



**XXIII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GLT/18  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**UMA ANÁLISE DO CRITÉRIO H/w**

**Afonso de Oliveira e Silva(\*)  
FURNAS**

**RESUMO**

O IT apresenta uma análise do chamado “Critério H/w” proposto pelo CIGRÉ para definição da necessidade ou não de utilização de proteção contra vibrações eólicas nos cabos de uma LT aérea.

É feita uma apresentação dos fundamentos do método do balanço de potência, que foi usado como uma verificação analítica das proposições feitas e do método propriamente dito.

É feita uma análise da possível influência do creep sobre o auto amortecimento do condutor em serviço e, também, no caso de cabos pretensionados ou após um retracionamento.

São feitas algumas comparações dos valores recomendados de H/w com os valores resultantes de EDS.

**PALAVRAS CHAVE**

Linhas de transmissão. Vibrações eólicas. Critério H/w. Método do balanço de potência

**1.0 - HISTÓRICO**

Em 1960 o Sub Comitê SC6 do CIGRÉ apresentou o critério do *EDS*, Every Day Stress ou Tração de Maior Duração, resultado de 6 anos de trabalhos do “*EDS Panel*”, que definiu valores limite para utilização de condutores com ou sem proteção. O *EDS* foi definido como a máxima carga de tração que deveria existir durante a maior parte da vida útil do cabo, sem risco de danos por fadiga. Assim sendo, ele foi definido como a tração final na temperatura média anual, com base em um levantamento de ocorrência ou não de danos, feito em 1015 LTs, totalizando 134.100 km, sendo 95.700 km com cabos CAA. A Tabela 1 apresenta alguns valores recomendados.

**TABELA 1 – Valores Recomendados de EDS**

CAA		CAL		CA
Sem amort.	Com amort.	Sem amort.	Com amort.	Sem amort.
18	24	18	26	17

Já em 1962 começaram a aparecer críticas aos valores recomendados de EDS, A Brochura 273 do CIGRÉ(1) e a referência 5, por exemplo, apresentam análises das premissas e falhas deste critério. Apesar destas falhas, o critério tornou-se muito empregado no Brasil, sem levar em conta tais críticas.

Foi então estabelecida uma *Task Force* no CIGRÉ com o seguinte termo de referência: “*Produzir um guia prático para a seleção de trações seguras na forma de valores genéricos para classes específicas de linhas de transmissão com condutores singelos, para evitar danos por vibrações eólicas durante uma vida útil de projeto típica. Este guia deve ser baseado na experiência existente e no conhecimento da energia fornecida pelo*

(\*) Rua Real Grandeza, n° 219 – sala 405 - Bloco A - CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Tel: (+55 21) 2528-4387 – Fax: (+55 21) 2528-4452 – Email: [afonsoos@furnas.com.br](mailto:afonsoos@furnas.com.br)

**vento, auto amortecimento do condutor e sua resistência à fadiga.** Deve ser usado um modelo teórico que transforme o balanço de energia em amplitude e número de ciclos de vibração nos grampos, para avaliar a severidade das vibrações".

A partir de então, foram iniciadas pesquisas, teóricas e experimentais, para obter as informações definidas no termo de referência, com objetivo de definir tensões seguras, com base em critérios mais elaborados. Entre os resultados obtidos, podemos destacar:

- a) Estabelecimento de fórmulas para cálculo da potência fornecida pelo vento, definindo a influência da turbulência em função da cobertura do terreno e não mais em função da sua topografia (plano, ondulado ou montanhoso), como no critério EDS.
- b) Estabelecimento de fórmulas para cálculo da potência dissipada por um cabo vibrando, com base em pesquisas experimentais.
- c) Com base nos dados acima, aprimoramento do método do balanço de potência.
- d) Pesquisa sobre a resistência à fadiga de diversos tipos de cabos, avaliando o efeito da carga de tração e do tipo de fixação usado.
- e) Desenvolvimento de equipamento para medição de vibrações eólicas no campo e desenvolvimento de modelos matemáticos para correlacionar as medições com as solicitações nos cabos.
- f) Desenvolvimento de modelos para estimar a intensidade das vibrações eólicas e seus efeitos, para condutores singelos e feixes, com ou sem proteção, levando em conta o conhecimento adquirido com as pesquisas anteriores.

O critério H/w foi definido atendendo ao termo de referência acima mencionado e levando em conta as pesquisas correlatas. Portanto, este critério é o resultado de quase 40 anos de pesquisas, das quais participaram pesquisadores, com dezenas ou centenas de publicações. Podemos afirmar que ele representa o estado da arte.

Entretanto, o próprio SC6 do CIGRÉ reconhece que a degradação de condutores devido à fadiga causada por vibrações é um problema altamente complexo e de natureza aleatória. Assim sendo, foram necessárias simplificações e um certo grau de conservadorismo para contrabalançar estas incertezas.

