

TE140 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Capítulo:

Equacionamento Técnico-Econômico da
Transmissão de Energia e Projetos de LT

PhD. Eng. Clodomiro Unsihuay Vila

Federal University of Paraná, Curitiba- Brazil

Efecto Corona

- Las descargas que se forman en la superficie del conductor cuando la intensidad de campo eléctrico excede el límite de aislamiento de aire.
- <https://www.youtube.com/watch?v=MuxjyvwoxQg>
- Las principales consecuencias
 - ✓ La emisión de luz
 - ✓ ruido audible
 - ✓ Ruido radioeléctrico (interferencia con los circuitos de comunicación)
 - ✓ Controlador de vibración
 - ✓ Emisiones de ozono
 - ✓ El aumento de las pérdidas de potencia (deben ser suministrados por la fuente)

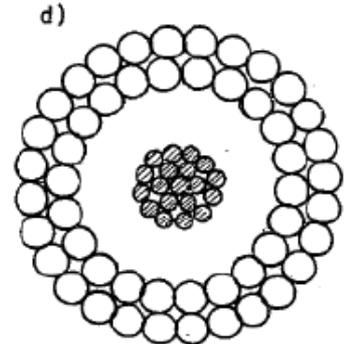
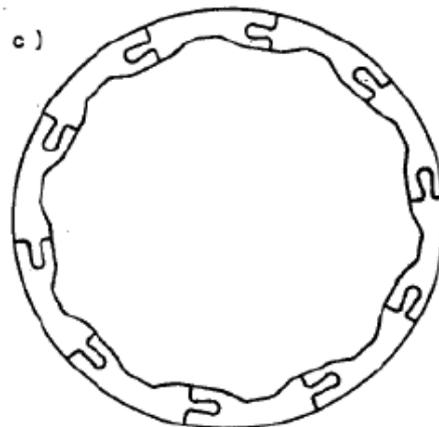
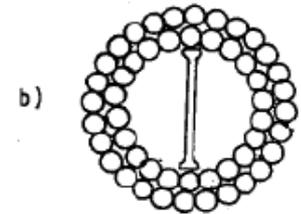
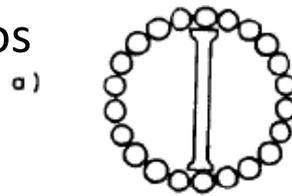


Efecto Corona

- La ionización de aire alrededor de los conductores debido al campo eléctrico de la misma
 - Los electrones libres cerca de la superficie del conductor ganan energía del campo eléctrico, suficiente para su aceleración. Estos contienen energía cinética, chocan con los átomos de oxígeno, nitrógeno y otros gases presentes, dándoles la energía que hace que los átomos se mueven a un estado superior
 - Los átomos se vuelven a su estado original, otorgan energía en forma de calor, la energía lumínica, acústica, radiación electromagnética .
 - Este hecho se llama ionización por impacto
 - La tensión crítica para el que se inicia el efecto corona es llamado de tensión crítico de corona (V_c)

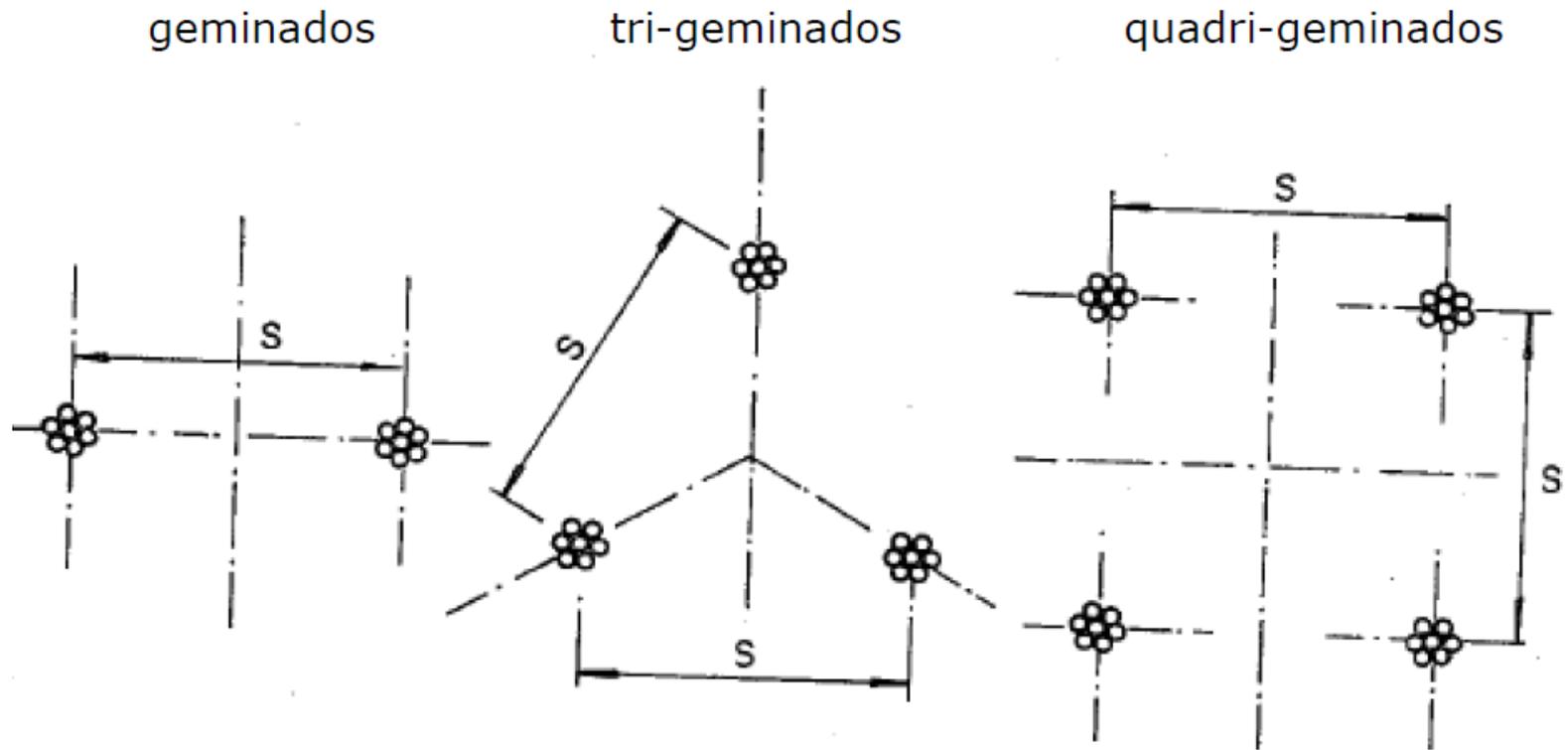
Efecto Corona

- Las tensiones EAT \rightarrow pérdidas de corona
- Reducir los gradientes de potencial en las superficies de los conductores
- Soluciones encontradas:
- El aumento del diámetro del conductor
- Conductores tubulares y expandidos



Efecto Corona

- Conductores múltiplos
 - Utilizados para reducción del efecto corona
- LT >300 kV usan conductores geminados.



Configurações de condutores múltiplos atualmente em uso.

O Efeito Corona

- A tensão crítica de corona pode ser avaliada pela fórmula semi-empírica:

$$\boxed{V_c = 2,43 \cdot m \cdot \delta \cdot d \cdot \log\left(\frac{2D}{d}\right)} \quad \longleftrightarrow \quad \boxed{\delta = \frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot H)}{273 + t}}$$

- V_c : tensão crítica de corona (kV) valor de pico
- m : coeficiente de rugosidade (0,93 para fios e 0,87 para cabos)
- d : diâmetro do condutor (mm)
- D : distância entre condutores (mm)
- δ : coeficiente que depende da temperatura e da altitude
- H : altitude (m)
- t : temperatura média anual (Celcius)
- f : frequência do sistema (Hz)
- V : tensão da rede (kV pico a pico)
- As perdas podem ser determinadas pela fórmula de PEEK

$$P = \frac{3,44}{\delta} \cdot f \cdot \sqrt{\frac{d}{2D}} \cdot (V - V_c)^2 \cdot 10^{-3} \quad (kW / km)$$

El Efecto Corona

- Ejercicio 1: Para evitar el efecto corona, calcular el diámetro mínimo equivalente de los conductores de una LT de aérea, siendo la distancia media entre los núcleos de 7 m, operando a 400 kV, a una altitud de 1.000 metros y una temperatura media de 22,64 ° C .
- Calcular una estimativa de las pérdidas, si el voltaje crítico de corona supera en un 10%, con la frecuencia de 60 Hz.
- Datos proporcionados:

$$D = 7 \text{ m} = 7000 \text{ mm}$$

$$V_L = 400 \text{ kV} \rightarrow Pico = V_{LP} = 400 \cdot \sqrt{2} \text{ kV} = 565,69 \text{ kV}$$

$$H = 1000 \text{ m}$$

$$t = 22,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m = 0,87 \text{ (Cables)}$$

$$\delta = \frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot H)}{273 + t} \quad \Rightarrow \quad \delta = 0,88$$

$$V_c = 2,43 \cdot m \cdot \delta \cdot d \cdot \log\left(\frac{2D}{d}\right) \quad \boxed{V_c > 400 \cdot \sqrt{2}} \quad \text{ou} \quad \boxed{V_c > 565,69} \quad \Rightarrow \quad \text{Condição para não haver efeito corona}$$

$$2,43 \cdot 0,87 \cdot 0,88 \cdot d \cdot \log\left(\frac{2D}{d}\right) > 400 \cdot \sqrt{2} \quad \Rightarrow \quad d \cdot \log\left(\frac{14000}{d}\right) > 304,07$$

