

COMITÉ D'ÉTUDES 22
LIGNES AÉRIENNES

CALCUL DES FLÈCHES DES CONDUCTEURS EN PORTÉES CONTINUES
ET UNE ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ STATISTIQUE DE TRANSIT DE LA's

João Ignácio da Silva Filho*
Aureo Pinheiro Ruffier

CEPEL
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Érico Fagundes Anicet Lisboa

Érico Lisboa Pesquisa e
Desenvolvimento

Luiz Felipe Estrella Jr.

Fundação Padre Leonel
Franca

RESUMÉ

Ce rapport présente la théorie qui a été le fondement pour la détermination de tensions mécaniques réelles et de flèches de conducteurs sur un canton avec plusieurs portées continues, nivelées ou pas. On a fait des simulations de la variation de flèches en portées de cantons situés en terrains plats ou accidentés, ayant le but de fournir des informations nouvelles pour le projet de lignes aériennes, d'après la méthodologie de la capacité statistique de transit qui se trouve en discussion dans la révision de la NBR 5422 (Projets de Lignes Aériennes d'Énergie Électrique) [1] qui considère des températures extrêmes d'exploitation de l'ordre de 100°C à 120°C.

MOTS CLÉS

Lignes de transport, flèches et tensions de câbles, températures de conducteurs, capacité statistique de transit.

NOMENCLATURE

A - longueur de la portée
 A_e - longueur de la portée équivalente
 A_b - longueur de la portée de nivelée
 E - module d'élasticité du câble
 h - dénivellation entre deux supports adjacents
 d - distance de sécurité réglementaire câble-sol
 L - longueur du câble sur une portée
 ΔL - variation de la longueur du câble sur une portée
 P - poids total du câble le long d'une longueur donnée
 P_{isol} - poids total de la chaîne d'isolateurs
 p - poids linéaire du câble
 S - l'aire de la section transversale du câble
 T - tension dans un point quelconque du câble
 t - température du câble
 (f) - souscrit en indiquant l'état final
 (i) - souscrit en indiquant l'état initial
 f - angle de déplacement de la chaîne d'isolateurs dans la direction longitudinale de la ligne

1.0 - INTRODUCTION

L'approche statistique de la capacité de transit met en relief la possibilité d'une augmentation des niveaux actuels de la capacité des LA's, sans diminuer sa fiabilité d'exploitation. Cette augmentation est possible dû au fait que cette nouvelle méthodologie mesure et considère les conditions climatiques réelles de la région traversée par la LA et, conséquemment, une évaluation plus précise de l'échange de chaleur entre le conducteur et l'environnement.

Comme l'analyse de la capacité de transit de la LA est basée sur une portée donnée du canton, dans les discussions sur ce sujet, on relève la question sur le comportement de flèches des conducteurs sur les autres portées.

Les discussions sur le sujet deviennent plus importantes dans la mesure où l'abordage statistique admet une exploitation de lignes avec des flèches qui se rapportent de 100°C à 120°C, valeurs nettement supérieures à celles traditionnellement utilisées dans les projets.

En principe, ces question pourraient être répondues par les équations de changement d'état qui résultent de la variation de la température du câble appliquée à des portées continues en tenant compte, sur chaque portée, de l'influence des portées adjacentes. Pourtant, en générale, on utilise des équations simplifiées, dû à la complexité de la solution du problème quand il s'agit de plusieurs portées continues, et de ce façon on introduit des erreurs dans le calcul. Ces erreurs dépendent de la disposition séquentielle des portées de différentes longueurs et peuvent même dépasser une erreur maximale admise ce qui n'est pas compatible avec les exigences de la méthode statistique.

Par voie de conséquence, l'un des buts de ce rapport est justement de présenter un modèle mathématique fondé sur un système d'équations non-linéaires, ce qui élimine les simplifications usuelles, en augmentant la

précision. Pour accomplir ce but, un programme d'ordinateur a été développé pour simuler le comportement des flèches dans un canton situé en terrain plat ou accidenté, ayant plusieurs longueurs de portées.

