

CÁLCULO DAS FLECHAS DOS CONDUTORES DE VÃOS CONTÍNUOS
E A AVALIAÇÃO DA AMPACIDADE ESTATÍSTICA DE LT's

João Ignácio da Silva Filho*
Aureo Pinheiro Ruffier

Érico Fagundes Anicet Lisboa

Luiz Felipe Estrella Jr.

CEPEL
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Érico Lisboa Pesquisa e
Desenvolvimento

Fundação Padre Leonel
Franca

RESUMO

É apresentada a teoria que serviu de base para o cálculo das reais tensões mecânicas e flechas de cabos em uma seção de tensionamento com vãos nivelados ou não. Foram feitas simulações da variação das flechas em vãos de seções de tensionamento em terrenos planos e acidentados, objetivando fornecer subsídios para o projeto de linhas de transmissão de energia elétrica (LT's) segundo a metodologia de ampacidade estatística atualmente em discussão na NBR5422 - Projeto de Linhas Áreas de Transmissão de Energia Elétrica [1], que considera temperaturas extremas do condutor da ordem de 100°C a 120°C.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, flechas e trações de cabos, temperatura do condutor, ampacidade estatística.

NOMENCLATURA

- A - comprimento do vão
- A_r - comprimento do vão regulador
- A_e - comprimento do vão nivelado
- E - módulo de elasticidade do cabo
- h - diferença de altura entre dois suportes adjacentes
- d - altura de segurança cabo-solo
- L - comprimento do cabo em um vão
- ΔL - variação do comprimento do cabo em um vão
- P - peso total do cabo em um dado comprimento
- P_{isol} - peso da cadeia de isoladores
- p - peso linear do cabo
- S - área da seção transversal do cabo
- T - tração em qualquer ponto do cabo
- t - temperatura do condutor
- (f) - sobrescrito indica um estado final
- (i) - sobrescrito indica um estado inicial
- f - ângulo de deslocamento da cadeia de isoladores no sentido longitudinal ao eixo da linha

1.0 - INTRODUÇÃO

O enfoque estatístico da ampacidade acena com a possibilidade de um aumento dos atuais níveis de

carregamento das LT's, sem decréscimo de sua confiabilidade operacional. Esse aumento potencial é possível pelo fato dessa nova metodologia medir e considerar as reais condições climáticas da região atravessada pela LT e, conseqüentemente, uma avaliação mais precisa da troca de calor do condutor com o ambiente.

Como a análise da capacidade de transporte da LT é feita com base em um vão específico de uma seção de tensionamento, nos vários foros onde o assunto é abordado surgem questões sobre o comportamento das flechas dos condutores nos demais vãos da seção.

As discussões tornam-se mais acaloradas na medida em que o enfoque estatístico admite a operação da LT com flechas ocasionadas por temperaturas do condutor da ordem de 100°C a 120°C, valores bem maiores que os tradicionalmente utilizados nos projetos.

Em princípio, as questões levantadas vêm sendo respondidas pelas equações de mudança de estado, decorrentes da variação da temperatura do cabo condutor, aplicadas a vãos contínuos, considerando para cada vão a influência dos vãos adjacentes. Todavia, devido à complexidade matemática para a solução do problema quando aplicado a vários vãos contínuos, na prática utilizam-se equações simplificadas que introduzem desvios de uma solução final mais acurada. Todavia, dependendo de como vãos de comprimentos diferentes se intercalam numa seção de tensionamento, as simplificações de cálculo podem levar a erros significativos não compatíveis com a evolução esperada pela metodologia estatística.

Por isto, um dos objetivos desse IT é apresentar uma modelagem matemática com base em um sistema de equações não-lineares, que elimina simplificações usuais, tornando a solução mais precisa. Com base na metodologia, foi desenvolvido um programa computacional para simular o comportamento das flechas em tramos de LT's localizadas em terrenos planos e acidentados com variados comprimentos de vãos.

Os valores de temperatura do condutor utilizados no estudo têm como base o banco de dados climáticos do CEPEL e a metodologia de ampacidade estatística desenvolvida no âmbito da Força Tarefa conjunta dos então GCPS e GCOI, e que deve ser incluída na próxima versão da norma NBR-5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica [1].