O que deve ficar claro, com base nas referências 1 e 5 e em diversos outros artigos e discussões apresentadas nos anais das bienais do CIGRÉ, ao longo de 50 anos, é que a intensidade da vibração e a resistência à fadiga de um condutor devem ser relacionadas com a carga de tração atuante e não tem nenhuma relação com a carga de ruptura do cabo. É fundamental que seja abandonada a porcentagem da carga de ruptura (EDS) como critério de proteção contra vibrações eólicas.

## 2.0 - SIMBOLOGIA

Nos itens onde não existe uma definição específica, os seguintes símbolos são usados para as grandezas:

$\varepsilon$  - alongamentos relativo, sendo adicionados os índices  $c$  para o creep e  $g$  para o geométrico;  $\sigma$  - tensão;  $\mu$  - massa específica;  $E$  - módulo de elasticidade;  $D$  - diâmetro,  $S$  - área da seção transversal;  $H$  - componente horizontal da carga de tração;  $L$  - comprimento do vão;  $f$  - frequência;  $y_{max}$  - amplitude do anti-nó da onda de vibração. O índice  $a$  será usado para caracterizar qualquer grandeza relativa ao alumínio e o índice  $s$  para o aço.

## 3.0 - O MÉTODO DO BALANÇO DE POTÊNCIA (MBP)

### 3.1 Conceito

Este é o método normalmente, usado para calcular a intensidade de vibração. Ele é traduzido pela equação:

$$P_V = P_C + P_D \quad (3.1)$$

onde  $P_V$ ,  $P_C$  e  $P_D$  são as potências fornecida pelo vento ao cabo, dissipada pelo auto amortecimento do cabo e pelos dispositivos de dissipação de energia, eventualmente usados, respectivamente.

Como este modelo não reproduz todas as características do fenômeno, seus resultados são, assim, apenas uma aproximação da resposta do sistema. Entretanto, seus resultados podem ser considerados como o limite superior da intensidade da vibração esperada e podem ser usados, também, para estudos paramétricos de sensibilidade aos diversos parâmetros representados.

### 3.2 Potência Fornecida pelo Vento

Esta potência é determinada em túneis de vento, sendo ajustada uma equação aos valores medidos, da forma:

$$\frac{P_V}{L} = f^3 D^4 \text{func}(y_{max} / D) \quad (3.2)$$

Onde  $\text{func}(\cdot)$  representa uma função. A referência 2 apresenta as fórmulas mais usuais para este cálculo.

### 3.3 Potência Dissipada Pelo Cabo

#### 3.3.1 Expressão para Cálculo

A potência dissipada pelo cabo é devida ao atrito entre os fios, causado pela deformação do cabo em vibração. Esta potência é medida em laboratório, com o cabo vibrando em condições constantes e é calculada pela fórmula genérica 3.3 em função da carga de tração,  $T$  (7).

$$\frac{P_C}{L} = k \frac{y_{max}^l f^m}{T^n} \quad (3.3)$$

Os valores de  $l$ ,  $m$  e  $n$  variam com a fonte mas, infelizmente, os valores de  $k$  não são informados, ficando o uso da fórmula restrito ao grupo que a estabeleceu.

Considerando a fórmula apresentada por Claren e Diana (4):

$$\frac{P_C}{L} = \frac{\pi}{2} y_{max}^2 H \lambda^{-3} f \quad (3.4)$$

onde  $H = \text{func}(D, \sigma_a)$  é o parâmetro de auto-amortecimento do cabo, em joule, e é dado na referência 4. Substituindo

o comprimento de onda por:  $\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{T}{m}}$  (3.5)

podemos escrever  $\frac{P_C}{L} = \frac{\pi}{2} m^3 H \frac{y_{max}^2 f^4}{T^3} = k \frac{y_{max}^2 f^4}{T^3}$  (3.6)

Esta expressão está na forma genérica da expressão 3.3 e mostra que  $k$  é função das características do cabo, motivo pelo qual não pode ser dada uma expressão ou valor genérico.

### 3.3 Potência Dissipada Pelos Amortecedores

Neste informe não iremos abordar esta potência, tendo em vista que esta é uma característica específica de cada modelo e nosso objetivo é analisar aspectos genéricos.

## 4.0 - RESISTÊNCIA À FADIGA

O dano mais comum causado pelas vibrações eólicas é a falha por fadiga de fios dos cabos. Esta falha ocorre nos pontos onde existe uma restrição ao deslocamento vertical do condutor, causado pelas vibrações eólicas, como nos grampos de suspensão, grampos de amortecedores e espaçadores, etc.

A fadiga do condutor tem origem na flexão cíclica do mesmo, mas deve ficar claro que esta fadiga não é causada pela flexão. Ela é uma falha dos fios, devida aos micro deslizamentos, causados pela flexão do condutor, que ocorrem localmente em pontos de contato envolvidos ("fretting").

Para um dado sistema condutor-grampo existe, aparentemente, uma amplitude de flexão que, se não for excedida, poderá ser suportada quase indefinidamente. Esta amplitude é denominada "limite de resistência" (à fadiga) ou "endurance limit", no termo em inglês.