Les valeurs de la température du conducteur utilisées dans l'étude sont basées sur la base de données climatiques du CEPTEL et résultent de la méthodologie développée par le Groupe d'Action du GCPS et du GCOI et qui fera partie de la norme Brésilienne NBR-5422 (Projets de Lignes de Transport Aériennes d'Énergie Électrique) [1].

2.0 - LES PORTÉES ISOLÉE, BASIQUE ET ÉQUIVALENTE

Les lignes de transport aériennes se constituent d'une série de portées continues où les câbles, soit conducteurs, soit de garde, restent suspendus au moyen de supports. Du point de vue de la température du câble, le positionnement des supports le long de la LA est accomplis de telle façon à:

- garantir que la distance minimale de sécurité câble-sol ne soit pas dépassée lorsque la flèche maximale se produit due à la température maximale d'exploitation prévue dans le projet;
- considérer le refroidissement du câble, ce qui augmente sensiblement sa tension et, conséquemment, les efforts sur les supports.

Les livres de Mécanique Classique décrivent mathématiquement les variations des flèches et des tensions d'un câble tendu entre deux supports, c'est à dire, dans une portée isolée, le câble étant soumis à de changement de température, effet différé, charges extérieures, etc. Ces variations sont traitées facilement et résolues dans le cas de portées continues à condition que le câble ait la liberté de se déplacer longitudinalement aux points de suspension sans que ces points ne se déplacent. Autrement dit, on admet que le câble puisse glisser librement sur les points de suspension comme s'il était sur des poulies. En réalité, les câbles sont fixés aux pinces de chaînes de suspension qui se déplacent dû aux différences de tensions du câble des deux côtés, ce qui rend les équations pour les portées isolées inapplicables.

En pratique, les projets de lignes de transport sont fondés sur le principe de la portée basique et de la portée équivalente, où flèches et tensions sont calculées au moyen des équations de portées isolées car l'application est simple et les résultats ont des erreurs acceptables pour la majorité de cas. La flèche pour la température maximale est définie à partir d'une portée basique choisie par l'ingénieur lors de l'étape de positionnement des supports. Une fois que les portées réelles entre les supports d'un canton sont connues, la portée équivalente est déterminée. Cette portée représente approximativement, d'après quelques hypothèses, les flèches et les tensions le long du canton.

2.1. Portée Isolée

La Figure 1 illustre un câble suspendu par deux supports dénivélés, aux points P_1 e P_2 . Cette courbe du câble est connu par chaînette. Le prolongement de

cette courbe, à partir du point P_1 , jusqu'à ce qu'elle atteigne la hauteur du point P_2 , représente une portée nivelée, A_e .

En considérant le point le plus bas de la chaînette comme l'origine du système de coordonnées, la longueur du câble (s) jusqu'au point (x, y) et sa tension (T) sont données par les équations (1), (2) et (3) [2]:

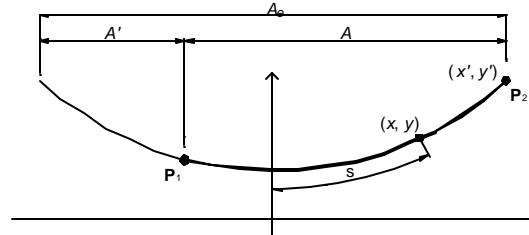


FIGURE 1 - Câble suspendu entre deux supports dénivélés.

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

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

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

où c est le paramètre de la chaînette, égal à T_x / p .

