

PERDAS POR EFEITO PELICULAR NAS LINHAS AÉREAS DE CORRENTE ALTERNADA

(Manuel Bolotinha ^{*i)})

1. INTRODUÇÃO

Para além das *perdas por efeito de Joule* ($P = RI^2$) devido à *resistência do condutor em corrente contínua*, das *perdas por efeito de coroa*, que dependem, entre outros factores da frequência da rede e das condições atmosféricas, e das *perdas por efeito de proximidade* (dos condutores), as *linhas aéreas de corrente alternada* têm também **perdas devidas ao efeito pelicular**, que são o objecto deste artigo.

Esta questão do **efeito pelicular** já tinha sido referida no *Capítulo 2* do artigo *Efeito de Coroa em Alta e Muito Alta Tensão*, como sendo **um dos factores que influenciam o efeito de coroa**.

As *perdas por efeito pelicular* resultam do **aumento da resistência** dos condutores da linha; este aumento de resistência é também influenciado pelo *efeito de proximidade*, tópico que será abordado noutro artigo.

Consequentemente o *aumento da resistência dos condutores* origina **um aumento das perdas por efeito de Joule**.

2. O QUE É O EFEITO PELICULAR

O **efeito pelicular** é um fenómeno que se verifica em **corrente alternada** (ca), em que a **densidade de corrente** é *maior junto à superfície do condutor* do que no seu interior.

Analise-se as Figura 1.a e 1.b.

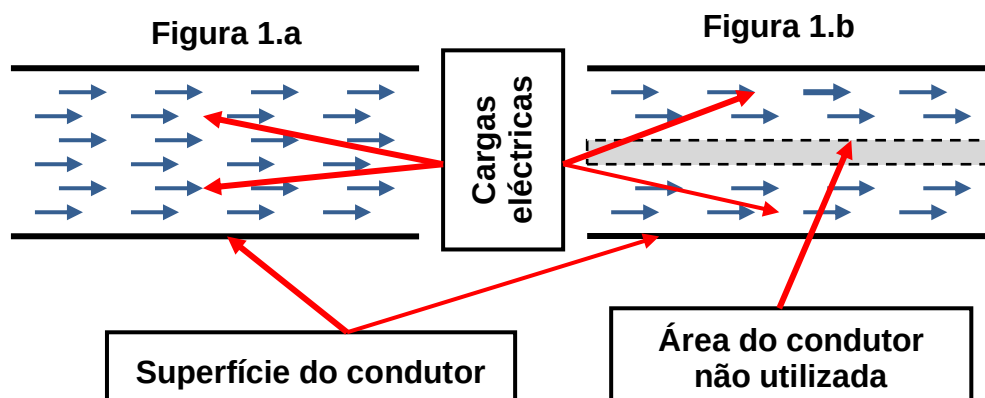


Figura 1 – Movimento das cargas eléctricas

Na Figura 1.a as *cargas eléctricas* movem-se **utilizando toda a área interior do condutor**, podendo-se afirmar que o condutor é **eficientemente utilizado**. Em contrapartida, na Figura 1.b, verifica-se que as *cargas eléctricas* **não utilizam toda a área disponível** do condutor, originando o fenómeno designado por **efeito pelicular**.

Este efeito resulta das **correntes induzidas** (ou de **Foucault**) devidas à **variação do campo magnético** e que se **opõem à corrente do circuito (lei de Lenz)**.

A **corrente eléctrica** flui principalmente junto à **superfície do condutor** e o seu **fluxo é menor nas camadas interiores**, designando-se a parte do condutor em que a corrente eléctrica circula por **profundidade de penetração (δ)**, o que se ilustra na Figura 2.

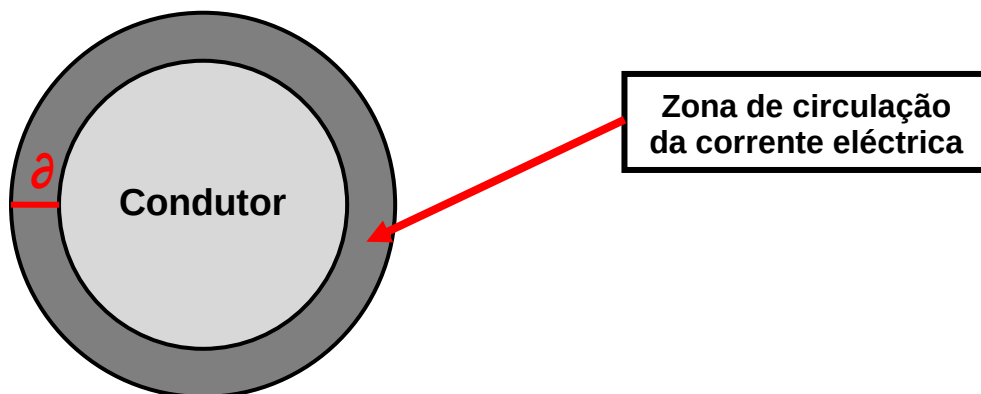


Figura 2 – Representação do efeito pelicular num condutor e respectiva profundidade de penetração

A consequência directa e mais relevante do efeito pelicular é a **diminuição da secção útil do condutor** a que corresponde a **um aumento da sua resistência** e das **perdas por efeito de Joule**.

3. RESISTÊNCIA E PERDAS NUM CONDUTOR EM CORRENTE ALTERNADA

Em *corrente contínua*, a **resistência** de um condutor é calculada pela expressão:

$$R_{cc} [\Omega] = \rho \times l/s \quad [1]$$

Onde:

- ρ – resistividade do material do condutor [$\Omega\text{km}/\text{mm}^2$]
- l – comprimento do condutor [km]
- s – secção do condutor [mm^2]

$$s_u [\text{mm}^2] = \pi d^2/4 - \pi(d-\delta)^2/4 \quad [2]$$

Sendo I [A] a *corrente nominal da instalação*, a *potência de perdas (P_p)* no condutor por *efeito de Joule* são calculadas pela expressão:

$$P_p [\text{W}] = RI^2 \quad [3]$$

Considerando o *comprimento do condutor unitário* ($l = 1 \text{ km}$), a **resistência unitária em corrente contínua (R'_{cc})** será:

$$R'_{cc} = \rho/s \quad [4]$$

Veja-se agora a situação em *corrente alternada*, tendo em atenção o *efeito pelicular*.

Sendo d o *diâmetro do condutor* e δ a *profundidade de penetração*, a **secção útil do condutor** é

$$s_u [\text{mm}^2] = \pi d^2/4 - \pi(d-\delta)^2/4 \quad [5]$$

Considerando o comprimento do condutor unitário ($l = 1 \text{ km}$), a resistência unitária em corrente alternada (R'_{CA}) será:

$$R'_{CA} = \frac{\rho}{s_u} = \frac{\rho}{\pi \frac{d^2}{4} - \pi \frac{(d-\delta)^2}{4}} \quad [6]$$

Das expressões [4] e [6], obtém-se:

$$R'_{CA} = \frac{\pi d^2}{\pi d^2 - \pi (d-\delta)^2} \times R'_{CC} \quad [7]$$

Analise-se agora a determinação de δ . A profundidade de penetração depende de:

- Resistividade do condutor (ρ)
- Velocidade angular ($\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência [Hz])
- Permeabilidade relativa do condutor (μ_r [adimensional])

Fazendo:

- $\mu = \mu_r \times \mu_0$, onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ – henry por metro, ou seja $4\pi \times 10^{-4} \text{ H/km}$)

A profundidade de penetração é calculada pela expressão:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f\mu}} \quad [8]$$

Da expressão [7] conclui-se que $\frac{\pi d^2}{\pi d^2 - \pi (d-\delta)^2} > 1$, logo $R'_{CA} > R'_{CC}$.

Tendo em consideração o parágrafo anterior e a expressão [3] conclui-se que as perdas em corrente alternada são **maiores** que as perdas em corrente contínua, para o mesmo material (o valor de μ_r depende apenas do tipo de material do condutor) e a mesmo diâmetro exterior do condutor, isto é (para uma corrente I [A] por condutor):

$$P'_{CA} [\text{W/km}] = R'_{CA} I^2 > P'_{CC} [\text{W/km}] = R'_{CC} I^2 \quad [9]$$

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os exemplos serão apresentados para o cabo nu do tipo **AL-4** (antigo **ASTER**), habitualmente utilizado nas linhas aéreas e nos barramentos tendidos das subestações, como é o caso de Portugal. É um cabo em **liga de alumínio** com **condutores cableados concêntricos**, compostos por **uma ou mais camadas de fios de liga de alumínio**, de acordo com as Normas EN¹ 50182 e 50183.

Para este tipo de cabo os valores da resistividade e da permeabilidade relativa são:

- $\rho \approx 31,5 [\Omega/\text{mm}^2]/\text{km}$
- $\mu_r \approx 1,000022$, logo $\mu \approx 1,000022 \times 4\pi \times 10^{-4} \approx 0,00126 \text{ H/km}$

¹ EN: Normas Europeias.

Considerem-se os cabos **570AL-4** (ASTER 570) e **851AL-4** (ASTER 851) e ainda os cabos **117 AL-4** (ASTER 117) e **148AL-4** (ASTER 148), sendo os resultados apresentados na Tabela 1, para $f = 50$ Hz.

Tabela 1 – Variação da resistência em cabos do tipo AL-4 por efeito pelicular

Cabo tipo	d (mm)	R'_{cc} (Ω /km)	∂ (mm)	R'_{ca} (Ω /km)	Variação da resistência (%)
117-AL 4	14,0	0,2833	12,6	$\approx 0,2833$	0
148AL-4	15,8	0,2239	12,6	$\approx 0,2239$	0
570AL-4	31,1	0,0585	12,6	0,0818	+40
851AL-4	38,0	0,0394	12,6	0,0638	+62

Pode concluir-se que quanto maior for o diâmetro do cabo maior é o aumento da respectiva resistência e, conseqüentemente, maiores são as perdas por efeito pelicular.

¹O Autor **não** utiliza o Novo Acordo Ortográfico