Adotando diferentes valores de d :

$$d = 100 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d \cdot \log\left(\frac{14000}{d}\right) = 214,61$$

$$d = 200 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d \cdot \log\left(\frac{14000}{d}\right) = 369,02$$

$$d = 160 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad d \cdot \log\left(\frac{14000}{d}\right) = 310,72$$

Adotado $d=160 \text{ mm}$

☞ Deve-se então combinar vários condutores por fase (2, 3 ou 4) para obtenção do diâmetros de 160 mm

A nova tensão crítica para $d = 160 \text{ mm}$ é:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_c = 2,43 \cdot 0,87 \cdot 0,88 \cdot 310,72 = 578,06 \text{ kV} \\ V_{cef} = 408,83 \text{ kV} \end{array} \right.$$

Cálculo das Perdas:

$$P = \frac{3,44}{\delta} \cdot f \cdot \sqrt{\frac{d}{2D}} \cdot (V - V_c)^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW} / \text{km})$$

$$P = \frac{3,44}{0,88} \cdot 60 \cdot \sqrt{\frac{160}{14000}} \cdot (57,8)^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW} / \text{km})$$

$$P = 83,77 \text{ (kW} / \text{km)}$$

Transmissão em CA

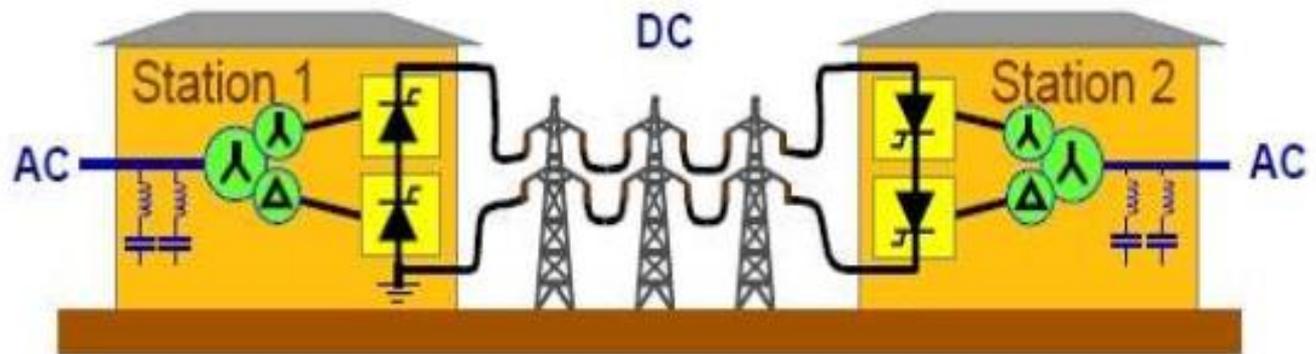
- Vantagens:
- A potencia pode ser gerada a altas potencias.
- Manutenção das subestações mais baratas
- Tensão pode ser elevado o abaixada por transformadores com facilidade e eficiência e permite transportar energia em altas tensões e distribui-las em níveis seguros.

Transmissão em CA

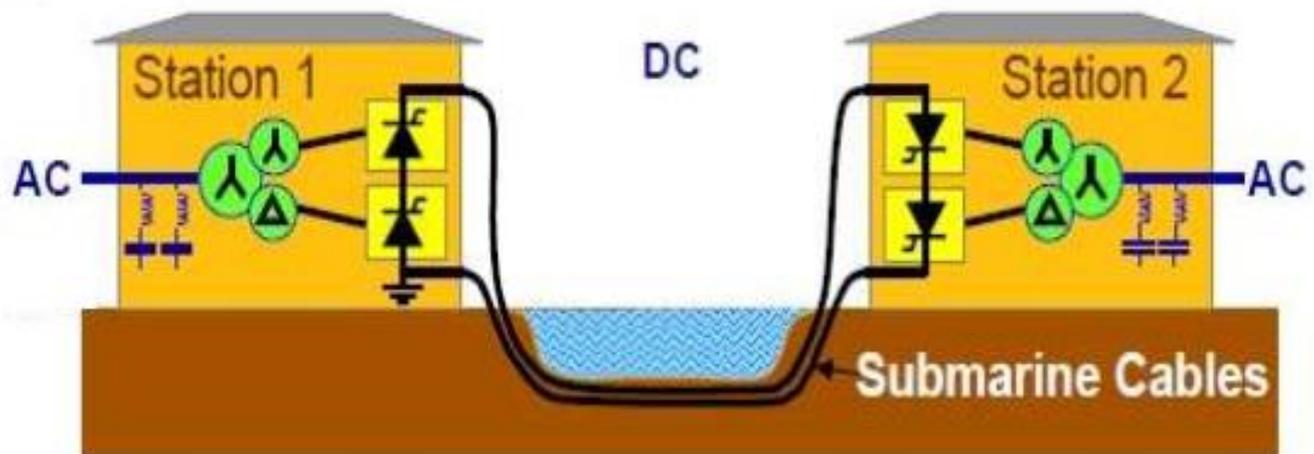
- Desvantagens
- Necessita mais cobre, alumínio do que a opção em CC.
- Construção das linhas de transmissão é mais complicada do que a da linha em CC.
- Devido ao efeito pelicular a resistência efetiva da linha se torna maior

Tipos de elos c.c.

