

# Perdas de linha de transmissão CA

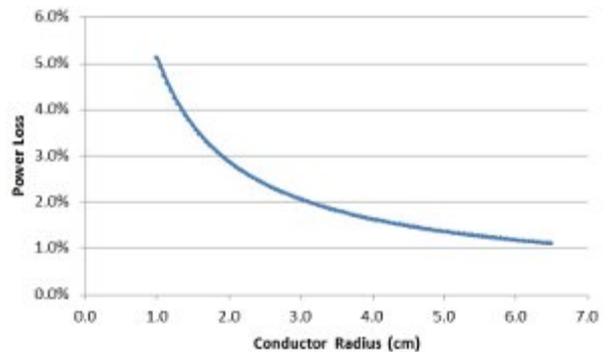
Curt Harting

24 de outubro de 2010

Submetido como curso para [Física 240](#), Universidade de Stanford, Outono de 2010

## Introdução

De acordo com o Departamento de Energia, a Califórnia perdeu cerca de  $19,7 \times 10^9$  kWh de energia elétrica através de transmissão / distribuição em 2008. [1] Este valor de perda de energia foi igual a 6,8% da quantidade total de eletricidade usada no estado durante esse ano. . No preço médio de varejo de US \$ 0,1248 / kWh em 2008, isso equivale a uma perda de cerca de US \$ 2,4 bilhões em eletricidade na Califórnia e uma perda de US \$ 24 bilhões em nível nacional. [1] Este relatório procura explicar e quantificar as duas principais fontes de perda nas linhas de transmissão CA de alta tensão: perda de resistência e perda de corona. O primeiro ocorre por causa da resistência não nula encontrada no metal do fio. A perda de corona é uma ionização do ar que ocorre quando os campos elétricos ao redor de um condutor excedem um valor específico.



**Fig. 1:** Perda Resistiva em uma linha de transmissão Al como uma função do raio como uma perda percentual acima de 1000 km.

## Perda Resistiva (Pele)

Embora os condutores em uma linha de transmissão tenham resistividade extremamente baixa, eles não são perfeitos. Esta seção procura quantificar essa perda através do cálculo dos fatores de profundidade da pele e atenuação de potência.

### Teoria

A quantidade de perda resistiva em um sistema pode ser encontrada estimada usando equações de linha de transmissão sem corona para encontrar a quantidade de energia fornecida a qualquer ponto ao longo do fio e subtraindo a quantidade inicial de energia. As equações para isso estão abaixo: [2]

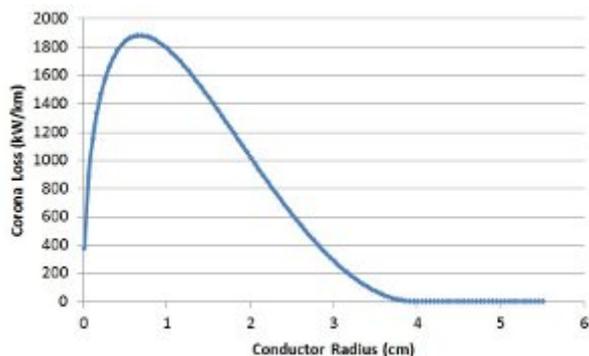
$$P(z) = P(0)e^{-2\alpha z} = P(0)e^{-zR_l/(Lc)}$$

$$P_{Rloss}(0 : z) = P(0) - P(z)$$

$$\%P_{Rloss} = \frac{P(0) - P(z)}{P(0)} = 1 - e^{-zR_l/(Lc)}$$

Na equação acima,  $c$  é a velocidade da luz e  $L$ , a indutância por unidade de comprimento da linha de transmissão é dada como:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$$



As equações para calcular  $R_1$ , a resistência por unidade de comprimento, podem ser mostradas abaixo. Ele inclui a fórmula para encontrar a profundidade da pele do fio ( $\delta$ ), que mostra a que distância do condutor 90% da energia é transportada pela corrente. [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

$$R_l = \frac{I_B}{2\pi a \sigma \delta}$$

**Fig. 2:** Perda de corona em quilowatts perdidos por quilômetro de fio em função do raio. Uma linha de transmissão de 765kV em fase A1 3 e a fórmula de Peek foram usadas para gerar este gráfico.

$I_B$  nesta equação é o fator de correção encontrado usando as duas primeiras funções de Bessel I.

