

Condição regente no projeto das linhas de transmissão

O presente trabalho estabelece uma metodologia simples para determinação do vão crítico e da condição regente nos projetos das linhas aéreas de transmissão.

Rubens Dario Fuchs
Márcio Tadeu de Almeida
Afonso H. Moreira Santos

Ao iniciar-se a fase de projeto mecânico das linhas, estudos técnicos e econômicos para a escolha dos condutores e estruturas já foram realizados previamente, estando suas características fixadas. Os trabalhos de levantamento topográfico e elaboração dos desenhos dos perfis e plantas já estão igualmente concluídas e à disposição. A primeira fase dos trabalhos consiste, pois, no preparo dos gabaritos de locação e subsequente locação das estruturas sobre o perfil. Durante esse trabalho, cada estrutura locada deverá ser verificada quanto às solicitações a que será submetida a seu tipo especificado, face a essas mesmas solicitações. Na segunda fase, com base nesse projeto de distribuição, são determinadas as diversas seções de tensionamento, e feitos os cálculos para execução das tabelas de tensionamento: trações x temperaturas e flechas x temperaturas. Estas últimas serão calculadas para os prováveis vãos de controle em cada seção de tensionamento e serão função da condição regente de projeto.

Hipóteses de carga e condição regente de projeto

No Brasil, de um modo geral, são adotadas as seguintes hipóteses de carga para os projetos das linhas aéreas:

Condição de trabalho de maior duração (EDS)

Corresponde a essa condição a temperatura média anual, considerada sem o efeito do vento.

R. D. Fuchs. Formou-se pelo Inst. Eletrotécnico de Itajubá, em 1951. Cursos de especialização: Power Technology Course, EUA; Mestre em Ciências em Eng. Elétrica. Atividades profissionais: Eng. da Techint, 1953/57; Titular de Cuomo & Fuchs Ltda., 1957/67; Prof. Titular da EFEI, a partir de 1968.
M. T. Almeida. Formou-se pela EFEI, em 1972. Mestre em Eng., EFEI, 1974; Doutor Eng., USP, 1980. Atividades profissionais: Consultor pela FUPAI, 1979; Chefe do Dept. de Projeto da EFEI, a partir de 1980.

A. M. Santos. Formou-se pela EFEI, em 1978. Mestre em Eng. EFEI, 1980. Atividades profissionais: Eng. da Filadelfia Eng., 1979; Prof. da EFEI, a partir de 1980; Eng. Consultor pela FUPAI, 1981.

Condição de máximo carregamento

Considera-se a linha submetida a ventos de máxima intensidade à temperatura mais provável de sua ocorrência.

Condição de flecha mínima

Considera-se a linha submetida à menor temperatura absoluta sem ocorrência de ventos.

Condições de flecha máxima

É a condição correspondente à temperatura mais elevada dos cabos, decorrentes da temperatura máxima média acrescida do efeito térmico das correntes nos cabos.

A essas hipóteses de carga, normalmente associam-se restrições quanto às solicitações máximas admissíveis nos cabos. É usual estabelecer, no Brasil, a carga máxima admissível na condição EDS como sendo 20% da carga de ruptura, e para as condições de flecha mínima e carregamento máximo, as trações não devem ultrapassar 33% da carga de ruptura, para cabos CAA.

Exemplo 1: No projeto de uma linha de transmissão na região Sul do Brasil, utilizando o cabo CAA código Hen, com as seguintes características:

E	= 8086 kgf/mm ²	(módulo de elasticidade)
S	= 238,10 mm ²	(área da seção reta)
α	= $13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	(coeficiente de dilatação térmica)
T _{rup}	= 10.590 kgf	(carga de ruptura)
P	= 1,108 kgf/m	(peso unitário do cabo)
d	= 22,40 mm	(diâmetro do cabo)

São estabelecidas as seguintes hipóteses de carga:

Condição de trabalho de maior duração (EDS)

Velocidade do vento, $v = 0$ km/h

Temperatura média, $t = +20^{\circ}\text{C}$

Tração máxima admitida nos condutores $-\frac{T_{rup}}{5} =$
 $= 2\ 118\ \text{kgf}$

