

REDE DE TERRAS E SISTEMA DE PROTECÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE SUBESTAÇÕES

Manuel Bolotinha, MSc, Engenheiro Electrotécnico¹

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo apresentamos *duas matérias* que estão **habitualmente ligadas** nas *Subestações (SE)*:

- *Rede de terras.*
- *Sistema de protecção contra descargas atmosféricas (SPDA)*

2. CONSTITUIÇÃO DA REDE DE TERRAS. NORMAS E REGULAMENTOS

A **rede geral de terras** de uma **SE** é constituída por uma **malha de cabo de cobre nu, enterrado no solo**, e **enterrado no solo**, complementada por **varetas de aço revestido a cobre (eléctrodo de terra)**, tendo com objectivo a segurança das pessoas, limitando as **tensões de passo e de contacto**² a **valores não perigosos**, mostrando-se na Figura 1 um exemplo.

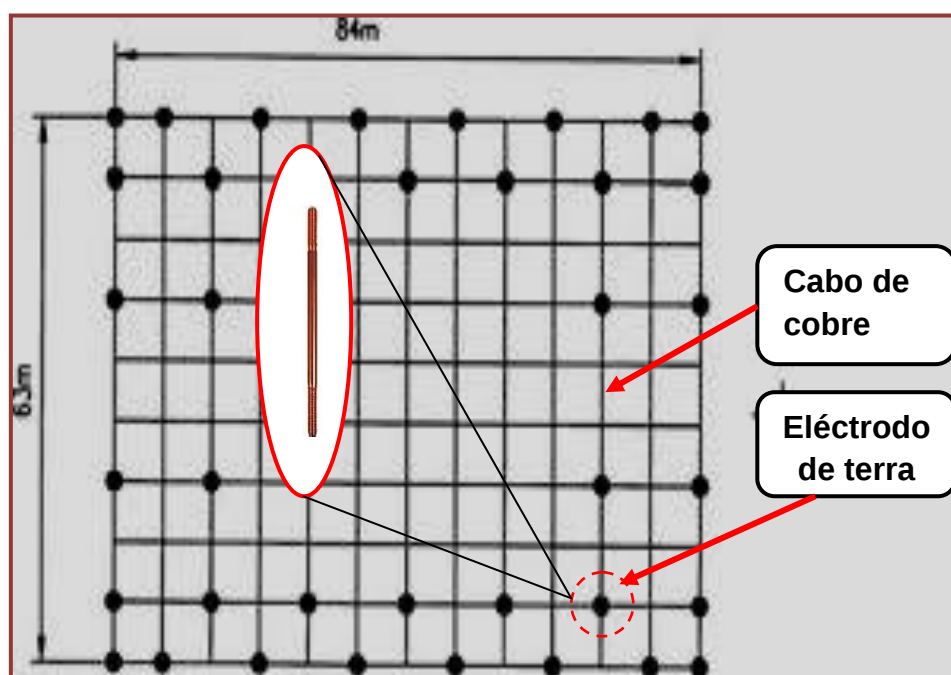


Figura 1 – Malha de terra típica de uma SE

Em Portugal, a **rede de terras das subestações** deve obedecer ao estipulado no *Regulamento de Segurança de Subestações e de Postos de Transformação e Seccionamento (RSSPTS)*.

¹ O Autor **não** segue o Novo Acordo Ortográfico.

² Ver Capítulo 3.

É prática corrente que a *rede de terras* seja **dimensionada** de acordo com a *Norma IEEE³ Std. 80-2000*, sem esquecer o definido no *RSSPTS*.

Recomenda-se que sejam seguidos os princípios de ensaio e as características dos materiais definidos nas *Normas IEEE Std. 81-1983 e Std. 837, EN⁴ 13602 e ASTM⁵ B3, B33, B48, B75, B174, B251 e B466/B466M*.

3. TENSÕES DE PASSO E DE CONTACTO

Nas **SE exteriores**, do tipo **AIS⁶**, o **campo electromagnético** causado pelas **cargas estáticas** nos **condutores nus** e pelas **condições atmosféricas** dão origem a **tensões induzidas** nas *partes da instalação normalmente sem tensão*, como por exemplo as estruturas metálicas, **criando diferenças de potencial** quer *entre elas e a terra*, quer *entre pontos diferentes no solo da SE*.

Situações semelhantes ocorrem a quando de um **defeito Fase-Terra** que envolvem as já referidas *estruturas metálicas*.

