^k) \quad (2.8)$$

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

$g(V^k)$ – valor da função de falha no ponto V^k

Para $k = 1$, o qual representa a primeira tentativa para avaliação do ponto de projeto V , onde os valores iniciais de V^1 serão funções dos valores médios e da covariância das variáveis resistência R e solicitação S , já devidamente transformadas em variáveis normais do tipo padrão. Para $k = 1$, avaliar-se-á os novos valores de V , que neste caso será representado por V^2 , onde estes valores serão determinados através da equação 2.8.

A seguir serão comparados os valores de V^2 e V^1 e através de uma tolerância de desvio imposta pelo projetista entre os dois valores, se verificará se o critério de convergência foi atingido. Caso não tenha ocorrido à convergência o processo inicia-se novamente, sendo que os valores de V^2 serão considerados como os dados de partida para esta nova iteração. Ao atingir-se o critério de convergência estabelecido, calcula-se o índice de confiabilidade que é dado pelo módulo de V^* e representado por $\beta = |V^*|$.

O processo descrito acima é o método HLRF para determinação do ponto de projeto, porém a experiência tem mostrado que este algoritmo na sua forma original às vezes é instável e em alguns casos pode não convergir. Este algoritmo foi aperfeiçoado por Liu e Der Kiureghian (1991) e Zhang e Der Kiureghian (1997) através de alteração no esquema de busca do ponto de projeto e foi chamado de iHLRF.

O novo ponto de projeto através do iHLRF será obtido pela seguinte expressão:

$$V^{k+1} = V^k + \lambda d \quad (2.9)$$

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

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

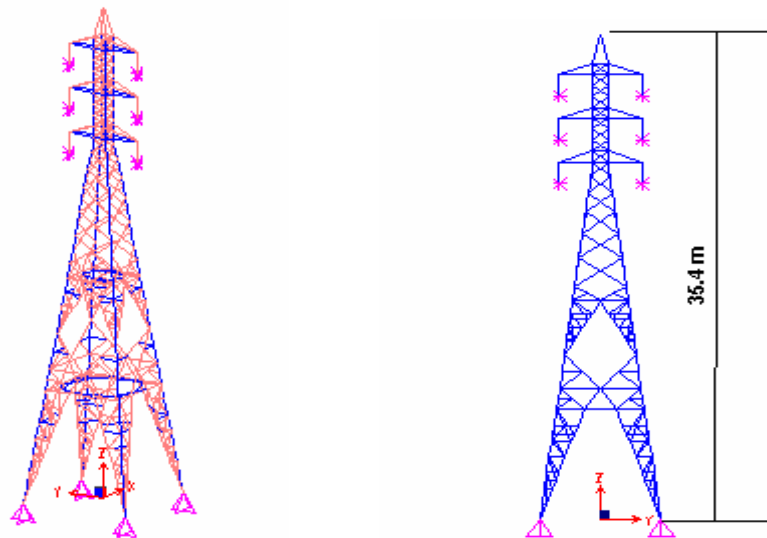
$$d = \frac{1}{|\nabla g(V)|^2} [\nabla g(V)^T V - g(V)] \nabla g(V) \quad (2.10)$$

O iHLRF é uma melhoria do método HLRF, com relação ao cálculo do λ (tamanho do passo da iteração). No método HLRF, o λ é igual a 1, ao passo que no iHLRF o λ é variável, de tal forma a buscar-se o ponto de projeto ideal.

A seguir será apresentado um estudo de caso com a aplicação do método FORM para determinação da confiabilidade de uma torre de transmissão utilizada na COPEL.

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

Figura 2.4 – Torre de suspensão 138 kV



Esta torre é composta por 598 perfis cantoneiras de aço carbono ASTM A36 e de 276 de aço de alta resistência A572 – 50. Observa-se na figura 2.4 a TTEE em perspectiva, o material das cantoneiras em aço ASTM A572 – GR.50 está sendo representado em cor azul, o qual é utilizado nas pernas, na parte inferior das mísulas da torre e em outras partes, onde existir maior solicitação da estrutura. O aço ASTM A36 está representado na cor vermelha para o restante das barras.

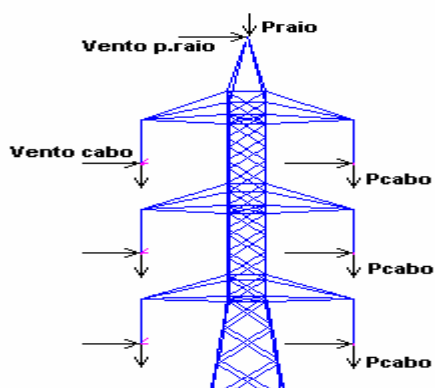
Definição das cargas de projeto

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

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

As cargas estão representadas graficamente na figura 2.5:

Figura 2.5 – Representação das cargas na torre.