2.0 - O VÃO ISOLADO, O BÁSICO E O REGULADOR

Linhas de transmissão são formadas por uma sucessão de vãos contínuos onde cabos condutores e pára-raios ficam suspensos do solo através de estruturas de sustentação. Do ponto de vista da temperatura do cabo, a locação das estruturas ao longo da LT é feita de tal forma que:

- garanta uma distância mínima de segurança do condutor ao solo quando da ocorrência da flecha máxima, decorrente da maior temperatura do condutor prevista no projeto;
- considere que o resfriamento do cabo aumenta sensivelmente a sua tração mecânica e, em consequência, os esforços nos suportes.

Os livros de Mecânica Clássica ou Racional descrevem matematicamente as variações das flechas e trações de um cabo estendido entre dois suportes, ou seja, em um vão isolado, quando o cabo é submetido a mudanças de temperatura, fluência, cargas externas etc. Essas variações são também facilmente equacionadas e resolvidas para o caso de vãos contínuos onde o cabo tem a liberdade de movimento longitudinal nos pontos de sustentação nas estruturas, sem que esses pontos se desloquem. Em outras palavras, assume-se que o cabo pode deslizar livremente nos pontos de sustentação, como se estivesse sobre roldanas. Na realidade, como os cabos são presos nos grampos das cadeias de suspensão, os pontos de fixação se deslocam quando solicitados pela tração do cabo, não sendo mais aplicáveis as equações para vãos isolados.

Na prática, pela facilidade e por fornecer resultados com erros aceitáveis, os projetos de LT's baseiam-se nos chamados vão básico e vão regulador, onde as flechas e trações são calculadas pelas equações de vãos isolados. A flecha para a temperatura máxima é definida a partir de um vão básico escolhido pelo projetista na etapa de locação das estruturas. Uma vez conhecidos os reais vãos entre as estruturas de uma seção de tensionamento, determina-se um vão equivalente e fictício, que sob algumas hipóteses, representa aproximadamente as flechas e tensões de toda uma seção de tensionamento, que é o vão regulador.

2.1. Vão isolado

A Figura 1 apresenta um cabo suspenso por dois suportes não nivelados, nos pontos P_1 e P_2 . A curva formada pelo cabo é conhecida como catenária. O prolongamento da curva, a partir do ponto P_1 , até que se atinja a altura do ponto P_2 , formará um vão nivelado A_e .

Considerando o ponto mais baixo da catenária como origem do sistema de coordenadas, o comprimento do

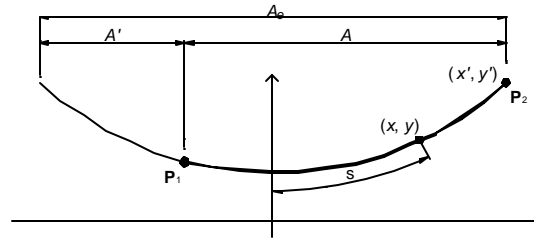


FIGURA 1 - Cabo suspenso entre dois suportes em desnível.

cabo (s) até o ponto (x, y) e a tração (T) em qualquer ponto são dados pelas equações (1), (2) e (3) [2]:

$$y = c \cosh\left(\frac{x}{c}\right), \quad (1)$$

$$s = c \sinh\left(\frac{x}{c}\right), \quad (2)$$

$$T = T_x \cosh\left(\frac{x}{c}\right), \quad (3)$$

onde c é uma constante, igual a T_x / p .

Com a mudança de temperatura, o comprimento do cabo varia em virtude de dois fatores: a dilatação do cabo e a mudança da deformação devido à variação na tração do cabo, ou seja:

$$L^{(f)} - L^{(i)} = \Delta L = \Delta L_{(\text{dilatação})} + \Delta L_{(\text{deformação})}. \quad (4)$$

2.1.1 Variação no comprimento devido à dilatação

A variação no comprimento devido à dilatação é proporcional à variação da temperatura, sendo dada pela equação:

$$\Delta L_{(\text{dilatação})} = L^{(i)} \alpha \Delta t. \quad (5)$$

2.1.2 Variação no comprimento devido à deformação

Ao longo deste item, serão utilizadas as seguintes identidades hiperbólicas:

$$\sinh(a) - \sinh(b) = 2 \sinh\left(\frac{a-b}{2}\right) \cosh\left(\frac{a+b}{2}\right), \quad (6)$$

$$\cosh(a) - \cosh(b) = 2 \sinh\left(\frac{a+b}{2}\right) \sinh\left(\frac{a-b}{2}\right), \quad (7)$$