Estas diferenças de potencial dão origem às **tensão de contacto** (U_{cont}) e **tensão de passo** (U_{passo}), que se encontram representadas na Figura 2, ou a uma *combinação de ambas*, que podem provocar a **circulação de uma corrente através do corpo humano**, com todas as consequências daí resultantes.

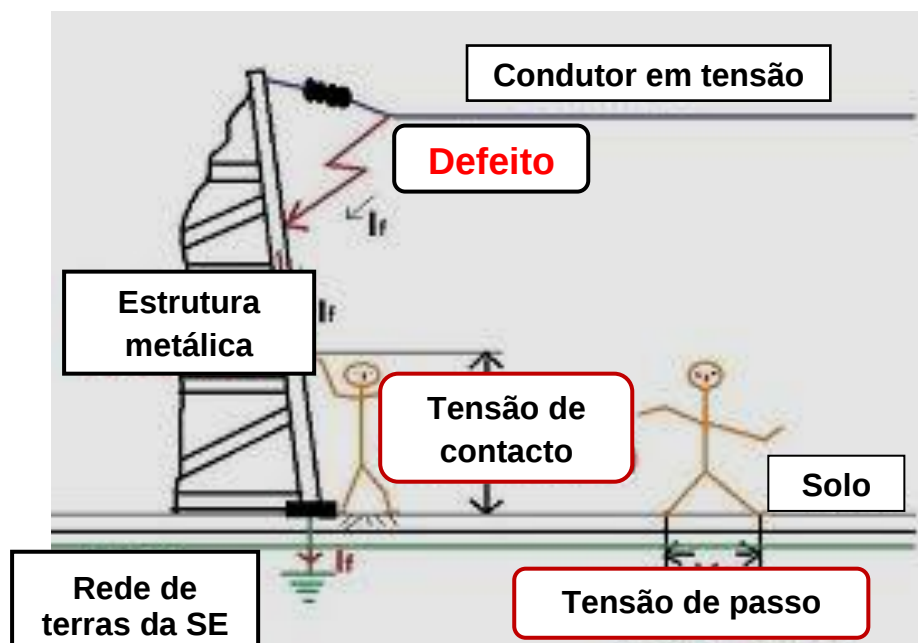


Figura 2 – Tensões de contacto e de passo

A *tensão de contacto* pode ser definida como a **diferença de potencial** entre qualquer *ponto do solo e uma estrutura metálica* ligada à terra e capaz de ser tocada, quando a corrente de defeito circula, sendo habitual considerar a distância de **um metro** entre a estrutura e o solo.

³ IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers

⁴ EN: Normas Europeias

⁵ ASTM: American Society for Testing and Materials

⁶ AIS: Air Insulated Substation.

A *tensão de passo*, define-se como a **diferença de potencial máxima** entre os pés, por exemplo do operador, quando a corrente de defeito circula, sendo habitual considerar a distância de *um metro entre os pés*.

Um caso particular da *tensão de contacto* é a **tensão transferida (U_{tr})**, que é uma tensão que é transferida para a SE a partir de um ponto remoto exterior à SE, ou transferida para o exterior da SE, para um ponto remoto exterior.

4. CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO DA REDE DE TERRAS

4.1. ASPECTOS GERAIS

O **dimensionamento da rede de terras** de uma SE traduz-se em:

- Cálculo da **secção do cabo** de cobre.
- Determinação das **tensões de passo e de contacto**, utilizando a *Norma IEEE Std. 80-2000*⁷.
- Cálculo da **resistência de terra**.

4.2. CÁLCULO DA SECÇÃO DO CABO DE COBRE

O cálculo da **secção do cabo** de *cobre* (**S**) é feito através da expressão:

$$S = \frac{I''_{K1}}{13} \times \sqrt{\frac{t_s}{\Delta\theta}}$$

Onde:

- I''_{K1} é a corrente de defeito **Fase-Terra** [A].
- t_s é o tempo de duração do defeito [s].
- $\Delta\theta$ é a elevação de temperatura admissível no condutor [°C] (para o *cobre* **nu** $\Delta\theta = 150$ °C).

Como nem sempre a *corrente de defeito Fase-Terra* está disponível, ou é não é fácil de calcular, pelo **desconhecimento de parâmetros da rede**, é **prática habitual** usar a **corrente de curto-circuito trifásico** (I''_{k3}) para este cálculo.