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

Para este tipo de estrutura e nível de tensão, o condutor Íbis 397.5 MCM, cujo diâmetro é de 0.01988 m e o cabo pára-raios Petrel 101.8 MCM com diâmetro de 0.0117 m, são os mais usuais. Com as características geométricas e físicas do condutor e do pára-raios, seus pesos foram determinados de acordo com a tabela 1:

Tabela 1 - Cálculo do Peso dos Condutores e Pára-raios

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

A seguir será apresentada a tabela 2, onde se obteve as cargas sob os condutores e o cabo pára-raios quando sujeitos à ação do vento. Para a determinação destes valores, foram seguidas as orientações indicadas na NBR 5422. A velocidade básica de vento, ou seja, a 10 metros de altura e com período de integração de 10 minutos, adotada no cálculo é de 30 m/s. Esta velocidade do vento foi tomada como referência, mas os cálculos podem ser obtidos para velocidades superiores ou inferiores.

Tabela 2 - Cálculo das Cargas nos Condutores e Pára-raios sob a Ação do Vento

Características de Projeto	unidade	Condutor	Pára-raios
Velocidade básica (a 10 metros de altura e 10 minutos) - V_b	m/s	30	30
K_d - fator correção do tempo de integração da velocidade p/30 segundos		1,21	1,21
Correção da altura - n (t=30s e terreno B)		11	11
H altura média de atuação do vento no cabo	m	20	30
Diâmetro do condutor	m	0,01988	0,0117
Velocidade corrigida para a altura de projeto	m/s	31,95	33,15
Velocidade de projeto com altura corrigida e t =30 s - V_p	m/s	38,66	40,11
Pressão dinâmica de referência - q_0 $q_0 = \frac{1}{2} \rho v_p^2$	N/m ²	916,23	986,33
Coefficiente de arrasto C_{xc}		1,00	1,00
Fator de efetividade alfa α		0,9	0,9
Vão médio de atuação do vento - Z	m	450	450
Ângulo de incidência do vento sobre os condutores e torre θ	°	90	90
Ação do vento A_c $A_c = q_0 C_{xc} \alpha d \frac{Z}{2} \text{sen}^2 \theta$	kN	7,13	4,52
Fator adotado no projeto		1,00	1,00
Ação do vento - A_c - corrigido	kN	7,13	4,52

A velocidade corrigida de projeto é calculada pela equação abaixo:

$$V_p = k_r \cdot k_d \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot V_b \quad (2.11)$$

Onde,

K_r – coeficiente de rugosidade por tipo de terreno;

K_d – fator de conversão do tempo de integração;

V_b – velocidade básica do vento.

A carga de vento em condutores é dada pela fórmula abaixo:

$$A_c = q_0 C_{xc} \alpha d \frac{Z}{2} \text{sen}^2 \theta \text{ (N)} \quad (2.12)$$

Onde,

q_0 – pressão dinâmica de referência;

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

α - fator de efetividade adimensional;

d – diâmetro do cabo em metros;

Z – comprimento do vão em metros;

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

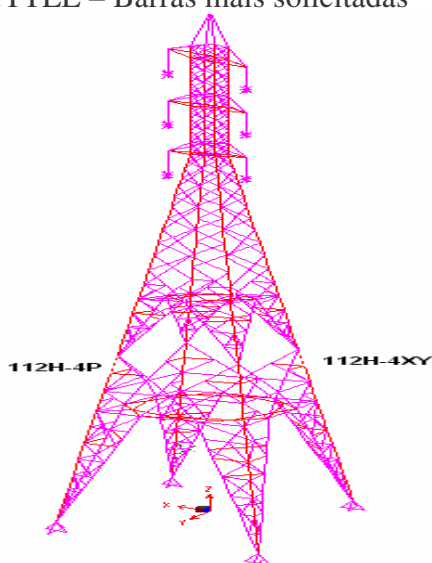
Para determinação dos esforços causados pelo vento sobre a estrutura, utilizou-se o processo de cálculo automático do SAP 2000, sendo que os critérios de cálculo dos esforços são definidos pela norma ASCE 10-97.

Verificação do dimensionamento e estabilidade da torre

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

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

Figura 2.7:TTEE – Barras mais solicitadas



A figura 2.7 indica a posição da barra 112H-4P que apresentou maior compressão e a barra 112H-4XY que esta mais tracionada.

A seguir apresenta-se a tabela 3 com os resultados do cálculo da confiabilidade para algumas barras da TTEE.