$$\cosh(2a) = 1 + 2 \sinh^2(a). \quad (8)$$

Como o cabo está preso aos suportes, a variação de comprimento que irá sofrer implica uma variação na tração. Pela lei de Hooke, "as deformações elásticas são proporcionais às tensões aplicadas". No cabo suspenso, a tração não é constante ao longo de seu comprimento, devido ao peso do próprio cabo. Neste caso, será considerada uma tração equivalente que, aplicada em todo o cabo, acarreta a mesma deformação que a tração atuante ao longo do cabo. Esta tração equivalente é definida por:

$$\bar{T} = \frac{\int T ds}{L}. \quad (9)$$

A deformação elástica em virtude da variação da força de tração será então:

$$\Delta L_{(\text{deformação})} = \frac{\bar{T}^{(f)} L^{(f)} - \bar{T}^{(i)} L^{(i)}}{ES}. \quad (10)$$

Para obter a deformação, deve-se resolver a integral que se segue. Aplicando (2) e (3) a (9), tem-se que:

$$\bar{T}L = \int T ds = \int T \frac{ds}{dx} dx = \int T \cosh\left(\frac{x}{c}\right) dx = T_x \int \cosh^2\left(\frac{x}{c}\right) dx. \quad (11)$$

onde T_x é constante ao longo do cabo. Integrando a equação (11) do ponto P_1 ao ponto P_2 obtém-se:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left[x + \frac{c}{2} \sinh\left(\frac{2x}{c}\right) \right]_{P_1}^{P_2}. \quad (12)$$

No ponto P_1 , $x = x' - A$ e no ponto P_2 , $x = x'$. Substituindo em (12), tem-se que:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left\{ A + \frac{c}{2} \left[\sinh\left(\frac{2x'}{c}\right) - \sinh\left(\frac{2x'-2A}{c}\right) \right] \right\}. \quad (13)$$

Aplicando (6) em (13), chega-se a:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left[A + c \sinh\left(\frac{A}{c}\right) \cosh\left(\frac{A'}{c}\right) \right]. \quad (14)$$

Aplicando então (8) em (14), a equação toma-se:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left[A + c \sinh\left(\frac{A}{c}\right) \left(1 + 2 \sinh^2\left(\frac{A'}{2c}\right) \right) \right]. \quad (15)$$

Para resolver esta equação, deve-se determinar A' . Resolvendo a equação (1) nos pontos P_1 e P_2 , tem-se que:

$$h = c \left[\cosh\left(\frac{x'}{c}\right) - \cosh\left(\frac{x'-A}{c}\right) \right]. \quad (16)$$

Aplicando (7) em (16) pode-se escrever que:

$$\sinh\left(\frac{A'}{2c}\right) = \frac{h}{2c} \frac{1}{\sinh\left(\frac{A}{2c}\right)}. \quad (17)$$

Aplicando (17) em (15), obtém-se:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left[A + c \sinh\left(\frac{A}{c}\right) \left(1 + \frac{2h}{4c^2 \sinh^2\left(\frac{A}{2c}\right)} \right) \right]. \quad (18)$$

A equação (18) pode ser simplificada em termos do comprimento do cabo, que pode ser escrito, como [3]:

$$L^2 - h^2 = 4c^2 \sinh^2\left(\frac{A}{2c}\right). \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18) obtém-se, após breve manipulação algébrica, a equação final para a tração equivalente no cabo:

$$\bar{T}L = \frac{T_x}{2} \left[A + c \frac{L^2 + h^2}{L^2 - h^2} \sinh\left(\frac{A}{c}\right) \right]. \quad (20)$$

A partir das equações (4), (5), (10) e (20), obtém-se o valor de $T_x^{(i)}$ ao longo do cabo. Este processo não pode ser efetuado algebricamente, devendo ser utilizado um método iterativo.

2.2. - Vão regulador

Uma solução aproximada para o problema, e de uso generalizado nos projetos de LT's, consiste na determinação de um vão equivalente e fictício, calculado em função dos vãos reais do tramo, onde as tensões calculadas para esse vão segundo as equações de um vão isolado podem ser estendidas para os vãos reais da seção de tensionamento. A esse vão é dado o nome de vão regulador. Para uma seção de tensionamento com n vãos de comprimentos diferentes A_i , o vão regulador é dado por:

$$A_r = \sqrt{\frac{\sum A_i^3}{\sum A_i}}. \quad (21)$$

O vão regulador admite algumas hipóteses, tais como:

- a tração é a mesma em todos os vãos da seção;
- a temperatura do condutor não varia ao longo de toda seção;
- os vãos da seção não podem ser muito diferentes do vão regulador (na prática admite-se uma variação de até $\pm 10\%$);
- a seção não pode apresentar ângulos;
- as estruturas devem ser rígidas.