- ▶ Aéreo, ponto a ponto¹

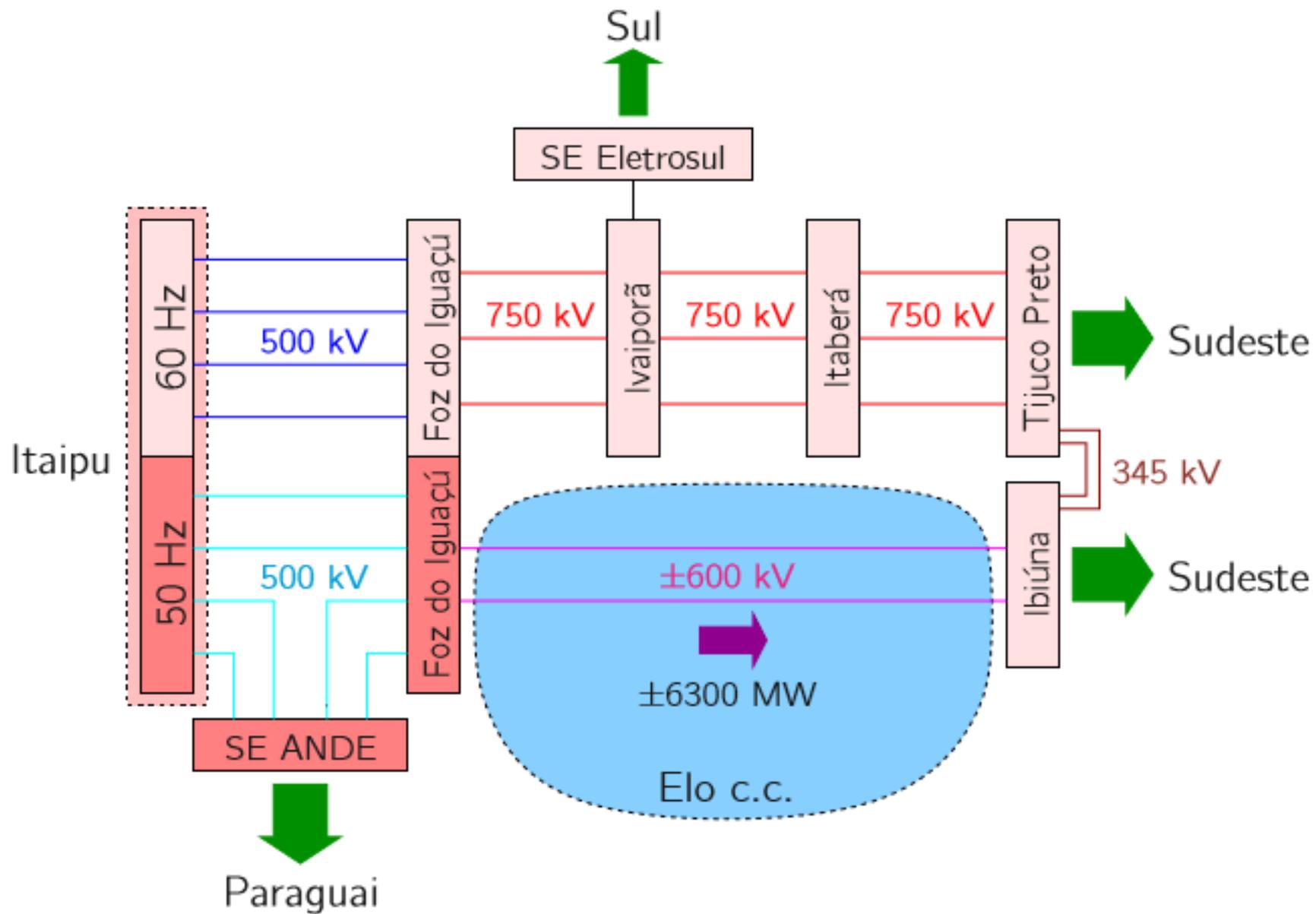


- ▶ Submarino, ponto a ponto

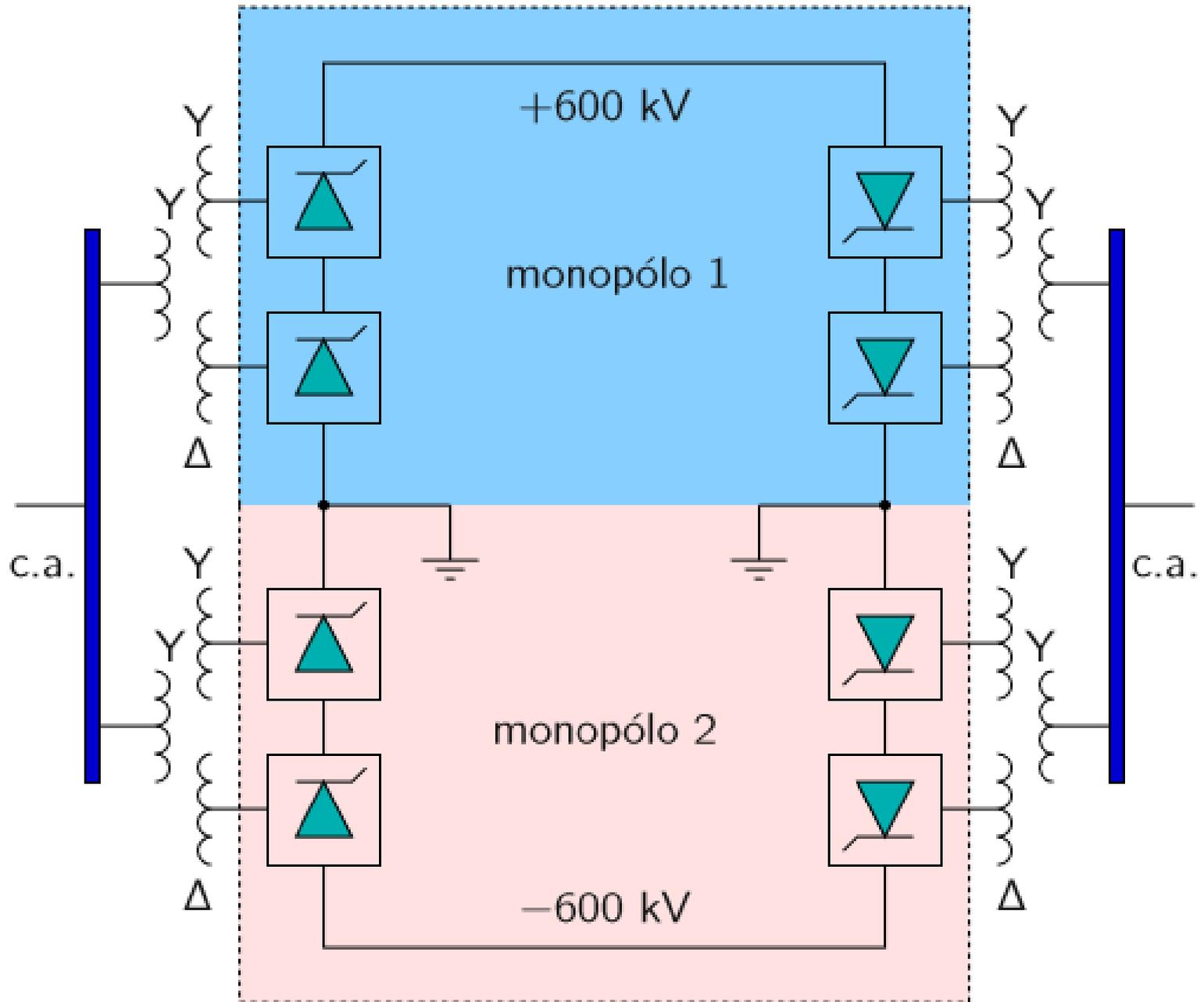


Transmissão em CA e CC

- Usos da transmissão em CC:
 - transmissão submarina
 - transmissão aérea em longas distancias
 - amortecimento de oscilações (melhora da estabilidade)
 - interligação de sistemas com frequências diferentes
 - transmissão em longas distancias em áreas metropolitanas



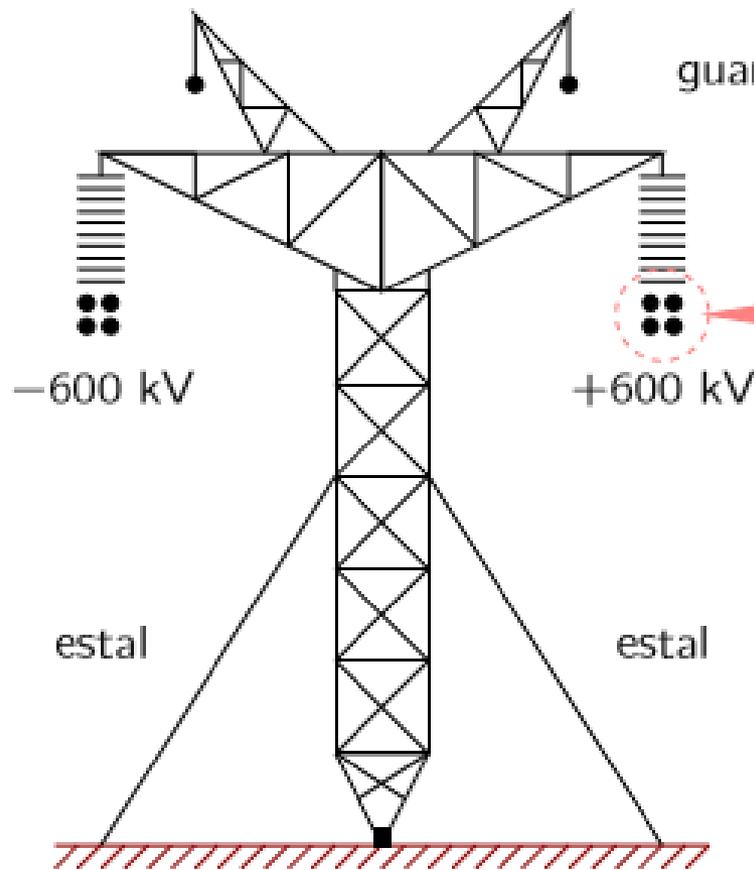
Elo c.c.



Transmissão em CC

- Vantagens CC:
 - Não há indutância nem capacitância.
 - Não há efeito pelicular
 - Menor numero de condutores
 - Torres menores e mais baratas
 - Menores perdas
 - As perdas em c.a. são 33% maiores que as perdas c.c. para uma mesma potencia transmitida
 - Menor nível de isolação
 - A tensão c.c. é menor para mesmas perdas e mesma potência transmitida. Logo, o nível de isolação em c.c. é menor que em c.a

► Torres de transmissão em c.c.:



guarda (pára-raios)

-600 kV

+600 kV

estai

estai

Estaiada

4 × ACSR 1273 MCM

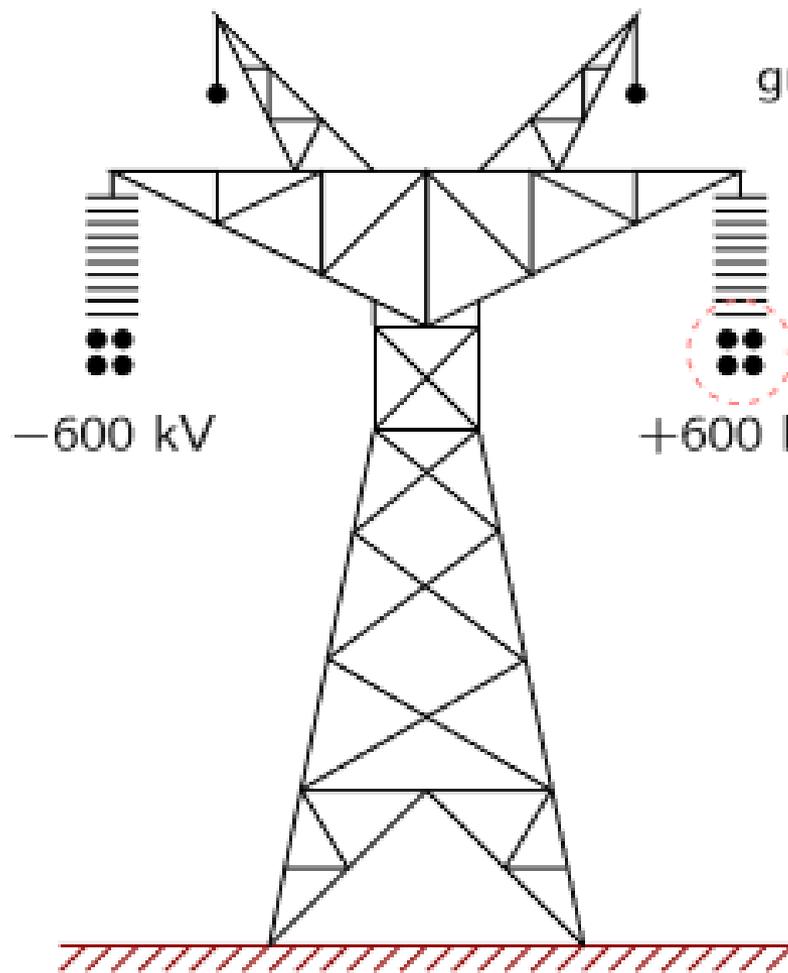
$\phi = 34,12 \text{ mm}$

$d = 457 \text{ mm}$ (entre condutores)

linha c.c. bipolar

torre estaiada

(mais simples e leve que torres c.a.)



guarda (pára-raios)

-600 kV

+600 kV

4 × ACSR 1273 MCM

$\phi = 34,12 \text{ mm}$

$d = 457 \text{ mm}$ (entre condutores)

