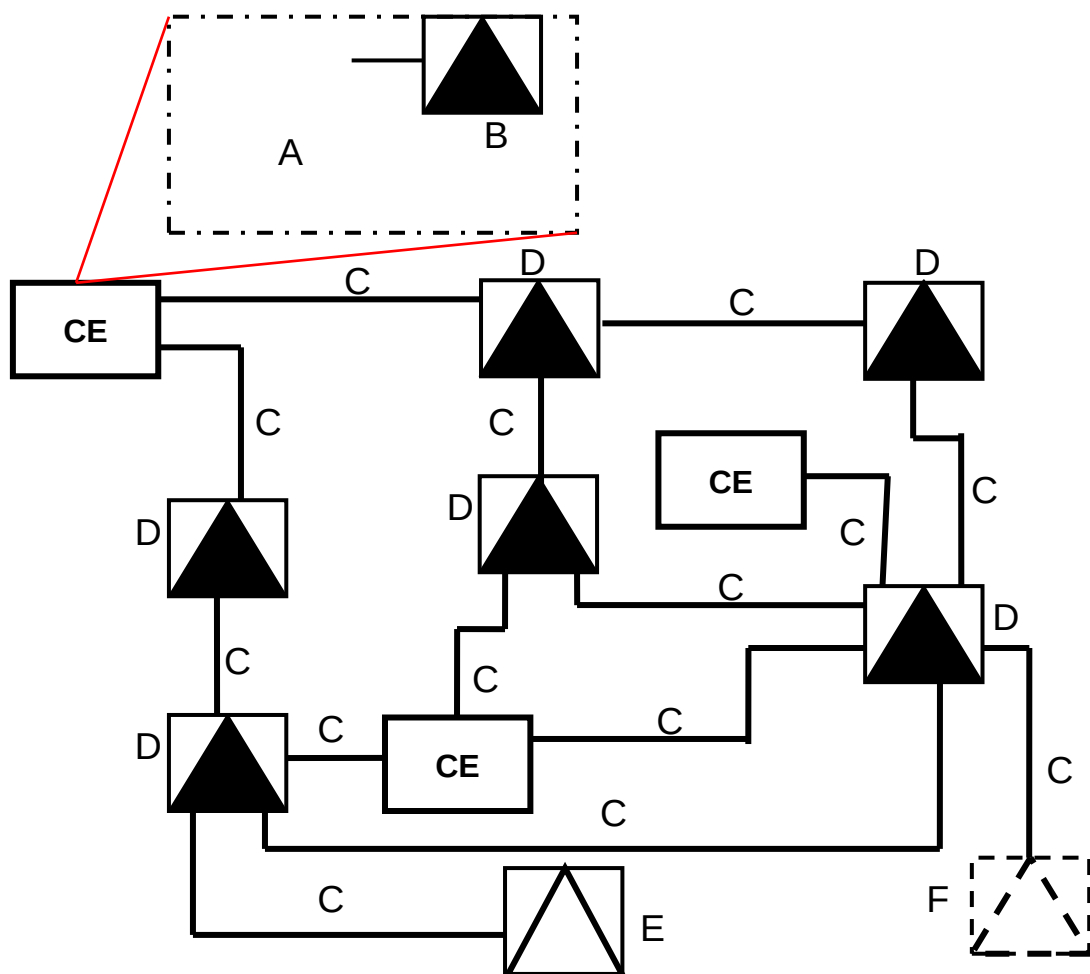


CONCEITOS BÁSICOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA E MUITO ALTA TENSÃO (CORRENTE ALTERNADA)

(Manuel Bolotinha ^{*i})

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Genericamente as **linhas aéreas** de *alta tensão (AT)* e *muito alta tensão (MAT)* integram o **sistema de transporte (transmissão) de energia** (habitualmente designado por *rede primária*), interligando as *centrais produtoras de energia eléctrica* com as *subestações (SE)* da *rede primária (MAT/MAT/AT; MAT/AT)* com as SE da *rede de distribuição de energia em média tensão (MT) – SE AT/MT*, situação que se ilustra na Figura 1.



LEGENDA DA FIGURA

- 1
- CE** – Central Eléctrica
 - A** – Gerador (Alternador)
 - B** – SE elevadora **MT/MAT** ou **MT/AT**
 - C** – Linha aérea **MAT** ou **AT**
 - D** – SE **MAT/MAT, MAT/AT, AT/AT** ou **MAT/MAT/AT**
 - E** – SE privada **MAT/AT/MT** ou **AT/MT** (grandes clientes industriais)
 - F** – SE **AT/MT** (rede de distribuição)

Figura 1 – Configuração esquemática do sistema de transporte de energia

Os valores habitualmente considerados para a *tensão nominal* (U_n) das *linhas AT* (LAT) estão compreendidos entre $60 \text{ kV} \leq U_n \leq 110 \text{ kV}$ (em Portugal, 60 kV) e a *tensão nominal* das *linhas MAT* (LMAT) é $U_n > 110 \text{ kV}$ (em Portugal, 150 kV, 220 kV e 400 kV).

Ainda em Portugal, a rede de transporte de energia engloba apenas as LMAT e as SE MAT/MAT/AT e MAT/AT e cujo concessionário em Portugal Continental é a REN (Redes Energéticas Nacionais). As LAT, bem como as SE AT/MT, já pertencem ao concessionário da rede de distribuição de energia em média e baixa tensão, a EDP Distribuição.

Em Portugal as linhas aéreas devem ser projectadas e construídas de acordo com o **RSLEAT** (*Regulamento de Segurança das Linhas Eléctricas de Alta Tensão*), devendo as características dos materiais estarem de acordo com as Normas NP, EN, NP EN e IEC², bem como com as especificações e procedimentos do concessionário da rede.

2. CONSTITUIÇÃO E CONFIGURAÇÕES

As LAT e LMAT, cujas características eléctricas principais são a *tensão* (kV) e a sua *natureza* (CA ou CC) e a *frequência* (50 Hz ou 60 Hz, conforme os países), são constituídas por:

- Apoios, incluindo os respectivos maciços de fundação
- Condutores³ nus
- Cadeias de isoladores e acessórios
- Sistema de protecção contra descargas atmosféricas
- Eléctrodos de terra dos apoios

¹ Uma SE diz-se **elevadora** quando a *tensão primária* é **inferior** à *tensão secundária*; caso contrário a SE designa-se por **abaixadora**.

² **NP**: Normas Portuguesas. **EN**: Normas Europeias. **NP EN**: Normas Portuguesas harmonizadas com as Normas Europeias. **IEC**: International Electrotechnical Commission.

³ Neste texto optou-se, para as LMAT e LAT, por utilizar a designação *condutor* em vez de *cabo*, porque tecnicamente um *cabo* é constituído por **condutor(es) isolado(s) e, pelo menos, por uma bainha exterior**.

- Dispositivos de protecção da avifauna⁴ (eventualmente)
- Chapas de “Perigo de Morte” e de identificação/número do apoio

As principais características mecânicas de uma linha aérea são o **vão**, designadamente o *vão máximo*, a **flecha** e o **esforço de tracção** exercida pelos condutores nos apoios.

Os vãos classificam-se normalmente como:

- *Vão comum*: vão no qual não existe qualquer cruzamento ou vizinhança com outras infra-estruturas aéreas, nem travessias de vias rodoviárias e ferroviárias, de cursos de água e lagos.
- *Vão de nível*: vão no qual os **pontos de fixação de um condutor em dois apoios consecutivos** estão no **mesmo plano horizontal**.
- *Vão desnivelado*: vão em que não se verifica a situação definida no parágrafo anterior.

A **flecha** de um condutor define-se como a **distância** entre o **ponto do condutor** onde a **tangente à curva**⁵ descrita pelo condutor entre os dois apoios é **paralela à recta** que passa pelos respectivos pontos de fixação e a **intersecção da vertical** que passa por aquele **ponto** com a **recta referida**, na **condição de o condutor não ser desviado pela acção do vento**.

A Figura 2 exemplifica o que foi exposto anteriormente.

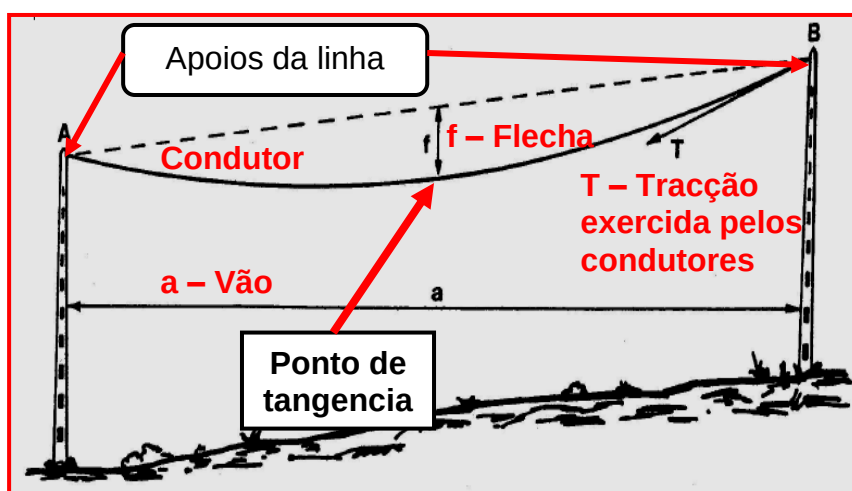


Figura 2 – Esquema ilustrativo de uma linha aérea

⁴ As linhas aéreas são classificadas segundo o seu *grau de perigosidade*, tendo em conta factores como a mortalidade, a ocorrência de aves prioritárias e/ou classificadas, o habitat e a localização da linha.

Para minimizar o impacto, as linhas dispõem de **dispositivos de protecção da avifauna**, também denominados **espanta-pássaros**, são montados espaçadamente nos condutores e/ou nos cabos de protecção contra descargas atmosféricas, que são dispositivos de formato helicoidal em material plástico de cor púrpura ou vermelha, ajustando-se aos condutores por enrolamento. São colocados espaçados entre si de 6 m, alternadamente num e noutro condutor e/ou cabo, o que numa visada transversal do vão, dá um espaçamento de 3 m.

⁵ A curva descrita pelo condutor é, *matematicamente*, uma **catenária**, isto é, trata-se da curva descrita por um cabo (neste caso metálico, condutor) tracionado *entre dois pontos fixos e sujeito à acção da gravidade*. A curva exprime-se pela **função hiperbólica** $f(x) = a \cdot \cosh(x/a) = (a/2) \cdot (e^{(x/a)} + e^{-(x/a)})$, sendo $a = m' \cdot H / T_H$, onde m' é a massa por unidade de comprimento, H a distância entre apoios (vão) e T_H o esforço de tracção.

Os apoios são normalmente *metálicos* e as LAT e LMAT têm usualmente uma *configuração* em **esteira horizontal**, quando o apoio suporta apenas **um circuito**, ou uma *configuração* em **esteira vertical**, quando o apoio suporta **dois circuitos** (ver Figuras 3 e 4).



Figura 3 – LMAT com um circuito e disposição em esteira horizontal

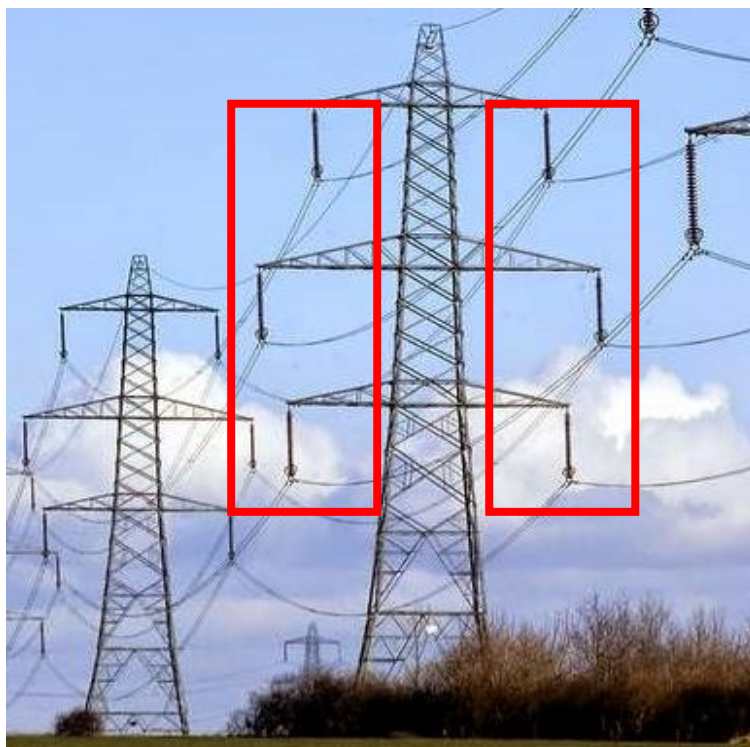


Figura 4 – LMAT com dois circuitos e disposição em esteira vertical

Nas LMAT com *dois circuitos* a disposição dos condutores pode apresentar também uma *configuração* em **triângulo**, como se ilustra na Figura 5.



Figura 5 – LMAT com dois circuitos e disposição em triângulo

Nas LAT com um circuito (em Portugal, para a tensão da rede de **60 kV**) a configuração pode ainda ser em **galhardete**, o que se mostra na Figura 6.



Figura 6 – LAT com um circuito e disposição em galhardete

As configurações de uma linha aérea dependem da *distância que é necessário garantir entre os condutores*, do *comprimento do vão*⁶ e da existência de *transições linha aérea/cabo subterrâneo*.⁷

Numa linha aérea é possível existirem simultaneamente diversos tipos de configurações.

Particularmente nas LMAT, tendo em atenção a *corrente de serviço*, é habitual utilizarem-se pelo menos dois ou mais condutores por fase, com **espaçadores**, cuja

⁶ Ver Figura 2.

⁷ Ver Capítulo 8.

forma depende do número de condutores, com o objectivo de *minimizar a respectiva secção* e, consequentemente, o *seu peso*. Esta situação é ilustrada na Figura 7.