A solução obtida com vãos reguladores é satisfatória até as temperaturas de 50°C a 70°C [4], que são as usuais nos projetos de LT's.

3.0 - VÃOS CONTÍNUOS

Em LT's onde normalmente os comprimentos dos vãos de uma seção de tensionamento são desiguais, a variação do comprimento do cabo devido à mudança de temperatura, fluência, carga de vento etc., acarreta valores de tração diferentes em cada um dos vãos. Para manter o equilíbrio, essas diferenças de tração são absorvidas pelas estruturas intermediárias, que são solicitadas no sentido longitudinal do eixo da linha. No caso de estruturas com cadeias de suspensão, a diferença de tração em dois vãos adjacentes fará com que a cadeia sofra uma inclinação, pendendo no sentido do vão com maior tração, conforme apresentado na Figura 2.

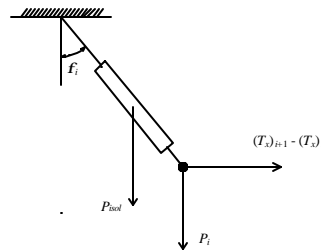


FIGURA 2 - Cadeia de isoladores submetida a esforços de tração diferentes no cabo.

Pelo equilíbrio do momento, determina-se o ângulo de inclinação da cadeia de isoladores como:

$$f_i = \arctg\left(\frac{(T_x)_{i+1} - (T_x)_i}{P_i + \frac{1}{2} P_{isol}}\right). \quad (22)$$

O peso do cabo sustentado pelo suporte i é dado por:

$$P_i = \frac{p}{2} \left(A_i^{(i)} + A_{i+1}^{(i)} \right) + \frac{h_i(T_x)_i^{(f)}}{A_i^{(f)}} - \frac{h_{i+1}(T_x)_{i+1}^{(f)}}{A_{i+1}^{(f)}} \quad (23)$$

Uma vez que o deslocamento da cadeia modifica o comprimento dos dois vãos adjacentes, o problema torna-se então em obter o ângulo de inclinação das cadeias de isoladores de cada suporte, determinar a tração horizontal em cada vão, e resolvê-lo como se fosse um vão isolado, após a correção do seu comprimento. Este comprimento é calculado em função da inclinação e do comprimento das cadeias de isoladores, das duas extremidades do vão:

$$A_i^{(f)} = A_i^{(i)} + L_{isol}(\sin f_{i+1} - \sin f_i) \quad (24)$$

Para uma seção de tensionamento com n vãos contínuos, a solução deste problema incorre em um sistema de $n-1$ equações não-lineares, onde as incógnitas são os valores de f_i nos suportes intermediários da linha, uma vez que nas estruturas terminais os cabos são ancorados resultando em $f_0 = f_n = 0^\circ$.

Em [4] é apresentada uma tabela contendo os resultados de um exemplo numérico com o cálculo das flechas em 10 vãos contínuos. O exemplo foi calculado por 6 programas computacionais desenvolvidos por especialistas distintos, e a tabela apresenta uma média dos resultados dos 6 programas. A Tabela 1 apresenta a comparação entre os resultados apresentados em [4] e os obtidos pela metodologia proposta no IT.

TABELA 1 - Flechas do condutor Lapwing à temperatura de 100°C em 10 vãos contínuos obtidos por 6 programas de [4] e pelo programa desenvolvido.

Vão	Flecha pelo A_r	Valores de [4] (média de 6 Programas)		Programa desenvolvido	
		Flecha	erro do A_r	Flecha	erro do A_r
213,4	5,5	5,8	0,3	5,8	0,3
350,5	14,9	15,3	0,4	15,2	0,3
228,6	6,3	6,8	0,5	6,7	0,4
137,2	2,3	2,5	0,2	2,4	0,1
274,3	9,1	9,7	0,6	9,6	0,5
228,6	6,3	6,6	0,3	6,6	0,3
289,6	10,1	10,2	0,1	10,1	0,0
457,2	25,3	23,8	-1,5	23,7	-1,6
259,1	8,1	8,2	0,1	8,1	0,0
198,1	4,8	4,9	0,2	4,9	0,1

Notas: Na seção o vão regulador é de 304,8m e o condutor na temperatura de 100°C tem uma flecha de 11,23m e a tração de 27,1 kN. As características mecânicas do condutor Lapwing estão descritas em [4]. Os valores estão em metros.

