

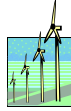
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Linhas de Transmissão



Just Rui Ferreira 2008

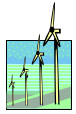


SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

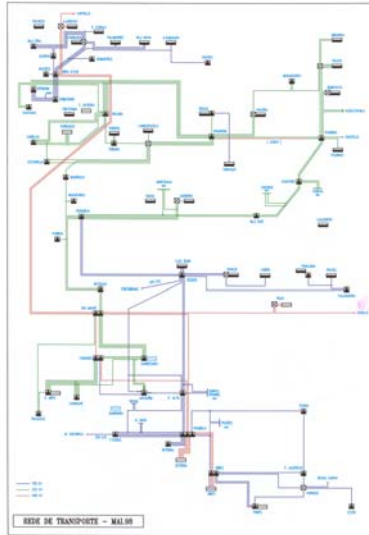


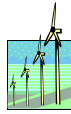
TÓPICOS:

- ❖ Linhas de transmissão de energia? Porquê?
- ❖ Qual a tensão de serviço que se deve escolher para uma linha?
- ❖ Qual o tipo de corrente?
- ❖ Devo optar por uma linha aérea ou por um cabo subterrâneo?



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



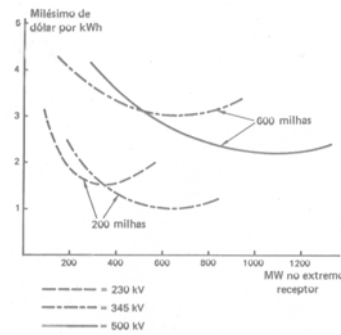


SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

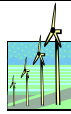


Tensão de serviço

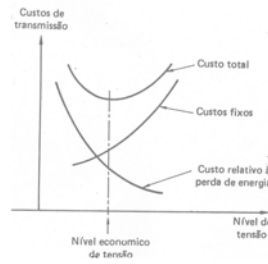
Custo do transporte de energia em função da potência na recepção, do nível de tensão e do comprimento da linha



O óptimo económico (tensão) cresce com o comprimento da linha e com a potência a transmitir



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

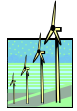


Custos fixos → postes, isoladores, condutores, equipamento terminal, direitos de passagem.

Custos relativos a perda de energia

Potência=150MW Distância=300km Secção 400mm²

Tensão (kV)	Intensidade (A)	Perdas Joule (kW)	Rendimento (%)
U_2	$I = P_2 / (\sqrt{3} U_2)$	$3RI^2 = R (P_2 / U_2)^2$	$\eta = (P_2 / (P_2 + R(P_2 / U_2)^2)) * 100$
15	5774	2647641	5,4
30	2887	661910	18,5
60	1443	165478	47,5
150	577	26476	85,0
220	394	12308	92,4
400	217	3723	97,6



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Outros factores a considerar

- normalização
- limites técnicos
- segurança

Corrente

- Corrente contínua
- Corrente alternada

Tipo de Linha

- ✓ Linha aérea
- ✓ Cabo subterrâneo

Normalização: se a tensão a adoptar fosse ditada apenas por questões de ordem económica, seríamos levados a escolher uma tensão diferente para cada caso. Tal não é viável, questões de fabrico e de ordem económica conduziram a uma normalização de tensões.

Limites técnicos: alternadores, aparelhos de utilização,

Condições de segurança: existem critérios de segurança e normas de segurança em cada país que nos obrigam a utilizar níveis de tensão diferentes consoante o caso.

Corrente

A transmissão de energia eléctrica pode ser feita em corrente contínua ou corrente alternada. Hoje, só em alguns casos é utilizada a transmissão em corrente contínua.

As vantagens da utilização de alternadores (máquinas de corrente alternada) relativamente aos dínamos (máquinas de corrente contínua) na produção da energia eléctrica, matéria a ser estudada em outras disciplinas, a facilidade de conversão dos níveis de tensão para os adequar às diferentes etapas da cadeia de energia, e a necessidade de muitos equipamentos terminais serem alimentados em corrente alternada, levaram a que se use quase exclusivamente a corrente alternada.

No entanto convém referir, que o uso de corrente contínua não foi completamente abandonado, há casos em que é utilizada na transmissão de energia eléctrica, como é o caso do transporte de grandes quantidades de energia a longa distância em meios ambientes adversos (efeito pelicular) ou quando é necessário efectuar a interligação de dois sistemas a frequência diferente.

