

EFEITO DE COROA EM ALTA E MUITO ALTA TENSÃO

(Manuel Bolotinha ^{*i)})

1. O QUE É O EFEITO DE COROA

O **efeito de coroa** é o fenómeno que resulta de uma **descarga parcial** no ar (generalizando, em qualquer fluido) provocada pela ionização desse meio quando um condutor é percorrido pela corrente eléctrica e verifica-se quando o valor do **gradiente¹ do campo eléctrico** é suficiente para ionizar o meio, mas não para provocar a sua **ruptura dieléctrica²** ou um **arco eléctrico** entre os condutores. Este fenómeno verifica-se sobretudo quando a *distância entre condutores é grande quando comparada com o seu diâmetro*.

É habitual classificar o *efeito de coroa* como *positivo* ou *negativo*, de acordo com a *polaridade da tensão nos condutores encurvados* – **positivo** se a *curvatura do condutor é positiva relativamente a um condutor plano de referência* e **negativo** em caso contrário.

Este fenómeno apresenta-se normalmente em três formas distintas – em forma de **pluma**, quando o **gradiente do campo eléctrico** é cerca de **20 kV/mm**; em forma de **escova** para um **gradiente** de aproximadamente **25 kV**; em forma de **bolbo**, se o **gradiente do campo eléctrico** é cerca de **30 kV/mm**. Junto aos condutores e/ou isoladores uma *luminescência* (“clarão”) com uma cor no **espectro azul/violeta**, como se mostra na Figura 1.

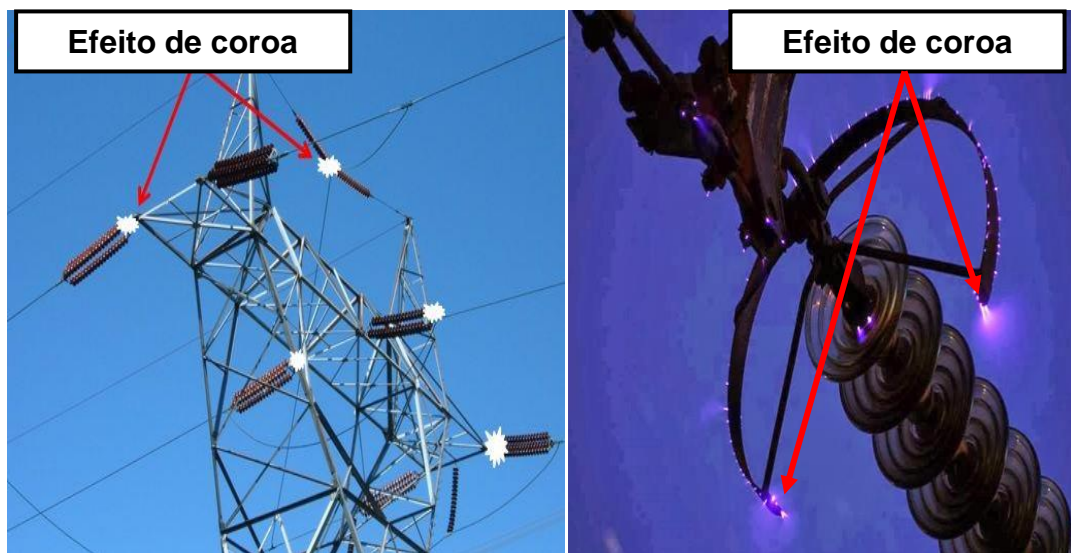


Figura 1 – Efeito de coroa

¹ O operador **gradiente** de um *campo escalar F* é um vector que indica o sentido e a direcção na qual, por deslocamento a partir de um ponto especificado, se obtém o maior aumento possível no valor desse campo.

² A **ruptura dieléctrica** de um material isolante acontece quando o valor do campo eléctrico a que ficam submetidos é muito intenso, tornando esses materiais condutores. Para o ar, essa ruptura ocorre para campos eléctricos da ordem de 3×10^6 V/m. Diz-se que, nestas circunstâncias, se dá uma **disrupção**.

Embora o **efeito de coroa** se verifique para *tensões iguais ou superiores a 30 kV*, é nas instalações de *Alta Tensão (AT)* e *Muito Alta Tensão (MAT)*³ que este fenómeno ocorre com mais frequência e apresenta maiores desvantagens, principalmente em *MAT*, mais habitualmente junto às **cadeias de isoladores** dos *postes das linhas aéreas* e dos *pórticos de amarração de linha das subestações*, e também junto às “cabeças” dos *Transformadores de Tensão (TT)* e dos *Descarregadores de Sobreensões (DST)*, vulgarmente conhecidos como *pára-raios* nas **subestações exteriores com isolamento no ar (AIS – Air Insulated Substations)**.