4.3. DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES DE PASSO E DE CONTACTO

A determinação dos **valores das tensões de passo e de contacto**, que permitem *definir* as **dimensões da malha**, o **número de eléctrodos de terra** e o **comprimento total do cobre enterrado** na SE (**cabo+eléctrodos**) são habitualmente realizados de acordo com a *Norma IEEE Std. 80-2000*.

Trata-se de um **cálculo iterativo**, realizado com **software próprio** e os **valores obtidos garantem**, *do ponto de vista das tensões de passo e de contacto*, a **segurança** de quem se encontra no *parque exterior da SE*, desde que sejam **cumpridas todas as indicações** da *norma referida*.

⁷ Embora a norma seja explícita, afirmando que apenas se aplica a subestações exteriores, é habitual utilizá-la igualmente para o cálculo da rede de terras das subestações interiores.

A Norma IEEE Std. 80-2000 permite calcular os **valores máximos admissíveis** para as tensões de passo e de contacto, usando as seguintes fórmulas:

Tensão de passo máxima admissível

$$U_{\text{passo}} = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s \times \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}) - \text{para um peso corporal de 50 kg}$$

$$U_{\text{passo}} = (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}) - \text{para um peso corporal de 70 kg}$$

Tensão de contacto máxima admissível

$$U_{\text{passo}} = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s \times \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}) - \text{para um peso corporal de 50 kg}$$

$$U_{\text{passo}} = (1000 + 1,5 \times C_s \times \rho_s \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}) - \text{para um peso corporal de 70 kg}$$

C_s é o **factor de depreciação da camada superficial do solo**, sendo calculado pela expressão:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \times \frac{\rho}{\rho_s}}{2 \times h_s + 0,09}$$

Onde:

- t_s é o tempo de duração do defeito [s]
- ρ_s é a resistividade superficial do terreno (*usualmente a gravilha*) [Ωm]
- ρ é a resistividade do terreno abaixo da gravilha [Ωm]
- h_s é a espessura da camada superficial [m]

Caso **não exista camada superficial**, então $C_s = 1$ e $\rho_s = \rho$

4.4. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE TERRA

De acordo com a Norma IEEE Std. 80-2000 a **resistência da rede de terras** (*resistência de terra* (R_T)) é calculada pela seguinte expressão:

$$R_T = \frac{\rho}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{l_T}$$

Onde:

- A é a área total ocupada pela malha de terra [m^2]
- l_T é o comprimento total do cabo de cobre enterrado, incluindo os eléctrodos de terra [m]
- t_s é o tempo de duração do defeito [s]
- ρ é a resistividade do terreno abaixo da gravilha [Ωm]

Na Tabela 1 apresentam-se *valores típicos* para ρ , para *diversos tipos de terreno*.

Tabela 1 – Valores típicos de ρ

Tipo de solo	Resistividade – ρ (Ω m)
Terreno pantanoso	0 a 30
Lodo	20 a 100
Terra vegetal	10 a 150
Turfa húmida	5 a 100
Argila plástica	50
Terra calcária ou argila compacta	100 a 200
Terra calcária do jurássico	30 a 40
Areia argilosa	50 a 500
Areia de sílica	200 a 3000
Solo rochoso nu	1500 a 3000
Solo rochoso nu coberto de relva	300 a 500
Calcário mole	100 a 300
Calcário compacto	1000 a 5000
Calcário gretado	500 a 1000
Xistos	50 a 300
Micaxisto	800
Granitos e grés alterados	1500 a 10.000
Granitos e grés muito alterados	100 a 600
Gravilha	≈ 2500
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6
Betão	1×10^6 a 1×10^9

Nas *SE construídas em Portugal* deve ser **observado** o indicado no RSSPTS, segundo o qual $R_T \leq 1 \Omega$.

5. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS QUE DEVEM SER LIGADOS À REDE DE TERRAS

Todas as massas metálicas e as diversas ferragens normalmente sem tensão, bem como a rede de vedação (no caso de ser metálica) e o sistema de protecção contra descargas atmosféricas deverão ser ligadas à rede de terras, isto é:

- As estruturas metálicas de suporte dos equipamentos e os pórticos.
- As facas (contactos) de terra dos seccionadores.
- Os carris de assentamento dos transformadores, se existirem.
- As tubagens do sistema de extinção de incêndios, se existir.
- Os descarregadores de sobretensões (*pára-raios*) e contadores de descarga.