Como ainda não existe um modelo analítico que permita determinar o limite de resistência a partir das características do condutor, grampo, carga de tração etc, estes limites são determinados experimentalmente, em função de alguma medida da intensidade da vibração, uma vez que as tensões que causam a falha não são acessíveis para medição. Entre as possíveis medidas de intensidade de vibração, a TF B2.11.07 do CIGRÉ, adotou o produto  $f y_{max}$  para caracterizar o limite de resistência. Do ponto de vista de ensaios de laboratório, este parâmetro é adequado, pois ambas grandezas são medidas diretamente.

A Tabela 2 apresenta alguns valores de limite de resistência, de acordo com a referência 3.

TABELA 2 – Limites de Resistência

Limite De Resistência	Tipo do cabo				
	CA	CAL 6201	CAA		Aço
			Exceto 7/1	7/1	
$f y_{max}$ (mm/s)	128	87	118	149	385

## 5.0 - ESTABELECIMENTO DO CRITÉRIO H/w

### 5.1 Condutores Singelos Sem Proteção

Conforme definido no termo de referência mencionado no item 1.0 (1), o critério a ser definido deveria ser baseado na experiência (de campo) existente e nos conhecimentos sobre a energia fornecida pelo vento, energia dissipada e resistência à fadiga, conforme exposto nos itens 3.0 e 4.0.

A carga de tração foi escolhida como parte do critério, por ser o parâmetro de projeto com maior influenciância probabilidade de falha por fadiga, devido ao seu impacto sobre a potência dissipada pelo auto amortecimento, conforme fórmula 3.3.

Os resultados das pesquisas de campo, envolvendo o desempenho de LTs, foram ordenados em função do parâmetro H/w, para que a caracterização da ocorrência ou não de falhas por vibrações, ficasse independente das características do condutor, como diâmetro e massa. Como o valor de H varia com o tempo e com a temperatura, foi adotada a carga de tração inicial na temperatura média do mês mais frio do ano. A idéia básica é que, adotando como condição de partida para o cálculo este valor, a carga de tração não deveria superar mais a carga inicial, ao menos por longos períodos de tempo e, ao que parece, estaria implícito que a intensidade da vibração iria sendo reduzida com o passar do tempo, para as mesmas condições ambiente.

A Figura 1 apresenta, de forma qualitativa, em função da frequência, a variação da amplitude das vibrações, conforme calculada pelo MBP.

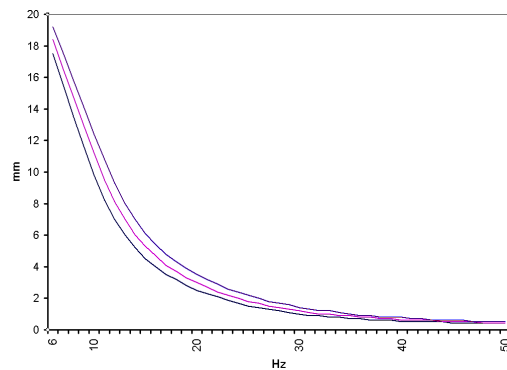


FIGURA 1 – Amplitude

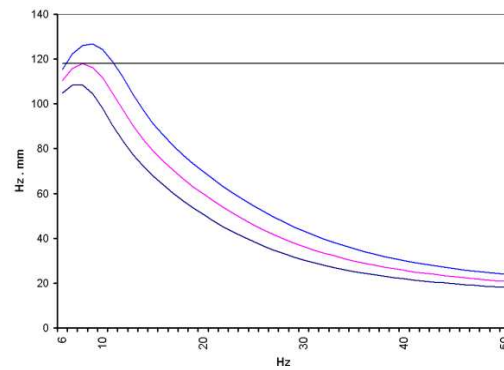


FIGURA 2 –  $f_{y_{max}}$

Da mesma forma, a Figura 2 apresenta a variação do parâmetro  $f_{y_{max}}$ . Cada curva corresponde a uma diferente carga de tração, crescente de baixo para cima. Nesta última figura está caracterizado o valor da carga de tração que corresponde ao limite definido de H/w (118 Hz.mm, no caso).

Os resultados de experiências de campo em vãos sem nenhum tipo de proteção foram usados para verificar os valores de H/w calculados pelo MBP, que correspondem ao limite de resistência do cabo considerado.

A Figura 3 apresenta os limites de H/w recomendados pelo CIGRÉ (1), para vãos sem e com amortecedores.