Avec le changement de température, la longueur du câble varie à cause de deux facteurs: la dilatation du câble et l'incrément de déformation due à la variation de la tension du câble, c'est à dire:

$$L^{(f)} - L^{(i)} = \Delta L = \Delta L_{(dilatation)} + \Delta L_{(déformation)} \tag{4}$$

2.1.1 Variation de la Longueur due à la Dilatation

La variation de la longueur due à la dilatation est proportionnelle à la variation de température, étant donnée par l'équation:

$$\Delta L_{(dilatation)} = L^{(i)} \alpha \Delta t, \tag{5}$$

2.1.2 Variation de la Longueur due à la Déformation

On utilise, dans ce paragraphe, les identités hyperboliques suivantes:

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

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

$$\cosh(2a) = 1 + 2 \sinh^2(a). \tag{8}$$

Comme le câble est attaché aux supports, la variation de sa longueur entraîne une variation de sa tension. Selon la loi de Hooke, "les déformations élastiques sont proportionnelles aux tensions appliquées". Dans le câble suspendu, la tension n'est pas constante le long de sa longueur dû au poids-propre du câble. Dans ce cas, on considère une tension équivalente qui, appliquée le long de la longueur du câble, donne la même déformation que la tension réelle le long du câble. Cette tension équivalente est définie par:

$$\bar{T} = \frac{\int T ds}{L}. \tag{9}$$

La déformation élastique due à la variation de la tension est donnée par:

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

Pour obtenir la déformation, il faut résoudre l'intégral qui suit. En jetant (2) et (3) dans (9), on a:

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

où T_x est constante le long du câble. En intégrant l'équation (11) du point P_1 au point P_2 , on obtient:

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

Sur le point P_1 , $x = x' - A$, et sur le point P_2 , $x = x'$. En jetant sur (12), on a:

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

En jetant (6) dans (13), on arrive à:

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

En jetant (8) dans (14), cette équation devient:

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

Pour résoudre cette équation, il faut déterminer A' . En résolvant l'équation (1) aux points P_1 et P_2 , on a:

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

En jetant (7) dans (16) on peut écrire:

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

En jetant (17) dans (15), on obtient:

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

L'équation (18) peut être simplifiée en fonction de la longueur du câble, qui s'écrit, [3]:

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

En jetant (19) dans (18) on obtient, après quelques calculs, l'équation finale pour la tension équivalente du câble.

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

À partir des équations (4), (5), (10) et (20), on obtient la valeur de $T_x^{(f)}$ le long du câble. Ce processus ne peut pas être effectué algébriquement, il faut s'en servir d'une méthode itérative.

2.2. Portée Équivalente

Une solution approchée du problème, d'utilisation générale dans les projets de LA's, consiste dans la

détermination d'une portée représentative qui est calculé en fonction des portées réelles du canton, où les tensions calculées pour cette portée représentative, nommée équivalente, d'après les concepts de la portée isolée, peuvent se rapporter aux portées réelles du canton. Pour un canton avec n portées différentes A_i , la portée équivalente est calculée par:

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

La portée équivalente admet les hypothèses suivantes:

- la tension est constante le long du canton;
- la température du conducteur ne varie pas le long du canton;
- les portées d'un canton ne peuvent pas s'écarter de la portée équivalente d'environ 10%;
- le canton ne présente pas de supports en angle;
- les supports sont rigides.

La solution que l'on obtient avec l'utilisation de la portée équivalente est satisfaisante pour des températures de 50°C à 70°C [4], normalement admises dans les projets de LA's.

3.0 - PORTÉES CONTINUES

Normalement, les longueurs des portées d'un canton ne sont pas égales, la variation de la longueur du câble due au changement de température, l'effet différé, la charge de vent, etc., entraînent des valeurs de tensions différentes sur chaque portée. Pour tenir l'équilibre, ces différences de tension sont absorbées par les supports intermédiaires, qui sont sollicités dans le sens longitudinal de l'axe de la ligne. Dans le cas de supports à chaîne de suspension, la différence de tension entre les deux portées adjacentes fait que la chaîne subisse une inclinaison, tendant vers la portée avec la plus grande tension, comme montré dans la Figure 2.

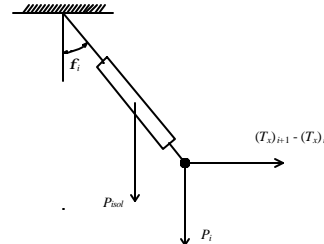


FIGURE 2 - Chaîne d'isolateurs soumise à des tensions différentes dans le câble.