2. FACTORES QUE INFLUENCIAM O EFEITO DE COROA

A **amplitude do efeito de coroa** depende não só do **valor do campo eléctrico**, e *consequentemente da tensão da instalação*, mas também do **diâmetro dos condutores e do respectivo posicionamento relativo e distância, da altitude, das condições ambientais e atmosféricas e o estado dos condutores, isoladores, ligadores e outros acessórios**.

Como o *gradiente do campo eléctrico* é **maior na superfície de um condutor** (devido ao *efeito pelicular*⁴), os *condutores com diâmetro maior* têm na sua superfície um *gradiente do campo eléctrico menor* que os *condutores com um diâmetro inferior*, concluindo-se assim que *aqueles condutores* têm um **efeito de coroa mais baixo**.

Um *aumento da altitude* resulta numa **rarefação do ar** (menor densidade), o que **intensifica o efeito de coroa**. A *presença de poeiras, humidade, gotas de chuva, neve, nevoeiro, geada e condensações na superfície dos condutores* são *factores que contribuem para o aparecimento ou para o aumento do efeito de coroa*.

A *existência de zonas irregulares nos condutores e acessórios*, tais como **protuberâncias, pontos de desgaste mais pronunciado e arestas pontiagudas** provocam uma **concentração do campo eléctrico nesses pontos**, e *consequentemente um aumento do seu gradiente, constituindo também uma causa do efeito de coroa*.

3. CONSEQUÊNCIAS DO EFEITO DE COROA E PROTECÇÕES

O *efeito de coroa* tem *consequências prejudiciais* para **pessoas, instalações e sistemas** que se encontram na sua *vizinhança*, designadamente **rádio-interferência nos sistemas de telecomunicações**, e também para as próprias instalações em que é gerado.

Para as *pessoas*, para além do ruído produzido, que pode ser incómodo, as suas **consequências mais graves são a produção de ozono e óxido de azoto, gases nocivos não só para a saúde das pessoas, mas também dos animais. O efeito de coroa prejudica também o funcionamento dos pacemakers**.

Nas instalações onde se verifica o fenómeno há um **aumento das perdas nos condutores das linhas aéreas** (perdas essas que se dissipam em diversa formas –

³ AT: $60 \text{ kV} \leq U < 150 \text{ kV}$
MAT: $U \geq 150 \text{ kV}$

⁴ O **efeito pelicular** é um fenómeno que se caracteriza pela repulsão entre linhas de corrente electromagnética (*corrente alternada*), criando a tendência para que a corrente flua na superfície dos condutores.

calor, luz, som e reações químicas), *possibilidade de descargas electrostáticas entre condutores e entre condutores e partes metálicas normalmente sem tensão*, que podem dar origem a *arcos eléctricos*, e *consequentemente curto-circuitos e destruição dos isoladores e outros elementos constituintes da linha aérea*, e **diminuição da rigidez dieléctrica⁵ do isolamento dos equipamentos eléctricos** (geradores, transformadores, motores e baterias de condensadores).

O efeito de coroa pode ainda **induzir correntes em estruturas metálicas** que se encontrem na *vizinhança da linha aérea*, tais como **vedações, veículos e coberturas metálicas**. Essas correntes podem representar **perigo de choque eléctrico ou electrocussão para pessoas e animais**.

Contudo, o efeito de coroa **reduz os efeitos dos fenómenos transitórios que acontecem durante as descargas atmosféricas** e devido à *ionização do ar à volta de um condutor*, **aquele meio torna-se condutor**, aumentando virtualmente o diâmetro dos condutores, o que reduz o esforço electrostático entre os referidos condutores.

As linhas MAT e AT utilizam, nas cadeias de isoladores de suspensão e de amarração, **dispositivos em forma de anel** (ver Figura 2), de forma **toroidal**, vulgarmente conhecidos pela designação inglesa *corona rings*, para **dispersar as linhas de força do campo eléctrico e diminuir o gradiente de potencial para valores inferiores aos necessários para produzir o efeito de coroa**.