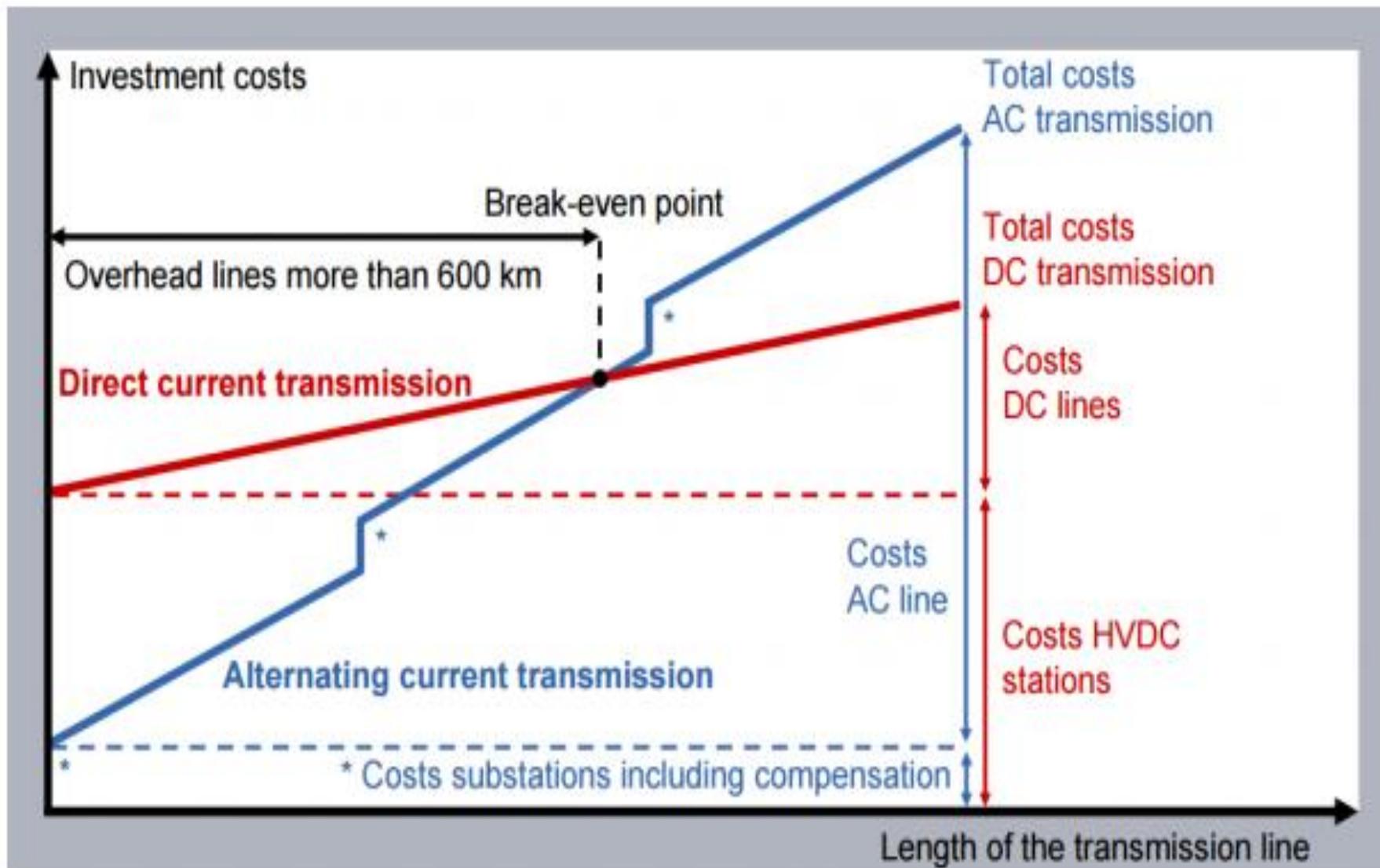
Autoportante

Transmissão em CC

- Desvantagens de Transmissão em CC
- A energia elétrica não pode ser gerada em em valores de tensão, devido a problemas de conversão
- A tensão não pode ser elevada para transmissão de potencia em altas tensões
- Os disjuntores e interruptores tem sua próprias limitações.

Custos CA VS CC

- A linha c.c. é mais barata que a linha c.a.: menos condutores, torres mais simples, menor nível de isolamento
- Porém, são também necessárias as estações conversoras (c.a./c.c. e c.c./c.a.), que são muito caras.
- A linha c.a. tem preço por km aproximadamente constante.
- A decisão sobre qual sistema adotar (c.a. ou c.c.) sob o ponto de vista de custos depende basicamente do comprimento da linha:



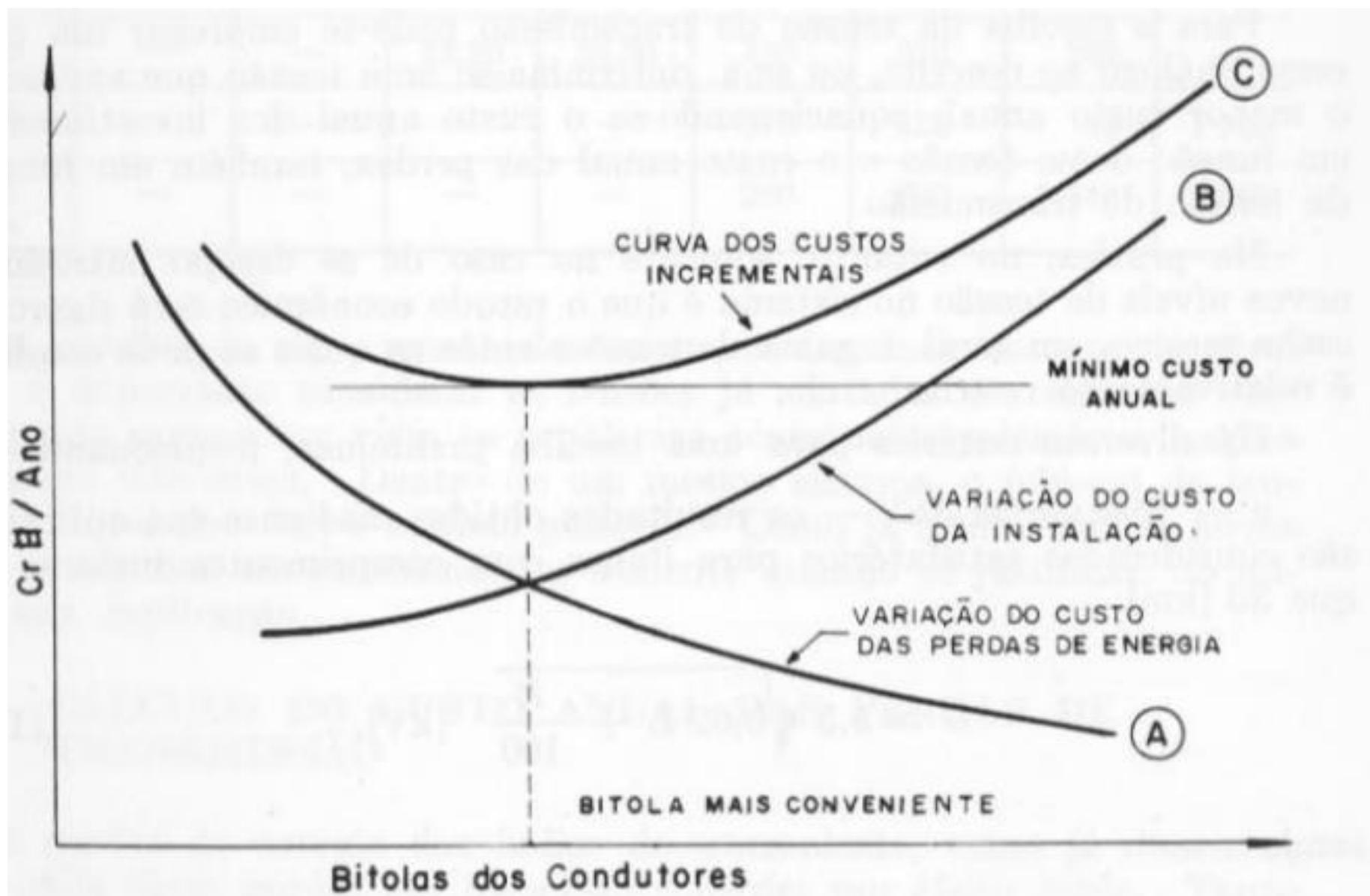
Custo de instalação x Extensão da LT (energy.siemens.com)

Considerações gerais

- A tarifa de uso de transmissão deve cobrir todos os custos de produção e comercialização, remunerando adequadamente os investimentos realizados.
- A partir de um grau de confiabilidade, qualquer melhoria deste, em geral leva investimentos excessivamente grandes para serem economicamente justificados.
- O custo de transporte de um kWh através de uma LT deve ser mínimo.

Fatores que determinam o custo de transporte de energia elétrica

- Consiste em estabelecer uma relação ideal entre:
 - Custo de energia perdida no transporte:
 - Efeito corona
 - Efeito Joule
 - Custo das instalações necessárias ao transporte da energia.
 - Dos condutores, estruturas, isoladores, etc
- Esses cálculos são em base de custo anual.



— *Variação do custo anual das perdas e dos investimentos no transporte de energia.*

Escolha da Tensão de Transmissão

- Critérios:
 - A) Formula de Still (Linhas maiores a 30 km)

$$U \simeq 5,5 \sqrt{0,62 L + \frac{P}{100}} \text{ [kV]},$$

sendo:

U [kV] — tensão entre fases;

L [km] — comprimentos da linha;

P [kW] — potência média a transmitir.

A tensão a ser adotada é a tensão padronizada mais próxima.

Escolha da Tensão de Transmissão

- B) Critério da potencia natural

Sendo P [MW] a potência a ser transmitida, a tensão indicada será:

$$U = \sqrt{P \cdot Z_0} \quad [\text{kV}].$$

Essas potências naturais variam com a chamada impedância natural da linha. Esta independe do comprimento da linha, dependendo grandemente da configuração dos condutores.