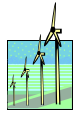
Tipo de linha

A linha aérea e o cabo subterrâneo diferem consideravelmente na sua constituição e conseqüentemente nas suas propriedades.

A linha aérea é formada por condutores nus ou em torçada, dependendo do nível de tensão, montados em apoios por intermédio de peças isoladas que se designam por isoladores.

O cabo subterrâneo é constituído por condutores isolados ao longo de todo o seu comprimento e reunidos num invólucro comum convenientemente protegido.

Dado que o custo das linhas aéreas é substancialmente mais baixo, este tipo de linhas é usado sempre que possível ...



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



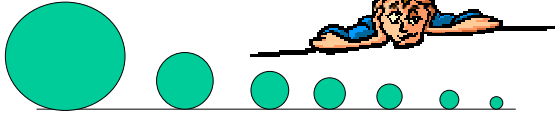
Linhas aéreas



Que material utilizar para os condutores?

Platina **Ouro** **Cobre** Alumínio Aço
Almelec Outras ligas

Almelec liga de alumínio com pequenas quantidades de ferro silício e magnésio
Aldrey ...



The diagram shows a horizontal line representing a conductor. Above the line, a cartoon character with a large nose is lying on their stomach, looking at the line. Below the line, a series of seven circles of decreasing size from left to right represent different cross-sections of the conductor. The largest circle is on the far left, and the smallest is on the far right.

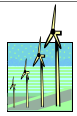
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

Escolha da Secção

Considerar:

- Intensidade admissível em regime permanente
- Queda de tensão
- Características mecânicas dos condutores
- Intensidade de curto-circuito admissível
 - esforços térmicos
 - esforços electrodinâmicos
- Efeito coroa
- Aparelhagem de protecção
- Normalização
- Condições de segurança
- Condições regulamentares
- Perdas de energia
- Preço

Efeito coroa: a corrente de fuga nas linhas aéreas e geralmente muito pequena e vai subindo proporcionalmente com a tensão até um determinado limite. A partir desse ponto o crescimento torna-se muito rápido deixando de ser desprezável. Assim para valores muito elevados de tensão a corrente de fuga pelo ar passa a ter um valor significativo e o ar, que quando seco é um isolante perfeito deixa de o ser. O campo eléctrico passa a ter valores elevados e começam a aparecer eflúvios luminosos, produzindo um leve crepitar, nos pontos onde há arestas ou saliências, em resultado do conhecido poder das pontas; esses eflúvios constituem o começo da perfuração do dieléctrico. A partir de determinado valor de tensão, e quando observado na escuridão, todo o condutor aparece envolto por uma auréola luminosa azulada, que produz um ruído semelhante a um apito. Este fenómeno é o **Efeito de Coroa**.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Factores a considerar

Preço → Matérias primas
→ Indústria transformadora
→ Custo energético

Resistividade → Quedas de tensão
→ Perdas Joule

Características mecânicas → Tensão de ruptura
→ Reutilização

Corrosão → Tempo médio de vida da instalação
→ Local de implantação

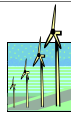
Temperatura de funcionamento → Potência veiculável
→ Exploração

Baixa resistividade: as perdas de energia e as quedas de tensão ao longo da linha devem ser o mais reduzidas possível;

Elevada resistência mecânica: os condutores da linhas aéreas estão sujeitos a importantes esforços mecânicos que têm de suportar;

Elevada resistência à corrosão atmosférica: o custo de uma linha aérea é elevado pelo que há que garantir uma vida longa para os condutores;

Baixo custo: o encargo financeiro relativo à construção da linha aérea não deve ser demasiado elevado para que a sua exploração seja rentável.



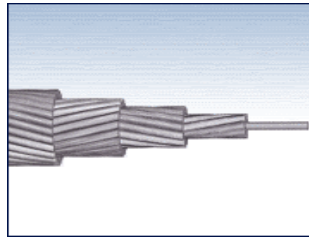
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



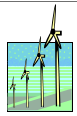
Comparações ...