Par l'équilibre de moment, on détermine l'angle d'inclinaison de la chaîne d'isolateurs comme suit:

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

Le poids du câble soutenu par le support i s'écrit:

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

Une fois que l'inclinaison de la chaîne modifie la longueur des deux portées adjacentes, le problème se résume en trouver l'angle d'inclinaison de la chaîne de chaque support, déterminer la tension horizontale de

chaque portée, et la résoudre comme si c'était une portée isolée, après la correction de sa longueur. Cette longueur est calculée en fonction de l'inclinaison et de la longueur des chaînes d'isolateurs aux deux extrémités de la portée:

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

Pour un canton avec n portées continues, la solution de ce problème revient à un système de $n-1$ équations non-linéaires, où les inconnues sont les valeurs de f_i pour les supports intermédiaires, alors que l'on a $f_0 = f_n = 0^\circ$ pour les supports d'ancrage.

La référence [4] montre un tableau qui contient les résultats d'un exemple numérique avec les calculs des flèches sur 10 portées continues. L'exemple a été calculé par 6 programmes d'ordinateur développés par des chercheurs différents, et le tableau montre une moyenne des résultats des 6 programmes. Le Tableau 1 montre la comparaison entre les résultats présentés en [4] et ceux obtenus par la méthodologie proposée par ce TT.

TABLEAU 1 - Flèches du conducteur Lapwing à une température de 100°C sur 10 portées continues obtenus par 6 programmes de [4] et par le programme développé.

| Portée | Flèche par A_r | Valeurs de [1] (moyenne de 6 programmes) | | Programme développé | |
|--------|------------------|--|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Flèche | Erreur de A_r | Flèche | Erreur de 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 |

Notes: La portée équivalente du canton vaut 304,8 m et le conducteur dans la température de 100°C a une flèche égale à 11,23 m et une tension égale à 27,1 kN. Les caractéristiques mécaniques du conducteur Lapwing sont décrites en [4]. Les valeurs sont en mètres.

La comparaison des valeurs du Tableau 1 montre la bonne performance de la méthodologie et du programme d'ordinateur ci présentés, qu'ils s'appliquent aux supports dénivelés et considèrent les changements de température du conducteur le long du canton.

4.0 - CAPACITÉ STATISTIQUE DE TRANSIT

La méthodologie statistique développée par le Groupe d'Action du GCPS et du GCOI [5], qui sert actuellement de base pour les discussions de la Commission d'Études (CE-11.1), qui veille sur la révision de la norme NBR 5422 [1], la capacité de la LA est définie en considérant deux couples de valeurs de la température du conducteur et de la distance au sol, montrées dans la Figure 3 par (d_1, t_1) et (d_2, t_2) .

Les deux températures du conducteur sont obtenues en fonction de ses risques thermiques, de tel façon que t_1 a un risque thermique maximal égal à 5% et t_2 a des risques thermiques maximaux entre 1% et 7,5%, selon la condition d'opération du système: normal ou d'urgence. Le risque thermique est la probabilité

qu'une certaine température du conducteur puisse être dépassée et est obtenue à partir de séries horaires de données climatiques mesurées à l'emplacement de la LA, appliquées à un modèle d'équilibre thermique du conducteur.

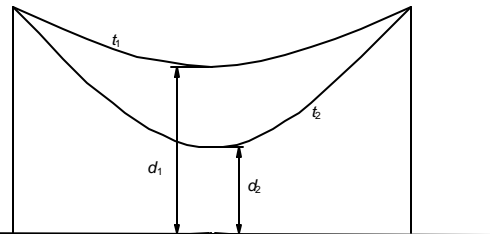


FIGURE 3 - Couples de valeurs de température et de distance au sol considérées dans la capacité statistique.