Condição de máximo carregamento

Velocidade do vento de projeto, $v = 110\ \text{km/h}$

Temperatura mais provável quando de sua ocorrência, $t = + 15^\circ\text{C}$

Tração máxima admitida nos condutores $-\frac{T_{rup}}{3} = 3\ 530\ \text{kgf}$

Condição de flecha mínima

Velocidade do vento, $0\ \text{km/h}$

Temperatura mínima, $- 5^\circ\text{C}$

Tração máxima admissível nos condutores, $\frac{T_{rup}}{3} = 3\ 530\ \text{kgf}$

Condição de flecha máxima

Velocidade do vento, $0\ \text{km/h}$

Temperatura máxima no condutor, levando-se em conta o efeito térmico da corrente, $+50^\circ\text{C}$.

(Nesta condição a tração é mínima).

Das hipóteses de carga estabelecidas, uma delas será a condição regente do projeto. Para determiná-la, deve-se verificar se, fixada a tração máxima de uma condição, as trações correspondentes às outras condições serão inferiores às máximas estabelecidas. Se isto não ocorrer, essa condição não é a regente, sendo necessário verificar as demais, com exceção da condição de flecha máxima, pois nela sempre ter-se-á tração mínima.

Vão crítico

Existem casos onde, para as mesmas hipóteses de carga e o mesmo cabo, pode-se ter até duas condições regentes de projeto, dependendo do tamanho do vão regulador encontrado. O vão para o qual ocorre a transição de uma condição regente para outra é chamado **vão crítico**. Nele as duas condições podem reger o projeto indiferentemente.

Supondo duas hipóteses de carga genéricas i e j, pode-se aplicar a equação de mudança de estado passando das condições em i para as de j, para um vão qualquer a.

A equação de mudança de estado será então:

$$\alpha (t_j - t_i) + \frac{T_j - t_i}{ES} = \frac{a^2}{24} \left(\frac{P_j^2}{T_j^2} - \frac{P_i^2}{T_i^2} \right) \quad (1)$$

Desta equação calcula-se T_j correspondente ao vão admitido a. Assim, pode-se verificar se este valor não ultrapassa a tração máxima T_{JM} para a hipótese j. Como no vão crítico tanto a condição i como j são regentes, pode-se aplicar a equação (1), fixando-se $T_i = T_{iM}$ e $T_j = T_{jM}$, ou seja, estabelecendo-se as trações iguais as máximas admitidas para as hipóteses correspondentes. Conseqüentemente, o valor do vão calculado usando (1) será o vão crítico:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{24 \left[\alpha (t_j - t_i) + \frac{T_{jM} - T_{iM}}{SE} \right]}{\left[\frac{P_j}{T_{jM}} \right]^2 - \left[\frac{P_i}{T_{iM}} \right]^2}} \quad (2)$$

No cálculo do vão crítico, pode-se cair nos seguintes casos que serão agora analisados:

1.º Caso

Vão crítico existe, ou seja, o radical da equação (2) é positivo. Nessa situação duas situações podem ocorrer, conforme é mostrado na fig. 1.

No caso da curva 1, para valores de vãos menores que a_{cr} , a condição regente é a i, pois a equação de mudança de estado leva a tração do valor T_{iM} para valores T_j menores do que T_{jM} . Para valores de vãos maiores que a_{cr} , a condição regente é a j, pois a equação de mudança de estado leva a tração do valor T_{jM} para valores T_j maiores do que T_{jM} .

No caso da curva 2 acontece justamente o inverso da explanação anterior. Portanto, o simples cálculo do vão crítico, dado pela equação (2), não define a condição regente para as duas faixas existentes (maior e menor que o vão crítico). Para levantar-se esta indeterminação, procede-se da seguinte maneira:

— Reescreve-se a equação (1):

$$\frac{\alpha (t_j - t_i) + \frac{T_j - T_{iM}}{ES}}{a^2} = \frac{1}{24} \left(\frac{P_j^2}{T_j^2} - \frac{P_i^2}{T_{iM}^2} \right) \quad (3)$$

Esta expressão representa exatamente a função que descreve a curva 1 ou a curva 2 da fig. 1.