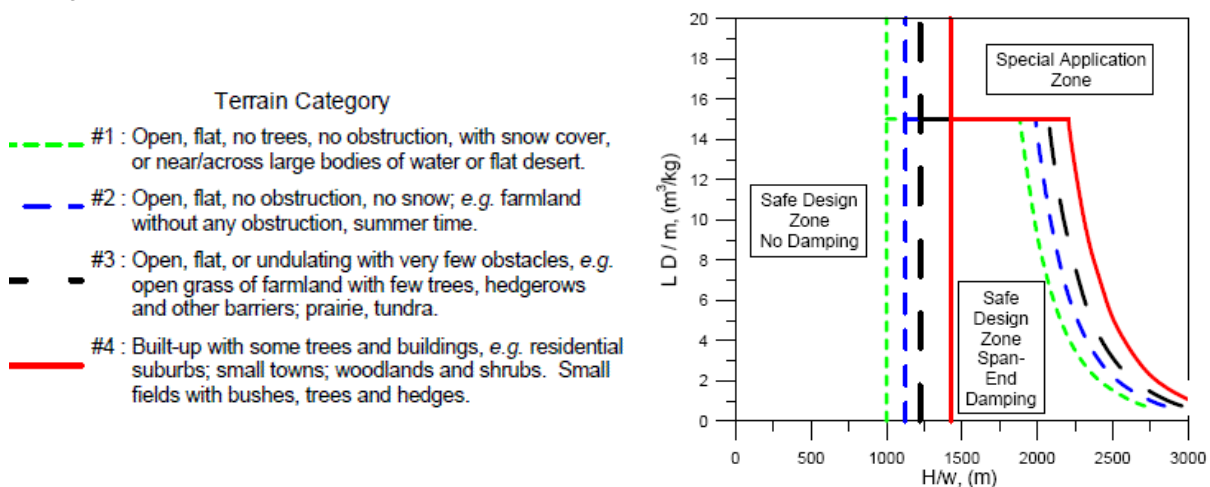


FIGURA 3 – Definição das Zonas de Aplicação de Amortecedores (1)

Os limites dados na Figura 3, para não utilização de amortecedores, correspondem a valores de H muito abaixo dos que hoje são usados nas LTs do Brasil, como por exemplo, 1000 para terrenos da categoria 1, justificando a prática usual do emprego de amortecedores Stockbridge.

## 5.2 Condutores Singelos Com Amortecedores Stockbridge

Neste caso, além de um parâmetro caracterizando a potência dissipada pelo cabo ( $H/w$ ), existe a necessidade de um outro parâmetro, caracterizando o efeito dos amortecedores, para classificar os resultados da experiência de campo.

Na referência 6, é apresentado um estudo, a partir de dados de campo, com objetivo de identificar parâmetros que permitissem caracterizar LTs, com algum tipo de proteção, que apresentaram e não apresentaram danos devidos à vibrações eólicas. É intuitivo que o comprimento do vão e a carga de tração têm grande influência sobre a severidade das vibrações eólicas. Entretanto, o resultado de uma análise baseada nestes dois parâmetros se mostrou função das características dos cabos não sendo, portanto, genéricos.

Buscou-se, então, parâmetros que refletissem a mesma tendência à vibração que o tamanho do vão e a carga de tração, mas que fossem independentes das características do cabo. Na ocasião, o estudo contemplou apenas cabos CAA. No dizer dos autores, os parâmetros foram determinados, a partir de uma combinação de hipóteses, estudos empíricos e teoria, uma vez que não foi possível obter uma base puramente teórica.

O comprimento do vão está associado à potência fornecida pelo vento, que é influenciada, também, pelo diâmetro do cabo. Conforme mostrado nesta referência, o efeito do comprimento do vão, diâmetro, massa unitária e carga de tração, estaria refletido no parâmetro  $LD/Z_0$ , onde  $Z_0 = \sqrt{H/m}$ .

Este parâmetro está relacionado com os parâmetros adotados na figura 3 (1), conforme mostrado a seguir:

$$\frac{LD}{Z_0} = \frac{LD}{m} \times \frac{1}{\sqrt{9,81 \sqrt{H/w}}} \quad (5.1)$$

Para terreno da categoria 1, o limite de  $H/w$  para uma utilização normal de amortecedores é dado pela fórmula (1):

$$\frac{H}{w} = \frac{2615}{(LD/m)^{0,12}} \quad (5.2)$$

## 6.0 - INFLUÊNCIA DO CREEP

### 6.1 Geral

A redução da carga de tração do cabo devido ao creep tende a aumentar a potência dissipada, conforme se observa na expressão 3.3. Entretanto, existem indícios que, devido ao cabo se tornar "mais compacto" devido às deformações sofridas, o auto amortecimento tenderia a diminuir, devido à redução do deslizamento entre os fios, com o passar do tempo. Os dois efeitos tenderiam a se equilibrar, ao menos parcialmente. As informações que obtivemos na literatura a este respeito, são escassas e contraditórias.

Considerando a fórmula 3.4, não fica claro se a redução reportada da intensidade da vibração com o passar do tempo, é devida somente à redução da carga de tração, ou se é um efeito combinado das reduções da carga de tração e do parâmetro de auto amortecimento. Estes dois parâmetros têm efeitos contrários sobre o auto amortecimento.

Ensaio realizados numa linha experimental mostraram que cabos para-raios de aço zincado e alumoweld, que praticamente não sofrem o efeito do creep, apresentaram uma redução no auto amortecimento em serviço, por um fator da ordem de 8 (não foi informado depois de quanto tempo) (8). Por outro lado, de acordo com a referência 7 ensaios feitos com um cabo CAL, 402,92 mm<sup>2</sup> novo e um velho, não mostraram diferença no auto amortecimento.