Comparando-se os valores da Tabela 1 é possível verificar o bom desempenho da metodologia e do programa computacional aqui apresentados, que podem ser aplicados para estruturas desniveladas e considerar mudanças da temperatura do condutor ao longo da seção de tensionamento.

4.0 - AMPACIDADE ESTATÍSTICA

Na metodologia estatística desenvolvida pela Força Tarefa Conjunta dos entões GCPS e GCOI [5], e que atualmente serve de base para as discussões da Comissão de Estudos (CE-11.1) que cuida da revisão da norma NBR5422 [1], a ampacidade da LT é

definida considerando-se dois pares de valores de temperaturas do condutor e distâncias cabo-solo, representados na Figura 3 por (d_1, t_1) e (d_2, t_2) .

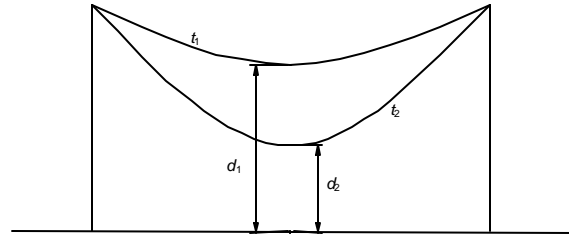


FIGURA 3 - Pares de valores de temperaturas e alturas considerados na ampacidade estatística.

As duas temperaturas do condutor são obtidas em função de seus riscos térmicos, sendo que t_1 tem um risco térmico máximo de 15% e t_2 tem riscos térmicos máximos entre 1% e 7,5%, dependendo da condição de operação do sistema: normal ou emergência. O risco térmico é a probabilidade de que uma dada temperatura do condutor venha a ser excedida e é obtida a partir de séries horárias de dados climáticos medidos na região da LT, aplicadas a um modelo de equilíbrio térmico do condutor.

As distâncias cabo-solo são definidas pela soma de três parcelas: básica, elétrica e de segurança; que variam em função dos tipos de terreno e obstáculos sob a linha, da tensão elétrica e se a LT está operando em regime normal ou de emergência. Na CE-11.1 as últimas sugestões dos valores para as três parcelas resultam numa diferença de 1m entre d_1 e d_2 . Para os vãos e tensões mecânicas usuais, a variação de 1m representa, aproximadamente, uma variação de 30°C na temperatura do condutor.

Com base nos dados de mais de 30 estações de coleta distribuídas pelo Brasil, que fazem parte do Banco de Dados Meteorológicos do CEPEL, foi realizado um estudo onde se verificou que para as correntes atualmente praticadas na operação normal as temperaturas (t_1) com riscos térmicos de 15% são da ordem de 50°C a 70°C , dependendo do clima da região. Em novos projetos e na recapitação de instalações existentes pensa-se em dimensionar as LT's para correntes onde as temperaturas com risco térmico de 15% cheguem a até 90°C .

Com esses valores para a temperatura t_1 , uma variação de 1m na flecha resulta em temperaturas t_2 na faixa de 80°C a 120°C .

Portanto, apesar de admitir uma baixa probabilidade de ocorrência, a metodologia de ampacidade estatística prevê que o condutor vai operar a altas temperaturas, o que pode requerer o cálculo das trações nos vãos da LT considerando a inclinação das cadeias.

5.0 - SIMULAÇÕES E ANÁLISES DE RESULTADOS

O objetivo deste item é verificar as diferenças numéricas entre as distâncias mínimas cabo-solo definidas pelas flechas e trações do vão regulador e pela metodologia apresentada no IT, nos vários vãos de uma seção de tensionamento. Para facilitar a notação nos gráficos e tabelas, e por estar mais

próxima da realidade, a distância calculada pela metodologia que considera a inclinação das cadeias de isoladores será denominada de distância mínima real.

Nos exemplos, os perfis de terrenos e as locações das estruturas são reais. As alturas das estruturas foram calculadas considerando as flechas e trações segundo o vão regulador do tramo e as distâncias mínimas cabo-solo propostas na revisão da NBR 5422.

Com as alturas definidas, calcularam-se as flechas e trações com as cadeias inclinadas e as reais distâncias cabo-solo em cada vão. Estas distâncias foram comparadas com as distâncias iniciais, ou seja, do vão regulador.