Les distances au sol sont définies par la somme de trois termes: basique, électrique et de sécurité; qui varient en fonction des types de terrain et des obstacles sous la ligne, de la tension électrique et si la LA opère en régime normal ou d'urgence. Selon la CE-11.1, les dernières suggestions de valeurs pour les trois termes résultent dans une différence égale à 1 m entre d_1 et d_2 . Pour les portées et tensions mécaniques usuelles, la variation de 1 m représente une variation d'environ 30°C sur la température du conducteur.

Ayant pour base les données de plus de 30 stations climatiques réparties au Brésil, qui font partie de la Base de Données Météorologiques du CEPEL, on a fait une étude où on a vérifié que, pour les courants actuellement pratiqués sous opération normal, les températures (t_1) avec risque thermique de 15% sont de l'ordre de 50°C à 70°C, selon le climat de la région. Dans les nouveaux projets et dans le renforcement de capacité de lignes existantes, on envisage de dimensionner les LA's pour des courants où les températures avec risque thermique de 15% atteignent jusqu'à 90°C.

Avec ces valeurs pour la température t_1 , une variation de 1 m sur la flèche résulte dans des températures t_2 dans l'étendue de 80°C à 120°C.

Malgré on admet une basse probabilité d'occurrence, la méthodologie de la capacité statistique prévoit que le conducteur opère à des hautes températures, ce qui requiert le calcul des tensions sur les portées de la LA en considérant l'inclinaison des chaînes d'isolateurs.

5.0 - SIMULATIONS ET ANALYSES DE RÉSULTATS

Le but de ce paragraphe est d'analyser les différences numériques entre les distances minimales au sol définies par les flèches et tensions de la portée équivalente et celles de la méthodologie présentée dans ce TT, sur les plusieurs portées d'un canton. Afin de faciliter la notation sur les figures et sur les tableaux, la distance au sol calculée par la méthodologie qui considère l'inclinaison des chaînes d'isolateurs est nommée de distance minimale réelle.

Dans les exemples qui suivent, les profils en long des LA's et les positionnements des supports sont réels. Les hauteurs des supports ont été calculées selon les flèches et les tensions de la portée équivalente du

canton, et les distances minimales au sol sont celles proposées dans la révision de la NBR 5422.

Une fois que les hauteurs sont définies, on calcule les flèches, les tensions et les distances réelles au sol de chaque portée en tenant compte de l'inclinaison des chaînes d'isolateurs. Ces distances sont comparées à celles calculées selon la portée équivalente.

On sait que les différences entre les distances au sol calculées selon les deux méthodes sont dues à la disposition relative des longueurs des portées dans le canton. Bien que cette étude analyse des cantons différents, l'intention des exemples est celle de montrer l'application de la méthodologie et de présenter une première indication sur comment ce sujet peut être envisager dans la pratique, surtout dans la méthodologie de la capacité statistique.

Cas 1

Cet exemple analyse, selon l'approche statistique, la capacité d'une LA de 138kV avec les caractéristiques suivantes:

- Conducteur: Linnet
- Numéro d'isolateurs: 10
- Distances minimales au sol: $d_1 = 6,89$ m et $d_2 = 5,89$ m
- Températures du conducteur: $t_1=70^\circ\text{C}$ et $t_2=100^\circ\text{C}$
- Canton: 20 portées
- Tension EDS: 20%
- Température EDS: 25°C
- Portée équivalente: 306,7 m

Les hauteurs des supports ont été calculées selon les flèches et les tensions de la portée équivalente et les deux couples de valeurs de température et de distance au sol, (d_1, t_1) et (d_2, t_2) . Dans cette étude on a considéré la hauteur minimale du support, on a pas tenu compte que les hauteurs des supports varient selon des standards commerciaux.

Comme montré par le Tableau 2 et la Figure 4 il y a des portées où les distances au sol sont plus grandes que la valeur critique, et les hauteurs de ceux qui se trouvent sur une des limites ont été définies soit par le couple (d_1, t_1) , soit par le couple (d_2, t_2) . A titre d'exemple, la portée numéro 1 a été définie par $(6,89$ m, $70^\circ\text{C})$ et la portée 2 par $(5,89$ m, $100^\circ\text{C})$, tandis que la portée 8 n'a aucune distance critique.