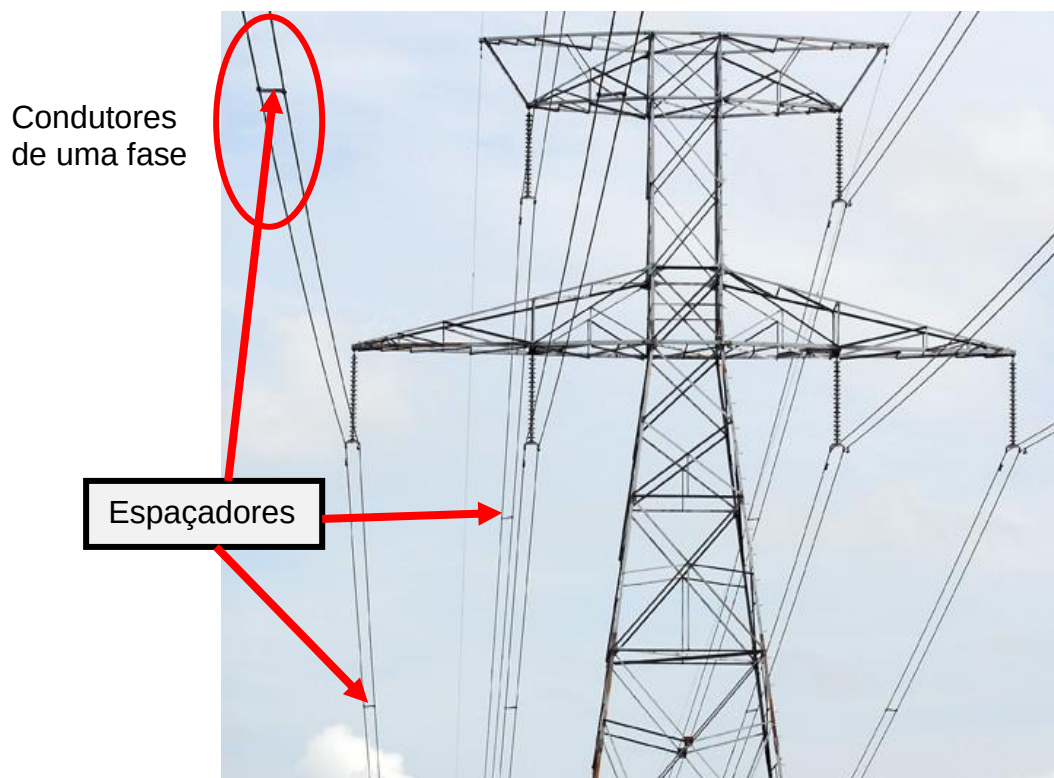


Figura 7 – LMAT com dois condutores por fase e separadores

Os *espaçadores* permitem manter os condutores nas suas *posições relativas* e se o *afastamento entre eles* for **muito maior** que o seu *diâmetro* permitem **minimizar** o **efeito de coroa**⁸.

As **distâncias mínimas de isolamento**, as **características** dos *apoios e isoladores* e os **procedimentos e processos construtivos**, nas situações em que as LAT e LMAT têm **travessias** e **cruzamentos** com *outras infra-estruturas ou redes (aéreas ou subterrâneas)* em Portugal **devem obedecer** ao estipulado nos **Artigos 85º a 142º** do RSLEAT. Para este efeito as travessias e cruzamentos a considerar são:

- Travessias de vias de circulação automóvel de qualquer tipo.
- Travessias de cursos de água navegáveis.
- Travessias de teleféricos.
- Travessias e cruzamentos de caminhos de ferro.
- Cruzamentos com linhas de tracção eléctrica.
- Cruzamentos com outras linhas de energia, qualquer que seja o valor da tensão destas linhas.
- Cruzamentos com linhas de telecomunicações.

⁸ Ver Capítulo 5.

3. APOIOS E MACIÇOS DE FUNDAÇÃO

Os apoios das *LMAT* e *LAT* são usualmente constituídos por **perfilados de aço, galvanizados a quente por imersão, após fabrico**⁹, formando uma *estrutura treliçada*, como as que estão representadas nas Figuras 3 a 7 do Capítulo 2.

A estrutura é constituída por diversas **secções**, que são fixas por aperto, devendo ser usada para o efeito uma **chave dinamométrica calibrada**. Os *perfilados* que constituem cada *secção* são unidos por **soldadura**; as soldaduras devem ser verificadas por **ultra-sons**, um método de *ensaio não destrutivo* e muito confiável.



Figura 8 – Pormenor de fixação de duas secções de um apoio de uma linha aérea

A secção inferior é designada por **base do apoio**, sendo encastrada em **maciços de fundação** em **betão** (*concreto*). Habitualmente esta secção dispõe de quatro pontos de fixação, que designaremos por “*pés*”.

Em *Portugal* quer as *estruturas metálicas* quer os respectivos *maciços de fundação* devem obedecer, nas partes aplicáveis, ao **REBAP** (*Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado*) e às *Normas NP EN 1990, 1991, 1992, 1993, 1997 e 1998* (**Eurocódigos**).

⁹ A galvanização dos perfilados deve obedecer às *normas EN ISO 14713, EN ISO 1461:2009, ISO 9223:1992 e ISO 2063:2005*. De acordo com estas normas a **espessura de galvanização** depende do *tipo de perfil* e da *agressividade salina do meio ambiente* onde os apoios estão inseridos.
ISO: International Organization for Standardization.



Figura 9 – Base de um apoio de uma linha aérea (esquerda) e pormenor de encastramento de um “pé” no maciço (direita)

É ainda comum nas *LMAT* a utilização de apoios apenas com um ou dois ponto de fixação no terreno, por questões de economia do espaço ocupado pela linha e pelo seu corredor (ver Capítulo 14) – situação em que o apoio necessita de ser **espiado** (*estaiado*) e como tal é designado – ou com **forma poligonal**, por apresentarem **maior resistência** aos **esforços de torsão** (devendo este tipo de apoios estar de acordo com a *Norma EN 50341*), situações que são ilustradas nas Figuras 10 e 11.



Figura 10 – Apoio espiado de uma LMAT



Figura 11 – Apoio poligonal de uma LMAT

Os apoios poligonais são fixos ao *maciço de fundação* por **chumbadouros roscados embebidos no betão**, porcas e anilhas, devendo o aperto ser feito por uma **chave dinamométrica calibrada**.

Nas LAT, principalmente nas *gamas de tensão* de **60 kV** é também usual utilizarem-se também **postes de betão**, embebidos no *maciço de fundação*, com **armação metálica** (perfis normalizados, habitualmente **U** ou **L**), para um *circuito* com *configuração em galhardete* (Figura 12) ou para *dois circuitos* com *configuração em esteira vertical*.

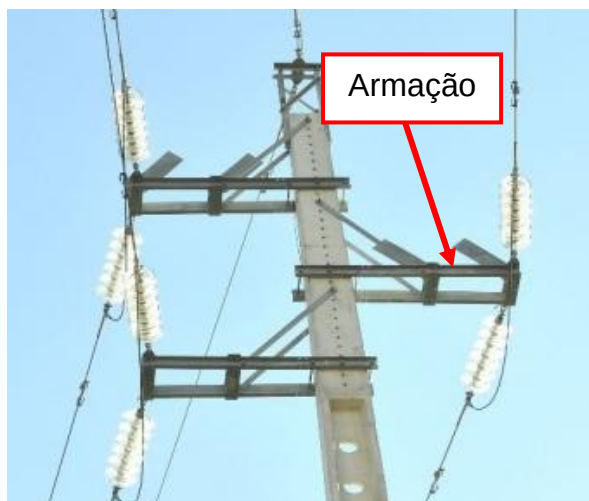


Figura 12 – Apoio em betão de uma LAT

Conforme a **função** desempenhada nas LAT e LMAT, o que se representa de uma forma esquemática na Figura 13, os apoios podem ser dos seguintes tipos:

- *De alinhamento*

- De ângulo
- De fim de linha
- De transição linha aérea/cabo subterrâneo

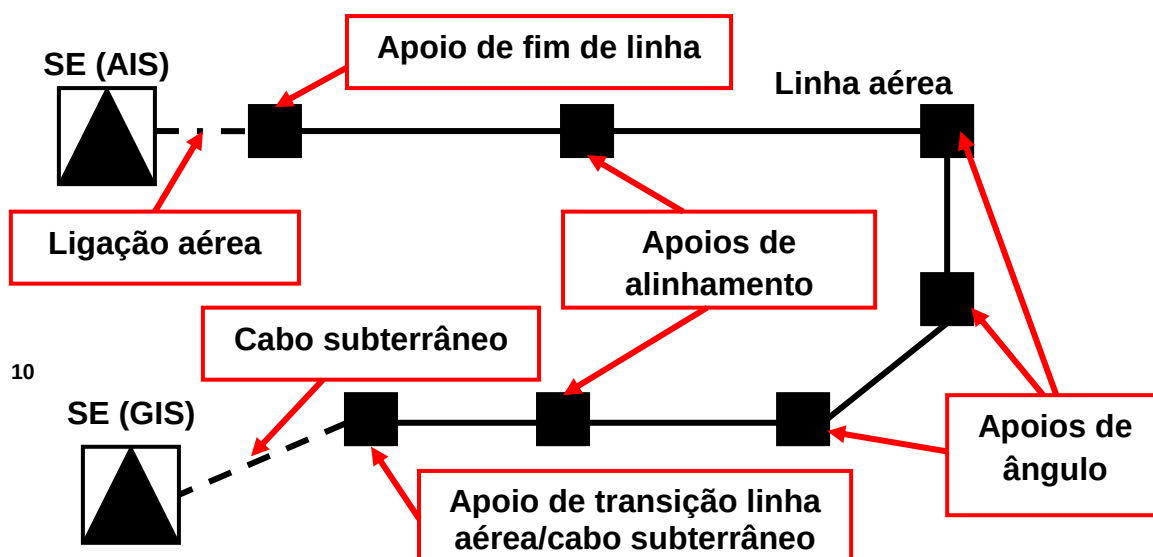


Figura 13 – Representação esquemática dos tipos de apoios das LMAT e LAT

Os apoios de ângulo e de alinhamento podem também desempenhar a função de **apoio de reforço**, para proporcionar pontos firmes na linha que limitem a propagação nesta de esforços longitudinais de carácter excepcional (ruptura de condutor, por exemplo), particularmente em vãos muito grandes e nas travessias de vias de circulação importantes (auto-estradas, por exemplo) ou cursos de água principais.

4. CONDUTORES

Inicialmente, nas LAT, foram utilizados condutores em *cobre nu*, que vieram a ser substituídos, nas LAT e LMAT, por diversos tipos de condutores de alumínio ou ligas de alumínio, associados ou não a aço galvanizado e aço coberto a alumínio do tipo **ACS** (da sigla inglesa *Aluminium Clad Steel*), conhecidos pela designação comercial **Alumoweld** (*marca registada*), tais como:

- Condutores nus em *alumínio*, designados como **AAC** (da sigla inglesa *All Aluminium Conductors*).
- Condutores nus em *liga de alumínio* (sendo a liga *Al-Mg-Si* – alumínio-magnésio-silício – a mais utilizada).
- Condutores cableados concêntricos em *alumínio-aço*, apelidados de **ACSR** (da sigla inglesa *Aluminium Cable Steel Reinforced*), constituídos por uma *alma de aço zincado de alta resistência*, revestida por uma ou mais camadas (**feixes**) de *fiões de alumínio* do tipo *AL1*, obedecendo às *Normas EN 50189, 50889, 61232 e 50182*, que ainda existe em algumas linhas que se encontram em serviço, designadamente nas gamas de *tensão* de **60-69 kV**.

¹⁰ AIS: Air Insulated Substation. GIS: Gas Insulated Substation.

Estes cabos são geralmente designados por *AL1/ST1A*, *AL1/ST2B*, *AL1/ST3D*, *AL1/ST4A* e *AL1/ST5E*.



Figura 14 – Cabo ACSR

Actualmente, nas *LAT* e *LMAT*, são utilizados condutores nus de *liga de alumínio*, com condutores cableados concêntricos, compostos de uma ou mais camadas (**feixes**) de fios de *liga de alumínio* do tipo **AAAC** (da sigla inglesa *All Aluminium Alloy Conductors*), conhecida como **Almelec** ou **Aldrey** (que são marcas registadas de fabricantes) e correctamente designados como *AL2*, *AL3*, *AL4* ou *AL5*, obedecendo às normas *EN 50182* e *50183*.

São usados normalmente em substituição dos cabos *ACSR* quando se pretende igualmente uma maior resistência à corrosão.

Em Portugal nas *LMAT* são utilizados cabos do tipo **AL4**, que veio substituir a antiga designação *ASTER*.



Figura 15 – Cabo AL4

De acordo com o *RSLEAT* a distância mínima (**D**) entre *condutores de fase*, para garantir que, devido às oscilações dos condutores por acção do vento, não haja diminuição da distância mínima de isolamento é calculada pela expressão:

$$\mathbf{D} = \mathbf{k} \times \sqrt{\mathbf{f} + \mathbf{d}} + \frac{\mathbf{U}}{150} \text{ (medida em m, arredondada ao cm)}$$

Onde:

- *f*: flecha máxima dos condutores (**m**) – ver Capítulo 2
- *d*: comprimento das cadeias de isoladores susceptíveis de oscilarem transversalmente à linha (**m**)

- U : tensão nominal da rede (kV)
- k : coeficiente que depende da natureza dos condutores (0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço; 0,7 para condutores de liga de alumínio e de ligas de alumínio)

A distância entre os condutores e os apoios (D' - medida em m, arredondada ao cm), é definida no RSLEAT considerando duas hipóteses:

- 1) Condutores em repouso, à temperatura ambiente considerada como a mais desfavorável.
- 2) Condutores desviados sob a acção do vento, considerando metade da pressão dinâmica do vento máximo habitual, a 15 °C.

O valor mínimo de D' é calculado pelas expressões:

$$D' = 0,10 + 0,0065 \times U_n \leq 0,15 \text{ m (condutores em repouso)}$$

$$D' = 0,0065 \times U \leq 0,15 \text{ m (condutores desviados pelo vento)}$$

Onde U_n é a tensão nominal da rede (kV).

5. CADEIAS DE ISOLADORES E LIGADORES

As **cadeias de isoladores** destinam-se a “suportar” os condutores das LAT e LMAT, para garantir a **distância mínima de isolamento** entre os condutores e as estruturas metálicas dos apoios, normalmente sem tensão e ligadas à terra, e também a **distância mínima de isolamento entre fases** quando os condutores são submetidos à acção de ventos fortes.

As cadeias de isoladores são constituídas por isoladores cerâmicos, em resina epoxy ou em vidro, **acopláveis**, montados de forma que permitam o **acoplamento amovível** de uma série de elementos, até obter o **nível de isolamento** desejado (Figura 16).

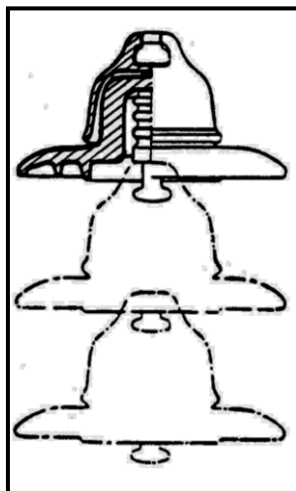


Figura 16 – Isolador acoplável

O número de *isoladores* em cada *cadeia* depende não só da *tensão da rede*, mas também do **comprimento mínimo da linha de fuga**, para evitar a **disrupção do arco eléctrico** entre os condutores activos e as massas metálicas ligadas à terra (“**contornamento**”), tendo em atenção a **poluição** existente na zona.

Os *agentes poluidores* que se depositam sobre a *superfície dos isoladores*, principalmente por acção do vento, são classificados em dois tipos: **poluição salina** e **poluição industrial**.

A classificação da *severidade poluente dos locais*, de acordo com a *Norma IEC 60815*, o *valor da salinidade suportável* e o *comprimento da linha de fuga específica* são indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de salinidade e linhas de fuga específicas

Nível de poluição	Distância ao mar	Salinidade suportável expectável (kg/m ³)	Linha de fuga específica (mm/kV)
Média	> 3 km	> 28	20
Forte	1 a 3 km	> 80	25
Muito Forte	< 1 km	> 160	31

De acordo com a tabela anterior, os **comprimentos mínimos das linhas de fuga** dos isoladores para as *tensões nominais* das *redes AT* e *MAT* usadas em Portugal são os indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de poluição e comprimento das linhas de fuga

Tensão de serviço (kV)	Nível de poluição	Comprimento da linha de fuga (mm)
400	Média	8400
	Forte	10.500
	Muito Forte	13.020
220	Média	4900
	Forte	6125
	Muito Forte	7595
150	Média	3400
	Forte	4250
	Muito Forte	5270
60	Média	1450
	Forte	1813
	Muito Forte	2248

As *cadeias de isoladores* são de dois tipos: de **suspensão** (*simples ou duplas*) – ver Figura 17 – e de **amarração** (*simples ou duplas*) – ver Figura 18.

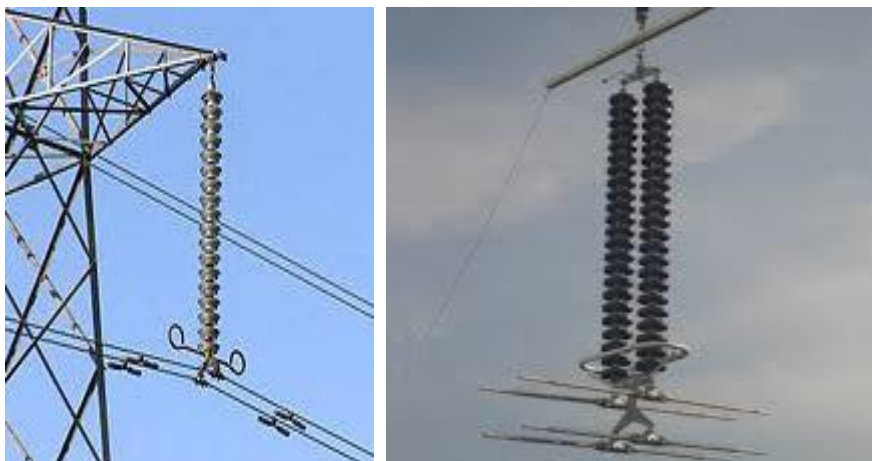


Figura 17 – Cadeias de suspensão simples (esquerda) e dupla (direita)

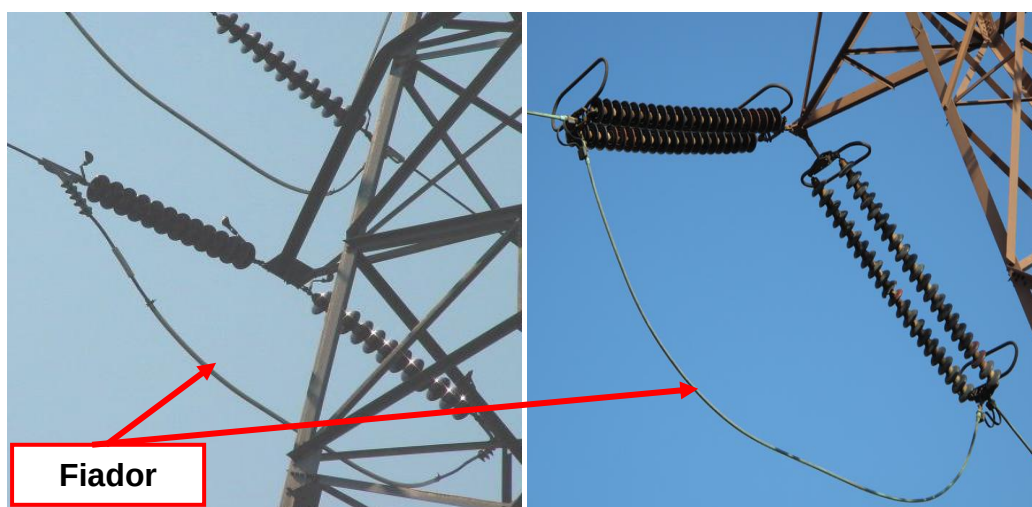


Figura 18 – Cadeias de amarração simples (esquerda) e dupla (direita)

Nalgumas situações das *LMAT* a *cadeia de suspensão da fase central*, nos apoios com *configuração horizontal dos condutores (simples ou duplos)*, ou mesmo em todas as fases, é **dupla**, em **V**, para evitar que em caso de ventos fortes possa haver uma **diminuição da distância de isolamento** daquela(s) fase(s) – ver Figura 19.

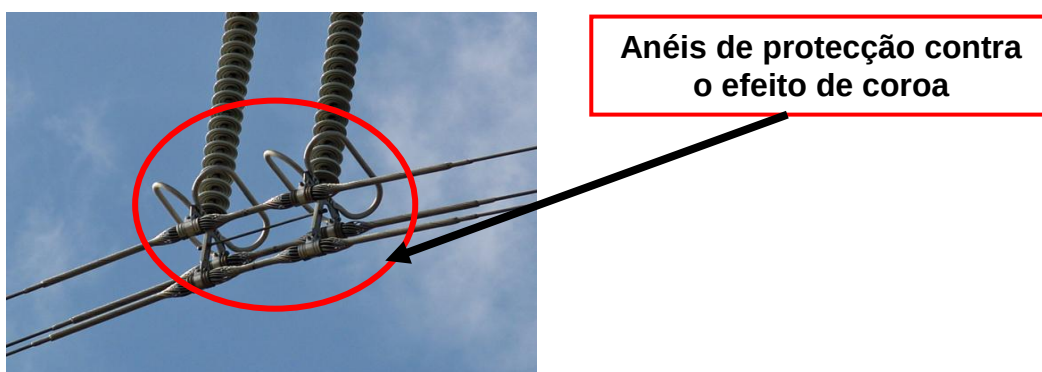


Figura 19 – Cadeias de isoladores de suspensão duplas em V

As cadeias de isoladores de suspensão são utilizadas nos apoios de alinhamento e as cadeias de suspensão são utilizadas nas seguintes situações:

- Apoios de ângulo
- Apoios de fim de linha
- Apoios de transição linha aérea/cabo subterrâneo
- Apoios de reforço quer sejam de alinhamento quer sejam de ângulo¹¹

Ainda nas LMAT é habitual que as cadeias de isoladores quer sejam de suspensão quer sejam de amarração disponham de um dispositivo aproximadamente em forma de anel (designados na literatura inglesa por *corona rings*), para protecção contra o efeito de coroa, como se pode observar na Figura 20.



Anéis de protecção contra o efeito de coroa

Figura 20 – Anéis de protecção contra o efeito de coroa

¹¹ Os apoios com cadeias de amarração são também designados por apoios de amarração. O troço de linha aérea entre dois apoios de amarração designa-se por cantão.

O **efeito de coroa** é o fenómeno que resulta de uma **descarga parcial** no ar (generalizando, em *qualquer fluído*) provocada pela *ionização* desse meio quando um condutor é percorrido pela *corrente eléctrica* e verifica-se quando o valor do **gradiente**¹² **do campo eléctrico** é suficiente para ionizar o meio, mas não para provocar a sua **ruptura dieléctrica**¹³ 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.

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/mm**; 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**.

O efeito de coroa tem consequências prejudiciais para as pessoas, para 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 diversas formas – 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 dieléctrica**¹⁴ 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 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.

¹² 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.

¹³ 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 x 10⁶ V/m**. Diz-se que, nestas circunstâncias, se dá uma **disrupção**.

¹⁴ 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**).

Os dispositivos de protecção contra o efeito de coroa são usados para **dispersar** as *linhas de força* do **campo eléctrico** e *diminuir* o **gradiente de potencial** para valores inferiores aos necessários para produzir o *aquele efeito*.

Algumas *cadeias de isoladores* estão equipadas com **hastes de descarga** para, caso se verifique uma *descarga*, o **arco eléctrico** se *estabeleça* entre as *hastes* e **não percorra o isolador**, evitando assim a sua **destruição** (ver Figura 21).

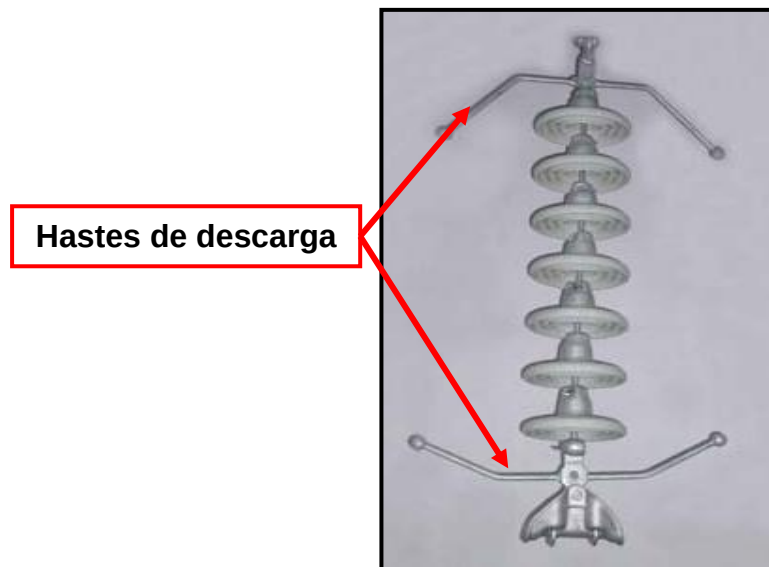


Figura 21 – Cadeia de isoladores com hastes de descarga

Nas *cadeias de suspensão* os **ligadores** utilizados nos *condutores* são designados por **pinças de suspensão**, mostrando-se na Figura 22 um exemplo destes equipamentos.

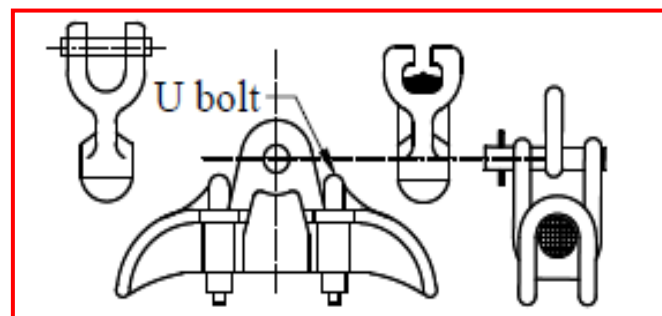


Figura 22 – Pinça de suspensão

Já nas *cadeias de amarração* são usadas **pinças de amarração**, de que se mostra um exemplo na Figura 23.

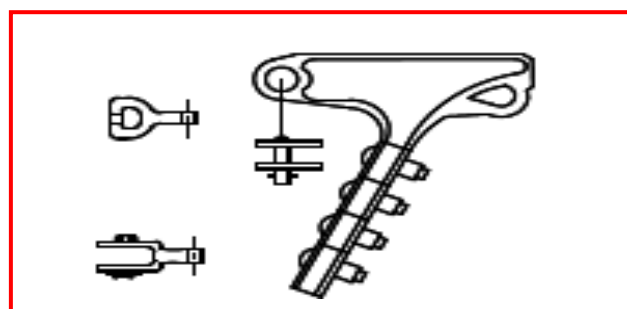


Figura 23 – Pinça de amarração

As pinças quer de suspensão quer de amarração têm o corpo habitualmente em liga de alumínio.

As uniões entre condutores são feitas com um **ligador por compressão**, com manga em alumínio e corpo em aço galvanizado forjado (Figura 24).

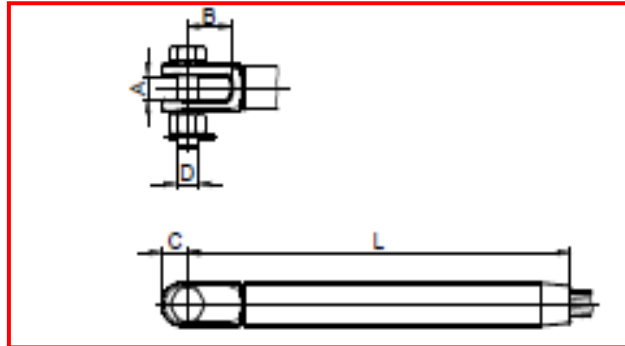


Figura 24 – Ligador de união por compressão

É também necessário considerar os acessórios de fixação das cadeias e pinças, designadamente balanceiros ou balancins (para fixação das pinças nas cadeias duplas) – ver Figura 25 – rótulas-olhal, olhal-bolha, eixos e cavilhas.

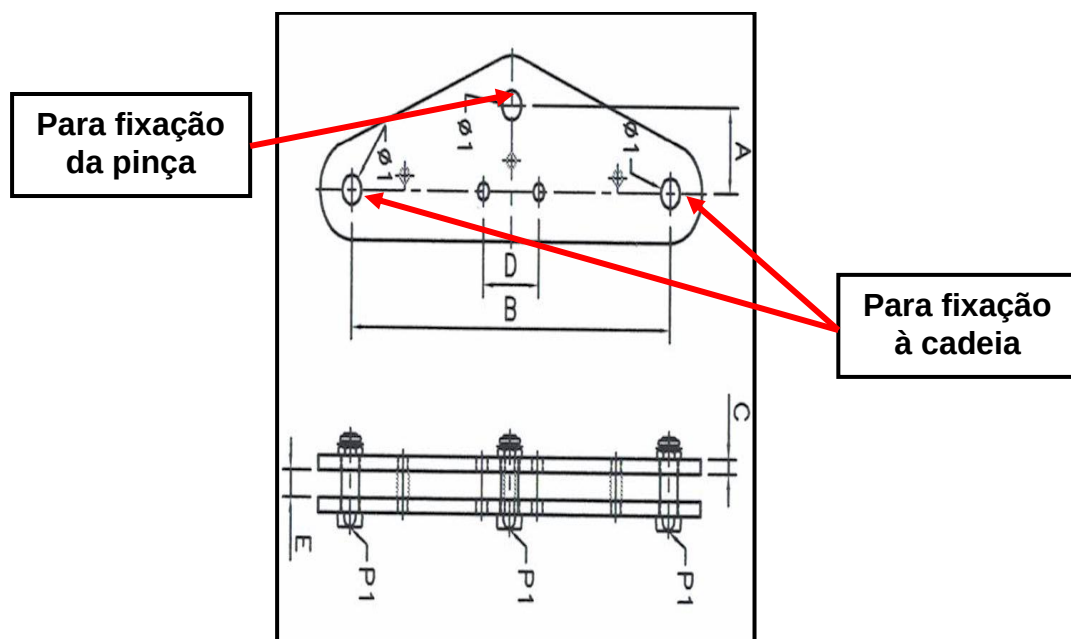


Figura 25 – Balanceiro

6. PARÂMETROS ELÉCTRICOS DE UMA LINHA AÉREA

Os parâmetros eléctricos de uma linha aérea são a *resistência* (R), a *reactância indutiva* (X_i) e a *reactância capacitiva* (X_c).

Para efeitos de cálculo, uma linha aérea pode ser representada pelo “**diagrama em π** ”.

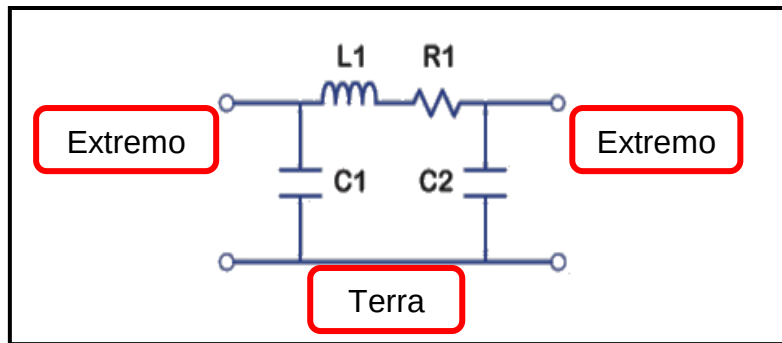


Figura 26 – Diagrama em π de uma linha aérea

Este diagrama é considerado rigoroso para linhas com comprimentos até **200 km**; para comprimentos superiores é necessário considerar vários *diagramas em π* , associados em série.

A **distinção** entre linhas “longas” e “curtas”, faz-se pela comparação entre a *resistência*, a *reactância indutiva* e a *reactância capacitiva*, recorrendo ao diagrama em “ π ” da linha. Na prática linhas com **70 – 100 km** são consideradas “curtas”.

Nas *LMAT* e *LAT* a *resistência* dos condutores é habitualmente desprezível quando comparada com a *reactância indutiva*, ao contrário do que sucede nas *linhas BT*¹⁵ e *MT*.

No cálculo de correntes de curto-circuito que não envolvam defeitos à terra, a *reactância capacitiva* não é considerada.

A **resistência** é calculada de acordo com a expressão:

$$R = (\rho_{20^\circ\text{C}} \times l / s) [\Omega]$$

Onde:

- $\rho_{20^\circ\text{C}}$: resistividade dos condutores a 20 °C ($\Omega\text{m/mm}^2$) – *cobre*: **1/56 $\approx$ 0,017774**; *alumínio*: **1/35 $\approx$ 0,028264**; *liga de alumínio (condutores AAAC)*: **0,0305 a 0,0325**; *liga de alumínio (condutores ACS)*: **0,0848**; *aço*: **0,1916**
- l : comprimento da linha (m)
- s : secção dos condutores (mm^2)

A **reactância indutiva** depende, entre outros factores, da frequência da rede e do número de circuitos no mesmo apoio e a sua configuração, sendo calculada pelas expressões:

$$X_i = 2\pi f x (\mu_0 / 2\pi) x (\ln(d/r_e) + (1/4n)) - \Omega/\text{km} \text{ (linha simples – um circuito)}$$

$$X_i = 2\pi f x (\mu_0 / 2\pi) x (\ln(d x d' / r_e x d'') + (1/4n)) - \Omega/\text{km} \text{ (linha dupla – dois circuitos)}$$

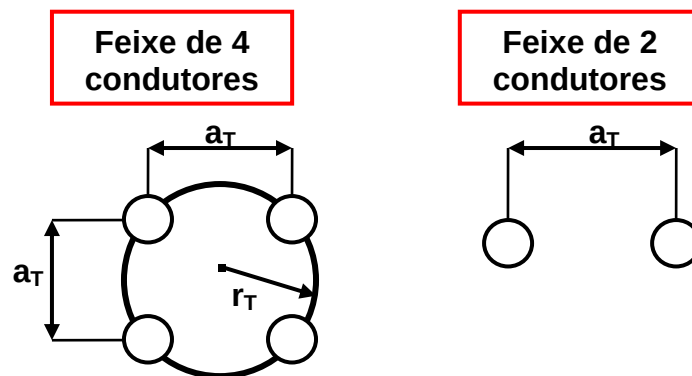
Onde:

- $d = \sqrt[3]{(d_{12} \times d_{23} \times d_{31})}$
- $d' = \sqrt[3]{(d'_{12} \times d'_{23} \times d'_{31})}$
- $d'' = \sqrt[3]{(d''_{11} \times d''_{22} \times d''_{33})}$
- d, d', d'' : Média geométrica das distâncias entre as três fases da linha aérea – mm

¹⁵ BT: Baixa Tensão.

- d_{12}, d'_{12} : Distância entre os condutores das fases 1 e 2 (linha 1 e linha 2) – **mm**
- d_{23}, d'_{23} : Idem fases 2 e 3 – **mm**
- d_{31}, d'_{31} : Idem fases 3 e 1 – **mm**
- $d''_{11}, d''_{22}, d''_{33}$: Distância entre as fases 1 (2 e 3) da linha 1 e da linha 2 – **mm**
- r_e : Raio equivalente do feixe de condutores do cabo – **mm**
- $r_T = \frac{a_T}{2 \times \sin \frac{\pi}{n}}$
- a_T : Espaçamento entre os condutores individuais dos feixes
- r_T : Raio do círculo que passa pelos pontos intermédios dos feixes dos condutores individuais

Exemplificando o significado de r_T e a_T :



- n : Número de condutores individuais que constituem o cabo
- μ_0 : Permeabilidade magnética espacial ($4\pi \times 10^{-4}$ H/km)
- $\ln$: Logaritmo natural (ou neperiano)

A **reactância capacitiva** é calculada pela expressão:

$$X_C = 1 / 2\pi f x C \text{ (}\Omega\text{)}$$

Onde C é a capacidade e é calculada pela expressão:

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon_0}{\ln D/r} \text{ (F/m)}$$

Onde:

- ϵ_0 : Capacidade específica espacial (**8,85 F/m**)
- D : Média geométrica das distâncias entre as três fases da linha aérea – **mm**
- r : raio do condutor – **mm**
- $\ln$: Logaritmo natural (ou neperiano)

7. PROJECTO DE LAT E LMAT

7.1. ASPECTOS GERAIS

Definidas a **tensão nominal da rede** e a **potência a transportar**, o projecto das LAT e LMAT, que é composto por **peças escritas** (*Memória Descritiva, Notas de Cálculo, Instruções de Regulação dos Condutores, Especificações Técnicas, etc.*) e **peças desenhadas** (*na qual estão incluídos o traçado da linha, os perfis longitudinais, os planos de fabrico e montagem das estruturas metálicas, os desenhos dos maciços de fundação, etc.*) deve ser feito, em Portugal, de acordo com o RSLEAT e outros regulamentos e normas aplicáveis referidos, *explícita ou implicitamente*, neste documento, designadamente a Norma EN 50341-1 – *Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – General requirements – Common specifications*.

Esta tarefa inclui uma série de tarefas e de procedimentos, dos quais se destacam, de forma não exaustiva:

- Traçado preliminar da linha (em planta – ver Figura 27).
- Dimensionamento eléctrico e mecânico dos condutores.
- Definição do(s) tipo(s) de apoio, configuração(ões) e número de circuitos por apoio.
- Dimensionamento dos apoios e respectivos maciços de fundação, incluindo o cálculo do vão máximo, de todos os vãos e das flechas, incluindo a determinação da flecha máxima.
- Necessidade de transposições (ver Capítulo 12).
- Ligações dos apoios à terra (*aterramento*) e sistema de protecção contra descargas atmosféricas.
- Determinação dos constrangimentos do traçado (atravessamento de povoações e travessias de vias rodoviárias e ferroviárias, de cursos de água e lagos), eventuais cruzamentos ou vizinhanças com outras infra-estruturas aéreas e possibilidade de interferência com o tráfego aéreo.
- Definição das distâncias mínimas entre fases, entre fases e a terra, ao solo e a vias de comunicação e acidentes geográficos, cujos valores mínimos são indicados no RSLEAT (ou nas NBR).
- Perfil longitudinal da linha (ver Figura 28).

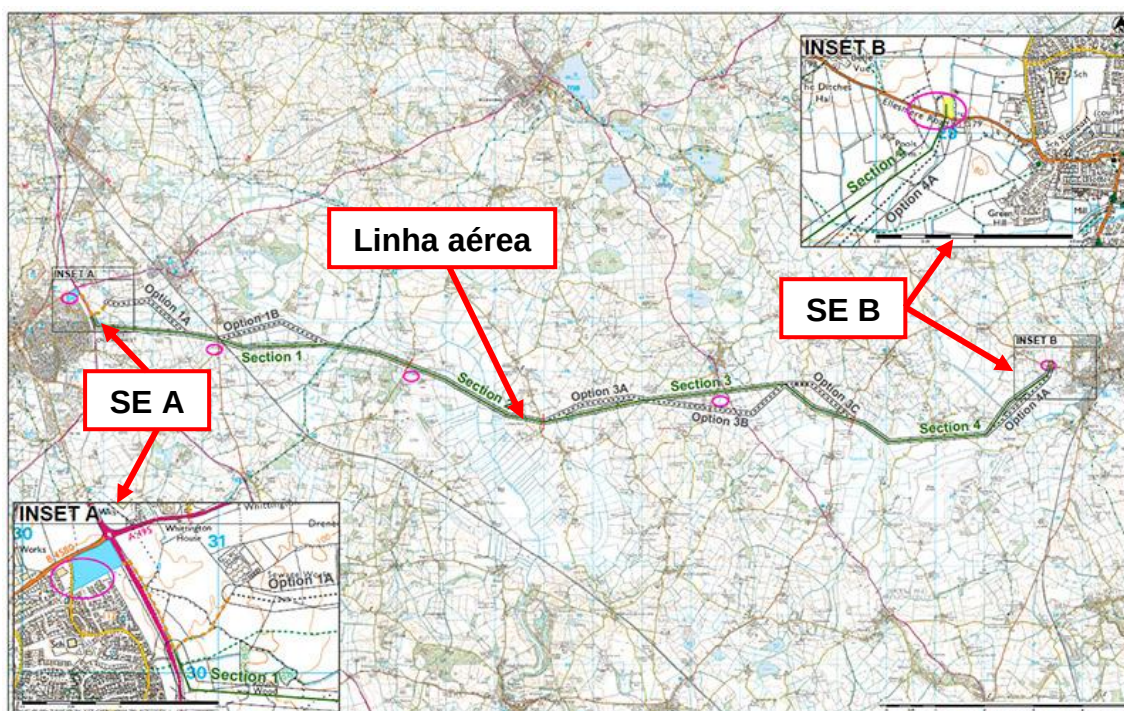


Figura 27 – Exemplo do traçado preliminar de uma linha aérea

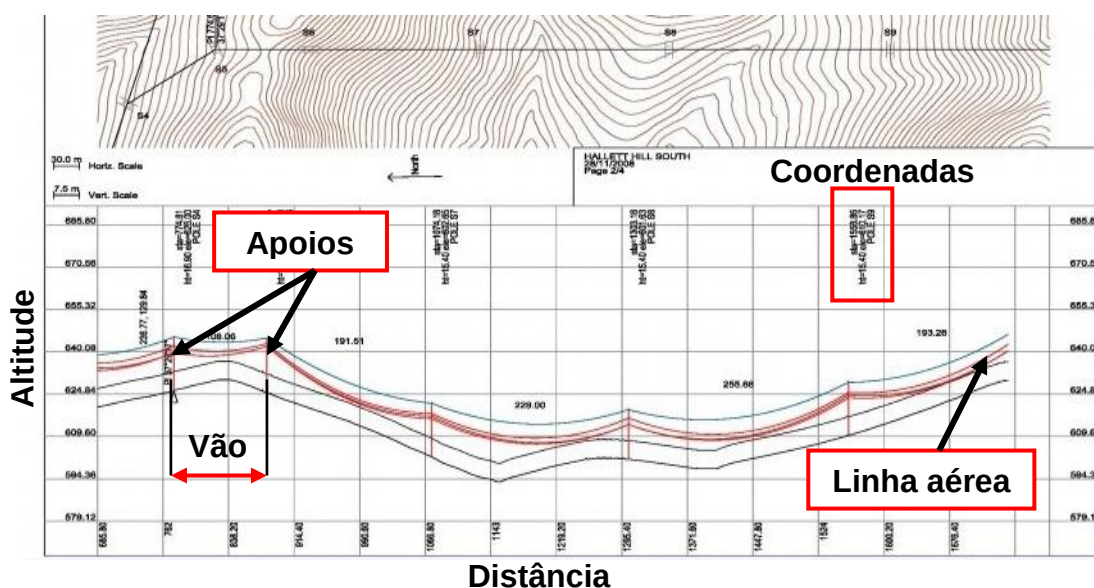


Figura 28 – Exemplo do perfil longitudinal (parcial) de uma linha aérea

7.2. DIMENSIONAMENTO ELÉCTRICO DOS CONDUTORES

No **dimensionamento eléctrico dos condutores** da *linha aérea* é calculada a respectiva **secção**, considerando a existência de um ou dois condutores, tendo em atenção:

- A *corrente de serviço*
- Os *esforços térmicos e electrodinâmicos da corrente de curto-circuito*

A determinação da secção em função da corrente de serviço é feita usando as características indicadas pelos fabricantes para os cabos escolhidos.

Para o cálculo dos **esforços térmicos** são utilizadas as seguintes fórmulas:

$$I_{th} = I''_{k3} \times \sqrt{(m+n)}$$

$$s = (I_{th} / \alpha) \times \sqrt{(t/\Delta\theta)}$$

Onde:

- I''_{k3} : Corrente inicial de curto-circuito trifásico
- I_{th} : Corrente de curto-circuito de curta duração
- m : Factor que traduz o efeito de aquecimento da componente **CC**
- n : Factor que traduz o efeito de aquecimento da componente **CA**
- s : Secção do condutor (mm^2)
- $\Delta\theta$: Aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- α : **13** para condutores de *Cu* e **8,5** para condutores de *Al*
- t : Tempo de duração do defeito, tal como definido no Capítulo 5.1 (s)

Nas Figuras 29 e 30 estão indicados os valores dos factores “ m ” e “ n ”.

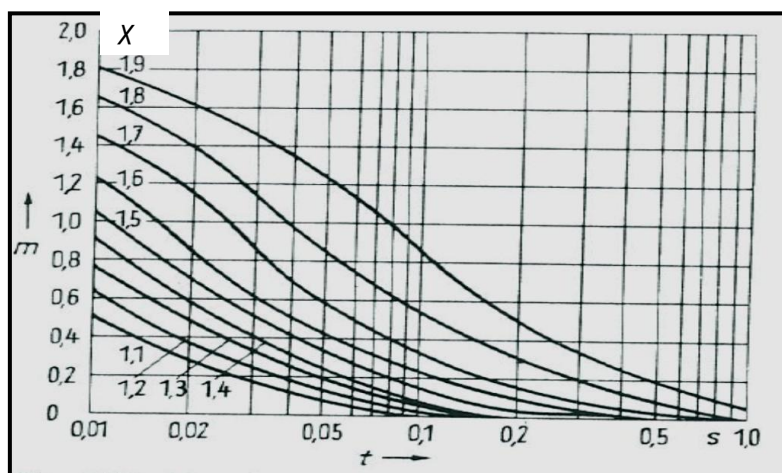


Figura 29 – Factor “ m ”

Notas:

1 – “ t ” é o tempo de duração do defeito

2 – É habitual fazer-se “ $\chi = 1,8$ ”

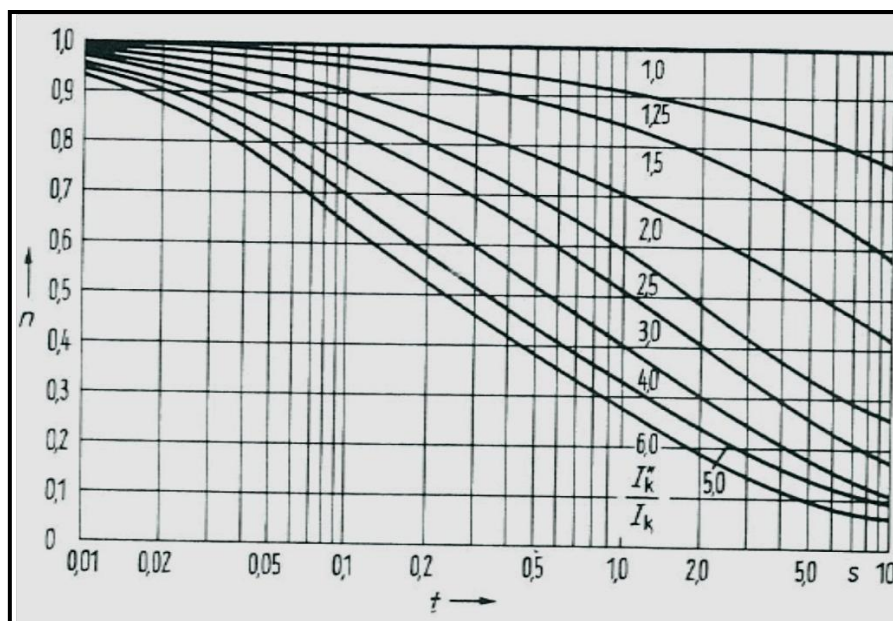


Figura 30 – Factor “n”

Notas:

1 – “t” é o tempo de duração do defeito

2 – I_k é o valor mantido da corrente de curto-circuito; numa rede estável $I''_k/I_k=1$.

O **esforço electrodinâmico** é calculado pela expressão:

$$F_{st} = F_{0st} \times (1 + \phi \times \zeta) \text{ kN}$$

- F_{0st} é o esforço de tracção, que de acordo com o RSLEAT não deve ser superior a 40% da carga de rotura nominal (artº 24) – [N]
- “ ζ ” é o parâmetro característico do vão, e calculado pela expressão:

$$\zeta = ((g \times p' \times l)^2 / (24 \times F'_{st}{}^3)) \times (1 / ((1 / (100 \times l)) + (1 / ((1 / (E \times k)))) \text{ [N/m]}$$

Onde:

- g : aceleração d gravidade – **9,81 m/s²**
- p' : peso do cabo e ligadores por **m**
- Ψ é o factor de reacção do vão, sendo uma função de ζ e de um parâmetro ϕ , característico, e que depende do esforço térmico de curto-circuito e do peso (por unidade de comprimento) do cabo e ligadores; é calculado pela expressão:

$$\phi = 3 \times (\sqrt{1 + ((F / (g \times p'))^2)} - 1)$$

Onde:

- **F (N/m) = $0,2 \times I''_{k2}{}^2 / d$** (I''_{k2} : **kA**; d (distância entre fases): **m**)
- I''_{k2} é a corrente de curto-circuito **fase-fase**

A Figura 31 apresenta o valor de Ψ .

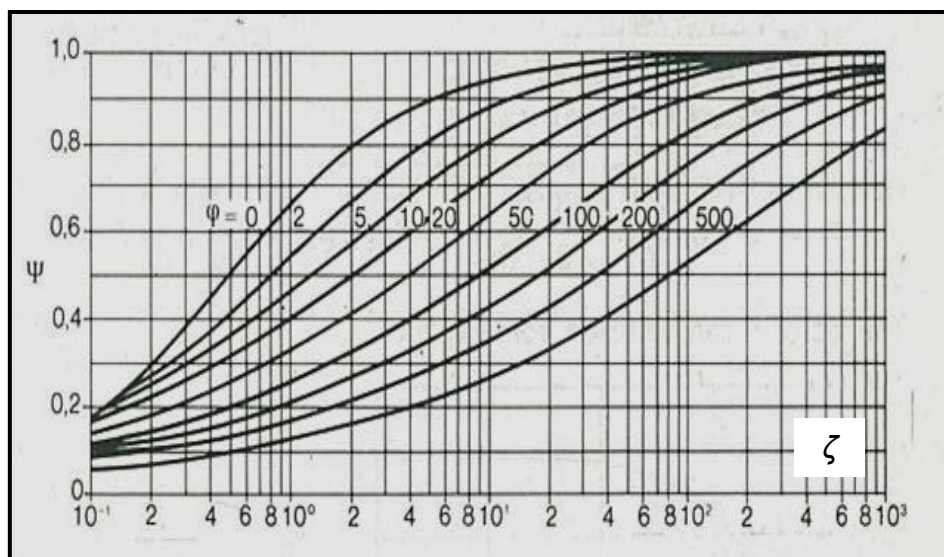


Figura 31 – Determinação do factor ψ

7.3. DIMENSIONAMENTO MECÂNICO DOS CONDUTORES E DOS APOIOS

O **cálculo mecânico** de uma *linha aérea* envolve os condutores e os apoios, devendo ser realizado, em *Portugal*, de acordo com o indicado no *RSLEAT*, compreendendo designadamente:

- Definição do valor da tensão máxima de tracção específica a aplicar a todos os vãos da linha.
- Cálculo dos coeficientes de sobrecarga e valor do **vão crítico** (vão para o qual os condutores ficam sujeitos à mesma tensão máxima de tracção nos estados de Inverno e Primavera).
- Definição de dois valores de vão médio.
- Determinação da tensão de montagem, através da equação dos estados, e cálculo dos parâmetros das curvas associadas a cada vão médio.
- Cálculo das distâncias mínimas regulamentares, desenho das curvas representativas das catenárias e localização dos restantes apoios.
- Definição do tipo de fixação dos condutores.
- Cálculo dos vãos fictícios equivalentes de cada cantão, considerando vãos em patamar.
- Cálculo das flechas ao longo da linha.
- Cálculo dos esforços aplicados aos apoios, por efeito das tracções e peso dos cabos e força do vento sobre isoladores e condutores.
- Escolha dos apoios, segundo análise dos esforços aplicados.

O estudo do comportamento dos condutores de acordo com a temperatura é um elemento indispensável no projecto de uma linha aérea, devido ao facto de com temperaturas elevadas os condutores alongam-se e com temperaturas baixas contraem-se.

A *dilatação dos condutores* provoca o **aumento da flecha** e **diminuição da tensão mecânica longitudinal** a que os condutores estão submetidos; já a sua *contração* provoca uma **diminuição da flecha** e o **aumento do esforço de tracção** sobre a *linha aérea*.

De acordo com o *RSLEAT* este estudo deve ser feito para:

- Estado de Inverno:
 - Menor temperatura previsível
 - Possibilidade da existência de manga de gelo
 - Existência de vento reduzido.
- Estado de Primavera:
 - Temperatura média previsível
 - Ausência de manga de gelo
 - Ventos muito intensos.
- Estado de Verão:
 - Temperatura máxima previsível
 - Ausência de manga de gelo
 - Ausência de vento

8. TRANSIÇÃO LINHA AÉREA/CABO SUBTERRÂNEO

De uma forma geral os *cabos isolados* **não** estão sujeitos a *descargas atmosféricas*, mas nas **transições linha aérea/cabo subterrâneo**, para ligação de uma *linha de energia* a um equipamento *GIS* ou em nos traçados da(s) linha(s) de distribuição de energia em *zonas urbanas*, situações que constituem exemplos da utilização de cabos isolados naquela(s) linha(s), uma *descarga atmosférica* que atinja a *linha aérea* **propagar-se-á ao cabo**, a menos que na *transição* sejam utilizados **descarregadores de sobretensões (DST)**, como se representa na Figura 32.

A **altura do apoio de transição** da *linha aérea* deve estar de acordo com a **distância mínima de isolamento de segurança em relação à terra**, definida nas *normas e regulamentos* aplicáveis, tendo em atenção a *tensão nominal da rede*, e também com o **raio máximo de curvatura** do *cabo isolado*, definido pelo fabricante

Quando a *transição* é feita **perto de vias de circulação**, os *cabos isolados* devem ser montados do lado do *apoio da linha aérea* **oposto** à *via* em causa.

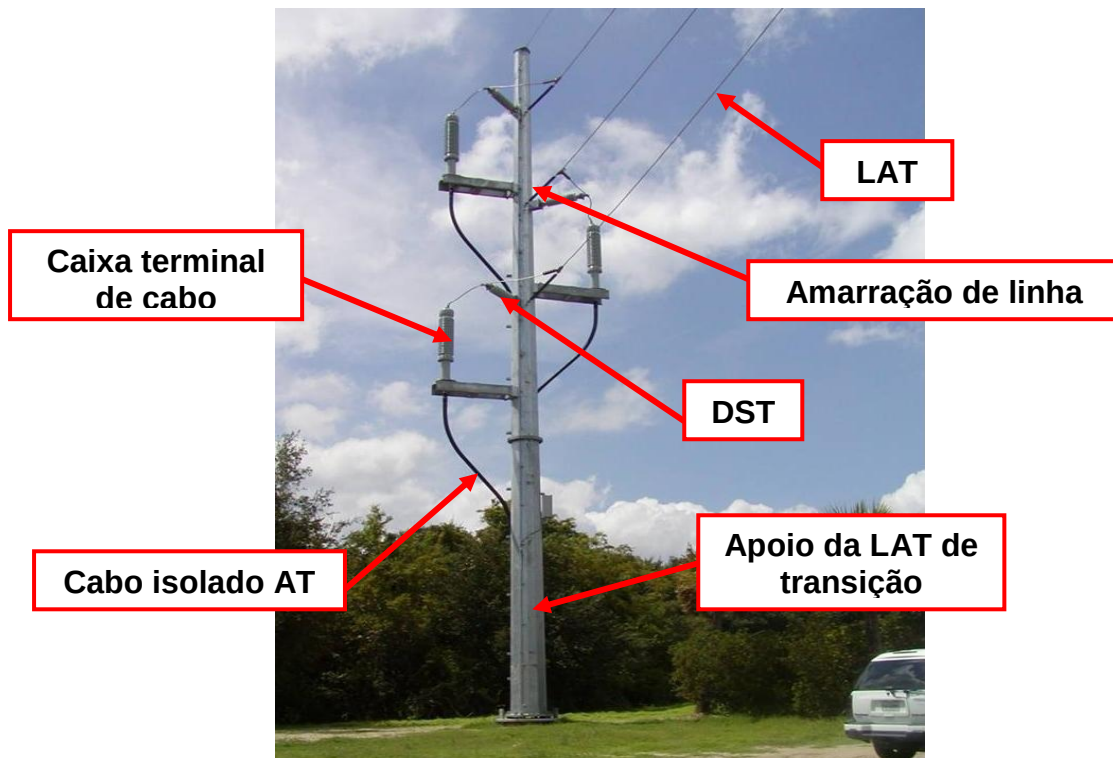


Figura 32 – Transição linha aérea/cabo subterrâneo

9. LIGAÇÃO À TERRA DOS APOIOS

Para minimizar os efeitos que as perturbações ocorridas numa aérea linha possam originar na segurança de pessoas e instalações, **todos os apoios numa linha aérea são individualmente ligados à terra** (*num apoio com mais de que um “pé”, cada “pé” será ligado à terra*), para evitar o aparecimento de tensões de passo e de contacto que possam ser perigosas para as pessoas e instalações e também reduzir as incidências dos defeitos nos equipamentos da linha.

De acordo com o *RSLEAT* os valores de resistência de terra dos postes deverão ser inferiores a **20 Ω** , em **quaisquer condições de tempo ou de medição**.

No caso de *apoios espiados*, as **espias** devem também ser **ligadas à terra**, devendo o *respectivo eléctrodo* ser **electricamente distinto** do *eléctrodo de terra do apoio*. **Caso tal não seja possível as terras do apoio e das espias devem ser ligadas.**

Os **eléctrodos de terra** são constituídos por *materiais metálicos enterrados no solo*, podendo estes serem em **cobre, aço galvanizado, ou aço revestido a cobre** **perfeitamente aderente** ou **outro material apropriado** (*ferro zincado ou ferro fundido*, por exemplo).

Os tipos de eléctrodos de terra habituais são:

- Eléctrodo em serpentina simples

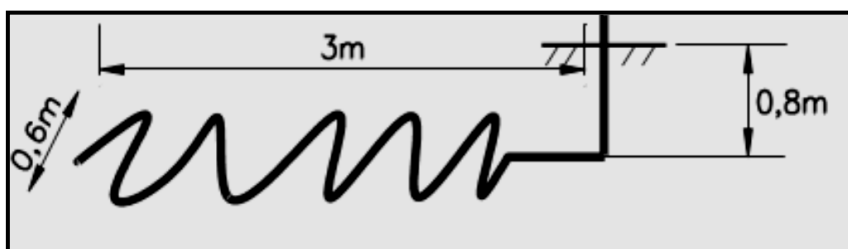


Figura 33 – Eléctrodo em serpentina simples

- Eléctrodo em serpentina dupla

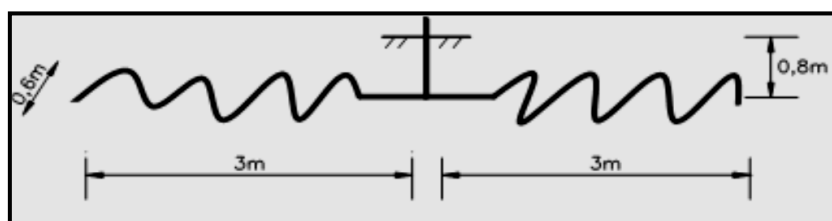


Figura 34 – Eléctrodo em serpentina dupla

- Eléctrodo em serpentina dupla longa

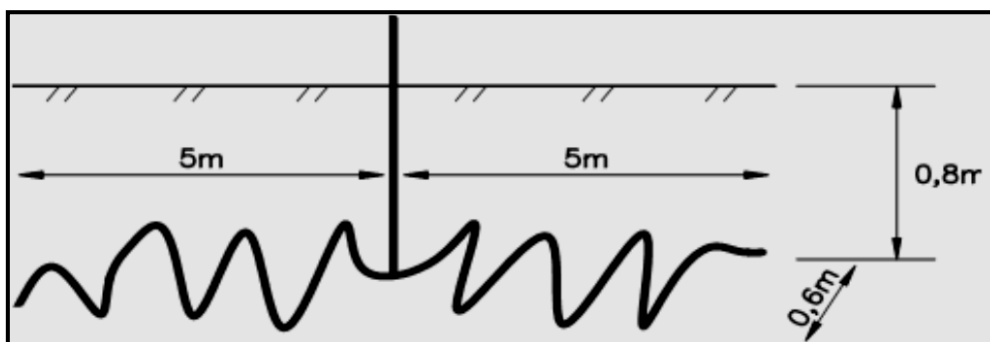


Figura 35 – Eléctrodo em serpentina dupla longa

- Eléctrodo em estrela ou pata-de-ave.

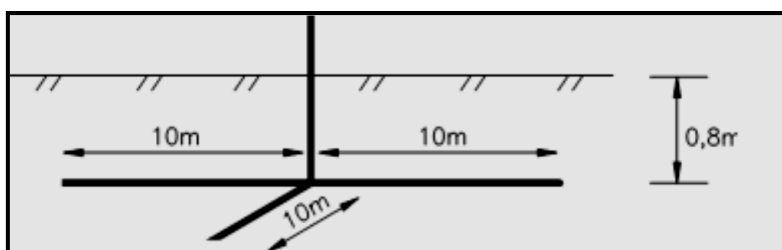


Figura 36 – Eléctrodo em estrela

- Eléctrodo com varetas em paralelo.

As varetas são em aço revestido a cobre com 2 m de comprimento

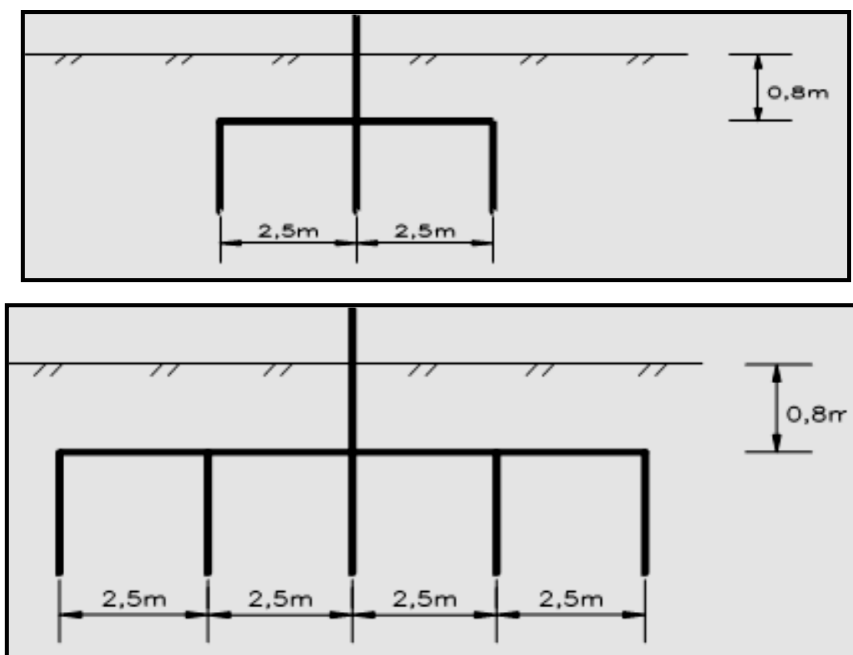


Figura 37 – Eléctrodo com varetas em paralelo – 3 varetas (topo) e 5 varetas (inferior)

Outros tipos de eléctrodos de terra utilizados são:

- Chapa rectangular de cobre, enterrada verticalmente.
- Chapa hemisférica de cobre, enterrada verticalmente.

Os valores da **resistência de terra (R_T)**, expressos em Ω , dos vários tipos de eléctrodos são calculados pelas expressões seguintes:

- Eléctrodo em serpentina simples (com um comprimento total de cabo de cobre de 10 m)

$$R_T = 0,2 \times \rho$$

- Eléctrodo em serpentina dupla (com um comprimento total de cabo de cobre de 20 m)

$$R_T = 0,15 \times \rho$$

- Eléctrodo em serpentina dupla longa (com um comprimento total de cabo de cobre de 30 m)

$$R_T = 0,08 \times \rho$$

- Eléctrodo em estrela ou pata-de-ave

$$R_T = 0,366 \times (\rho / (2L)) \times (\ln (4L/d) + \ln (L/h_s) + 0,465 - 0,18 \times (h_s/L))$$

- Eléctrodo com uma vareta

$$R_T = (\rho / (2 \times \pi \times L)) \times \ln((2 \times L/d) - 1)$$

- Eléctrodo com “n” varetas em paralelo

$$R_T = ((\rho / (2 \times \pi \times L)) \times \ln((2 \times L/d) - 1)) / n \text{ (desprezando o cabo de ligação entre eles)}$$

- Chapa rectangular de cobre, enterrada verticalmente

$$R_T = (0,8xp/P) \times (1 + (P/(16xh_s+P)))$$

- Chapa hemisférica de cobre, enterrada verticalmente

$$R_T = \rho/(\pi xd)$$

Onde:

- ρ é a resistividade do terreno à profundidade de enterramento, em Ωm .
- L é o comprimento do eléctrodo em m .
- P é o perímetro do eléctrodo em m .
- d é o diâmetro do eléctrodo em m .
- h_s é a profundidade de enterramento em m .
- $\ln$ representa o logaritmo natural ou neperiano.

10. PROTECÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os **sistemas de protecção contra descargas atmosféricas (SPDA)** devem ser estabelecidos, em *Portugal*, de acordo com as normas *IEC*, *NP* e *EN* e com o *Guia Técnico de Pára-raios* publicado pela **DGEG** (*Direcção Geral de Energia e Geologia*), que estabelece também os métodos de cálculo, para garantir que as sobretensões geradas não alcancem valores suficientemente elevados que possam danificar os equipamentos, considerando o **níveis de protecção (I, II, III, IV – muito elevado; elevado; normal; fraco)** definidos por aqueles documentos para os tipos de instalações a proteger.

De acordo com a *Norma IEC 62305*, para cada **nível de protecção**, os **valores máximos dos parâmetros da descarga** referentes ao **primeiro impulso positivo** são os indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores máximos dos parâmetros da descarga referentes ao primeiro impulso positivo

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Nível de Protecção			
			I	II	III	IV
Corrente de descarga (pico)	I	kA	200	150	100	
Carga do impulso	Q_{short}	C^{16}	100	75	50	
Energia específica	W/R	MJ/Ω^{17}	10	5,6	2,5	
Parâmetros de tempo	T_1/T_2	$\mu s/\mu s$	10/350			

¹⁶ C: Coulomb.

¹⁷ MJ/ Ω : megajoule por ohm.

Ainda de acordo com a mesma norma os **valores mínimos da corrente de descarga e o raio da esfera fictícia**¹⁸ a considerar indicam-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores mínimos da corrente de descarga e raio da esfera fictícia

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Nível de Protecção			
			I	II	III	IV
Corrente de descarga mínima (pico)	I	kA	3	5	10	16
Raio da esfera fictícia	r	m	20	30	45	60

A protecção das LAT e LMAT contra **descargas atmosféricas** é realizada por meio de um **cabo de guarda** instalado ao longo de todo o percurso, montado no topo dos postes, como se mostra na figura 38.



Figura 38 – Cabos de guarda

Na Figura 39 representam-se, em *alçado longitudinal e transversal*, as **zonas de protecção** dos *cabos de guarda*, em função da *altura de montagem dos sistemas de protecção (H)*, da *distância do cabo de guarda à estrutura a proteger (h_1)* e das *dimensões daquela estrutura ($c \times l \times h$ – comprimento $\times$ largura $\times$ altura)*.

As dimensões da base (d_1 e d_2 , correspondentes aos alçados longitudinal e transversal, respectivamente) da superfície gerada pela recta de inclinação da haste de descarga ($\alpha = 30^\circ$) devem obedecer às seguintes condições: $d_1 > c$ e $d_2 > l$.

¹⁸ A **esfera fictícia**, cujo raio permite definir a zona de protecção onde não há pontos atingidos pela descarga, traduz a aplicação mais aproximada **do modelo electrogeométrico** ao cálculo dos sistemas de protecção contra descargas atmosféricas; este modelo é o que permite uma melhor aproximação às condições reais da descarga, baseando-se fundamentalmente na relação do valor de pico da corrente de descarga e a distância de escorvamento do traçador (canal ionizado que se destaca de uma nuvem carregada e se dirige, por saltos sucessivos, em direcção ao solo).

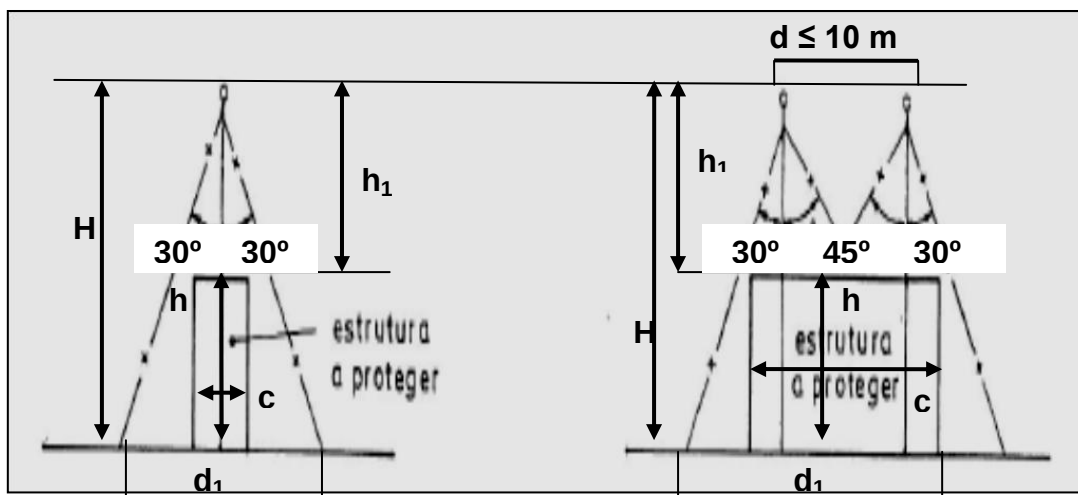


Figura 39 – Zonas de protecção de um cabo de guarda (esquerda) e dois cabos de guarda (direita)

Fonte: Guia Técnico de Pára-raios

Actualmente nas LAT e LMAT, na generalidade dos países, utiliza-se o cabo tipo **OPGW** (Optical Power Ground Wire), um cabo que contém uma *estrutura tubular* com *um ou mais cabos de fibra óptica* destinados à **comunicação** entre SE e/ou com os Centros Operacionais de Rede (**COR**); a estrutura referida é rodeada por *camadas de fio de aço ou alumínio*, que serve de *protecção contra as descargas atmosféricas*, como se representa na Figura 40.

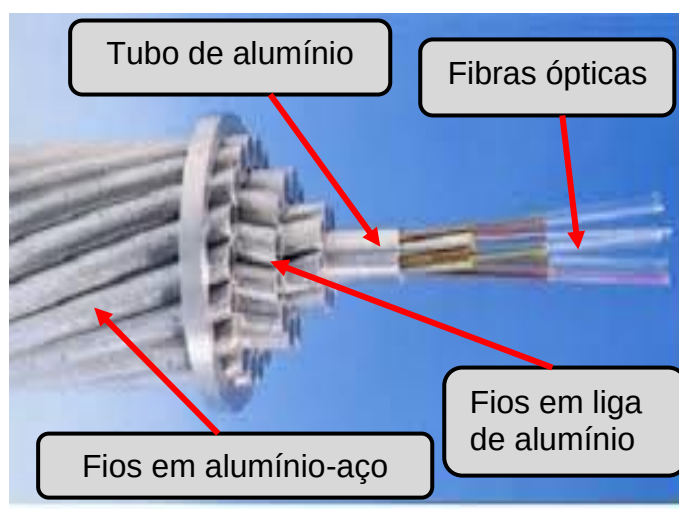


Figura 40 – Cabo OPGW

Nas LAT da gama dos **72,5 kV** mais antigas, onde pode não haver necessidade de comunicação entre SE ou quando essa *comunicação* se realiza através dos *condutores de energia por onda portadora*, com *modulação de frequências*, (**PLC – Power Line Carrier**), os cabos de guarda são habitualmente do tipo **ACSR**¹⁹.

¹⁹ Ver Capítulo 4.

11. BALIZAGEM DIURNA E NOCTURNA

As LAT e LMAT cruzam ou acompanham parte de acidentes vários geográficos, zonas de diversas características e parte das várias **rotas aéreas** quer sejam da aviação comercial quer sejam da aviação militar. Desta situação resulta a **obrigatoriedade** de instalação de **sinalização aérea diurna e nocturna** nas *linhas aéreas*, particularmente devido à grande altura dos apoios, obrigatoriedade essa que decorre da *legislação das entidades aeronáuticas* de cada país (**FAA** (*Federal Aviation Administration*) – *Estados Unidos da América*, **ANAC** (*Autoridade Nacional de Aviação Civil*) – *Portugal* e também com o mesmo nome a **ANAC** (*Autoridade Nacional de Aviação Civil*) – *Brasil*, por exemplo) e ainda pela **ICAO** (*International Civil Aviation Organization*).

Essa balizagem é realizada nas seguintes situações:

- Corredores de aviação.
- Travessia de albufeiras, lagos, lagoas, ou cursos de água com mais de 80 m de largura.
- Travessias em vales pronunciados para alerta na circulação de aeronaves, com ou sem cursos de água com largura superiores a 80 m, quando os condutores excedam a altura de 60 m em relação às quotas da sua projecção horizontal no terreno.
- Zonas de cultura agrícola intensiva, onde a monda química é feita por meios aéreos.
- Zonas de protecção ambiental, para alerta da avifauna.
- Travessias de rodovias principais, ferrovias, túneis, etc., de acordo com a legislação de cada país.

Designa-se como **balizagem diurna** a *pintura dos apoios*, a colocação de *esferas de sinalização* e a montagem de *dispositivos espanta pássaros*²⁰.

A **pintura dos postes** é feita em *faixas alternadas* de aproximadamente **6 m** cada, de tinta **laranja internacional/vermelho** e **branco leite**, alternadamente. A pintura pode ser feita na *totalidade do apoio* ou apenas no seu *corpo superior*, iniciando-se sempre pela *faixa de cor laranja internacional/vermelho*. As tintas a aplicar são à base de *borracha clorada* tendo a demão primária de possuir **características de aderência** à *zincagem dos perfilados*.

As **esferas de sinalização** são montadas nos *condutores e/ou no cabo de guarda*, nas cores **branca, amarela, vermelha** ou **laranja internacional**. São espaçadas de **60 m** entre si e dispostas em **zigzag**, o que, observado na *transversal*, dá uma visualização de **30 m** entre elas, como se representa na Figura 41.

De acordo com a legislação de cada país as *esferas* podem ter vários diâmetros de acordo com a tensão das linhas aéreas ou outras situações muito específicas; o diâmetro deve ser **± 600 mm** e o espaçamentos entre si **30 m**.

²⁰ Ver Capítulo 2.

Se estiverem localizadas sobre **canais de aproximação/descolagem de aeronaves** o *espaçamento*, numa *visada transversal*, deve ser de **12 m**, independentemente do diâmetro da esfera.

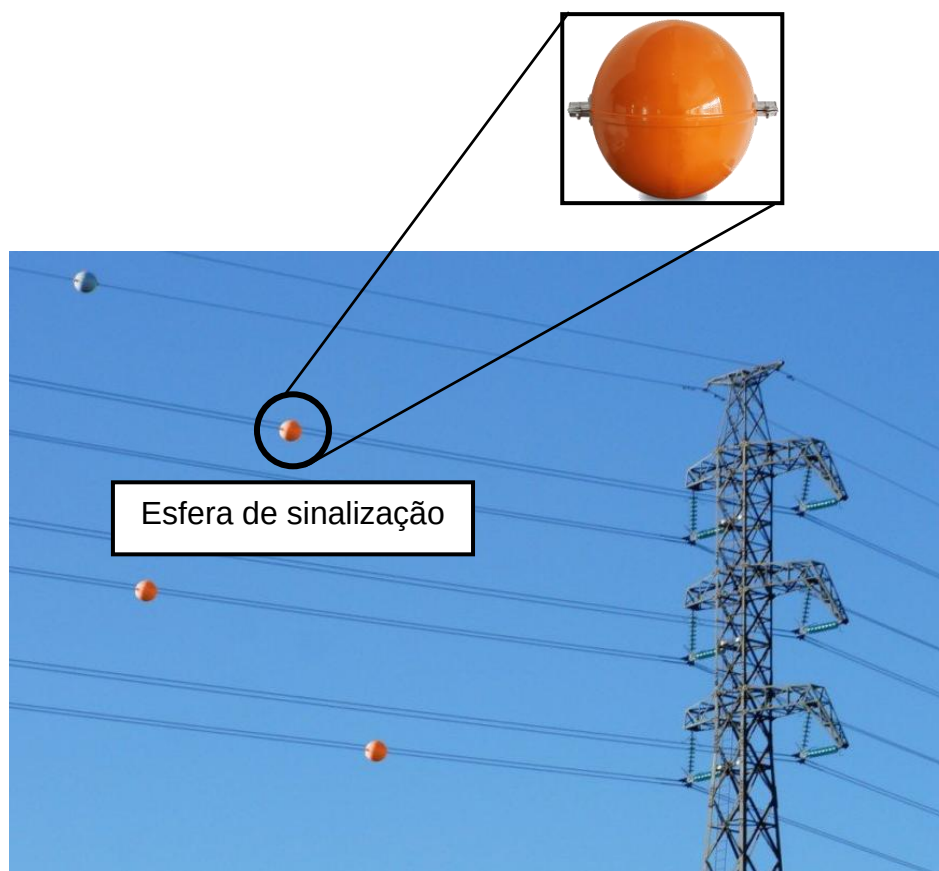


Figura 41 – Esferas de sinalização

Considera-se como **balizagem nocturna** os *dispositivos luminosos* colocados perto dos apoios ou nos próprios condutores da linha aérea, a solução mais utilizada.

Estes **sinalizadores**, de que na Figura 42 se mostra um exemplo e o esquema base de funcionamento, utilizam **lâmpadas de néon de baixa pressão de cátodo frio**, que funcionam com base no princípio dos **condensadores**, constituindo o *condutor da linha aérea* uma das **armaduras do condensador**.

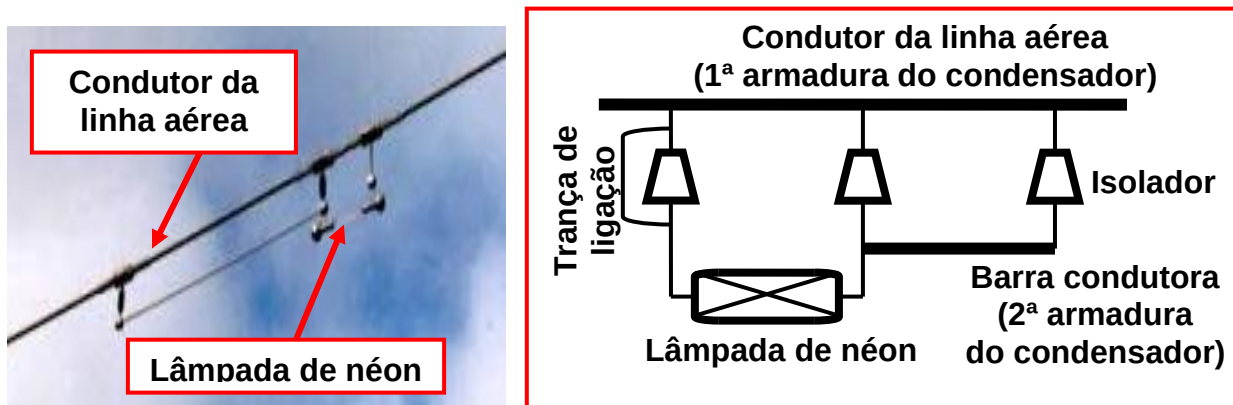


Figura 42 – Sinalizador de linha aérea (esquerda) e esquema base (direita)

Esta solução, conhecida como **sistema balisor**, permite ainda verificar se a linha tem *tensão* ou se há **falta de tensão** numa das *fases*.

Outra solução consiste na montagem no **topo** dos apoios da *linha aérea* **sinalizadores de obstáculos**, com **lâmpadas LED** e *sistema de alimentação híbrido* – **painel fotovoltaico** e **bateria de back-up**). A Figura 43 ilustra um sinalizador deste tipo.



Figura 43 – Sinalizador de obstáculos

12. TRANSPOSIÇÕES DAS LAT E LMAT

12.1. INTRODUÇÃO

Ao abordar o tópico das **transposições** das *linhas eléctricas*, que praticamente apenas se verificam nas *LMAT*, abordar-se-ão basicamente três temas, deixando para posterior análise, num outro documento, a *fundamentação teórica mais aprofundada* desta questão. Os temas que iremos abordar são:

- 1) Definição de transposição
- 2) Razões técnicas das transposições e vantagens
- 3) Como devem ser feitas as transposições

Por questões de simplificação esquemática das *transposições*, as **fases** serão identificadas por cores – **vermelho**, **verde** e **azul**, a que correspondem, respectivamente as letras **A**, **B** e **C**, isto é:

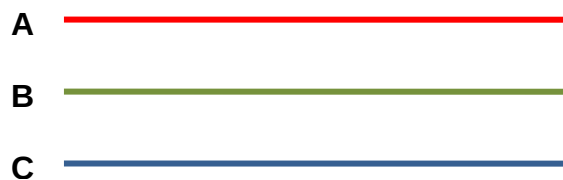


Figura 44 – Codificação das fases

12.2. DEFINIÇÃO DE TRANSPOSIÇÃO

Uma **transposição** define-se como uma **rotação física** dos *condutores de uma linha aérea*, em que *cada condutor ocupa o lugar do condutor que se encontra*

imediatamente a seguir, realizando-se essa mudança no **sentido directo**²¹, como se representa na Figura 45, verificando-se que depois da *transposição* cada fase ocupa uma posição diferente na estrutura metálica dos apoios da linha aérea.

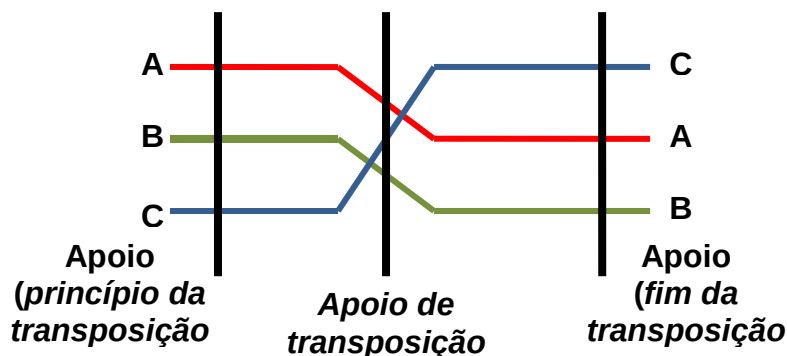


Figura 45 – Exemplo de uma transposição

As *transposições* devem-se iniciar e concluir em **apoios de amarração**²² e, eventualmente, pode ser necessário que os *apoios* entre o princípio e o fim da transposição (que designamos como “*apoio de transposição*”) tenham uma *configuração*²³ diferente dos restantes apoios da linha aérea.

Quando uma *linha aérea* sofre **três** (ou um seu múltiplo) operações de *transposições* tal significa que a **posição relativa das fases em ambos os extremos é a mesma**, designando-se nesse caso a *linha aérea* por **totalmente transposta**.

12.3. RAZÕES TÉCNICAS DAS TRANSPOSIÇÕES E VANTAGENS

A *corrente eléctrica* que percorre cada um dos condutores de uma *linha aérea* provoca **interferências electromagnéticas** nos restantes condutores da linha, particularmente no *condutor adjacente*, onde **induz** uma *corrente*, o que se designa por **acoplamento indutivo**, e nos condutores de outras *linhas aéreas* e de *telecomunicações* que a *cruzam* ou se encontram na sua *vizinhança*. Estas *interferências* são mais significativas para *níveis de tensão elevados*, como é o caso das LMAT, e para *grandes comprimentos da linha aérea*.

As **vantagens** da *transposição* das LMAT são as seguintes:

- Redução do desequilíbrio electrostático e electromagnético entre fases, que contribui para o desequilíbrio da tensão.
- Redução das correntes induzidas nos condutores de linhas nos mesmo apoio ou paralelas, o que minimiza o arco eléctrico que se forma na abertura dos disjuntores aquando de uma manobra de desenergização ou de um disparo por defeito de uma linha aérea. O esforço do disjuntor é menor, o que aumenta a sua vida útil.
- Redução das perdas da linha aérea.
- Redução do acoplamento indutivo nas linhas de telecomunicações que se encontrem na vizinhança.

²¹ **Sentido directo**: sentido dos ponteiros do relógio.

²² Ver Capítulo 3.

²³ Ver Capítulo 2.

12.4. COMO DEVEM SER FEITAS AS TRANSPOSIÇÕES

A **localização exacta das transposições** depende de uma *análise da linha e das linhas adjacentes*. Essa análise deve ser feita tendo também em consideração o comprimento da linha, a geometria dos apoios, a potência a transportar, o valor da tensão e a impedância da linha.

Como *regra geral*, dependendo do *comprimento da linha* ou da existência de *cantões*²⁴ muito longos, pode considerar-se que a *localização das transposições* resulta da *divisão do comprimento total da linha ou do cantão* em **três partes iguais**, como se exemplifica na Figura 46.

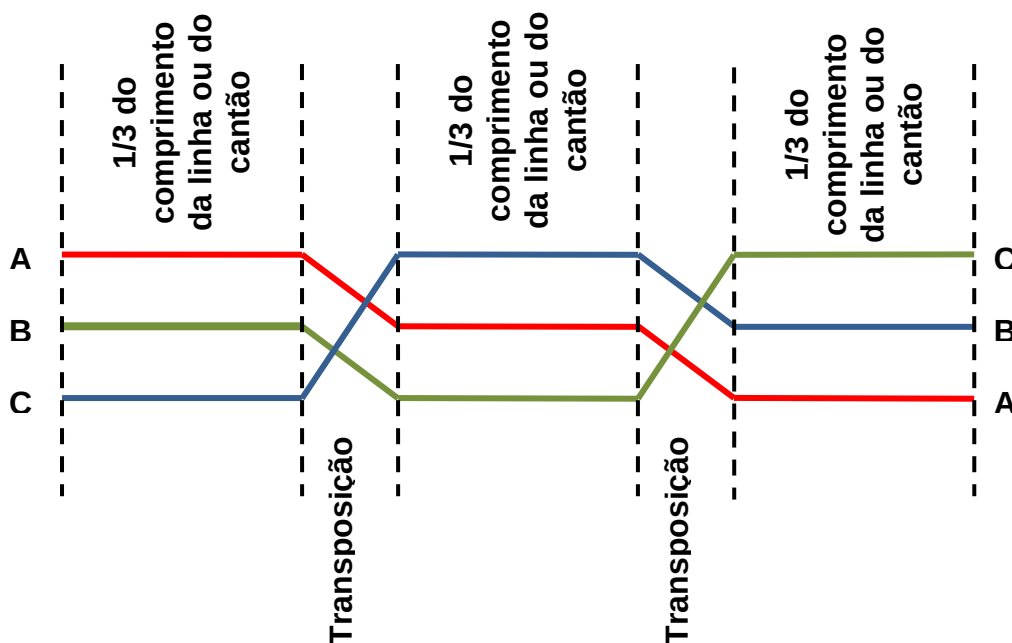


Figura 46 – Transposição de uma LMAT ou de um cantão da linha

13. DEFEITOS E PROTECÇÕES

13.1. TIPOS DE DEFEITOS

Os **defeitos** nas *linhas aéreas* são geralmente consequência de:

- Ciclos de sobrecarga severos.
- Sobreensões na rede, designadamente as de manobra.
- Descargas atmosféricas.
- Isoladores contaminados (poluição), partidos ou lascados.
- Descargas parciais (efeito de coroa) não controlado.
- Impacto de aeronaves e veículos automóveis, designadamente guas móveis.
- Contacto de aves e outros animais.
- Queda de árvores.

²⁴ Ver Capítulo 5 – nota de rodapé nº 12.

- Sobrecargas mecânicas devida ao gelo e à neve.
- Acção do vento.

Uma grande maioria (cerca de **90%**) desses defeitos são **assimétricos** (*curto-circuitos fase-terra e fase-fase*, geralmente **transitórios**, e que são *eliminados após o ciclo de religação*).

13.2. PROTECÇÕES

Nas *LMAT* e *LAT*, integradas em redes com **configuração em anel emalhado**, mais complexas, **não é possível garantir a selectividade entre protecções** utilizando apenas relés de *máximo de intensidade*. O sistema de protecções a implementar nestas situações deve:

- Ser capaz de detectar todos os tipos de defeitos das linhas.
- Ser capaz de distinguir os defeitos na linha protegida dos defeitos de outras linha adjacentes, barramentos, transformadores, etc.
- Ter a capacidade de eliminar o defeito muito rapidamente (habitualmente $\leq 0,1$ s), para garantir a estabilidade da rede.
- Ser confiável e capaz de eliminar qualquer tipo defeito.

As protecções utilizadas nas *linhas aéreas MAT* e *AT* que cumprem estes requisitos são:

- *Protecção diferencial* (código ANSI/IEEE²⁵/IEC 87L).
- *Protecção de distância* (código ANSI/IEEE/IEC 27).

A **protecção diferencial** é normalmente utilizada em **linhas “curtas”** e a **protecção de distância** em **linhas “longas”**, fazendo-se a distinção pela comparação entre a *resistência*, a *indutância* e a *capacitância*, recorrendo ao *diagrama em “ π ” da linha*.²⁶

De uma forma geral, embora seja necessário considerar outros parâmetros, como, por exemplo, a configuração da linha e a distância entre condutores, o efeito de acoplamento electromagnético devido a outras linhas no mesmo apoio ou próximas e a existência de transformadores com regulação automática de tensão e baterias de condensadores, uma linha considera-se “curta” se a resistência e a capacitância forem negligenciáveis face à indutância.

Na prática é habitual considerarem-se *curtas* linhas com comprimentos inferiores a **50-80 km**.

Actualmente a *LMAT* e *LAT* são protegidas por unidades de protecção – **IED** (*Intelligent Electronic Device*) – que para além das funções 87L ou 27 (**protecção principal**), incorporam também as funções 50, 50N, 51, 51N, 67 e 67N²⁷, que funcionam como “*back-up*” da protecção principal.

²⁵ ANSI: American National Standards Institute. IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

²⁶ Ver Capítulo 6.

²⁷ 50: protecção de sobreintensidade instantânea. 50N: protecção de sobreintensidade homopolar instantânea. 51: protecção de sobreintensidade temporizada. 51N: protecção de sobreintensidade homopolar temporizada. 67: protecção de sobreintensidade direcciona. 67N: protecção de sobreintensidade homopolar direcciona.

No caso das *LMAT* é também vulgar utilizar a protecção **Weak End Infeed**, que é um *complemento da protecção de distância*, que actua no caso da *corrente de defeito na linha ter um valor inferior ao da regulação da referida protecção de distância*.

Nalguns sistemas e por uma questão de **fiabilidade e garantia de actuação das protecções**, nomeadamente em *MAT*, existem **2 conjuntos iguais** de *protecções de linha*.

13.3. RELIGAÇÕES

Tendo em atenção a natureza dos defeitos das *LAT* e *LMAT*, é necessário prever, para além do disparo e religações tripolares, disparo e religações monopulares, permitindo restaurar a continuidade do serviço imediatamente após o disparo do disjuntor.

A religação é normalmente bem sucedida após uma temporização de alguns poucos ciclos. A Tabela 5 mostra a taxa de sucesso das religações na eliminação do defeito.

Tabela 5 – Taxa de sucesso das religações

Tentativas de religação	Taxa de sucesso (%)
1	90
2	4
3	1

Em caso de defeito numa linha de transmissão, actuará primeiro a protecção de distância que “vir” o defeito mais rapidamente. A fim de evitar que o defeito continue a ser alimentado até que a protecção situada no outro extremo da linha “veja” o defeito, deverá ser implementado um sistema de teleprotecção que provoque o disparo.

Os ciclos de religação habituais nas linhas de transporte de energia são:²⁸

- **A-F-A** – abertura-temporização (**0,3 s**)-fecho-abertura (religação única)
- **A-F-A-F-A** – abertura-temporização **0,3 s**-fecho-abertura-temporização (**3 m**)-fecho-abertura

Quando são realizados trabalhos em tensão (TET) o religador automático deve ser colocado fora de serviço e bloqueado.

Será utilizado um **relé de bloqueio independente para cada disjuntor**, com *função de disparar os disjuntores adjacentes*.

Será identificada uma condição de **falha de disjuntor** se uma das protecções correspondentes a um disjuntor houver actuado e, após um tempo pré-ajustado, a

²⁸ As temporizações indicadas são indicativas e dependem da exploração da rede e, principalmente, do tempo necessário para que o meio isolante do disjuntor recupere as suas propriedades dieléctricas.

protecção de “Falha de disjuntor” (50BF) continuar operada, indicando a *existência de fluxo de corrente através do disjuntor*.

Uma vez detectada uma condição de falha de disjuntor, deverão ser disparados todos os disjuntores adjacentes ao disjuntor faltoso, dependendo da configuração da SE.

14. MONTAGEM – PRINCÍPIOS BÁSICOS

A montagem das LAT e LMAT obedece a uma série de **procedimentos e operações sequenciais**, que se descrevem de forma resumida.

A *primeira fase* consiste em **reconhecer o traçado** da **linha aérea**, tendo por base a *planta*, à **escala 1/25000**, e o *perfil da linha*, à **escala 1/2500**, e construir, ultrapassados os problemas dos direitos de passagem, o **corredor** da *linha aérea* e os respectivos **acessos**.

O *corredor* serve como **zona de protecção** da *linha aérea*, garantindo a **distância de isolamento de segurança** entre a *linha* e a *área circundante*, e também como a zona privilegiada para depositar os equipamentos e posteriormente para percorrer a *linha* garantir o acesso aos apoios para as futuras **operações de inspecção e manutenção**, *preventiva e curativa*.

Deve fazer notar-se que em algumas zonas da *linha aérea* o acesso só é possível através de **meios aéreos** (*helicóptero*) e que para **linhas muito longas** a sua *percorrida* também só é possível utilizando *meios aéreos*.

Concluída esta fase iniciam-se os *trabalhos de construção* propriamente ditos, com as seguintes *operações sequenciais*:

1 – Piquetagem da linha

Localização no terreno dos *pontos de implantação dos apoios definidos sobre o perfil*, através da **medição e transmissão de alinhamentos e medição de vãos**.

A *definição dos alinhamentos* é feita por *processos topográficos*, a **taqueómetro, estação total ou GPS**, utilizando **marcas ou estacas consolidadas** que balizam, sobre o terreno, os diversos **vértices e pontos dominantes do traçado** e sobre os quais se baseou o levantamento do *perfil longitudinal da linha*.

Os *apoios* são materializados no terreno por **maciços de betão** em *zonas de fácil acesso, ou em terrenos duros e rochosos*, e por **estacas de madeira** nas *restantes situações*.

A *pintura nas estacas, ou noutras marcas inamovíveis*, é a seguinte:

- Identificação dos apoios: **tinta sintética azul**
- Identificação dos alinhamentos: **tinta sintética vermelha**
- Estacas auxiliares para apoio do traçado: **tinta sintética branca**

2 – *Transporte dos postes* para o local onde vão ser implantados.

3 – *Marcação e abertura das covas dos maciços de fundação dos postes*

A marcação das **covas** de cada poste será efectuada pouco tempo antes da respectiva abertura, **através de estacas cravadas no solo**, devendo ser utilizados **meios mecânicos** (*rectroescavadora*), para a *abertura das covas* (ver Figura 47).



Figura 47 – Abertura de covas para maciços de fundação

4 – *Montagem da base do apoio e dos eléctrodos de terra e betonagem dos maciços* (ver Capítulo 3 – Figura 8)

Durante a betonagem devem ser retiradas *amostras do betão* (**provetes**), para realização dos **ensaios de resistência à compressão e abaixamento** (*cone de Abrams*²⁹), conforme estipulado nos *Eurocódigos*.

5 – *Montagem das restantes secções do apoio*³⁰ e respectivas *fixações e apertos*

Esta operação só deve ser feita *após a cura do betão* dos *maciços de fundação* e é realizada com uma *grua ou camião-grua* (ver Figura 48).



Figura 48 – Montagem das secções do apoio com grua telescópica

²⁹ Este ensaio, também designado por “**slump test**” destina-se a medir o *assentamento* que sofre a *massa de betão fresco*, depois da amostra recolhida ser retirada de um **molde metálico de forma de troncocónica**. Este ensaio tem como finalidade determinar a **consistência** do *betão*.

³⁰ Esta *operação* deve incluir também a montagem das chapas de **identificação do apoio** e de “**Perigo de Morte**”, ou semelhante.

6 – Montagem das cadeias de isoladores, pinças de amarração e suspensão e roldanas (ver Figura 49)

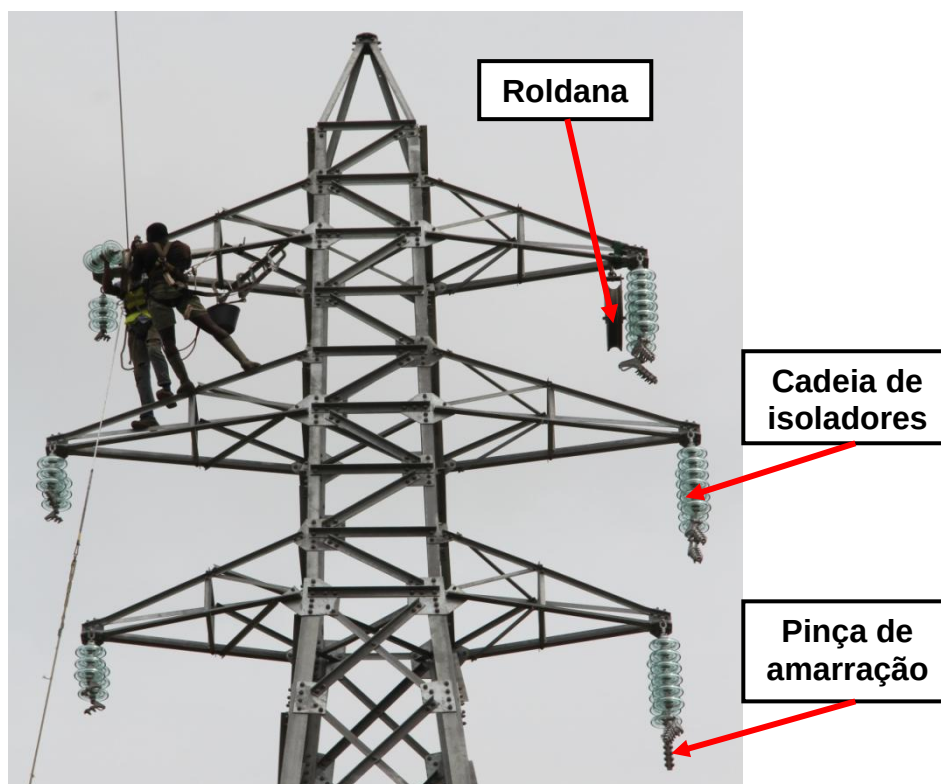


Figura 49 – Montagem das cadeias de isoladores, pinças e roldanas

7 – Desenrolamento dos condutores e cabo de guarda e respectiva montagem

Os condutores e o cabo de guarda são desenrolados usando um **porta-bobinas de tracção mecânica**, um **cavalete para bobinas de cabos** ou um **camião**, conforme as condições do local, sendo montados nas *roldanas* anteriormente referidas (ver Figura 50).

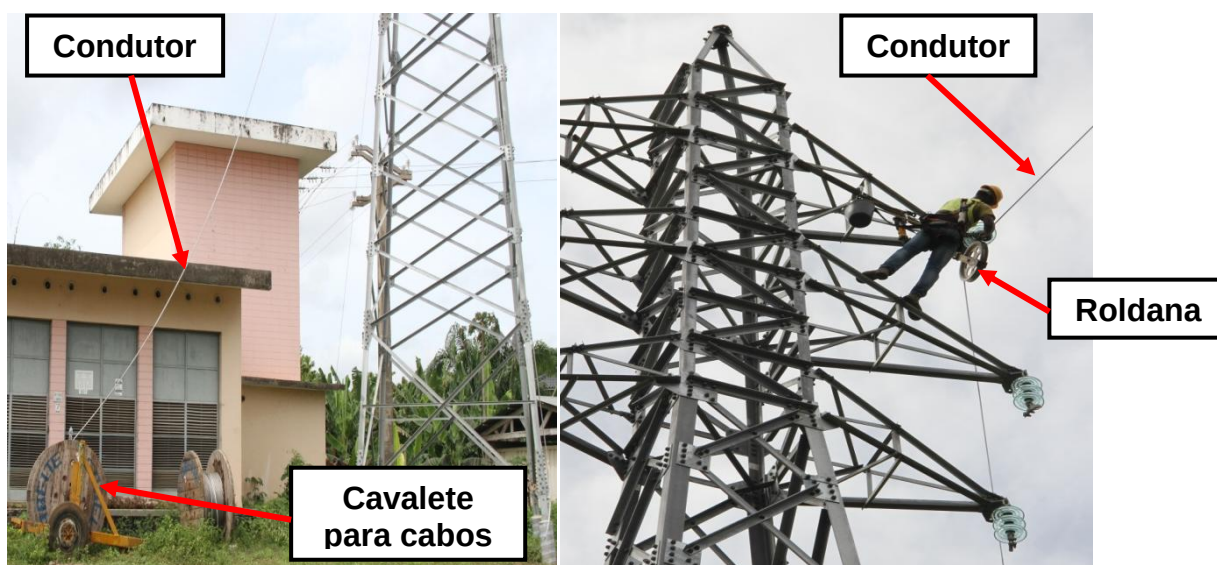


Figura 50 – Desenrolamento de condutores com cavalete para bobinas e montagem em roldanas

8 – Regulação dos condutores

A regulação dos condutores far-se-á pela **medida da tensão de colocação** nos *vãos constantes do projecto*, através de **dinamómetro adequado**, ou pela **medição da flecha**, utilizando neste caso uma **luneta de retículo** (ou *meridiana*).

9 – Fixação de condutores

Ultrapassadas **pelo menos 48 horas** após a conclusão da **operação de regulação do cantão**, os *condutores* podem ser libertados das *roldanas*, sendo, nos *apoios de suspensão*, fixados nas respectivas *pinças de suspensão* e, nos *apoios de amarração*, **ancorados nos braços, ou travessas**, através das *cadeias* (depois destas elevadas), e **fixados** nas *pinças terminais de aperto por parafusos*, colocadas nas suas extremidades.

¹Engenheiro Electrotécnico – Energia e Sistemas de Potência (IST – 1974)
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (FCT-UNL – 2017)
Consultor em Subestações e Formador Profissional

O Autor não utiliza o Novo Acordo Ortográfico