Usando as equações acima, a quantidade total de energia perdida devido à resistência é igual à potência a uma determinada distância menos a potência inicial. Como o valor da perda como uma porcentagem é um valor fixo, independentemente da potência inicial, os resultados listados são gravados como uma porcentagem da potência total. Os parâmetros listados acima e os resumos dos resultados dessas equações podem ser encontrados na Tabela 1. Nela, há perdas estimadas de uma linha de energia típica dos EUA feita de alumínio (Caso 1), uma linha de energia européia a 50 Hz (Caso 2) e uma linha feita de prata (caso 3). Uma comparação dos casos 1 e 3 mostra que construir um cabo de transmissão longo pode economizar em perda de resistência (cerca de US \$ 19 milhões por ano), mas custaria muito mais para construir (US \$ 18,5 bilhões) a preços de mercado de 2010.

Parâmetro		Caso 1	Caso 2	Caso 3
d	Separação de Linha	10 m		
uma	Raio do Condutor	0,015 m		
eu	Indutância por metro	2,6μH / m		
f	Frequência	60 Hz	50 Hz	60 Hz
σ	Condutividade do Metal	$3,82 \times 10^7$ S / m (Al)	$3,82 \times 10^7$ S / m	$6,17 \times 10^7$ S / m (Ag)
$I_B$	Fator de correção de Bessel	1,1	1,1	1,1
δ	Profundidade Da Pele	10,5 mm	11,5 mm	8,3 mm
$R_1$	Resistência por metro	29,1 μ / m	26,5 μ / m	22,9 μ / m
α	fator de atenuação	$18,6 \times 10^{-9}$ / m	$17,0 \times 10^{-9}$ / m	$14,7 \times 10^{-9}$ / m

$\mu_0$	Permeabilidade do espaço livre	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$		
c	Velocidade da luz	$3 \times 10^8 \text{ m / seg}$		
% P <sub>Rloss</sub> (1km)		37,2 ppm	34,0 ppm	29,3 ppm
% P <sub>Rloss</sub> (1000 km)		3,66%	3,34%	2,89%

**Tabela 1:** Valores de perda resistiva usando parâmetros de amostra e as fórmulas listadas acima.

## Valores medidos

Em um artigo da American Electric Power (AEP) publicado em 1969, os autores estimam que a quantidade de perda de energia de efeitos não baseados em corona é de cerca de 4MW ao longo de 100 milhas em um sistema de transmissão de 1GW. [7] Convertendo para unidades métricas, isso dá uma perda de cerca de 25MW ou 2,5% ao longo de uma linha de transmissão de 1000km. Este número é consistente com a perda resistiva dada em um relatório contemporâneo, auto-publicado pela AEP. [11] Neste relatório, a perda resistiva foi listada entre 3,1MW / 100 milhas e 4,4MW / 100 milhas, dependendo da configuração da fiação. Isso corresponde a uma perda de energia entre 1,9% e 2,8%, acima de 1000 km.

## Perda de corona

A perda de corona é o outro tipo importante de perda de energia nas linhas de transmissão. Essencialmente, a perda de corona é causada pela ionização de moléculas de ar próximas aos condutores da linha de transmissão. Essas coronas não faiscam nas linhas, mas carregam a corrente (daí a perda) no ar ao longo do fio. A descarga de corona em linhas de transmissão pode levar a ruídos de assobio / cacarejar, um brilho e o cheiro de ozônio (gerado a partir da quebra e recombinação de O<sub>2</sub> moléculas). A cor e a distribuição deste brilho dependem da fase do sinal AC em qualquer momento no tempo. Coronas positivas são lisas e de cor azul, enquanto coronas negativas são vermelhas e irregulares. [5] A perda de corona ocorre apenas quando a tensão linha a linha excede o limite de corona. Ao contrário da perda resistiva, em que a quantidade de energia perdida era uma porcentagem fixa de entrada, a porcentagem de energia perdida devido à corona é uma função da tensão do sinal. As perdas de energia de descarga de corona também são altamente dependentes do clima e da temperatura.

## Teoria

A equação do fator corona foi empiricamente derivada por FW Peek e publicada em 1911. [4] Em uma publicação posterior, ele modificou a equação original e mostrou que a quantidade total de perda de energia em um fio devido ao efeito de coroa foi igual à equação abaixo: [5]

$$P = \frac{k_0}{k_d} (f + 25) \sqrt{\frac{a}{d}} [V_0 - g_0 k_i a k_d \ln\left(\frac{d}{a}\right)]^2 \times 10^{-5} \text{ kW/km}$$

Para exemplos desses valores e seus significados, consulte a Tabela 2.