	COBRE RECOZIDO	COBRE DURO	ALUMÍNIO	ALMELEC	UNID
RESISTIVIDADE A 20°C	0,01724	0,0176	0,02828	0,0326	$\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$
COEF. TEMP.	0,0039	0,0039	0,004	0,0036	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
TENSÃO DE RUPTURA	24	40	18	35	kg/cm^2
PESO ESPECÍFICO	8,9	8,9	0,7	2,7	g/cm^3

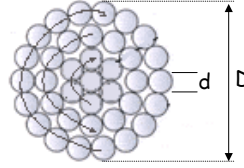
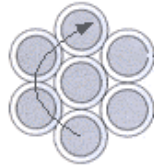
Condutores em Cabos



Nas linhas aéreas os condutores são unifilares apenas para secções até 10mm². Para secções superiores os condutores são multifilares tal como mostra a figura acima, daí a designação de condutores em cabos.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Os fios estão enrolados em sentidos contrários. Porquê?

Qual a vantagem de utilização de condutores multifilares?

Cabos Homogéneos

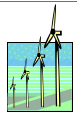
1+6	1+6+12	1+6+12+18	1+6+12+18+24
7	19	37	61 fios
$D=3d$	$D=5d$	$D=7d$	$D=9d$

Fios do mesmo diâmetro

Os fios são dispostos em torno de um fio central, em camadas sucessivas enroladas em sentidos contrários para um melhor aperto.

A utilização de condutores multifilares torna-os mais flexíveis, logo mais fáceis de manipular. Há outras razões que serão focadas mais à frente.

Nos cabos homogéneos usam-se fios do mesmo diâmetro.

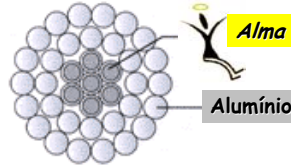


SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Cabos Mistos

Caso típico → Alumínio-aço



O cabo de alumínio-aço comparado com o cabo homogêneo de cobre com a mesma resistência tem ...

- **Maior diâmetro** - pode ser vantagem ou desvantagem
- **Menor peso** - vantagem
- **Maior resistência mecânica** - vantagem

Os cabos homogêneos de alumínio têm um emprego limitado, nomeadamente na alta tensão.

Os cabos mistos mais usados são os de alumínio-aço. São constituídos por uma alma em aço galvanizado de 1 ou mais fios envolvida por duas ou três camadas sucessivas de fios de alumínio. Normalmente os fios têm o mesmo diâmetro.

Como se sabe na corrente alternada a corrente distribui-se, quase exclusivamente, à superfície dos condutores pelo que nos cabos mistos se adopta a seguinte hipótese:

- a passagem da corrente é assegurada exclusivamente pelo alumínio, enquanto a resistência mecânica é fornecida exclusivamente pelo aço.

Da comparação entre o cabo de cobre e de alumínio-aço com a mesma resistência, logo com as mesmas perdas, podemos concluir:

- o cabo de alumínio-aço apresenta um diâmetro cerca de 40% superior; permite reduzir o efeito coroa muito útil nas linhas de alta e muito alta tensão;

- o cabo de alumínio-aço apresenta uma maior resistência mecânica e é mais leve o que permite reduzir as flechas e aumentar os vãos. No primeiro caso permite diminuir a altura dos apoios, o segundo permite reduzir o número de apoios, isoladores e ferragens.

SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

Condutores Simples?
Ocos?
Múltiplos?

Porquê?

Tensões > 220kV → uso de condutores múltiplos

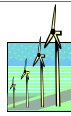
Mais uma vez o efeito coroa

Agora percebi!!!
 Porque é que aumentar a secção é uma vantagem

E o oco?

Comparando os 3 casos (cobre, alumínio e dois condutores de alumínio), para a mesma resistência e tensão, vemos que a proximidade das linhas de fluxo do campo eléctrico na superfície dos condutores é diferente sendo progressivamente menor do cobre para os 2 condutores de alumínio. A proximidade das linhas de fluxo é uma medida da intensidade do campo eléctrico. Como vimos atrás quanto maior o campo eléctrico maior a possibilidade de ocorrência do efeito coroa. Daí a utilização de feixes de condutores para tensões superiores a 220kV.

O condutor oco permite "aumentar" a secção, mas a sua manipulação é difícil e o seu preço elevado pelo que é pouco utilizado.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Projecto de uma linha aérea

Cálculo mecânico

VENTO

Coef. redução

Coef. Forma

Pressão dinâmica

Área exposta

$$F = \alpha \cdot c \cdot q \cdot S$$

GELO



Outros Cálculos ...

Aquecimento

Vibrações

Resistência mecânica - Flechas; tensão de tracção, ...

Protecção contra contactos acidentais
distância a: edifícios,
solo, árvores,...