Sabe-se que as diferenças das alturas calculadas pelos dois métodos dependem da disposição dos comprimentos dos vãos no tramo. Apesar do estudo ter analisado tramos diferentes, a intenção dos exemplos é mostrar a aplicação da metodologia e apresentar uma primeira indicação de como o assunto pode ser enfocado na prática, principalmente na metodologia de ampacidade estatística.

Caso 1

O exemplo analisa, segundo a abordagem estatística, a ampacidade de uma LT de 138kV com as seguintes características:

- Condutor: Linnet
- Número de isoladores: 10
- Distâncias mínimas cabo-solo: $d_1 = 6,89$ m e $d_2 = 5,89$ m
- Temperaturas do condutor: $t_1 = 70^\circ\text{C}$ e $t_2 = 100^\circ\text{C}$
- Tramo: 20 vãos
- Tensão EDS: 20%
- Temperatura EDS: 25°C
- Vão regulador: 306,7 m

As alturas das estruturas foram calculadas considerando as flechas e trações segundo o vão regulador e os dois pares de valores da temperatura e distância cabo-solo, (d_1, t_1) e (d_2, t_2) . Neste cálculo foi considerada a altura mínima da torre, não sendo levado em conta que as alturas das estruturas variam segundo padrões comerciais.

Conforme pode ser observado na Tabela 2 e na Figura 4, nem todos os vãos estão com as distâncias nos limites críticos, e as alturas dos que se encontram em um dos limites, ora foram definidas pelo par (d_1, t_1) e ora pelo par (d_2, t_2) . Exemplificando, o vão de número 1 foi definido pelo par $(6,89$ m, $70^\circ\text{C})$ e o vão 2 pelo par $(5,89$ m, $100^\circ\text{C})$, enquanto que o vão 8 não tem nenhuma distância crítica.

A Tabela 2 e a Figura 4 apresentam, ainda, as distâncias e trações ao considerar a inclinação das cadeias e as diferenças encontradas pelas duas metodologias.

Neste exemplo, apesar das máximas diferenças das distâncias serem de 0,24m para a temperatura de 70°C e de 0,42m para 100°C , as distâncias mínimas normalizadas foram violadas em apenas 5 vãos, com valor máximo de aproximadamente 0,20 m.

Caso 2

Aqui será considerada a mesma LT do Caso 1, com exceção dos dados meteorológicos que para o Caso 2

TABELA 2 - Comparação entre as distâncias mínimas calculadas pelo vão regulador e com as cadeias inclinadas (real) - Caso 1.

Número	Comprimento (m)	Desnível (%)	T cond = 70°C			T cond = 100°C				
			Distância mín. ma Ar (m)	Distância mín. ma real (m)	Diferença das distâncias (m)	Tração real (kgf)	Distância mín. ma Ar (m)	Distância mín. ma real (m)	Diferença das distâncias (m)	Tração real (kgf)
1	290	-1,7	6,89	6,93	0,04	1017	5,98	6,02	0,04	902
2	310	-3,1	6,93	7,01	0,08	1021	5,89	6,01	0,12	909
3	340	-1,6	7,10	7,25	0,15	1027	5,89	6,13	0,24	918
4	340	3,2	7,12	7,28	0,16	1028	5,89	6,16	0,27	920
5	330	0,2	7,04	7,16	0,12	1025	5,89	6,09	0,20	915
6	280	1,5	6,89	6,95	0,06	1021	6,05	6,13	0,08	908
7	330	-3,3	7,06	7,16	0,10	1023	5,89	6,06	0,17	912
8	310	-4,3	7,45	7,53	0,08	1021	6,41	6,54	0,13	911
9	320	-2,6	6,99	7,08	0,09	1022	5,89	6,04	0,15	912
10	330	0,6	9,79	9,88	0,09	1022	8,70	8,86	0,16	912
11	340	2,9	7,14	7,21	0,07	1018	5,89	6,02	0,13	908
12	310	2,7	6,93	6,90	-0,03	1008	5,89	5,84	-0,05	893
13	170	3,7	6,89	6,86	-0,03	1000	6,63	6,58	-0,05	879
14	280	-2,7	6,89	6,82	-0,07	1000	6,15	6,04	-0,11	883
15	360	-3,9	7,29	7,22	-0,07	1005	5,89	5,82	-0,07	892
16	290	1,5	6,89	6,77	-0,12	994	5,98	5,78	-0,20	876
17	250	1,3	6,89	6,73	-0,16	983	6,22	5,94	-0,28	859
18	250	-4,2	6,89	6,69	-0,20	976	6,22	5,88	-0,34	849
19	270	-0,4	6,89	6,65	-0,24	974	6,11	5,69	-0,42	846
20	260	-0,4	6,89	6,65	-0,24	972	6,16	5,74	-0,42	844