- É importante considerar tensões já adotadas nos sistemas vizinhos.
- Novas níveis tensões são recomendados somente quando se justificar no mínimo sua duplicação.

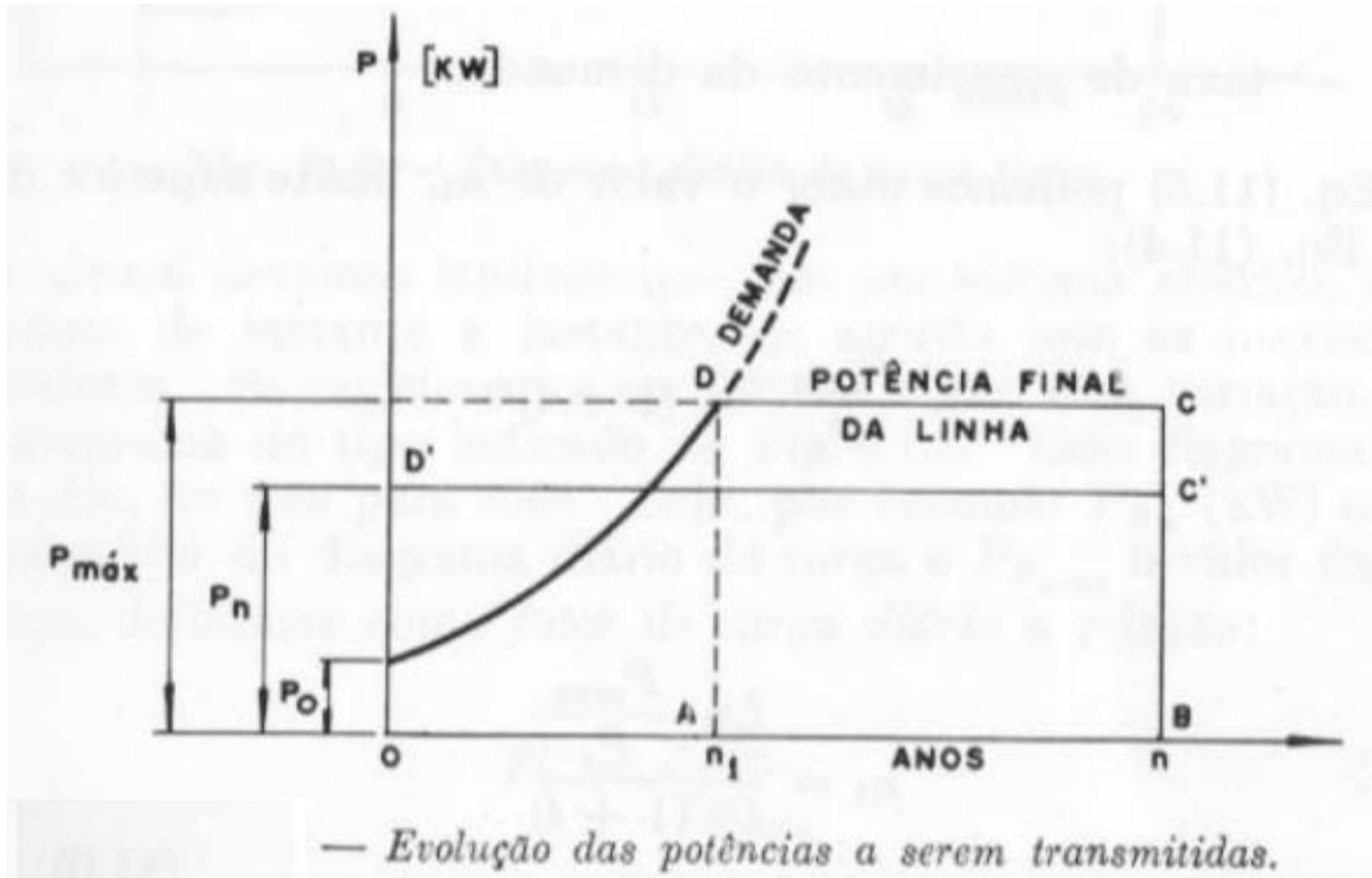
Potenciais Naturais e Tensões Nominais Correspondentes

Configuração de fase	Potências naturais em MW							
	33 kV	66 kV	88 kV	138 kV	220 kV	345 kV	500 kV	750 kV
⊙	2,7	10,80	19,40	47,60	120	300	—	—
⊙ ⊙	—	—	24,20	59,50	150	370	780	—
⊙ ⊙ ⊙	—	—	—	—	170	425	89	1 750
⊙ ⊙ ⊙ ⊙	—	—	—	—	200	500	1 040	2 000

Calculo do custo anual das perdas nas LT

- A) Perdas por dispersão (efeito corona)
 - Dependem dos gradientes de potencial nas superfícies os condutores e das condições meteorológicas ao longo das linhas.
 - Estas perdas devem ser menores a : 2 e 8 kW/km.
 - Valores mais baixos para linhas de classe de 220/230 [KV] e maiores para linhas de 500/525 [KV]

Perdas por efeito Joule



$$\Delta P_m = 3 I_m^2 R = 3 \left[\frac{P_m}{\sqrt{3} U \cos \phi} \right]^2 \cdot R;$$

considerando o ano 8 760 horas, a energia perdida será, em n anos:

$$E_n = 3 \cdot 8\,760 \cdot n \cdot R \left[\frac{P_m}{\sqrt{3} U \cos \phi} \right]^2 \cdot \quad [\text{kWh}]$$

ou, em média por ano:

$$E'_m = 3 \cdot 8\,760 \cdot R \left[\frac{P_m}{\sqrt{3} U \cos \phi} \right]^2 [\text{kWh/ano}].$$

O $\cos \phi$, nessas expressões, é o fator de potência no receptor da linha. A resistência R [ohm] é a resistência à corrente alternada na frequência do sistema, à temperatura de 75°C.

A expressão para o cálculo da energia anual perdida será:

$$E = 3 \cdot 8\,760 \cdot R \cdot FC \left(\frac{P_m}{\sqrt{3} U \cos \phi} \right)^2 \cdot 10^{-3} [\text{kWh/ano}].$$

Cálculo de custo da instalação

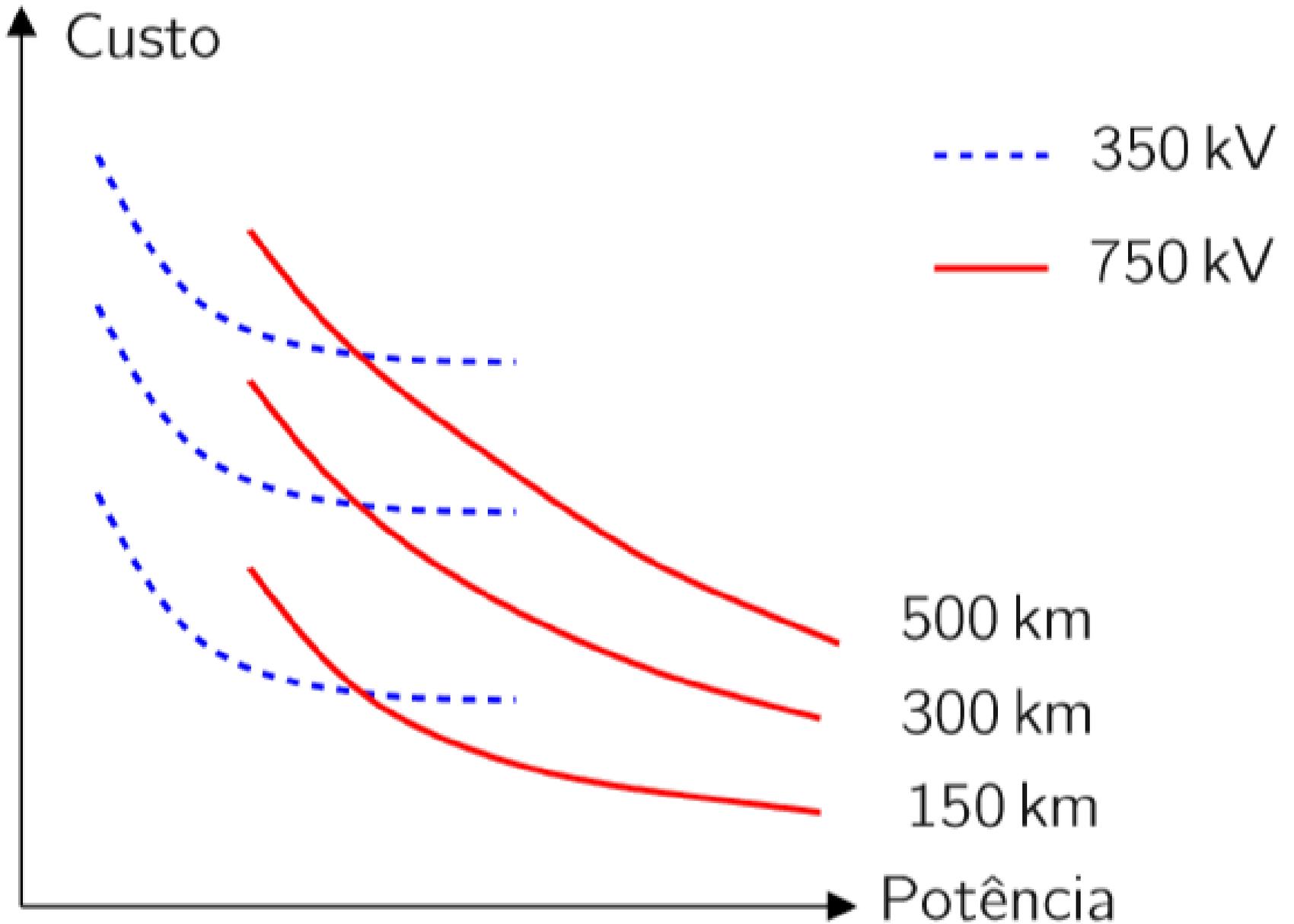
- Custo anual das LT
 - Estudos e projetos
 - Administração e fiscalização da obra
 - Custo dos materiais, inclusive seguros e transportes
 - Estruturas
 - Cabos
 - Ferragens e isoladores
 - Fundações
 - Aterramento
 - Equipamento de compensação
 - Fundações
 - Mão de obra, inclusive encargos sociais e trabalhistas.