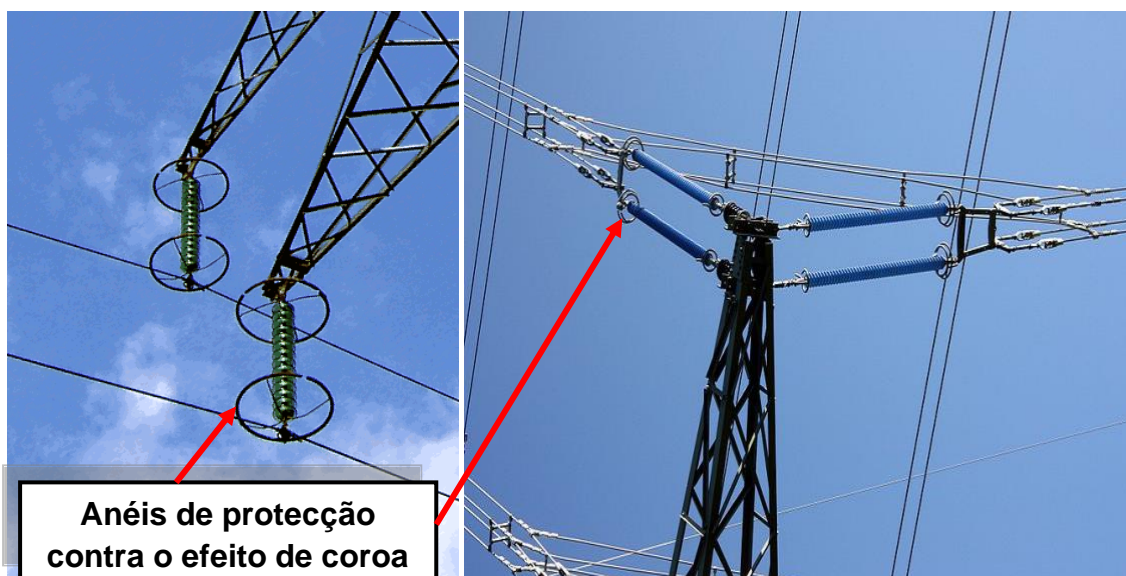


Figura 2 – Anéis de protecção contra o efeito de coroa em cadeias de suspensão (esquerda) e cadeias de amarração (direita)

Nos *TT* e *DST* das subestações do tipo *AIS* a solução é semelhante, como se ilustra na Figura 3.

⁵ Define-se **rigidez dieléctrica** como “a capacidade que um material isolante tem de suportar o campo eléctrico sem perda das suas características de isolante” (*ruptura dieléctrica*).

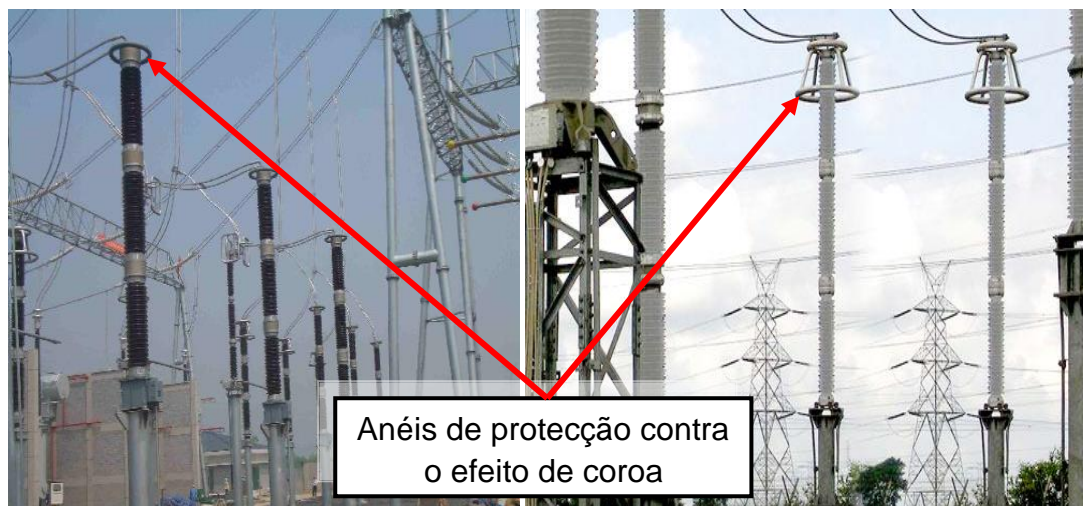


Figura 3 – Anéis de protecção contra o efeito de coroa em TTs (esquerda) e DSTs (direita)

Para além da utilização dos anéis e da regularização das superfícies, evitando ou minimizando pontos singulares, **outros métodos para minimizar as consequências do efeito de coroa** consistem em *aumentar o espaçamento entre condutores e o seu diâmetro*. A utilização destes métodos deve ser precedida de uma análise técnico-económica.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO EFEITO DE COROA

De uma forma geral para condutores paralelos no ar não se verifica o efeito de coroa quando:

$$D/r < 5,85$$

Onde **r** é o raio dos condutores e **D** a distância entre eles.