Infelizmente, não foi caracterizado o que se entende por um cabo velho. Com relação a estes ensaios com cabos "velhos", deve ser observado que a deformação decorrente do rebobinamento ou enrolamento, para o transporte, de um cabo retirado de serviço, pode eliminar o efeito do tensionamento já ocorrido (8).

A Tabela 3 apresenta a variação da carga de tração, entre a condição de enflechamento e a condição final após o creep de 10 anos, de um cabo Drake, para diversos comprimentos de vão, considerando os limites de  $H/w$  para uma aplicação normal de amortecedores, calculados pela fórmula 5.2. Nesta tabela podemos observar que as tensões iniciais a 10°C variam bastante com o comprimento do vão mas os valores na temperatura inicial de enflechamento, de 22°C, variam menos. Por outro lado a influência do creep diminui com o aumento do vão.

TABELA 3 – Variação da carga de tração entre as condições inicial e final – Cabo Drake - Terreno Categoria 1

Vão	LD/m	H/w	H(10°C inicial)		H (22°C inicial)			$\epsilon_{ca}$	H (22°C final)			$\epsilon_{ca}$
m	m <sup>3</sup> /kg	m	N	%R	N	%H <sub>10</sub>	%R	µm/m	N	%H <sub>22</sub>	%R	µm/m
100	1,73	2449,0	39127	27,9	33996	86,9	24,26	218,4	23630	69,51	16,86	525,1
300	5,21	2146,4	34292	24,5	31908	93,1	22,77	201,4	27210	79,07	19,35	882,0
500	8,69	2018,9	32225	23,0	31208	96,8	22,27	196,1	28856	92,47	20,59	949,9

NOTA: %R= percent. da carga de ruptura; %H<sub>xx</sub>=percent. do valor de H na temperatura xx;  $\epsilon_{ca}$ = creep do Al

Considerando a fórmula 3.4, e os dados da Tabela 3, vemos que, somente o efeito da redução da carga de tração entre a condição inicial e a final, seria de um aumento de 26,4% na potência dissipada, para o vão de 500 m  $((1/(0,9247)^3 - 1) \times 100)$  e de 102% para o vão de 300 m. Ou seja, o aumento da energia dissipada com o passar do tempo é maior para os vãos menores, o que facilitaria a proteção destes vãos.

Para o vão de 500 m, uma redução do parâmetro de auto amortecimento da ordem de 25%, entre 5 e 10 anos, compensará o efeito da redução da carga de tração e não haverá a esperada redução da intensidade das vibrações. Se esta redução for maior ainda, poderemos ter um aumento desta intensidade.

## 6.2 Efeito Sobre o Pretensionamento

A Tabela 4 apresenta o comportamento calculado de um cabo Drake considerando o pretensionamento. É admitido que o cabo está encabeçado numa extremidade do vão e passando sobre uma roldana na outra, até o tensionador, de modo que a tração máxima de 30% da carga de ruptura é mantida constante no vão durante 24 h, pelo ajuste contínuo desde equipamento. Para o enflechamento foi considerado o mesmo valor de H/w a 10°C da tabela 3.

TABELA 4 – Efeito Sobre o Pretensionamento – Cabo Drake

Vão	Ao Fim do Pretensionamento				Enflechamento			Final – Creep 10 anos – 22°C				
	Tração Máx.		T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	ε <sub>c</sub> / ε <sub>g</sub>	H/w	H <sub>22</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	Tração			T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	ε <sub>c</sub> / ε <sub>g</sub>
m	N	%R	N	µm/m	m	N	N	N	%R	% H <sub>22</sub>	N	µm/m
300	42044	30	19981	485,0	2146,4	31816	15935	28529	21,4	89,7	9268	891,7
			19533	402,5			17851				20698	402,5
500			20582	496,2	2018,9	31245	14418	29666	22,3	95,0	9333	934,1
							19946				401,7	16912

NOTA:  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_g$  - Deformações totais do Al ao fim do período indicado; % H<sub>22</sub> – porcentagem do valor inicial a 22°C

Nesta tabela foram incluídas as trações médias, T<sub>a</sub> e T<sub>s</sub>, do alumínio e do aço, respectivamente, e os alongamentos geométrico e creep do alumínio, para permitir a visualização de suas alterações nas três etapas.

Comparando os valores das Tabelas 3 e 4, vemos que, devido ao elevado creep inicial, o aumento do creep após o pretensionamento é da ordem de 60% do aumento do creep, para o caso sem pretensionamento. Com isto, a redução da tração após o enflechamento é menor para o cabo pretensionado, sendo o efeito maior para o menor vão. Por exemplo, para o vão de 500 m, a tração final para o cabo pretensionado é de 95,0 % da tração de enflechamento a 22°C, enquanto que no caso da Tabela 3, esta porcentagem é de 92,47 %. Como consequência, a eventual redução do parâmetro de auto amortecimento será mais crítica para o cabo pretensionado.

Os cálculos mostram que, para os dois vãos, o creep ocorrido durante o pretensionamento considerado, corresponde ao creep que ocorreria em um período da ordem de 15 dias, sem o pretensionamento.

## 6.3 Efeito Sobre o Retracionamento

Devido à dificuldade crescente de construção de novas LTs, principalmente nas proximidades de centros urbanos tem ocorrido a necessidade de retracionar os condutores de LTs existentes para aumentar a potência transportada.

A Tabela 5 apresenta duas situações de retracionamento com um cabo Drake, com EDS de 18%, que seria um valor típico de uma LT antiga a ser retracionada hoje. O retracionamento foi feito para a mesma carga de tração da condição inicial, motivo pelo qual ela não está indicada na tabela. A condição final 1 corresponde ao creep de 10 anos após a condição inicial de enflechamento. A condição final 2 corresponde ao creep de 10 anos após o retracionamento.

TABELA 5 - Variação das Tensões Com o Retracionamento – Cabo Drake

Vão	Condição Inicial			Condição Final 1			Retracionamento		Condição Final 2			
	H <sub>22</sub>		T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	Tração		T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	f <sub>60</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	f <sub>75</sub>	H <sub>22</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>s</sub>	f <sub>75</sub>
m	N	%R	N	N	%R	N	m	N	m	N	N	m
300	28.757	20,52	15.957	25.229	18	8.266	8,54	10.71745	8,31	27.838,8	8858,4	8,49
			12.833			16.998		18.076,9			19.014,7	
500	26.585	18,97	14.788			8.439	21,5	9.380,3	21,2	26.380,1	8.457,2	21,3
			11.898			16.894		17.307,8			18.023,9	

NOTA: H<sub>22</sub>: Tração horizontal a 22°C; T<sub>a</sub>, T<sub>s</sub>: trações médias no alumínio e na alma; f<sub>xx</sub>: flecha na temper. xx

Na Tabela 5 podemos observar a distribuição da carga de tração entre a coroa de alumínio e a alma de aço, nas diversas etapas. Observa-se que, embora a tração de retracionamento seja igual à tração inicial, dada na segunda coluna da tabela, a tração suportada pela coroa de alumínio é substancialmente reduzida e, com isto, o creep daí em diante é pequeno. Neste caso, a redução da carga de tração após o retracionamento, será pequena e seu efeito sobre o aumento da potência dissipada seria muito pequeno. Também neste caso, a eventual redução do parâmetro de auto amortecimento, principalmente após o retracionamento, poderá ser crítica.

Nesta tabela pode ser visto que, nas condições de retracionamento adotadas, a flecha final a 75°C após o retracionamento é, praticamente, igual a flecha a 60°C, antes do retracionamento.

## 7.0 - CRÍTICAS AO CRITÉRIO H/w

Comentamos a seguir algumas críticas feitas ao critério H/w:

a) Admitindo que a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do alumínio é igual a 3, a tensão nos fios de alumínio seria calculada pela fórmula abaixo (fórmula 2.3.8 da referência 2):

$$\sigma_a = \frac{H}{S_a + 3S_s} \quad (7.1)$$

Como a relação entre as massas específicas do aço e do alumínio é igual a 3, o peso unitário do cabo seria:

$$w = g\mu_a(S_a + 3S_s) \quad (7.2) \quad \text{donde obtemos} \quad \sigma_a = g\mu_a \frac{H}{w} \quad (7.3)$$

A justificativa inicial para a utilização deste parâmetro como critério, era esta proporcionalidade entre a tensão nos fios de alumínio e H/w. Entretanto, a relação 7.3 somente é válida se forem desprezados todos os alongamentos não elásticos (geométrico, creep) sofridos pelo cabo. Além disso, na condição inicial, a relação entre os módulos de elasticidade é da ordem de 4,7 e não 3.

Este fato já foi apontado como uma falha do critério H/w (5), já que a relação 7.3 não é verdadeira.. Entretanto, na apresentação final do critério, na referência 1, esta proporcionalidade não é considerada. O critério é baseado no MBP e na experiência de campo. Ou seja, esta crítica não deve ser considerada como uma falha do critério H/w.

b) Este critério estabelece os mesmos limites de H/w para cabos feitos com fios de alumínio (CA, CAA) e cabos feitos com fios de liga de alumínio (CAL, CAAL), embora os limites de resistência à fadiga dos fios de liga sejam bastante inferiores.

A justificativa apresentada na Brochura 273 (1) é que, embora os ensaios de laboratório indiquem essa menor resistência à fadiga (ver Tabela 2), não existe experiência de campo suficiente para estabelecer um limite diferente.

Conforme vimos no item 5.0, o método usado para estabelecer os limites de H/w leva em conta o limite de resistência à fadiga. Assim sendo, com base no método do balanço de potência, esta crítica parece ter fundamento. Entretanto, se fosse recomendado um valor menor de H/w para cabos CAL, as trações resultantes, em porcentagem da carga de ruptura seriam ainda menores que as atualmente calculadas, o que desagradaria ainda mais os críticos que alegam que o método H/w restringe a aplicação dos cabos CAL (ver item 8.0).

c) Pelo fato que, projetos recentes de longas linhas de CC no Brasil usaram cabos de alumínio simples (CA), tem sido questionado que a alma de aço, usada com objetivo de aumentar a segurança seria, na realidade prejudicial.