— Para um valor muito grande de a, a tração T_j tende a:

$$T_j^1 = T_{iM} \cdot \frac{P_j}{P_i} \quad (4)$$

Define-se então um parâmetro auxiliar ψ , mostrado na fig. 1, que terá o seguinte valor para grandes vãos:

$$\psi = T_j^1 - T_{jM}$$

ou, levando-se em conta a equação (4):

$$\psi = T_{IM} \cdot \frac{P_j}{P_i} - T_{JM} \quad (5)$$

Note-se que, observando novamente a fig. 1, ψ é positivo para a curva 1 e negativo para a 2. Desta maneira levanta-se a indeterminação. Tudo isto está resumido na tabela 1.

2.º Caso

Vão crítico não existe, ou seja, o radical da equação (2) é negativo. Desta forma duas situações podem também ocorrer, conforme é mostrado na fig. 2.

Neste caso, a condição regente é a mesma para qualquer valor de vão. Para a curva 3, ψ é positivo e a condição regente de projeto é a j. Já para a curva 4, ψ é negativo e a condição regente é a i. Da mesma maneira pode se resumir tudo isto na tabela 2.

Tabela 1 — Vão crítico existe

Sinal de ψ	Condição regente
+	Para valores de vãos menores que a_{cr} a condição regente é i.
	Para valores de vãos maiores que a_{cr} a condição regente é j.
-	Para valores de vãos menores que a_{cr} a condição regente é j.
	Para valores de vãos maiores que a_{cr} a condição regente é i.

Tabela 2 — Vão crítico não existe

Sinal de ψ	Condição regente
+	Para qualquer valor de vão a condição regente de projeto é j.
-	Para qualquer valor de vão a condição regente de projeto é i.

Pode-se ainda simplificar a solução deste problema, eliminando o cálculo de ψ . Para isto basta observar que o denominador da equação 2 tem sempre o mesmo sinal de ψ . Baseado nesta afirmação, na condição de existência do vão crítico, e nas tabelas 1 e 2, constrói-se a tabela 3.

Deve-se observar que as hipóteses de carga i e j devem ser aquelas condições prescritas, ou seja: condição de trabalho de maior duração, condição de máximo carregamento, condição de flecha mínima. É im-

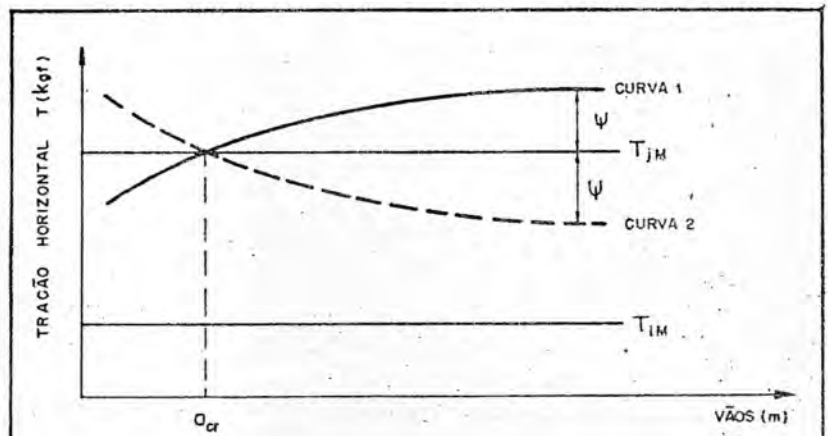


Fig. 1 — Variação das trações em função dos vãos e das hipóteses de carga, com existência de vão crítico