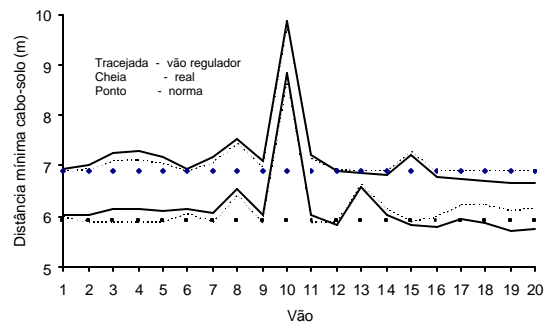


FIGURA 4 - Distâncias mínimas cabo-solo - Caso 1.

levam às temperaturas $t_1 = 57,7^\circ\text{C}$ e $t_2 = 80,6^\circ\text{C}$. As distâncias mínimas obtidas pelos dois métodos de cálculo encontram-se na Figura 5.

É interessante notar na Figura 5 que 15 vãos foram dimensionados pelo par (d_1, t_1) e que apenas 1 vão foi dimensionado pelo par (d_2, t_2) , ao considerar o método do vão regulador. Ao considerar as reais distâncias para a temperatura de $57,7^\circ\text{C}$ verifica-se que os vãos 15, 17, 18 e 20 violaram a distância de 6,89 m em aproximadamente 0,10 m. Para a temperatura de $80,6^\circ\text{C}$, somente o vão de número 15 ultrapassou a distância de 5,89 m, em 0,07 m.

Caso 3

O exemplo analisa uma LT de 69 kV com as seguintes características:

- Condutor: Linnet
- Número de isoladores: 6
- Distâncias mínimas cabo-solo: $d_1 = 6,0$ m e $d_2 = 5,0$ m
- Temperaturas do condutor: $t_1 = 70^\circ\text{C}$ e $t_2 = 96,3^\circ\text{C}$

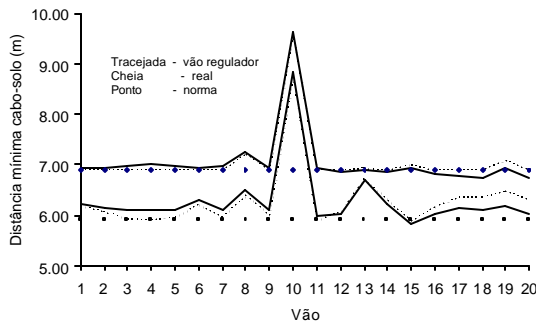


FIGURA 5 - Distâncias mínimas cabo-solo - Caso 2.

- Tramo: 16 vãos
- Tensão EDS: 20%
- Temperatura EDS: 25°C
- Vão regulador: 277,6 m

As distâncias mínimas encontram-se na Tabela 3 e na Figura 6.

TABELA 3 - Comparação entre as distâncias mínimas calculadas pelo vão regulador e com as cadeias inclinadas (real) - Caso 3.

Número	Vão					T cond = 70°C					T cond = 96,3°C				
	Comprimento (m)	Desnível (%)	Distância mínima Ar (m)	Distância mínima real (m)	Diferença das distâncias (m)	Tração real (kgf)	Distância mínima Ar (m)	Distância mínima real (m)	Diferença das distâncias (m)	Tração real (kgf)	Distância mínima Ar (m)	Distância mínima real (m)	Diferença das distâncias (m)	Tração real (kgf)	
1	131	2,8	8,70	8,64	-0,06	916	8,59	8,45	-0,14	781					
2	163	3,5	6,00	5,88	-0,12	923	5,77	5,54	-0,23	791					
3	325	1,7	8,79	8,74	-0,05	945	8,58	8,50	-0,08	826					
4	195	4,2	9,54	9,43	-0,11	939	9,19	8,96	-0,23	814					
5	135	2,9	6,00	5,94	-0,06	941	5,82	5,71	-0,11	815					
6	200	0,0	6,00	5,97	-0,03	953	5,92	5,86	-0,06	832					
7	318	-3,2	6,22	6,24	0,02	983	6,21	6,24	0,03	874					
8	142	-3,1	6,00	6,01	0,01	994	5,93	5,95	0,02	889					
9	376	0,5	10,7	11,0	0,35	1017	9,48	10,1	0,62	924					
10	434	-1,5	7,07	7,80	0,73	1024	5,00	6,30	1,30	935					
11	175	-0,7	6,00	5,97	-0,03	970	5,66	5,60	-0,06	854					
12	245	-0,2	6,00	5,83	-0,17	943	5,48	5,16	-0,32	816					
13	90	-1,9	6,00	5,95	-0,05	918	5,91	5,81	-0,10	780					
14	140	-3,0	6,50	6,38	-0,12	906	6,32	6,09	-0,23	763					
15	175	-3,8	10,4	10,3	-0,08	897	10,3	10,1	-0,15	752					
16	195	-2,0	6,00	5,79	-0,21	894	5,73	5,33	-0,40	749					