- Todos os armários e caixas de reagrupamento e de BT⁸, instalados no parque exterior, bem como no interior dos edifícios.
- As bases das cadeias de amarração e suspensão.
- Todo o aparelho ou parte do aparelho em que a colocação à terra é imposta pelos regulamentos em vigor e/ou indicada nos planos de montagem.
- Os cabos de guarda e as hastes de descarga do sistema de protecção contra descargas atmosféricas.
- Os prumos da vedação exterior.

Junto a cada *armário de comando dos disjuntores e seccionadores* e das *caixas de reagrupamento dos transformadores de medida*, deve ser instalado um **“tapete” metálico equipotencial**, ligado à *rede de terras da SE*, com o objectivo de **diminuir os valores das tensões de passo e de contacto**, para **aumentar a segurança do operador** (Figura 3).



Figura 3 – Tapete equipotencial

6. PROCEDIMENTOS BASE DE MONTAGEM DA REDE DE TERRAS

O **cabo de cobre** é instalado **enterrado**, habitualmente a uma profundidade de **0,6-0,8 m** da **cota 0,00** da SE (ver Figura 6).

As **ligações e derivações** entre os condutores da *rede de terras* podem ser executadas das seguintes formas:

- **Soldadura aluminotérmica**, utilizando um **kit** apropriado (Figura 4).

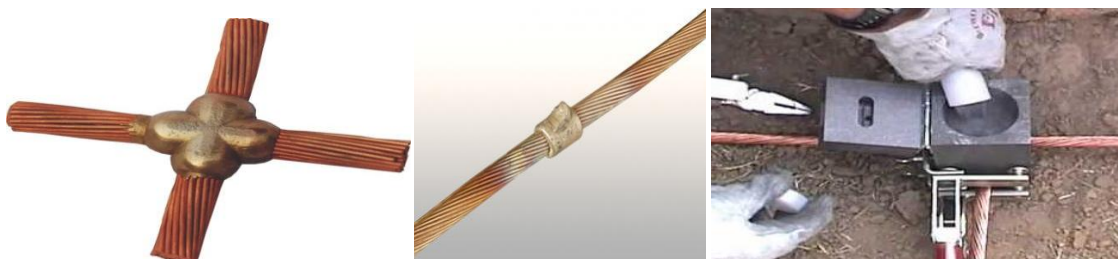


Figura 4 – Exemplos de soldadura aluminotérmica (esquerda e centro) e preparação da soldadura (direita)

⁸ BT: Baixa Tensão. $U < 1000 \text{ V}$.

Nos casos em que sejam utilizado o método de *soldadura aluminotérmica*, o **número de ligações executado por cada molde não pode ultrapassar o indicado pelo fabricante**.

- **Ligadores em “C”** (Figura 5), com recurso a *prensa de cravar hidráulica calibrada e matrizes* com as **dimensões adequadas às dimensões dos ligadores**.

A Figura 5 representa uma situação em que a *matriz* é de **menor dimensão** do *ligador* em “C”.