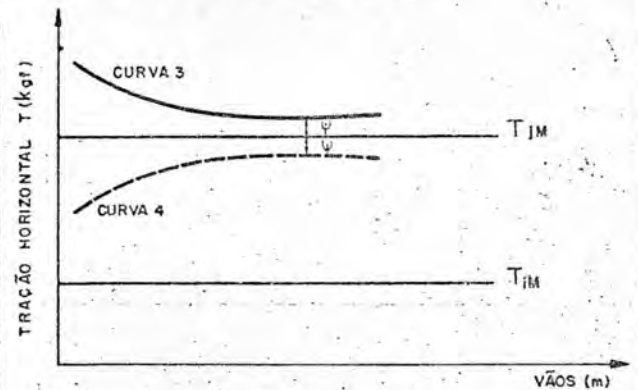


Fig. 2 — Variação das trações em função dos vãos e das hipóteses de carga, sem existência de vão crítico

portante dizer que não faz diferença qual situação é a i e qual é a j, pois a conclusão será a mesma.

Exemplo 2: Para a linha de transmissão do exemplo 1, levando-se em conta a carga de vento, o peso virtual será 1,476 4 kgf/m. Daí, pode-se determinar a condição regente, bem como verificar a existência do vão crítico.

Seja i a condição de maior duração e j a condição de maior carregamento; pela equação 2 tem-se:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{24 \left[18 \cdot 10^{-6} (15-20) + \frac{3\,530 - 2\,118}{298,1 \cdot 8\,086} \right]}{\left(\frac{1,4\,764}{3\,530} \right)^2 - \left(\frac{1,1\,080}{2\,118} \right)^2}}$$

ou

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{+ 0,011\,898\,864}{- 0,000\,000\,098\,7}}$$

Tabela 3

Sinal do numerador de eq. (2)	Sinal do denominador da eq. (2)	Vão crítico	Condição regente
+	+	Existe	Para valores de vão menores que a_{cr} a condição regente é I. Para valores de vão maiores que a_{cr} a condição regente é J.
-	-		Para valores de vão menores que a_{cr} a condição regente é J. Para valores de vão maiores que a_{cr} a condição regente é I.
+	-	Não existe	Para qualquer valor de vão a condição regente de projeto é I.
-	+		Para qualquer valor de vão a condição regente de projeto é J.

Os demais dados e condições de trabalho são as mesmas do exemplo 1, alterando-se a tração máxima na condição EDS para 900 kgf, nas outras duas condições para 1 500 kgf e peso virtual com vento para 1,043 kgf/m.

Utilizando-se da tabela 3, para vão crítico inexistente, numerador positivo e denominador negativo, tira-se que a condição regente é I, ou seja, a condição de maior duração (EDS).

Verifica-se que se tivesse sido invertida a escolha de i e j, seria obtido o numerador negativo e o denominador positivo, indicando a condição j como regente, o que levaria da mesma forma a EDS regente sobre a de maior carregamento.

É necessário ainda verificar a condição regente entre a EDS e a de flecha mínima. Seja i a condição de EDS e j a de flecha mínima. Calcula-se então o vão crítico:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{24 \left[18 \cdot 10^{-6}(-5-20) + \frac{3\,530 - 2\,118}{298,1 \cdot 8\,086} \right]}{\left(\frac{1,1\,080}{3\,530}\right)^2 - \left(\frac{1,1\,080}{2\,118}\right)^2}}$$

ou

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{+ 0,003\,258\,864}{- 0,000\,000\,017\,51}}$$

Utilizando-se da tabela 3, para vão crítico inexistente, numerador positivo e denominador negativo, tira-se que a condição regente é I, ou seja, a condição de maior duração (EDS).

Portanto, a hipótese de EDS é a regente do projeto.

Exemplo 3: Seja suposto que a linha de transmissão do exemplo 1 esteja construída com um cabo Chickadee-CAA com os seguintes dados:

- S = 212,55 mm²
- d = 18,87 mm
- T_{rup} = 4 500 kgf
- p = 0,6 423 kgf/m

Seja i a condição de maior duração e j a condição de maior carregamento; pela equação 2 tem-se:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{24 \left[18 \cdot 10^{-6}(15-20) + \frac{1\,500 - 900}{212,55 \cdot 8\,086} \right]}{\left(\frac{1,043}{1\,500}\right)^2 - \left(\frac{0,6\,423}{900}\right)^2}}$$

ou

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{+ 0,006\,218\,53}{- 0,000\,000\,025\,8}}$$

Utilizando-se da tabela 3, para vão crítico inexistente, numerador positivo e denominador negativo, tira-se que a condição regente é I, ou seja, a condição de maior duração (EDS).

É necessário ainda verificar a condição regente entre a EDS e a de flecha mínima. Seja i a condição de EDS e j a de flecha mínima. Calcula-se então o vão crítico:

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{24 \left[18 \cdot 10^{-6}(-5-20) + \frac{1\,500 - 900}{212,55 \cdot 8\,086} \right]}{\left(\frac{0,6\,423}{1\,500}\right)^2 - \left(\frac{0,6\,423}{900}\right)^2}}$$

ou

$$a_{cr} = \sqrt{\frac{- 0,059\,999\,205}{- 0,000\,000\,325\,9}} = 429 \text{ [m]}$$

Consultando-se a tabela 3, para vão crítico existente, numerador negativo e denominador negativo, conclui-se que: para vãos maiores que $a_{cr} = 429$ (m) a condição regente é i, ou seja, condição de máxima duração (EDS). Já para vãos maiores que $a_{cr} = 429$ m, a condição re-

gente é J, ou seja, a condição de mínima flecha. Pode-se finalmente dizer que como a condição de EDS é regente sobre a de máximo carregamento, então, para vãos menores que o crítico a EDS é a regente e para vãos maiores que este a condição de mínima flecha rege o projeto.

Nota final

A determinação da condição regente é feita em função do valor do vão básico adotado inicialmente no projeto, sendo que se faz necessário uma averiguação, após a locação das estruturas, do desvio entre o vão regulador encontrado e o básico adotado. Em casos de desvios grandes, além de outros erros, pode ocorrer que esses dois vãos não se situem no mesmo lado em relação ao vão crítico. Isto implicará numa condição regente diferente da adotada, podendo a tração infringir os limites de segurança admitidos.

BIBLIOGRAFIA

1. Fuchs, Rubens D., Almeida, Márcio T., Moreira, Afonso H., Considerações sobre o vão básico no projeto das linhas de transmissão, Mundo Elétrico n.º 264, Setembro/81.
2. Fuchs, Rubens, D., Almeida, Márcio T., Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão, Editora Edgard Blucher, S. Paulo.
3. Fuchs, Rubens, D., Almeida, Márcio T., Moreira, Afonso H., Curso de projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão, FUPAI, Itajubá, MG.
4. Lavanchy, C. H., Étude et construction des lignes électriques aériennes, J. B. Baillière et Fils, Editeurs, Paris, 1952.



Vamos deixar tudo bem claro

para iluminação de emergência, lembre-se em primeiro lugar da segurança. Não se deixe enganar pelas aparências. Só o legítimo UNILAMP reúne características de projeto e fabricação que nunca deixarão você no escuro. Existe um tipo de UNILAMP para cada aplicação, desde os pequenos portáteis, até grandes centrais.

Quando você compra um UNILAMP está comprando também algo que não tem preço: **QUALIDADE e SEGURANÇA.**

Unitron
engenharia, indústria e comércio ltda.

Rua Antonieta Leitão, 110 - Freguesia do Ó - CEP: 02925
Tels.: (011) 265-5650 - 266-4376 - 5028 - 1651
Telex: (011) 32003 UEIC BR - São Paulo - SP

REPRESENTANTES: • Rio de Janeiro: (021) 201-7643 • Recife: (081) 241-5309
• Porto Alegre: (0512) 33-7523 • Belo Horizonte: (031) 225-6425
• Blumenau: (0473) 22-4422 • Curitiba: (041) 262-0111
• Salvador: (071) 245-7812 • Maceió: (082) 221-2617
• João Pessoa: (083) 221-7070 • Teresina: (086) 222-8800
• Campinas: (0192) 2-1575