Caso 4

Considera as mesmas condições do caso anterior, mudando apenas as temperaturas do condutor que são: $t_1 = 57,7^\circ\text{C}$ e $t_2 = 80,6^\circ\text{C}$. As distâncias mínimas encontram-se na Figura 7.

Analisando os Casos 3 e 4, verifica-se que, com exceção do vão 10, as alturas foram definidas pelo par (d_i, t_i) devido aos comprimentos serem pequenos. Nos dois casos neste vão a diferença das distâncias calculadas pelos dois métodos foi bastante acentuada, ultrapassando 1m. Isto fez com que a altura calculada pelo vão regulador ficasse maior do que a necessária.

6.0 - CONCLUSÕES

A modelagem proposta para cálculo da flecha de condutores submetidos a altas temperaturas nos vãos de uma seção de tensionamento é válida para vãos

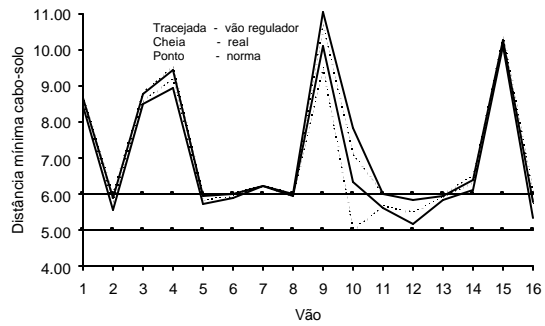


FIGURA 6 - Distâncias mínimas cabo-solo - Caso 3.

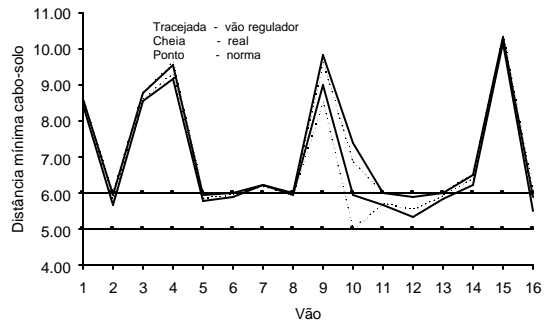


FIGURA 7 - Distâncias mínimas cabo-solo - Caso 4.

nivelados ou não, de diferentes comprimentos e com variação de temperatura ao longo da seção.

Para os perfis de terrenos e locação das estruturas considerados no IT, a metodologia do vão regulador é conservadora quando aplicada para o cálculo das distâncias cabo-solo na metodologia estatística, que considera dois pares de valores de temperatura e distância. Como esta constatação não pode ser generalizada para outros perfis e locação, somente uma aplicação maciça a vários casos pode concluir pela necessidade ou não de um aumento na altura da estrutura para compensar a inclinação das cadeias.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – Procedimentos”, 1985.

[2] Cella, P., “Methodology for Exact Solution of Catenary”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, nº 12, p. 1467-1480, 1999.

[3] Fuchs, R.D. e Almeida, M.T., “Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão”, Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1982.

[4] IEEE Task Force Bare Conductor Sag at High Temperature, “Limitations of the Ruling Span Method for Overhead Line Conductors at High Operating Temperatures”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, nº 2, 1999.

[5] Força Tarefa Conjunta de Ampacidade Estatística, “Critérios e Procedimentos para Cálculo da Ampacidade Estatística de Linhas Aéreas de Transmissão com Cabos Alumínio-Aço”, GCPS/GCOI, 1993.