Cálculo de custo da instalação

- Encargos financeiros
 - Prestações dos empréstimos nos bancos
 - Amortizações da devida
 - Juros em cima dos devidas.
 - Dispensas para obtenção de financiamentos
- Custo anual de manutenção e operação
 - Limpeza periódica da faixa de serviço
 - Limpeza dos isoladores
 - Troca de ferragens e isoladores, etc

Cálculo de custo da instalação

- capacidade da linha de transmissão diminui com o comprimento. Uma maneira de compensar o efeito da distancia é utilizar tensões mais elevadas, pois a capacidade de transmissão é aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão nominal de transmissão



Projeto de Linhas de Transmissão

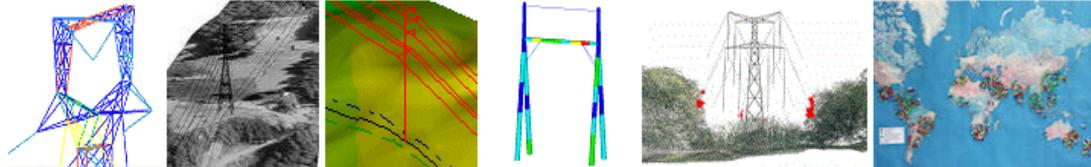
- As ferramentas mais utilizados por projetistas de linhas de transmissão nos dias de hoje são o PLS-CADD, LT-CAD com eles é possível realizar um projeto completo com dados como velocidades dos ventos, temperaturas e cargas nas estruturas, utilizando o pacote completo dele é possível:
 - realizar a plotação de estruturas;
 - mudar o tipo de estrutura visando um menor custo
 - calcular flechas;
 - cálculo do terreno;
 - calcular distância de segurança;
 - tensões;
 - cargas;
 - desenho completo de um projeto de linha de transmissão

Últimos desenvolvimentos...

[ATUG 2019](#) anunciou

[Versão 15.30](#) lançado

PLS-CADD / Ultralite
[Disponível](#)



Power Line Systems desenvolve, vende e oferece suporte a software para o projeto de transmissão aérea de energia elétrica, distribuição e li comunicação e suas estruturas.

Nós somos os criadores dos programas de design linha padrão da indústria [PLS-CADD](#) , [PLS pólos](#) e [TOWER](#) .
Para mais informações, consulte um dos seguintes links:



Projeto de Linhas de Transmissão

- Tanto para projetos quanto para construção de linhas de transmissão no Brasil, o que garante a qualidade dos serviços são as Normas Brasileiras (NBR's), criadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5422:1985: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985. 54 p



PROJETO DE LINHAS AÉREAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA
Procedimento

03.019
NBR 5422
MAR/85

ERRATA À COLETÂNEA DE NORMAS
"LINHAS DE TRANSMISSÃO"

Esta **ERRATA Nº 1 de JUN 1996** tem por objetivo corrigir a NBR 5422, contida na COLETÂNEA - LINHAS DE TRANSMISSÃO - no seguinte:

- onde se lê: "Mar/85"
- Leia-se: "FEV 1985"

Origem: ABNT 03:09.11.1-001 (NB-182/84)

CB-3 - Comitê Brasileiro de Eletricidade

CE-3:11.1 - Comissão de Estudo de Projeto e Execução de Linhas Aéreas

SISTEMA NACIONAL DE
METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO
E QUALIDADE INDUSTRIAL

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA
DE NORMAS TÉCNICAS

©

Palavra-chave: Linhas de transmissão de energia

NBR 3 NORMA BRASILEIRA REGISTRADA

Projeto de Linhas de Transmissão

- A NBR que rege os projetos de LT's é a NBR5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Nela contém:
 - normas complementares – relação de normas para a correta padronização de serviços e materiais de uma LT;
 - definições – linguagem mais utilizada por engenheiros;
 - parâmetros meteorológicos – todas as definições assim como tabelas e fatores para correção;
 - cabos condutores e para-raios -- define os padrões e as normas relativas que os condutores e para-raios devem se enquadrar, como carga, temperatura e flecha dos cabos;

Projeto de Linhas de Transmissão

- isoladores e ferragens – especificações para a elaboração do projeto bem como as normas complementares;
- suportes e fundação – cita as normas que o projeto de fundação e os suportes devem seguir, e uma breve descrição das hipóteses de carga e tipo de fundação;
- esforços mecânicos – cita os esforços a que toda a estrutura está submetida e todo o método de cálculo destes esforços;

Projeto de Linhas de Transmissão

- aterramento – apenas recomendações sobre o aterramento, pois o mesmo deve ser feito de acordo com o projetista da linha;
- distância de segurança – demonstra como calcular a distância de segurança;
- travessias – cita todos os tipos de travessias e os critérios a serem utilizados;

Impacto ambiental das LT

- Nas primeiras LT construídas o numero de eletrochoques apareceu, pois as pessoas estavam subindo as torres tocando no cabo de sustentação.
- Impacto estético.





Impacto ambiental das LT

- campos magnéticos de alta frequência são gerados devido ao efeito corona.
 - Segurança pessoal e interferência em equipamentos eletrônicos (estação de rádio ou celulares, etc)
- ameaça que representa à biodiversidade e à manutenção de florestas e do estoque de água doce.
- interferências em áreas de vegetação nativa, unidades de conservação, terras indígenas e áreas de proteção permanente
- <https://globoplay.globo.com/v/3667881/>



Faixa de servidão

- É a faixa de terra ao longo do eixo da LT, cujo domínio permanece com o proprietário, porém, com restrições ao uso, necessária para garantir a segurança das instalações da LT e das pessoas que convivem com a linha.



Faixa de servidão

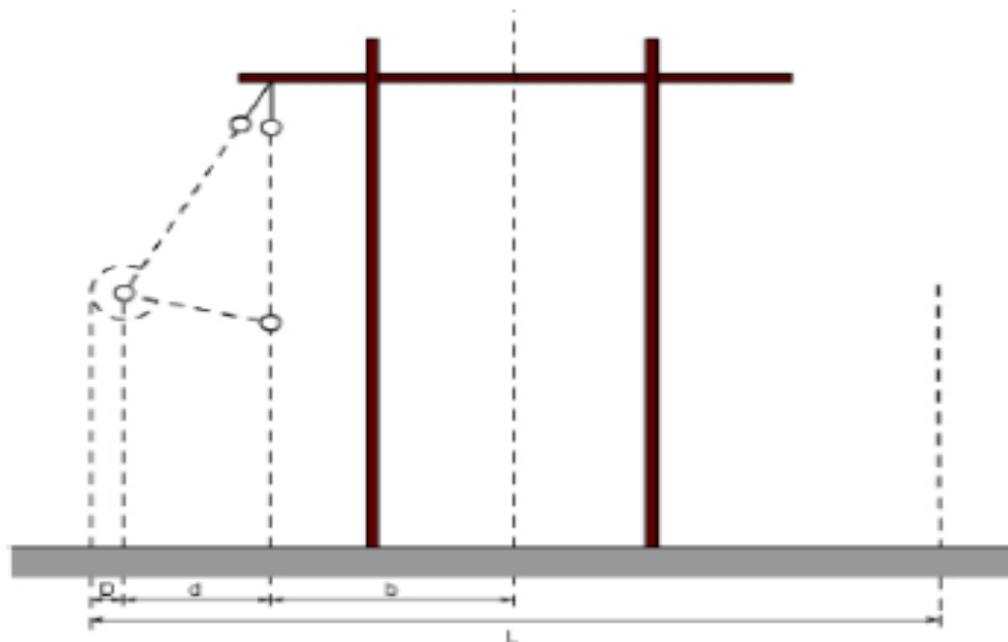
- A norma brasileira NBR 5422 – “Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica” – especifica as condições básicas de um projeto de linhas aéreas de transmissão, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações próximas (ABNT, 1985).
- O estabelecimento destes limites de segurança para exposição de campos eletromagnéticos sobre ambos os lados das linhas ao longo de sua trajetória é denominado: “faixa de servidão” ou “faixa de passagem”.
- Dentre outros parâmetros, a norma estabelece uma metodologia para o cálculo da largura da faixa de servidão de uma linha aérea de transmissão.

$$L = 2 \times (b + d + D)$$

Onde:

- b - Distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo.
- d - Soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores após seu deslocamento angular devido à ação do vento.
- D - Dado por $D_U / 150$, valor mínimo de 0,5 m.
- D_U - Tensão máxima de operação da linha, em kV.