F - é a força do vento por unidade de comprimento

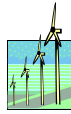
α - é um coeficiente de redução que traduz a variação de velocidade da actuação do vento ao longo do comprimento do condutor

c - é um coeficiente de forma que traduz a influência da forma geométrica do elemento exposto à acção do vento e da direcção do vento

q - é a pressão dinâmica do vento

S - é a área da secção do elemento apresentado à acção do vento.

Para os cabos de guarda devem ser efectuados os mesmos cálculos.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Isoladores



Função?

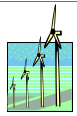
Evitar a passagem de corrente do condutor ao apoio ou suporte e sustentar mecanicamente os cabos, barramentos, ...

Mas será que o isolador cumpre sempre a função para que foi criado?

Que fenómenos podem ocorrer? Quais os mais graves?
Como poderemos evitá-los?



Nas linhas de transmissão, os isoladores usados nas cadeias de suspensão e suporte isolam electricamente as linhas dos apoios, da terra e sustentam mecanicamente os cabos aéreos de transporte de energia fixados nas estruturas metálicas, de betão ou de madeira.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Os fenómenos ...

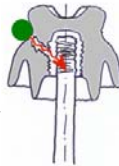
Condutividade da massa do isolador

O seu valor é insignificante → **DESPREZAR**



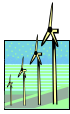
Perfuração da massa do isolador

Incidente grave, com probabilidade crescente de ocorrência à medida que aumenta o nível de tensão




Condutividade da massa do isolador - com os materiais actualmente utilizados no fabrico de isoladores, a corrente resultante é insignificante podendo ser desprezada.

Perfuração da massa do isolador - Em baixa tensão este problema praticamente não se coloca, dada a pequena espessura do isolador é possível garantir a homogeneidade do material que o constitui. Em alta e muito alta tensão a espessura do isolador é grande, o que implica cuidadosos processos de fabrico de forma a evitar a existência de heterogeneidades no interior da massa do isolador, que conduzam ao perigo de perfuração.




SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

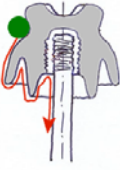


Condutividade superficial

Poeiras e sais depositados + humidade → condução de corrente



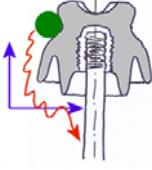
- ✓ Alongar a linha de fuga (forma do isolador)
- ✓ Aumentar o número de saias
- ✓ Proceder à limpeza (manutenção)
- ✓ Agradecer à chuva



Descarga disruptiva e contornamento

Arco entre o condutor e as partes metálicas dos suportes.
Causas:

- Rigidez dieléctrica do ar
- Sobretensões nas linhas

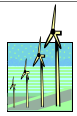


Condutividade superficial - contornamento da parte exterior do isolador. Este contornamento é favorecido pela deposição de poeiras e sais na superfície do isolador e pela presença de humidade, gelo ou neve. Pode ser evitado dando ao isolador uma forma conveniente, de modo a tornar o mais longo possível o caminho da corrente de fuga (linha de fuga), procedendo à limpeza do isolador ou agradecendo ao deuses a queda de chuva. A linha de fuga normal é de $1,5 \text{ cm.kV}^{-1}$ e a linha de fuga alongada vale $2,6 \text{ cm.kV}^{-1}$.

Descarga disruptiva e contornamento - arco entre o condutor e as partes metálicas dos suportes quando a rigidez dieléctrica do ar se apresenta com um valor bastante baixo, o que acontece sobretudo com chuva ou se o grau de humidade for elevado.

Daqui se conclui que os isoladores deverão ter as seguintes características:

- Elevada resistividade
- Rigidez dieléctrica suficiente para que a sua tensão de perfuração seja muito superior à tensão de serviço, o que lhes permite suportar sobretensões que possam aparecer na linha sem risco de perfuração. Caso se verifique perfuração, a rigidez dieléctrica do isolador está definitivamente comprometida e a energia que se desenvolve no seu interior, devido ao arco resultante, poderá levar à explosão do isolador e à conseqüente queda do condutor.
- Forma adequada para em primeiro lugar diminuir a corrente de fuga até que seja praticamente desprezável e, em segundo, evitar as descargas de contornamento.
- Resistência mecânica suficiente para suportar os esforços exercidos pelos condutores.
- Resistência às variações bruscas de temperatura.
- Preço baixo.



Tipos de Isoladores

Isoladores de suspensão de Porcelana

Rígidos

isoladores bastão



isoladores pino

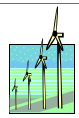


isoladores pilar



isoladores roldana





SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Suspensos

Isoladores de campânula simples



Isoladores de campânula simples anti-poliuição



Cadeia de isoladores →



Para tensões de serviço superiores a 60kV, e por vezes mesmo para tensões inferiores, os isoladores rígidos são difíceis de montar e demasiado frágeis devido às suas dimensões, logo pouco seguros. Assim, foi necessário desenvolver novos tipos de isoladores tendo surgido os isoladores suspensos compostos por vários elementos reunidos em forma de cadeia. Estes isoladores podem ser de porcelana ou vidro.

Basicamente existem 3 tipos diferentes de elementos que formam as cadeias de isoladores:

- isoladores de campânula simples;
- isoladores de campânula dupla;
- isoladores de tronco longo.

Uma cadeia de isoladores é formada por uma série de isoladores de campânula de porcelana ou vidro.

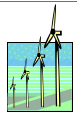
O número de isoladores que forma uma cadeia depende da tensão. Para a tensão de 120 kV usa-se de 6 a 8 isoladores enquanto para linhas de 500 kV são usados de 26 a 32 isoladores.

A tensão média por isolador é de 10 kV.

Cadeias de suspensão - Cadeias verticais ou em V são usadas em postes onde apenas há suspensão de linhas (postes de alinhamento) ou pequeno ângulo.

Cadeias de amarração - Cadeias horizontais são usadas em postes de amarração, de ângulo ou fim de linha.

As cadeias podem ser simples ou duplas.

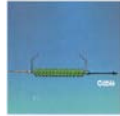


SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



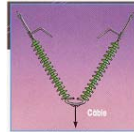
Alguns exemplos ...

Suspensão simples

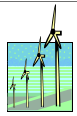


Amarração simples

Suspensão dupla em V



Amarração Dupla



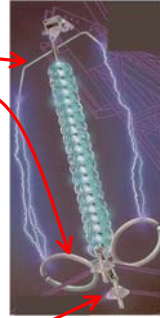
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



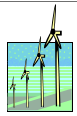
Acessórios

Anéis
e
hastes de descarga

Pinça de amarração



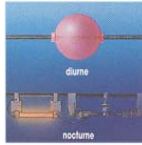
Amortecedores
"Stock bridge"



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Separadores de feixe

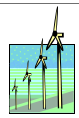


Avisos à navegação

Protecção de aves



Trabalhos em tensão



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Ensaio de isoladores

Quanto à natureza

Eléctricos { Freqüência industrial
Choque

Mecânicos



Térmicos

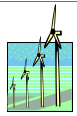
Os **ensaios eléctricos** têm por finalidade verificar quais os níveis de tensão que o isolador suporta sob determinadas condições, em que o isolador pode ser chamado a funcionar, sem que se verifique contornamento ou perfuração. No caso de existir contornamento avalia-se a resistência mecânica do isolador.

Em funcionamento normal, à tensão de serviço, podem surgir diferentes tensões de contornamento consoante as condições do ambiente tais como temperatura, humidade, depósitos salinos, Importa conhecer, à partida, qual o comportamento do isolador sob essas condições, uma vez que a capacidade de isolamento é afectada.

Além deste ensaio é importante também conhecer o desempenho do isolador face a outro tipo de sobretensões, como as devidas ao fecho ou abertura de linhas e a descargas atmosféricas.

Os **ensaios mecânicos** servem para verificar a resistência do isolador às solicitações mecânicas, normais ou excepcionais, a que vão estar sujeitos em funcionamento como sejam as que resultam do peso dos condutores, da acção do vento, do peso da camada de gelo que porventura se deposite sobre os condutores, ...

Com os **ensaios térmicos** pretende-se verificar a resistência do isolador às variações mais ou menos bruscas da temperatura. Estes ensaios são realizados mergulhando o isolador alternadamente em água quente e água fria. No final dos ensaios o isolador não deverá apresentar qualquer fissura ou fenda. Qual o interesse? Linhas aéreas em zonas desérticas ...

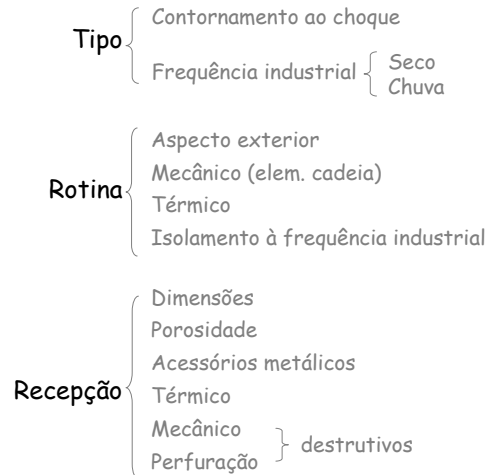


SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Ensaio de isoladores

Quanto às condições

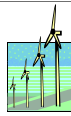


Ensaio tipo destinados a conhecer as características eléctricas do isolador, função da forma e dimensão. Estes ensaios são realizados apenas quando se cria ou altera um isolador e destinam-se a verificar se as características correspondem às projectadas.

Ensaio de rotina individuais e efectuados sobre a totalidade dos isoladores apresentados ao comprador. Destinam-se a eliminar os isoladores defeituosos.

Ensaio de recepção efectuados na presença do comprador sobre alguns dos isoladores adquiridos.

Com a implementação das actuais normas de qualidade alguns destes ensaios tendem a desaparecer ou a ser realizados só em casos pontuais. Muitas das empresas tendem a ser empresas certificadas por institutos internacionais o que à partida confere credibilidade aos produtos fabricados. No entanto, as empresas compradoras têm também mecanismos de controlo sobre os produtos adquiridos. Mediante o fornecedor o controlo de recepção pode ser mais (controlo a 100%) ou menos apertado (sem controlo).



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I

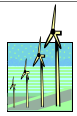


Apoios

Um apoio para linha aérea é constituído pelo poste e respectiva fundação e ainda pelos elementos que suportam os condutores (travessas)

Material {
 Madeira
 Metálicos
 Betão armado

Fundações {
 Madeira {
 Solo
 Bases (betão, ferro,...)
 Maciços
 Betão — Solo
 Metálicos {
 Solo
 Maciços



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Apoios

Ligação
à terra

Apoios (metálicos e betão)
Caixas de fim de cabo e
bainhas dos cabos
Interruptores e seccionadores
aéreos

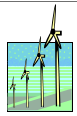
Tipos de
esforços

Verticais
Transversais
Longitudinais

Esforços verticais devido ao peso dos condutores e a possíveis depósitos de gelo ou neve sobre eles.

Esforços transversais que resultam quer da acção do vento sobre os apoios, quer das tracções dos condutores quando formam ângulo.

Esforços longitudinais se os esforços mecânicos aplicados ao apoio pelos condutores dos dois vãos adjacentes são diferentes ou se o apoio só suporta condutores de um dos lados.



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



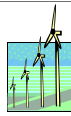
Apoios

Classificação dos apoios

Apoio de alinhamento



Apoio de ângulo



SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Apoios

Classificação dos apoios

Apoios de derivação
Apoios de travessia
Apoios de cruzamento
Apoios fim de linha

Apoios de reforço
(alinhamento, ângulo,
derivação)

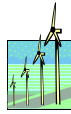


Apoios de alinhamento suportam unicamente os condutores e cabos de guarda quando os dois vãos adjacentes estão no prolongamento um do outro. Esforços verticais e transversais.

Apoios de ângulo utilizados para suportar os condutores e cabos de guarda nos vértices dos ângulos formados por dois alinhamentos diferentes. Esforços verticais e transversais.

Apoios de reforço servem para proporcionar pontos firmes na linha que limitam a propagação de esforços longitudinais de carácter excepcional, por exemplo, a ruptura de um condutor. Normalmente colocados em cada 2 ou 3 km.

Apoios fim de linha montados no extremo da linha aérea devendo por isso resistir a esforços longitudinais de todos os condutores e cabos de guarda.



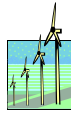
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Integração das linhas aéreas na paisagem

De uma maneira geral os apoios metálicos, usados em linhas AT e MAT, são galvanizados, tendo um aspecto brilhante. Em certos casos, é possível reduzir o impacto ambiental pintando os postes com um escolha de cores que se harmonize com o local.





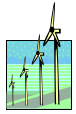
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Integração das linhas aéreas na paisagem

No meio rural
pode-se escolher
um pintura que
integre o apoio
no meio ambiente





SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA I



Integração das linhas aéreas na paisagem

Ou então ...



De aviso à
navegação
aérea