Define-se **tensão disruptiva crítica** como o menor valor da tensão entre fase e neutro (ou terra) para a qual se verifica o efeito de coroa. Sendo **r** [cm] o raio do condutor, **d** [cm] a distância entre o condutor e o neutro (ou a terra) e **U** [V] a tensão, a expressão geral do gradiente do campo eléctrico **E**, que designaremos por **G** (notação matemática – **grad E = ∇E**):

$$G = \frac{U}{r \times \ln \frac{d}{r}} \text{ [V/cm]}$$

Onde **ln** representa o logaritmo neperiano.

Para que se produza o efeito de coroa é necessário que **G** seja maior ou igual à *tensão de disrupção do ar*, que à *pressão atmosférica* ($1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}^6$) e à *temperatura de 25 °C*, vale **30 kV/cm** – considerando o *valor máximo de U* – ou **21,2 kV/cm** – considerando o *valor eficaz de U*.

⁶ Entre parêntesis estão indicadas *unidades de pressão*. **Pa**: Pascal – unidade de pressão do Sistema Internacional de Unidades (**SI**); **atm**: atmosfera; **mmHg**: milímetros de mercúrio.

Se designarmos por G_0 o valor de **grad E** que satisfaz à condição anterior, pode-se concluir que o **valor crítico da tensão de disrupção**, que designaremos por U_c , é calculado pela expressão:

$$U_c = G_0 \times r \times \ln \frac{d}{r} \text{ [kV/fase]}$$

Como foi referido anteriormente (Capítulo 2) as condições ambientais e a altitude influenciam o efeito de coroa. Se as premissas de pressão e temperatura forem diferentes das enunciadas atrás a densidade do ar varia; essa variação pode exprimir-se por um **factor δ** , que pode ser calculado, para uma determinada pressão P [Pa] e temperatura θ [°C], pela expressão:

$$\delta = \frac{3,92 \times 1,01325 \times 10^5 \times P}{(273 + \theta) \times 760}$$

Designado por G'_0 o valor de **grad E** que corresponde às novas condições, e que é directamente proporcional à densidade do ar, ter-se-á:

$$G'_0 = \delta \times G_0$$

Nestas circunstâncias o *valor crítico da tensão de disrupção*, correspondente às novas condições e que designaremos por U'_c , é calculado pela expressão:

$$U'_c = G_0 \times \delta \times r \times \ln \frac{d}{r} \text{ [kV/fase]}$$

Considerando um factor de irregularidade da superfície do condutor, m_0 , a expressão anterior escreve-se:

$$U'_c = m_0 \times G_0 \times \delta \times r \times \ln \frac{d}{r} \text{ [kV/fase]}$$

Os valores habituais de m_0 são:

- *Condutores polidos*: $m_0 = 1$
- *Condutores contaminados*: $m_0 = 0,92-0,98$
- *Condutores trefilados*: $m_0 = 0,80-0,87$

Define-se ainda a **tensão crítica visual**, que se representa por U_v , como o menor valor da tensão entre fase e neutro (ou terra) para o qual o efeito de coroa se verifica ao longo dos condutores da linha aérea. Utilizando os significados definidos anteriormente para os parâmetros e variáveis, U_v é calculada pela seguinte fórmula empírica:

$$U_v = m_v \times G_0 \times \delta \times 3 \times \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \times r}}\right) \times \ln \frac{d}{r} \text{ [kV/fase]}$$

O factor m_v é também um factor de irregularidade, que toma os seguintes valores:

- *Condutores polidos*: $m_v = 1$
- *Condutores irregulares*: $m_v = 0,72-0,82$

Considerando os *valores eficazes da tensão* de serviço (**U**) e de **U_c**, ambos em *kV*, e sendo **f** [Hz] a frequência da rede, o valor das perdas (**P_{co}**) por efeito de coroa é calculado pela expressão:

$$P_{co} = 242,2 \times \left(\frac{f + 25}{\delta} \right) \times \sqrt{\frac{r}{d}} \times (U^2 - U_c^2) \times 10^{-5} \text{ [kW/km/fase]}$$

5. APLICAÇÕES DO EFEITO DE COROA

Apesar dos inconvenientes atrás referidos o *efeito de coroa*, **quando controlado**, tem *várias aplicações industriais*, das quais se destacam:

- Produção de ozono.
- Arrefecimento de componentes electrónicos utilizados no fabrico de *chips* para equipamentos microprocessados.
- Remoção de cargas electrostáticas da superfície de aeronaves durante o voo.
- Remoção de compostos orgânicos da atmosfera, tais como pesticidas e solventes.
- Desinfecção da água das piscinas.
- Depuração de partículas nos sistemas de ar condicionado, funcionando como precipitador electroestático.
- Produção de laser de azoto.
- Tratamento de superfícies para a cultura de tecidos animais e vegetais.
- Processos de impressão e fotocomposição.

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