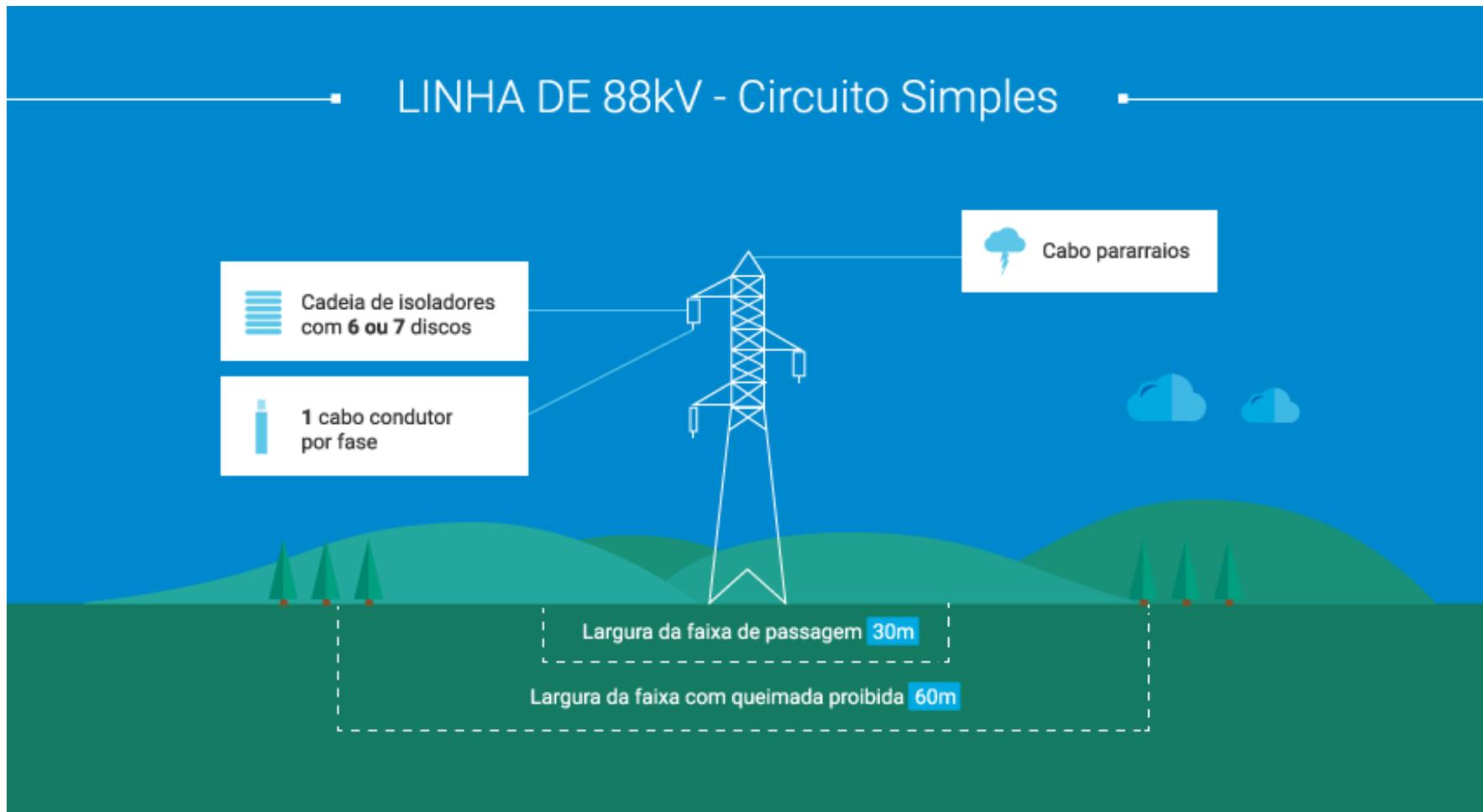
A FIG. 4 mostra uma linha de transmissão com os parâmetros L , b , d e D .



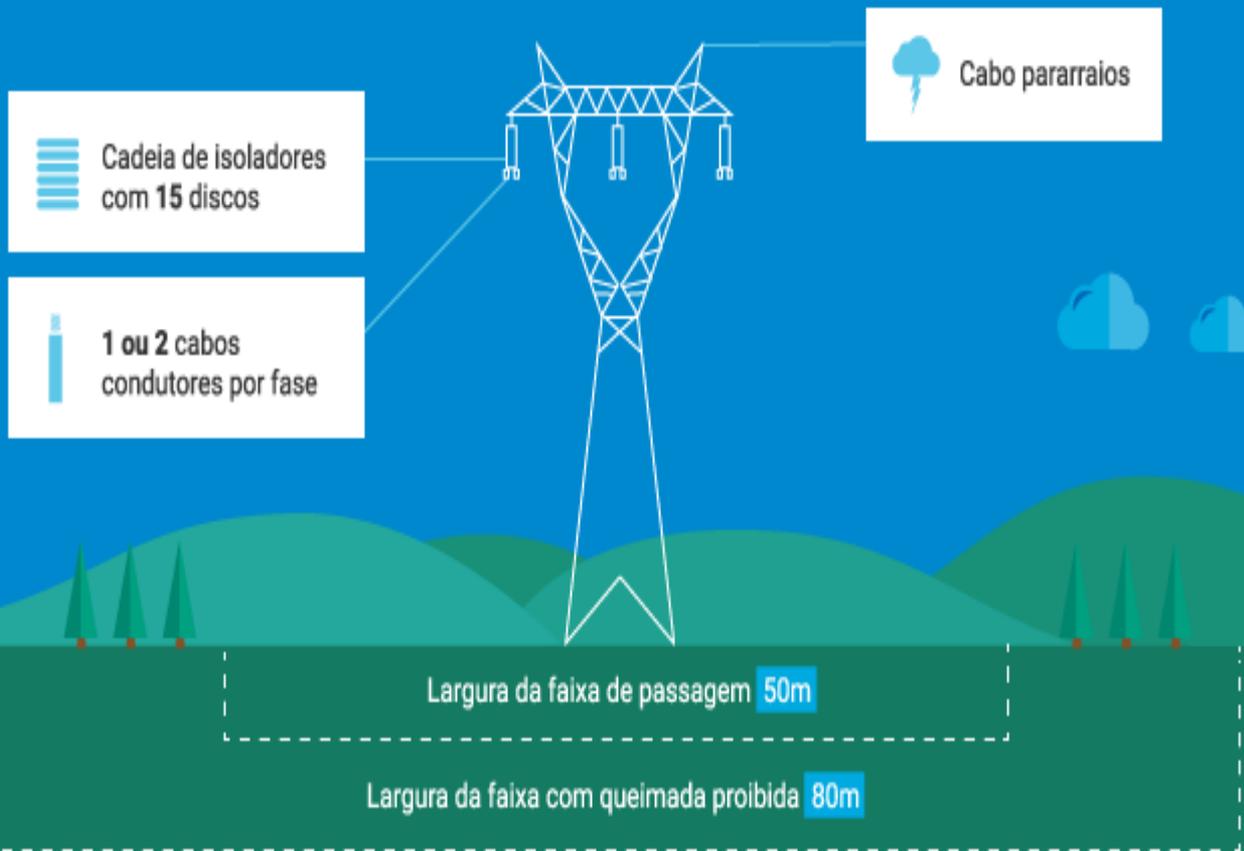
Cálculo da largura da faixa de servidão de uma linha de transmissão
Fonte: Kuster (2011).