Le Tableau 2 et la Figure 4 montrent aussi les distances au sol et les tensions lors que l'on considère l'inclinaison des chaînes d'isolateurs et les différences entre les deux méthodologies.

Dans cet exemple, malgré les différences maximales des distances au sol soient égales à 0,24 m pour la température de 70°C et à 0,42 m pour 100°C , les distances minimales réglementaires sont violées seulement sur 5 portées, avec une valeur maximale d'environ 0,20 m.

Cas 2

Ici on considère la même LT du Cas 1, sauf pour les données météorologiques qui, pour le Cas 2, conduisent à des températures $t_1 = 57,7^\circ\text{C}$ et $t_2 = 80,6^\circ\text{C}$. Les distances minimales obtenues par les deux méthodes de calcul se trouvent à la Figure 5.

Tableau 2 - Comparaison entre les distances minimales calculées selon la portée équivalente et avec l'inclinaison des chaînes (réel) - Cas 1.

| Numéro | Portée | | T cond = 70°C | | | | T cond = 100°C | | | |
|--------|--------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------|
| | Longueur (m) | Déviellation (%) | Distance min- male Ar (m) | Distance min- male réelle (m) | Différence des distances (m) | Tension réelle (kgf) | Distance min- male Ar (m) | Distance min- male réelle (m) | Différence des distances (m) | Tension réelle (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 |

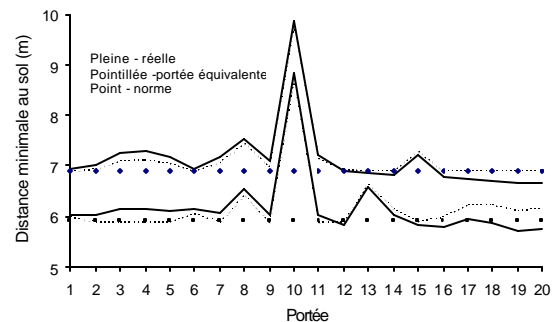


FIGURE 4 - Distances minimales au sol - Cas 1.

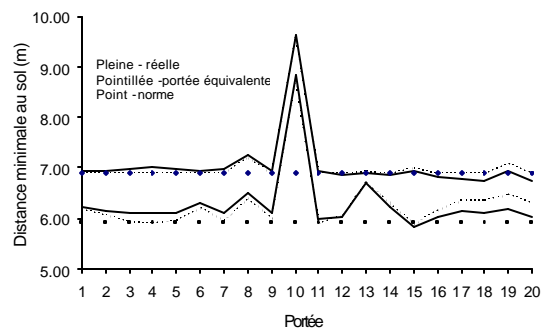


FIGURE 5 - Distances minimales au sol - Cas 2.

On note sur la Figure 5 que 15 portées ont été dimensionnées par le couple (d_1, t_1) et que seulement une portée a été dimensionnée par le couple (d_2, t_2) , selon la méthode de la portée équivalente. Lors que l'on considère les distances réelles pour la température de $57,7^\circ\text{C}$ on vérifie que les portées 15, 17, 18 et 20

ont violé la distance de 6,89 m d'environ 0,10 m. Pour la température de 80,6°C, seulement la portée numéro 15 a dépassé la distance de 5,89 m de 0,07 m.

Cas 3

Cet exemple analyse une LT de 69kV avec les caractéristiques suivantes:

- Conducteur: Linnet
- Numéro d'isolateurs: 6
- Distances minimales au sol: $d_1=6,0$ m et $d_2= 5,0$ m
- Températures du conducteur: $t_1=70^\circ\text{C}$ et $t_2=96,3^\circ\text{C}$
- Canton: 16 portées
- Tension EDS: 20%
- Température EDS: 25°C
- Portée équivalente: 277,6 m

Les distances minimales se trouvent au Tableau 3 et sur la Figure 6.