No nosso ponto de vista, o objetivo da alma de aço seria o de aumentar a resistência à tração, com o resultado colateral de reduzir as flechas em altas temperaturas.



Neste caso, o primeiro ponto a definir seria qual a resistência à tração que seria necessária. No Brasil, as cargas máximas de trabalho calculadas, são devidas ao vento, que têm duração relativamente pequena e que, normalmente, não ultrapassam 60% da carga de ruptura. Esta porcentagem da carga de ruptura é da mesma ordem da porcentagem admitida para os isoladores e ferragens e bem menor que a admitida para as estruturas.

O aumento da segurança proporcionado pela alma de aço seria, então, com relação à eventual ruptura de um número considerável de fios de alumínio, devido às vibrações eólicas. Sob este ponto de vista, podemos argumentar que esta proteção deve ser proporcionada por amortecedores ou espaçadores-amortecedores. A eventual ruptura de um cabo sem alma de aço por vibrações eólicas, além de rara, indicaria deficiência na proteção contra vibrações eólicas, e não uma deficiência do cabo.

d) Outra crítica na mesma linha da anterior é que, nas comparações econômicas para os grandes projetos, os cabos CAA estão sendo preteridos pelos cabos CA.

Com relação a esta crítica, somente podemos argumentar que, devido ao comprimento das LTs e volume de recursos envolvidos nestes projetos, o fator econômico é primordial. Estas LTs têm duas características particulares que facilitaram a utilização de cabos CA: a) o campo elétrico superficial (efeito corona e suas consequências) não é um fator limitante devido ao grande diâmetro dos cabos (LTs do Madeira) ou ao feixe de seis condutores (Belo Monte); b) a temperatura máxima de operação é da ordem de 50°C.

Estudos econômicos realizados para LTs convencionais, onde o campo elétrico superficial e seus efeitos são limitante se as temperaturas de operação são maiores, resultaram na escolha de cabos CAA.

e) Finalmente, tem sido argumentado que o critério H/w carece de uma comprovação em laboratório. De acordo com o que foi apresentado acima, podemos concluir que um dado cabo, com um certo valor de H/w, poderá ter diferentes comportamentos em operação, em função do comprimento do vão, da cobertura do terreno do regime de ventos, do tempo em operação e do sistema de amortecimento usado.

Assim sendo, a comprovação deste critério não poderá ser feita em laboratório pela realização de ensaios de fadiga com tração e solitação constante no ponto de fixação. Na realidade, os ensaios de fadiga realizados nestas condições são usados para definição do limite de resistência do cabo, que é, então, usado para definir o valor limite de H/w, conforme mostrado na Figura 2.

## 8.0 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS H/w E EDS

Considerando que os limites de H/w sem a utilização de amortecedores são muito baixos, a comparação em questão será feita considerando os limites para uma aplicação normal de amortecedores Stockbridge.

Na Tabela 3 (item 6.1), as cargas de tração finais em porcentagem da carga de ruptura, dadas na última coluna, são os valores de EDS correspondentes aos valores de H/w indicados.

Conforme pode ser observado, os valores de EDS para os vãos de 300 m e 500 m, estão de acordo com os valores utilizados atualmente. Para os vãos menores, a limitação da carga de tração já é usual.

Podemos concluir que, no caso presente, o critério H/w não impõe uma restrição à utilização do cabo Drake.

A Tabela 6 é similar à Tabela 3, apresentando os dados para o cabo CAL Flint e para um cabo CA que tem a mesma formação (número e diâmetro dos fios) que o cabo Flint. A carga de ruptura calculada para este cabo fictício é de 6095 kgf. Nesta tabela podemos observar, também, a grande variação com o comprimento do vão, das tensões iniciais a 10°C e de EDS.

TABELA 6 – Comparação entre H/w e EDS – Cabo CAL e Cabo CA – Terreno Categoria 1

Dados		Critério			Cabo CAL Flint				Cabo CA			
Vão	H/w	H (10°C inicial)			H (22°C inic.)		EDS (*)		H (22°C inic.)		EDS (*)	
m	m	N	%R CAL	%R CA	N	%R	N	%R	N	%R	N	%R
100	2349,2	23735	21,91	39,93	19218	17,74	13930	12,86	20228	33,83	12056	20,28
300	2059,1	21426	19,78	36,05	18963	17,50	16667	12,44	19130	31,99	14901	24,92
500	1936,6	19566	18,06	32,92	18786	17,34	17668	16,31	18816	31,66	16412	27,61

%R = porcentagem da carga de ruptura; H= compon. horiz. da carga de tração (\*) Final, creep de 10 anos, 22°C



Considerando os limites de  $H/w$ , os valores resultantes de EDS para o cabo CAL são bem menores que os que foram usados em LTs no Brasil. A utilização de maiores cargas de tração exigiria cuidados especiais na definição da proteção contra vibrações eólicas, de acordo com o critério  $H/w$ .

Por outro lado, o valor resultante de EDS para o cabo CA, num vão de 500 m, é maior que o utilizado em projetos recentes e definidos por critérios econômicos.