Parâmetro		Valor da amostra
$k_0$	Constante fixa	241
$g_0$	Gradiente disruptivo no ar	21,1 kv / cm
$k_d$	Fator 1 de densidade do ar normalizado (25 ° C, 76 cm de pressão)	1
$r_a$	Raio de Condutor	3,5 cm (ver Fig. 2)
$d$	Espaçamento do condutor	1000 cm
$f$	Frequência	60 Hz
$k_i$	Fator De Irregularidade De Arame	0,95 (fios desgastados)
$V_0$	Tensão de linha para neutro (1 / 1,73 x tensão entre condutores)	442 kV (765 kV / 1,73)
	Tensão Crítica Disruptiva ( $g_0 k_i a k_d \ln(d/a)$ )	397 kv
	Perda de Corona kW / km / linha	25kW / km
	% De perda de corona (linha de 1000 km a 2,25 GW)	3,3%

**Tabela 2:** Cálculo da perda de corona de amostra com base na fórmula de Peek.

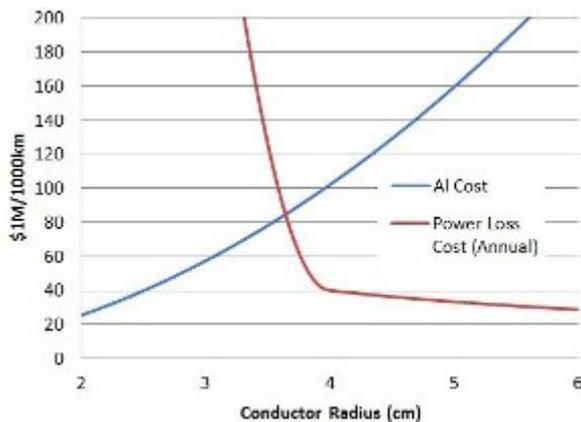
Como pode ser visto na Fig. 2, o raio do condutor tem um grande efeito na quantidade total de perda de corona. Uma maneira de obter linhas com um raio efetivo maior é através do uso de pacotes, onde 2-6 linhas separadas, mas fechadas, são mantidas na mesma voltagem através de conectores intermitentes. Isso reduz a quantidade de metal necessária para atingir um determinado raio e perda de corona. Cálculos transitórios da perda de corona podem ser encontrados na referência [10].

## Valores medidos

Na referência [6], os autores mediram a perda de corona de uma linha de transmissão de 765kV, 3 fases e agrupada como sendo cerca de 1,87kW / km em clima agradável. Isso equivale a apenas cerca de 0,083% de perda em uma linha de 1000 km. No mau tempo, no entanto, os autores mediram a perda em 84,3kW / km, ou cerca de 3,7% de perda. Usando esses números e o preço médio da eletricidade, um dia de chuva em um trecho de 100 km de fios de 765kV custa uma empresa de eletricidade de cerca de US \$ 25.000.

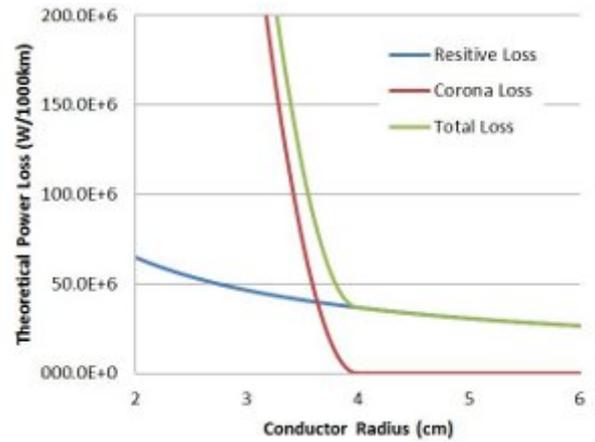
Olhando para tensões superiores a 765kV, o Instituto de Pesquisa Hydro-Quebec mediu a quantidade de perda de corona em tensões de até 1200 kV. [8] Eles descobriram que a perda de corona dos feixes de 6 e 8 condutores era de 22,7 kW / km e 6,2 kW / km, respectivamente. Estes números foram medidos em "chuva artificial pesada". As discrepâncias entre [6] e [8] provavelmente se originaram de diferentes raios e espaçamento entre condutores.

Finalmente, pesquisas na Finlândia mediram a quantidade de perda de corona em linhas de transmissão sob condições de geada. [9] Este artigo também mostra a grande redução na perda de corona dos fios de empacotamento: cerca de 2,5-5x para cada condutor adicionado entre 1-3. Sob condições de geada, eles mostram que a perda das linhas é de cerca de 21 kW para um feixe de 2 condutores de uma linha de transmissão trifásica de 400kV.



**Fig. 4:** Custo de uma linha de transmissão de 2,25 GWm em 3 fases de 765 kV em função do raio. O custo de uma linha de transmissão foi encontrado tomando o volume total do fio e multiplicando pelo preço de mercado de 2010 do alumínio (US \$ 1,14 por libra).

a quantidade de perda diminui em torno de  $1/r$  (resistivo) e quadraticamente em 0 (corona). Fios maiores também geram um custo quadraticamente maior e, eventualmente, atingem um ponto de equilíbrio, em que os raios condutores maiores não fazem sentido financeiro. Deve-se notar que esta



**Fig. 3:** Perda total de uma linha de transmissão de 2,25 GWm em 3 fases de 765 kV em função do raio.

## Resumo

Este relatório mostra como estimar as perdas corona e resistiva no fio e também dá resultados experimentais. A Fig. 3 fornece uma estimativa da quantidade total de perda em um sistema como uma função do raio do condutor. Olhando para essa figura, a quantidade de perda cai drasticamente conforme o raio do arame aumenta para cerca de 4cm. Se feito de metal sólido (como as fórmulas acima assumem), este seria um tamanho bastante pesado. Por causa disso, as empresas de linhas de energia agrupam linhas menores para manter os custos de construção e de perdas tão baixos quanto possível.

A Fig. 4 mostra a quantidade total de perda de potência teórica e o custo de uma linha de transmissão de alta tensão de 1000 km. À medida que o fio se torna maior,

figura (erroneamente) assume um fio sólido e homogêneo. As linhas de energia, além de serem empacotadas, também contêm um núcleo de aço mais barato no interior do fio. Isso ocorre porque uma vez passada a profundidade da pele no fio, onde 90% da energia é transportada, a resistividade do fio torna-se menos importante.

© 2010 C. Harting. O autor concede permissão para copiar, distribuir e exibir este trabalho de forma inalterada, com atribuição ao autor, apenas para fins não comerciais. Todos os outros direitos, incluindo direitos comerciais, são reservados ao autor.

## Referências

- [1] M. Bowles, " [State Electricity Profiles 2008](#) ," US Energy Information Administration, DOE / EIA 0348 (01) / 2, março de 2010.
- [2] W. Hayt e J. Buck, *Engineering Electromagnetics* (McGraw-Hill, 2006), págs 346, 486.
- [3] F. Rachidi e S. Tkachenko, *Interação do Campo Eletromagnético com Linhas de Transmissão da Teoria Clássica para Efeitos de Radiação de HF* (WIT Press, 2008).
- [4] FW Peek, "A Lei da Coroa e a Força Dielétrica do Ar", *Transactions of AIEE* **30** , 1889 (1911).
- [5] FW Peek, *Fenômenos Dielétricos em Engenharia de Alta Voltagem* (McGraw-Hill, 1929), pp 169-214.
- [6] N, Kolcio *et al.* , "Radio-Influence and Corona-Loss Aspects of AEP 765-kV Linhas" *IEEE Transactions on Power Apparatus e Systems* **PAS-88** , No.9, 1343 (1969).
- [7] GS Vassell e RM Maliszewski, "Sistema AEP 765-kV: Considerações de Planejamento do Sistema", *IEEE Transactions on Power Apparatus e Systems* **PAS-88** , 1320 (1969).
- [8] NG Trinh, PS Maruvada e B. Poirier, "Um Estudo Comparativo do Desempenho Corona de Conjuntos de Condutores para Linhas de Transmissão de 1200 kV," *IEEE Transactions on Power Apparatus e Systems* **PAS-93** , 940 (1974).
- [9] K. Lahti, M. Lahtinen e K. Nousiainen, "Transmission Line Corona Losses Under Hoar Frost", *IEEE Transactions on Power Delivery* **12** , 928 (1997).
- [10] X. Li, O. Malik e Z. Zhao, "Computação de transmissões da linha de transmissão, incluindo Corona Effects", *IEEE Transactions on Power Delivery* **4** , 1816 (1989).
- [11] " [Fatos da Transmissão](#) ", American Electric Power.