TABLEAU 3 - Comparaison entre les distances minimales calculées selon la portée équivalente et avec l'inclinaison des chaînes (réel) - Cas 3.

| Numéro | Portée | | T cond = 70°C | | | | T cond = 96,3°C | | | |
|--------|--------------|------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| | Longueur (m) | Déviellation (%) | Distance minimale Ar (m) | Distance minimale réelle (m) | Différence des distances (m) | Tension réelle (kgf) | Distance minimale Ar (m) | Distance minimale réelle (m) | Différence des distances (m) | Tension réelle (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 |

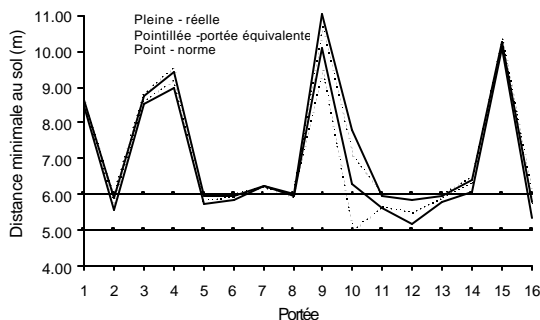


FIGURE 6 - Distances minimales au sol - Cas 3.

Cas 4

On considère les mêmes conditions du cas précédent, en ne changeant que les températures du conducteur qui sont: $t_1= 57,7^\circ\text{C}$ et $t_2=80,6^\circ\text{C}$. Les distances minimales se trouvent sur la Figure 7.

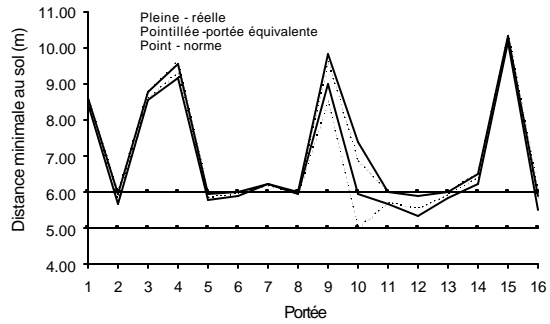


FIGURE 7 - Distances minimales au solo - Cas 4.

L'analyse des cas 3 et 4 permet de conclure que, sauf pour la portée 10, les hauteurs ont été définies par le couple (d_1, t_1) puisque les longueurs sont petites. Dans les deux cas, pour cette portée, la différence des distances calculées selon les deux méthodes est importante, même plus grande que 1 m. Conséquemment, la hauteur selon la portée équivalente est devenue plus grande que le nécessaire.

6.0 - CONCLUSIONS

La méthodologie proposée pour le calcul de flèches des conducteurs soumis à des hautes températures sur les portées d'un canton est valable pour des portées nivelées ou pas, des différentes longueurs et avec de la variation de température au long du canton.

Pour les profils en long et les positionnements des supports considérés dans ce TT, la méthodologie de la portée équivalente est conservatrice lors que l'on applique aux calculs des distances au sol dans la méthodologie statistique, qui considère deux couples de valeurs de température et de distance. Comme cette constatation ne peut pas être généralisée pour d'autres profils en long, seulement une application massive à plusieurs cas permettrait de conclure pour le besoin ou pas d'une augmentation de la hauteur du support pour compenser l'inclinaison des chaînes d'isolateurs.

7.0 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 5422 - Projetos de Lignes Aériennes d'Énergie Électrique - Procédures", 1985 (en portugais).

[2] Cella, P. "Methodology for Exact Solution of Catenary", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, n° 12, p. 1467-1480, 1999.

[3] Fuchs, R.D., Almeida, M.T., "Projet Mécanique de Lignes Aériennes", Edgard Blücher, São Paulo, Brésil, 1982 (en portugais).

[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, n° 2, 1999.

[5] Groupe d'Action de Capacité Statistique de Transit, "Critères et Procédures pour le Calcul de la Capacité Statistique de Transit de Lignes Aériennes à Câbles en Aluminium-Acier", GCPS/GCOI, 1993 (en portugais).