Com relação aos valores de EDS dados na Tabela 1, os valores resultantes de EDS da Tabela 6, são menores para o cabo CAL e maiores para o cabo CA.

Observamos que a NBR 5422 estabelece que a carga de tração inicial na temperatura mínima, não deve ultrapassar 33% da carga de ruptura, para qualquer tipo de cabo. Esta limitação tem o objetivo de evitar danos por vibrações eólicas, mas não faz referência à utilização ou não de amortecedores. A Tabela 6 mostra que este valor poderá ser ultrapassado, no caso de cabos CA, quando são utilizados amortecedores Stockbridge. Considerando que os limites recomendados de  $H/w$  correspondem à diferentes porcentagens da carga de ruptura, na condição inicial, para diferentes tipos de cabo, esta limitação da Norma perde o sentido e, em nossa opinião, deve ser retirada numa futura revisão da mesma.

Deve ser observado que um dado valor de EDS produziria a mesma solicitação nos fios de alumínio de cabos com uma mesma formação. Entretanto, o parâmetro  $LD/m$  é, aproximadamente, inversamente proporcional ao diâmetro do cabo. Assim sendo, para um dado vão, de acordo com a fórmula 5.2, os limites de  $H/w$  são menores para os cabos de menor diâmetro e, portanto, as restrições no valor de EDS serão um pouco maiores para os cabos de menor diâmetro. Por exemplo, para um vão de 500 m, o valor de EDS para o cabo Drake é de 20,59% (Tabela 3) enquanto que para o cabo Linnet, no mesmo vão, ele seria de 18,65%.

Os resultados apresentados nas tabelas 3 e 6 mostram que, para um dado tipo de cabo (CAA, CA, CAL) e uma certa cobertura do terreno, com o método  $H/w$ , as trações limite recomendadas variam com as características específicas do cabo (massa, diâmetro), comprimento do vão e cobertura do terreno, resultando em diferentes valores finais após o creep, que corresponderiam a diferentes valores de EDS. Por outro lado, a tração de EDS só depende do tipo de cabo, o que é apontado como uma das falhas do critério (1,5).

## 9.0 - CONCLUSÃO

O critério  $H/w$  reflete o estado da arte do conhecimento sobre vibrações eólicas. Os limites definidos na referência 1, foram estabelecidos com base na experiência de campo e no método do balanço de potência. Entretanto, foram apontadas, no item 6, situações nas quais, aparentemente, não existem dados sobre o desempenho de linhas onde foi feito o pretensionamento e/ou retensionamento. Faltam, também, dados sobre a variação do auto amortecimento em função do tempo, devido ao creep e, eventualmente, devido ao efeito da poluição atmosférica, para aplicação do método do balanço de potência.

As comparações feitas no item 8.0 entre os critérios  $H/w$  e EDS, mostram claramente que não é possível definir um único valor de porcentagem da carga de ruptura, para um dado tipo de cabo, que cubra todas as diferenças entre características do cabo, comprimento do vão e cobertura do terreno. Assim sendo, o critério do EDS deve ser abandonado.

## 10.0 - REFERÊNCIAS

- (1) CIGRÉ WG B2.11.04. Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibrations, Technical Brochure 273, June 2005.
- (2) EPRI – Transmission line reference book – Wind-induced conductor motion, Second Edition, 2009, Chapter 2 Aeolian Vibration.
- (3) Idem, Chapter 3 Fatigue of overhead conductors.
- (4) CLAREN,R; DIANA, G, TAVANO, F Proposal for calculating, on the basis of experimental results, the self-damping, CIGRÉ, 22-91 (WG11 – TF1) 8, September 1991.
- (5) BARRET,J.S., MOTLIS,Y Allowable tension levels for overhead-line conductors, IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib, Vol 148, No. 1, January 2001.
- (6) RAWLINS,C.B.; GREATHOUSE,K.R.; LARSON,R.E. Conductor vibration – A study of field experience, AIEE Paper No. CP61-1090, presented at the AIEE Fall Meeting, Detroit, MI, October15-20,1961.
- (7) TAVANO,F. Collection of experimental data on conductors self-damping, CIGRÉ, 22-91 (WG11 – TF1)7, September 1991.
- (8) RAWLINS,C.B. Research on vibration of overhead ground wires, IEEE Trans., Vol PWD 3, No. 2, April 1988.

**11.0 - DADOS BIOGRÁFICOS**

Afonso de Oliveira e Silva (17/03/1942, Vacaria, RS ) Engenheiro Civil e Eletricista, formado em 1965 na Escola de Engenharia da Universidade federal de Juiz de Fora. Pós Graduação em Sistema de Potência, EFEI 1973 e na COPPE UFRJ 1989/1990, também em Sistemas de Potência, especialização em Alta Tensão, ambos em nível de Mestrado. Trabalhou na CEMIG, PTEL, LIGHT, ENGERIO e atualmente trabalha em FURNAS na Divisão de Engenharia de Linhas de Transmissão. É Coordenador da Comissão de Estudo de revisão da NBR 5422.