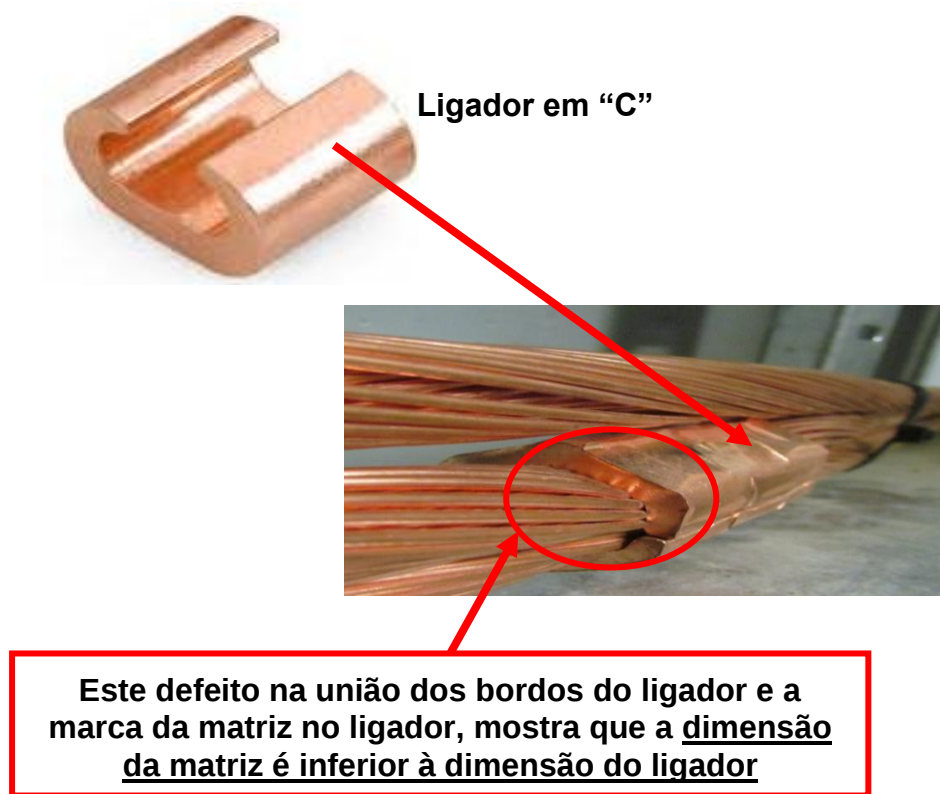


Figura 5 – Ligador em “C” e respectiva cravação

As **ligações dos cabos às estruturas metálicas** do *parque exterior da SE* fazem-se *acima do solo, sem descontinuidade da malha*, por *fixação de dois cabos sobre a estrutura* utilizando **ligadores apropriados**.

A partir deste *ligador* será derivada **uma ligação em antena**, constituída **por barra ou cabo de cobre nu**, *fixado sobre a estrutura metálica*, que permite a *ligação entre a malha de terra e a aparelhagem suportada*. No caso de os *pés da estrutura* serem **tubulares**, a *ligação à aparelhagem* será realizada através de **cabo de cobre nu**, instalado no *interior da estrutura*, pelas razões já referidas atrás.

Na Figura 6 exemplifica-se o que foi anteriormente exposto.