Tabela 3 - Confiabilidade de algumas barras da TTEE

	Barra	278-2Y	278-2P	1-2P	112H-4P	71H-2YP
1	Resist. P_Calc (kN)	28,21	28,21	10,48	196,03	174,95
2	Resist. P_Caract.(kN)	31,34	31,34	11,65	217,81	194,39
3	Resist. P_medio(kN)	35,76	35,94	13,36	249,78	222,92
4	Solicit. Ptotais(kN)	-3,54	-3,54	-1,12	-19,86	-17,54
5	Dist.Normal - COV	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
6	Desvio_Padrão	-0,18	-0,18	-0,06	-0,99	-0,88
7	Solicit. VentoTotal(kN)	-13,65	-13,65	-4,23	-78,84	-67,47
8	Dist.Gumbel - COV	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
9	Desvio_Padrão	-2,73	-2,73	-0,85	-15,77	-13,49
10	Pu(kN)	-22,70	-22,70	-7,07	-130,31	-112,26

11	P_{ratio}	0,7439	0,7439	0,6627	0,6283	0,6235
12	Beta (iHLRF)	3,4260	3,4458	4,1445	4,1786	4,3307
13	Pf	0,000306	0,000285	0,000017	0,000015	0,000007
14	Confiabilidade Rel	0,999694	0,999715	0,999983	0,999985	0,999993

Esta tabela apresenta alguns resultados obtidos através do método FORM, de índices de confiabilidade com suas respectivas probabilidades de falha de algumas barras. Para avaliação do ponto de projeto ideal, foi implementado os algoritmos HLRF e iHLRF e o método como um todo foi implementado no software Matlab. Observa-se na tabela acima que a barra 278-2Y resultou em um menor nível de confiabilidade entre todas as barras, que foi 0,999694 (probabilidade de falha de 3.06×10^{-4}) e também é a barra que se apresenta mais solicitada, conforme se observa pelo maior índice Pratio de 0,7439 entre todas as barras da torre. Entretanto, este nível de confiabilidade é alto, e sua probabilidade de falha é praticamente desprezível, considerando-se, por exemplo, o nível de confiabilidade anual de 0,99 para um período de retorno de 50 anos, conforme estabelecido na norma IEC 826.

3. Conclusões

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

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

Verificou-se através dos resultados obtidos que todas as barras passaram pelo critério de dimensionamento definido pela norma ASCE 10-97. A barra 278-2Y foi a que apresentou o maior quociente entre solicitação e resistência de cálculo – Pratio de 0,7439 obtida pelo SAP 2000.

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

4. Referências bibliográficas

- [1]. ANG, A.H.S., TANG, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.1 – Basic Principles, New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [2]. ANG, A.H.S., TANG, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol.2 - Decision, Risk and Reliability, New York: John Wiley & Sons, 1984.

- [3]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N° 52, "Guide for Design of Steel Transmission Towers", 1988.
- [4]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N° 74, "Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading", 1991.
- [5]. BLESSMANN, J., O Vento na Engenharia Estrutural, 1 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- [6]. COSTA NETO, P.L.O., Estatística, 2ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- [7]. DEOLIYA, R., DATTA, T.K., Reliability of microwave towers against extreme winds, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 6, No. 5, 1998, pp. 555-569.
- [8]. DITLEVSEN, O AND MADSEN, H. O., Structural Reliability Methods, Baffins Lane, Chichester: John Wiley & Sons Inc., 1996 URL: <http://www.mek.dtu.dk/staff/od/books.htm>
- [9]. FUSCO, P.B.(1976). Introdução ao projeto estrutural. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.
- [10]. GONTIJO, CARLOS ROBERTO, Cálculo de torres para linhas de transmissão – IEA Editora, 1994.
- [11]. GUETTER,A.K.,HOFFMANN, J.N., MELLO,J.L.S – Parâmetro Meteorológicos Aplicáveis para Projeto de Linhas de Transmissão no Paraná, 2005.
- [12]. INTERNATIONAL STANDARD – ISO 4354, "Wind Actions on Structures", July 1997.
- [13]. IEC 826, Loading and Strength of Overhead Transmission Lines, IEC – International Electrotechnical comission, 2nd Edition, 1991.
- [14]. MACHADO, A.C., SOUZA, A.M.L., ROCHA, M.M., "Caracterização das Propriedades Aerodinâmicas de Torres Metálicas Treliçadas para Determinação da Resposta do Vento", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [15]. MADSEN, H. O., KRENK, S. AND LINK, N. C., Methods of Structural Safety, Prentice Hall, New Jersey, 1986
- [16]. MILONE, G., Estatística Geral e Aplicada, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- [17]. NBR 5422, Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985.
- [18]. PARK, S., CHOI, S., SIKORSKY, C., STUBBS, Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure, International Journal of Solids and Structures, 41, 2004, pp. 5035-5050.
- [19]. ROSS, S. M., Introduction to Probability Models, San Diego, CA: Academic Press, 2000.
- [20]. RODRIGUES, R.S., "Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Março de 2004.
- [21]. RUFFIER, A.P., ESTRELLA, L.F., LISBOA, E.F.A., "Uma Avaliação da Influência do Método de Cálculo da Carga de Vento para o Dimensionamento de Estruturas de Linhas de Transmissão", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [22]. RODRIGUES, R.S., BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., "Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento – Proposta para Revisão de Normas e Procedimentos de Projeto", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2003.
- [23]. SAGRILO, L.V.S.; Analise de Confiabilidade Estrutural Utilizando os Métodos Analíticos FORM E SORM, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1994.