Faixa de servidão

- https://www.youtube.com/watch?v=Npc67JnsRxY&ab_channel=MundodaEl%C3%A9trica



LINHA DE 230kV - Circuito Simples



LINHA DE 230kV - Circuito Duplo

 Cadeia de isoladores com **15 ou 16** discos

 **2** cabos condutores por fase



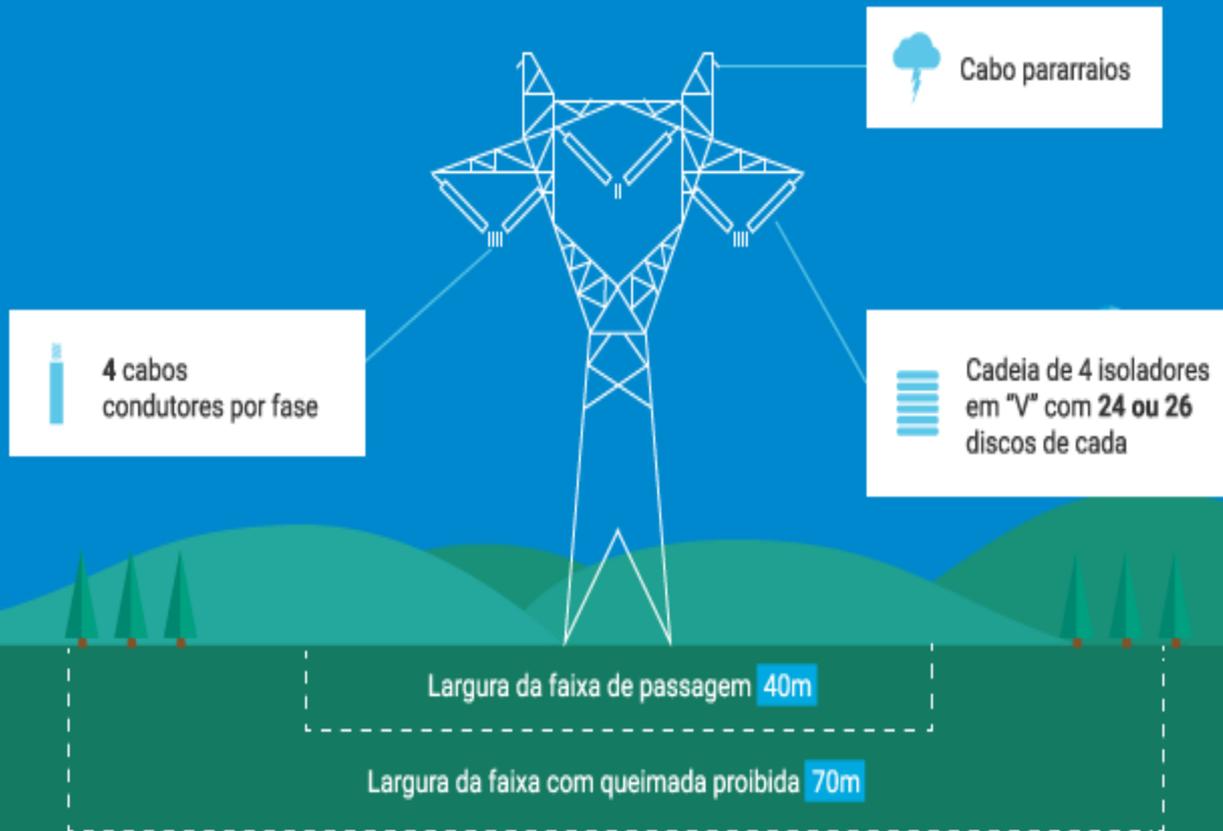
Cabo pararraios

Largura da faixa de passagem **50m**

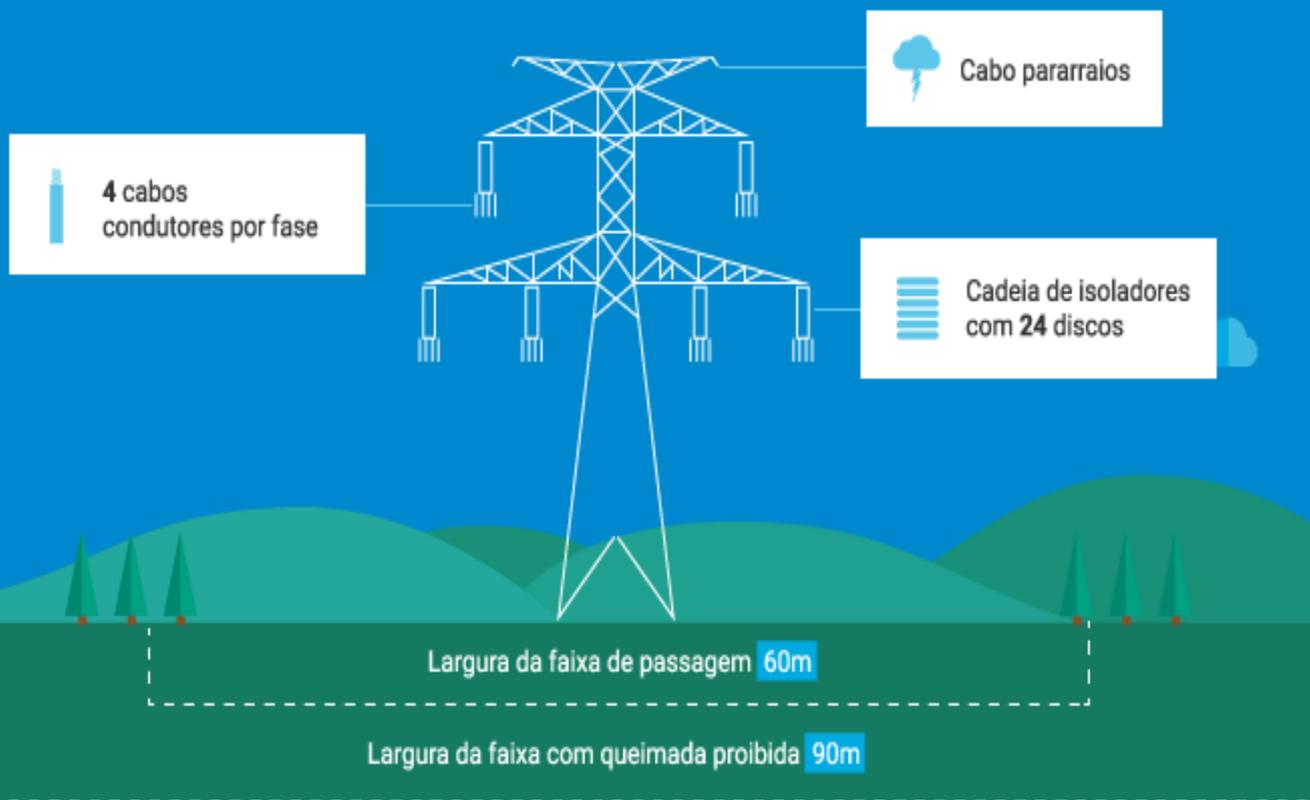
Largura da faixa com queimada proibida **80m**

LINHA DE 440kV - Circuito Simples

(Cadeias "VVV")



LINHA DE 440kV - Circuito Duplo Triangular



▪ LINHA DE 440kV - Circuito Duplo Vertical ▪

 Cadeia de isoladores com **24** discos

 **4** cabos condutores por fase

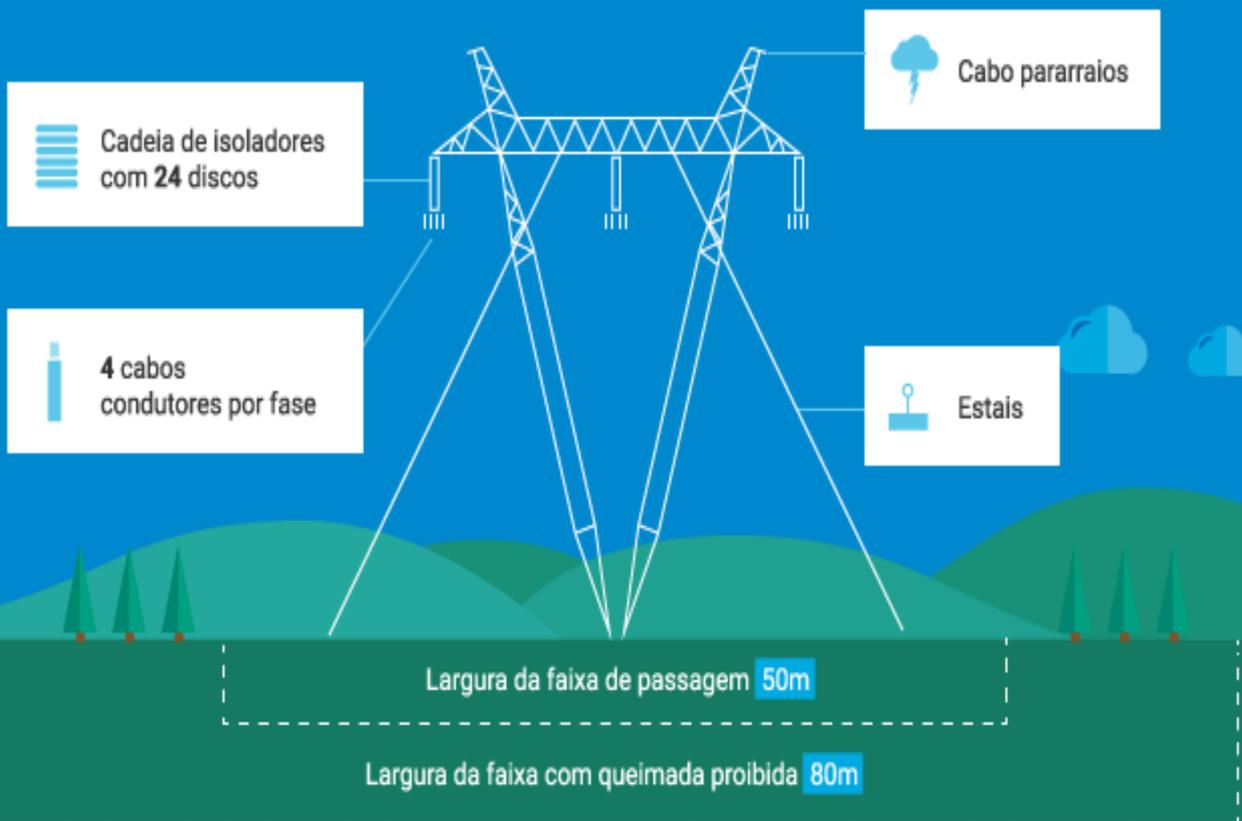


Cabo pararraios

Largura da faixa de passagem **50m**

Largura da faixa com queimada proibida **80m**

LINHA DE 440kV Estaiada - Circuito Simples



Distancias mínimas de segurança

- Nas travessias sobre vegetações devem-se obedecer às disposições legais vigentes. Nas travessias de hidrovias, ferrovias, rodovia, oleodutos e linhas de transmissão deve-se seguir os decretos correspondentes (ABNT NBR 5422, 1985).
- No caso de travessias sobre outras linhas energizadas e ferrovias eletrificadas deve ser mantida a distância de segurança de $Du/150$ onde Du é o valor da tensão da linha que permanece energizada

Distancias mínimas de segurança

- Travessias sobre linhas de energia de tensão menor ou igual a 34,5kV não necessitam de projeto de travessias, apenas deve ser indicado na planta e perfil da linha a altura dos cabos em relação as outras linhas de energia (ABNT NBR 5422, 1985)

A distância segura do condutor ao solo ou a outros obstáculos em condições normais de operação é dada segundo a fórmula:

$$D = a + 0,01 \left(\frac{Du}{\sqrt{3}} - 50 \right) \text{ Se, } U > 87 \text{ kV}$$

e

$$D = a \text{ Se } U \leq 87 \text{ kV}$$

Du – tensão mais elevada das duas linhas consideradas

A – distancia básica

Tabela 1: Distâncias básicas (NBR 5422).

<i>Natureza da região ou obstáculo atravessado pela linha ou que dela se aproxime</i>	<i>Distância básica a (m)</i>
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,0
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,5
Rodovias, ruas e avenidas	8,0
Ferrovias não eletrificadas	9,0
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,0
Suporte de linha pertencente à rodovia	4,0
Águas navegáveis	H+2,0
Águas não navegáveis	6,0
Linhas de energia elétrica	1,2
Linhas de telecomunicações	1,8
Telhados e terraços	4,0
Paredes	3,0
Instalações transportadoras	3,0
Veículos ferroviários e rodoviários	3,0