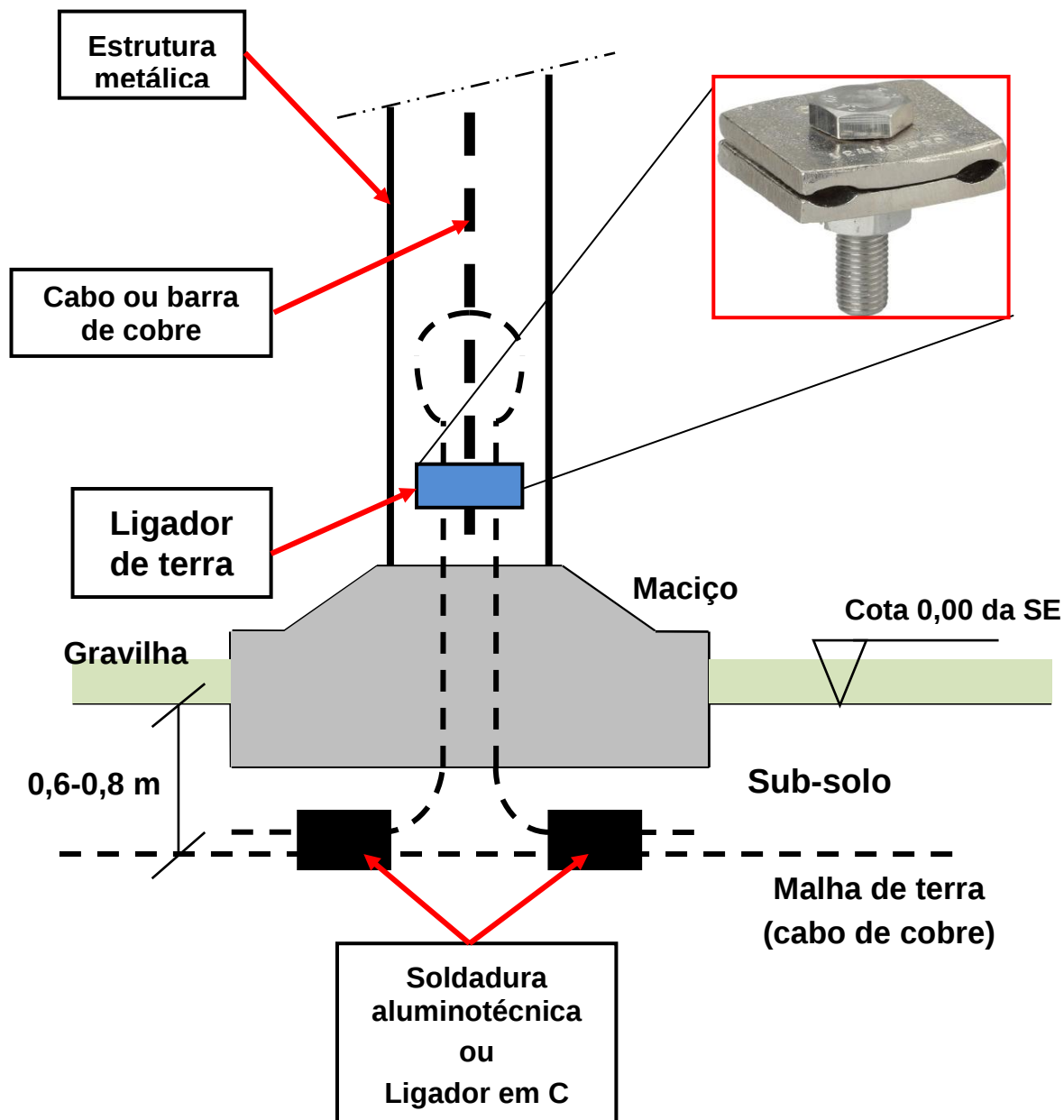


Figura 6 – Ligador de terra

As ligações aos carris de rolamento dos transformadores (caso existam) devem ser feitas preferencialmente por **soldadura**.

As várias ligações devem ser concebidas de forma que **não exista contacto entre metais diferentes susceptíveis de provocar corrosão electrolítica**.

7. SISTEMA DE PROTECÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O SPDA da SE, que deve obedecer às Normas IEC 62305 e 62561 é constituído por **cabos de guarda**, em aço galvanizado ou alumínio-aço, do tipo **ACSR**⁹ apoiados nas cabeças dos pórticos da SE, podendo ser **complementada** com **hastes de descarga**

⁹ ACSR: Aluminium cable steel reinforced.

(normalmente **pára-raios do tipo Franklin**) igualmente *apoiadas nos pórticos*, se o *cáculo* assim o **justificar**.

A utilização de **pára-raios do tipo ionizante** ou de **avanço à ignição**, que **não obedecem** à Norma IEC 62305, por **não existirem Normas internacionais e EN** para este **tipo de pára-raios**, mas sim à Norma NP¹⁰ 4426:2013, **não é recomendável**, particularmente em *zonas em que se verifica um grande número de descargas atmosféricas*

As soluções com cabos de guarda e cabos de guarda reforçados por hastes de descarga são apresentadas na Figura 7.



Figura 7 – Hastes de descarga e cabos de guarda (esquerda) e cabos de guarda (direita)

Nas SE que **não dispõem** de *pórticos de amarração*, o **SPDA** é constituído por **hastes de descarga** instaladas em *estruturas metálicas exclusivas para esse fim*, como se representa na Figura 8.

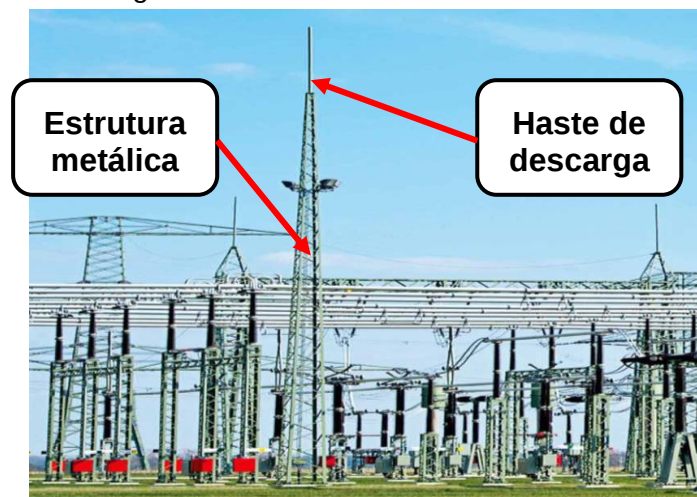


Figura 8 – Haste de descarga montada numa estrutura metálica

O **cálculo do SPDA** deve ser realizado de acordo com o **Guia Técnico de Pára-Raios** da DGE¹¹, que afirma **não se aplicar aos pára-raios ionizantes**, por **não existir**, ao nível da IEC e CENELEC¹², **normalização que os contemple**.

¹⁰ NP: Norma Portuguesa.

¹¹ DGE: Direcção-Geral de Geologia e Minas.

¹² CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization.