Tracção Eléctrica

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

Sistemas de electrificação

João Martins
2018/2019

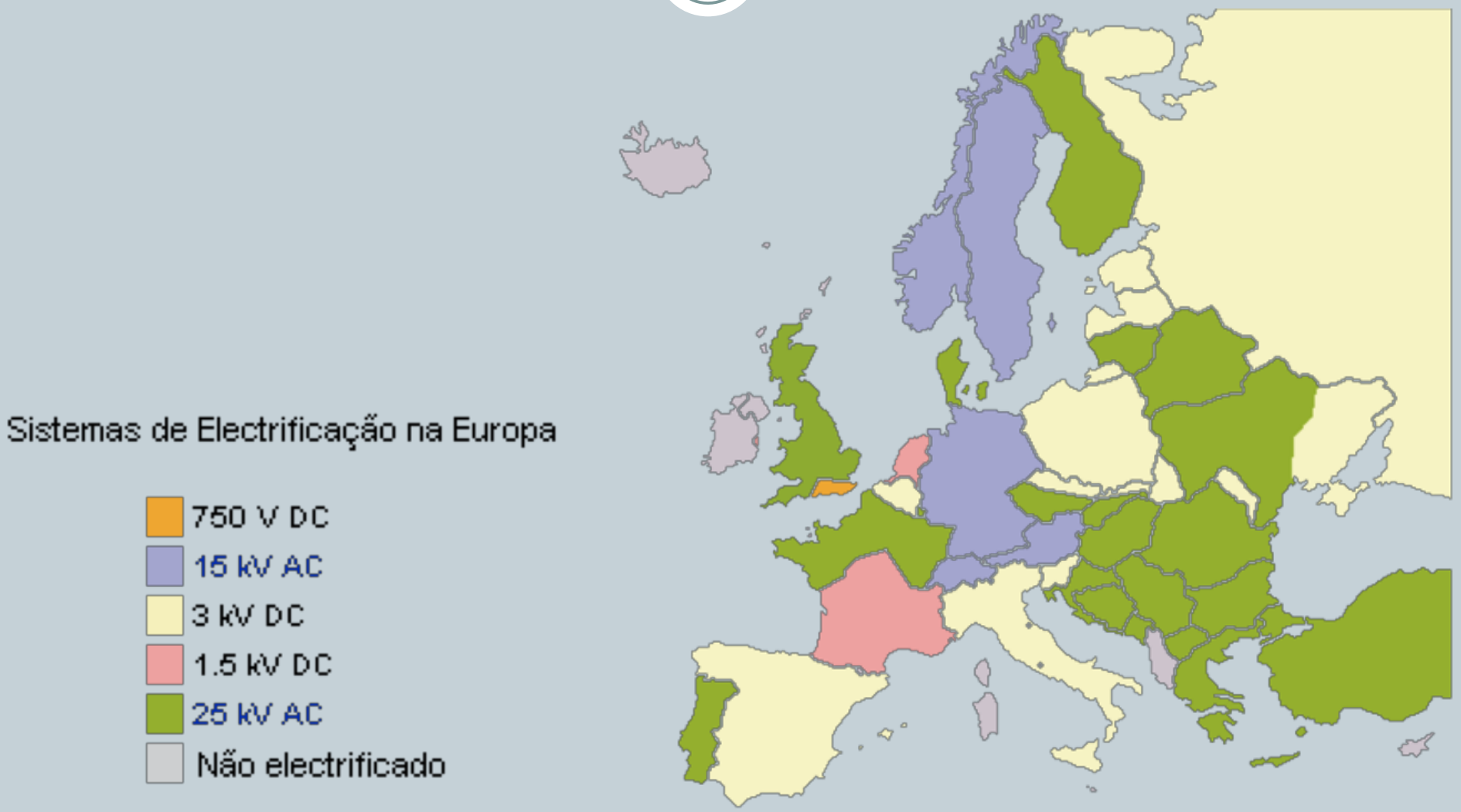


Electrificação DC ou AC?

Monofásica ou Trifásica?

Frequência especial ou industrial?

Sistemas de electrificação na Europa

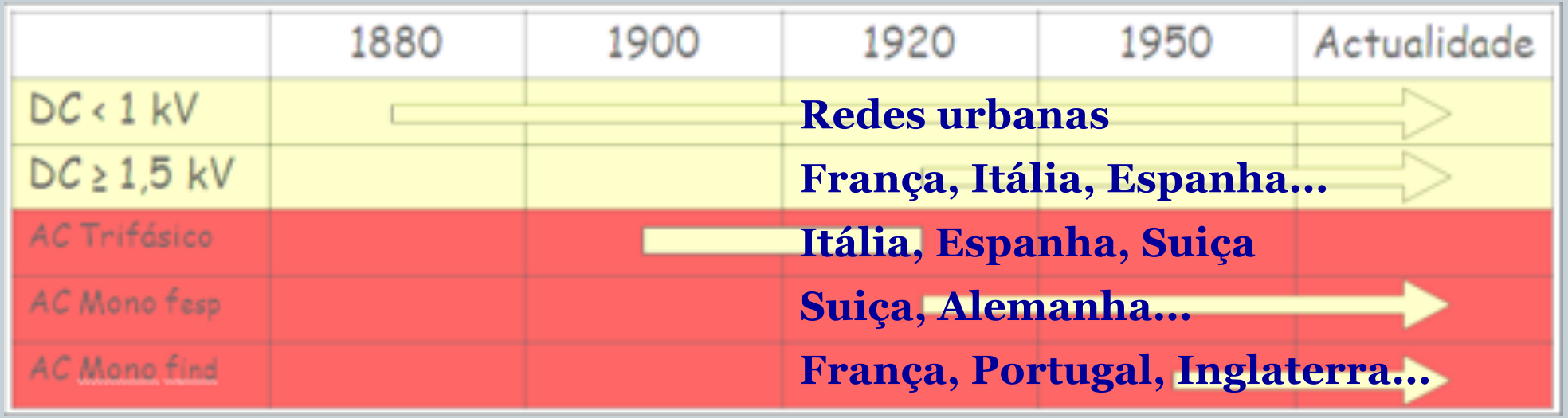


Electrificação DC

	1880	1900	1920	1950	Actualidade
DC < 1 kV					
DC ≥ 1,5 kV					
AC Trifásico					
AC Mono fesp					
AC Mono find					

AC Monofásico fespecial = 15-25Hz
AC Monofásico findustrial = 50-60Hz

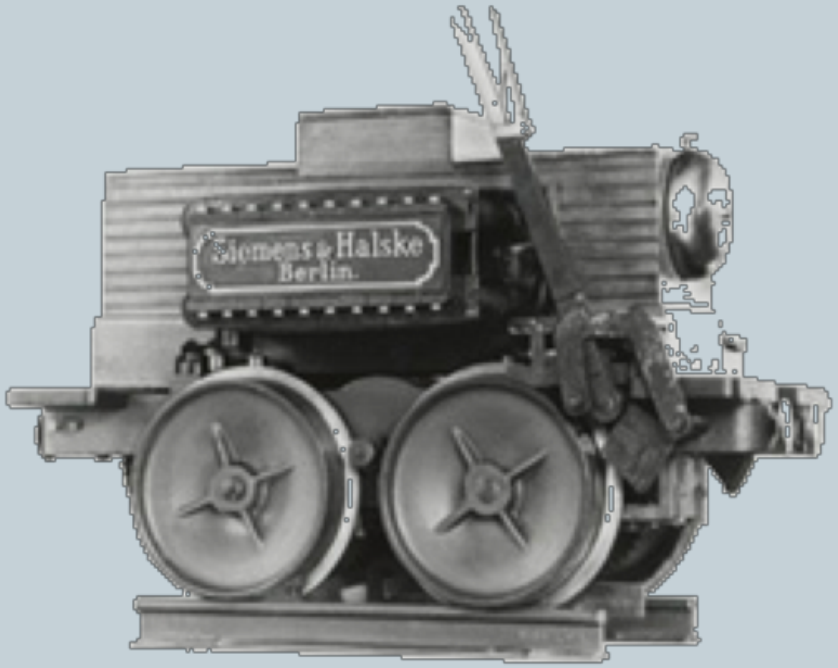
Electrificação DC

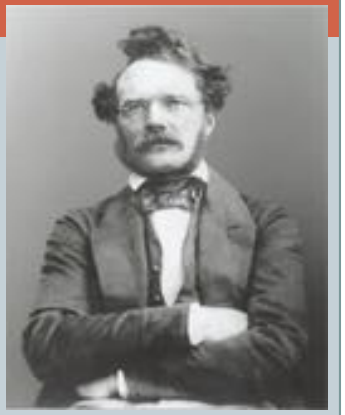


Electrificação DC

Foi a primeira a existir… (1879)

Werner Von Siemens

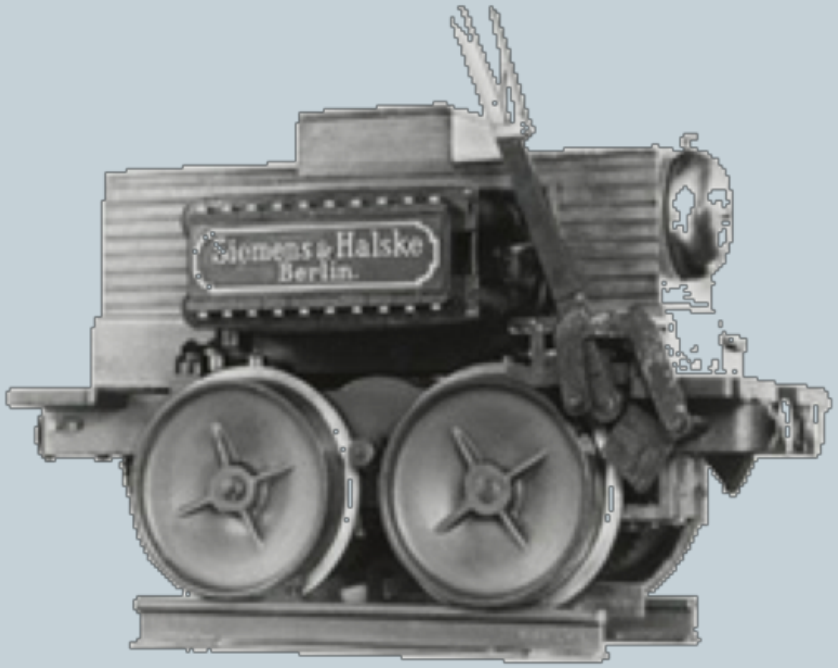






Electrificação DC

Foi a primeira a existir… (1879)



- Apresentado na Exposição Internacional de Berlim
- Pequeno tractor accionado por um motor eléctrico de corrente contínua
- Rebocou três pequenos vagões, constituídos por bancos de seis lugares montados sobre rodas, e que podiam transportar 18 passageiros
- O conjunto deslocava-se sobre carris, numa via circular de 300 m de comprimento, com uma velocidade de 12 km/h
- Alimentação feita através de um carril central, em corrente contínua, com uma tensão de 150 V, sendo o circuito de retorno constituído pelos carris de guiamento

Electrificação DC

Características do motor série DC para a tracção eléctrica:

- Fácil regulação de velocidade por variação da tensão de alimentação
- Característica auto-reguladora
- Elevado binário de arranque
- Possível recuperar energia na travagem
- Manutenção cara do motor (escovas e colector…)

Electrificação AC de frequência fixa

A primeira linha de transporte de energia trifásica foi estabelecida em França em 1891…

As primeiras aplicações datam de 1888 (Siemens) e de 1889 (Brown Boveri)

O motor de indução trifásico é mais robusto e simples do que o motor série



Electrificação AC de frequência fixa



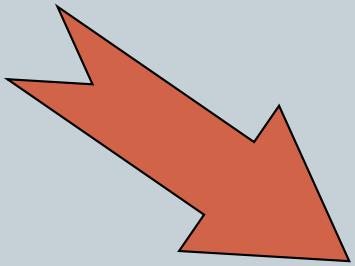
Inconvenientes:

- Fraco binário de arranque
- Fraca flexibilidade do motor se o regime óptimo não se situar perto do sincronismo
- Complexidade da linha de contacto com fases isoladas
- Impossibilidade de recuperar um atraso temporal, pois não é possivel variar a velocidade

- Dupla catenária, que não pode ser realizada de forma simples, sendo a terceira fase assegurada por carril

Electrificação AC monofásica de frequência especial

No inicio da tração monofásica ainda não existiam grandes redes de distribuição de energia



O caminho de ferro era o grande produtor da sua própria energia

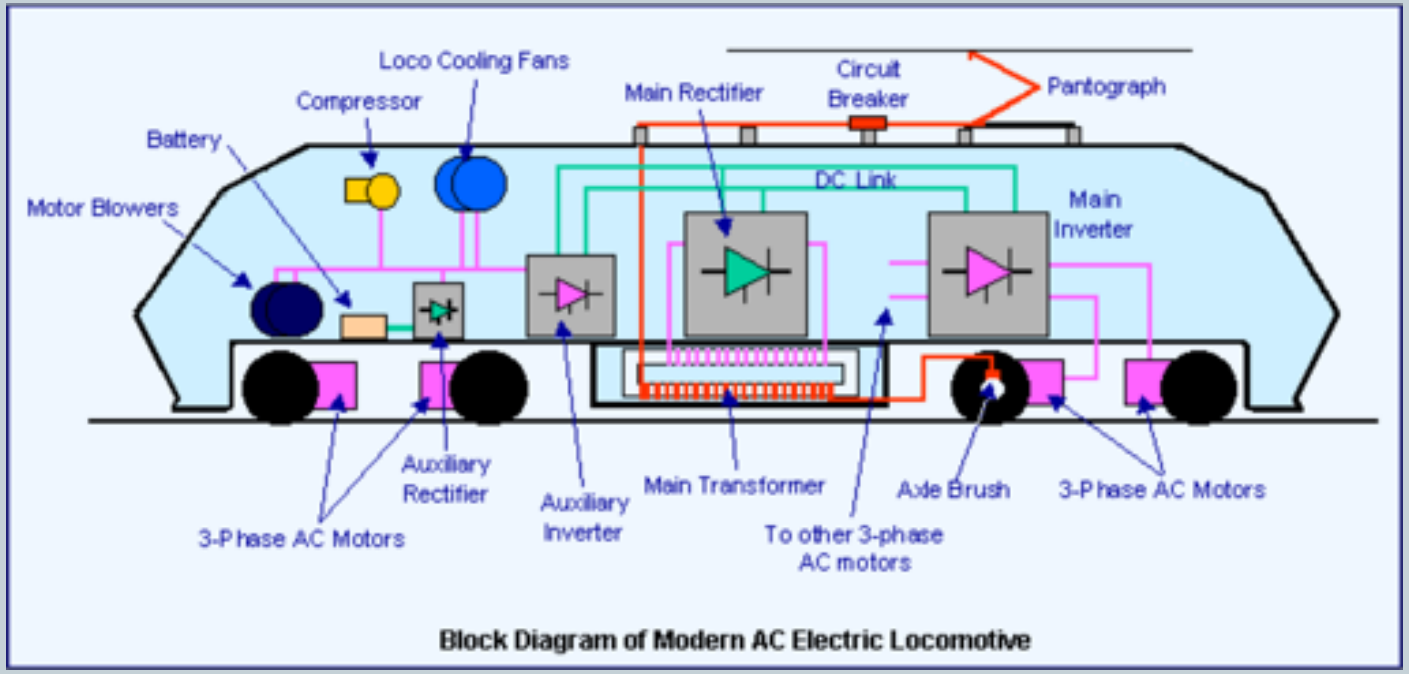
A frequência de 50 Hz revelou-se de dificil utilização na alimentação de um motor série monofásico optando-se por 16 2/3 Hz

50 Hz originavam harmónicas nas redes telegráficas e telefónicas

Electrificação AC monofásica de frequência industrial

Primeira aparição em 1932, na Hungria

- Alimentação do motor série a 50Hz muito complicada
- Grande impulso a partir de 1970 com o desenvolvimento dos tiristores
- Onduladores trifásicos de frequência variável possibilitam a utilização da máquina assincrona de rotor em gaiola



Block Diagram of Modern AC Electric Locomotive

Electrificação DC actual

Sistemas de alimentação

- Superior
- Terceiro carril
- Quarto carril



Electrificação DC actual

Sistema de alimentação superior

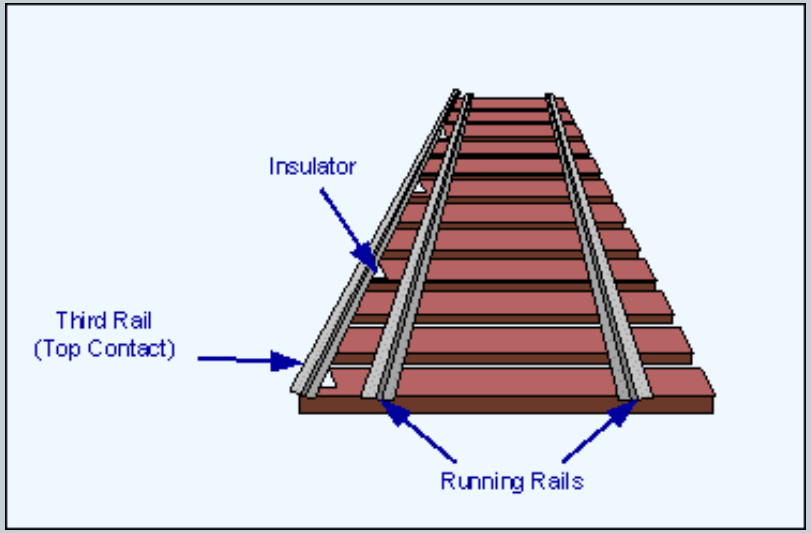
- 600 – 700 V para “trams” e metros
- 1500 – 3000 V para comboios

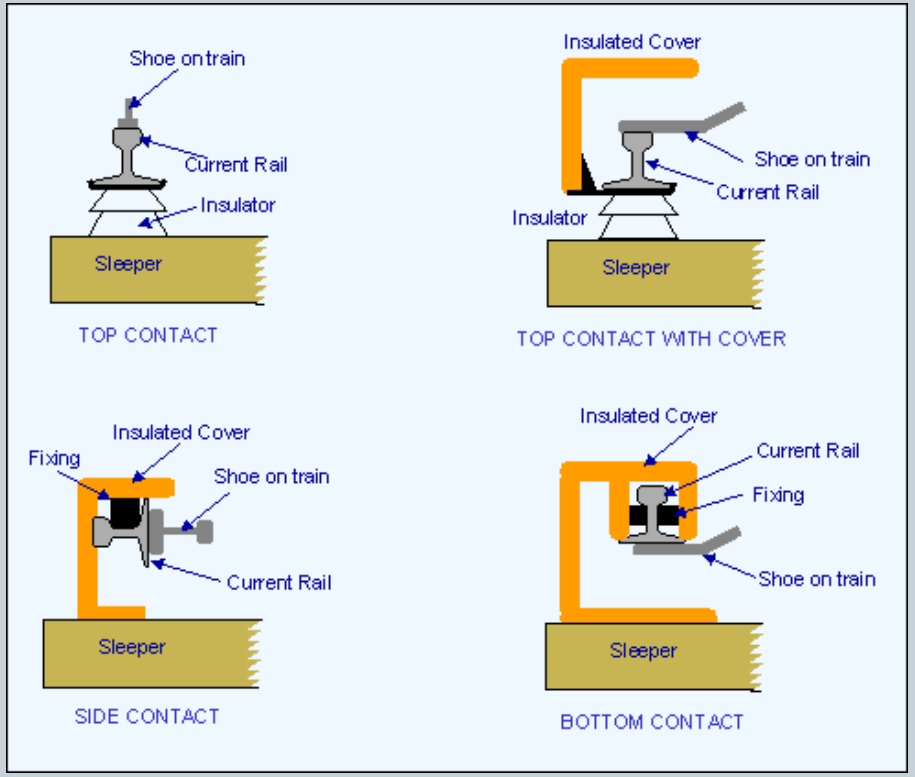


Electrificação DC actual

Sistema de alimentação por terceiro carril

• Não se deforma com o tempo e é mais económico do que a catenária

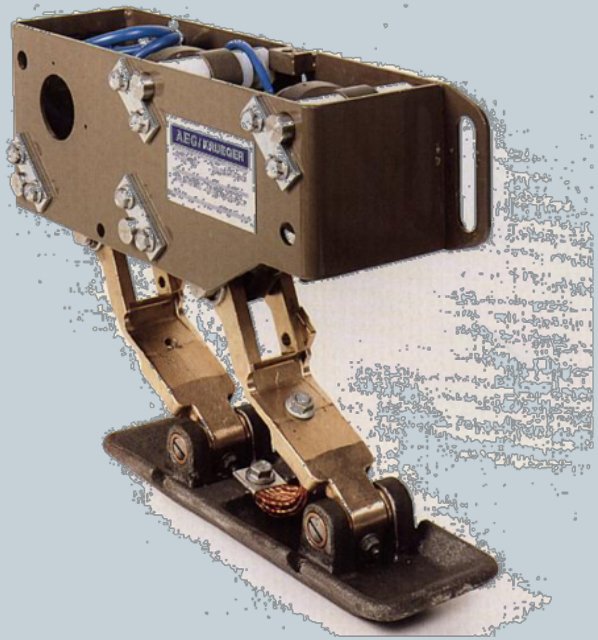




Electrificação DC actual

Sistema de alimentação por terceiro carril

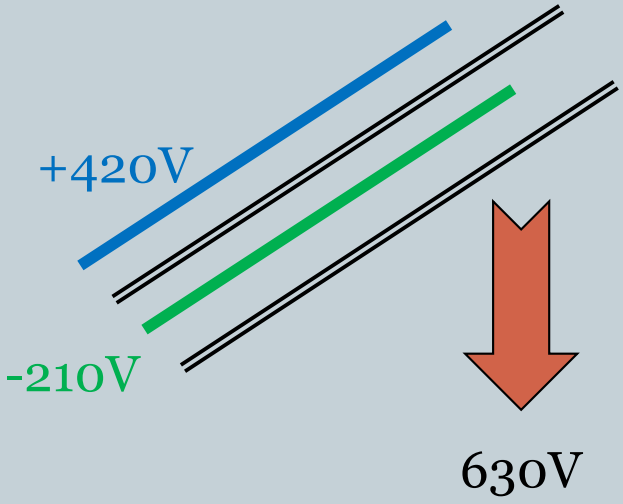




Electrificação DC actual

Sistema de alimentação por quarto carril

• O retorno é efectuado por um quarto carril dedicado e não pelos carris da composição (utilizado no metro de Londres)

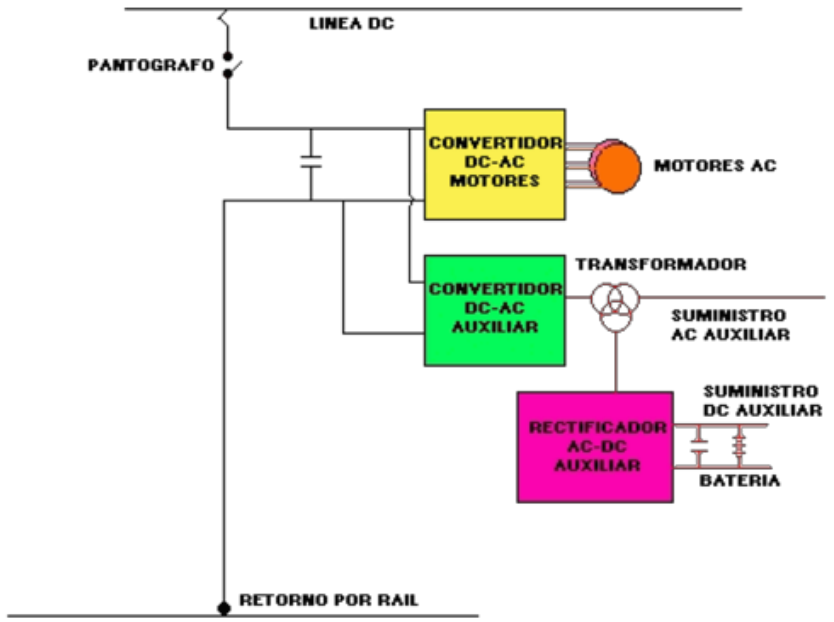




Panorama actual

Alimentação DC em alta tensão

- 1000 – 3000 V
- Taxa de desenvolvimento inferior às redes AC
- Generalização da utilização de conversores electrónicos de potência e motores AC
- Forte utilização em redes urbanas (750V)



Panorama actual

Alimentação DC (1500-3000V)

- Complexidade das instalações fixas (sub-estações numerosas e complexas, catenária com secção elevada – menos problemático em 3000V)
- Emprego do motor série particularmente bem adapatado à tracção eléctrica

Panorama actual

Alimentação AC (frequência especial)

- Relativa complexidade da alimentação
- Catenária mais económica

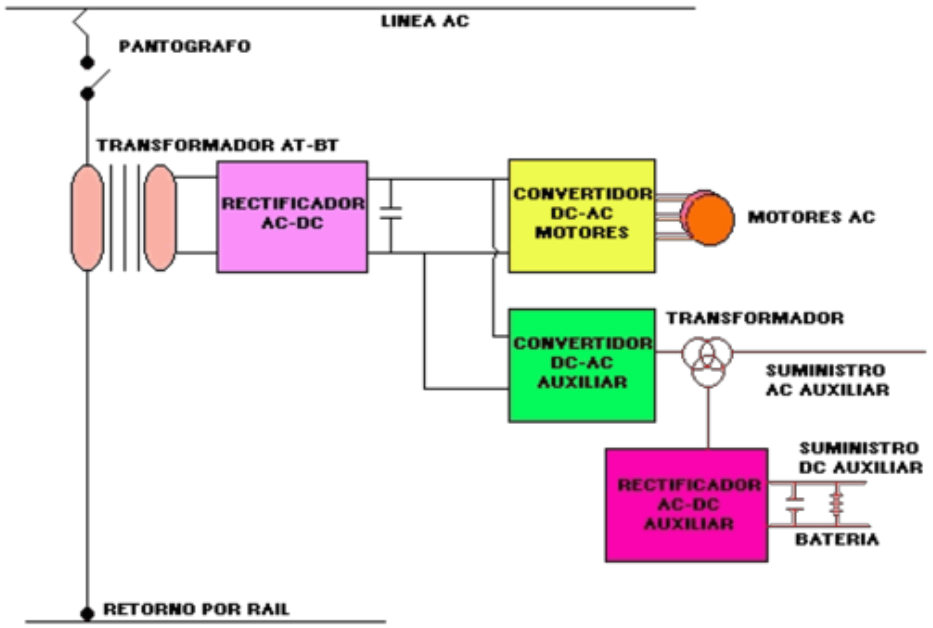
Alimentação AC (frequência industrial)

- Recurso massivo a converores electrónicos de potência

Panorama actual

Alimentação AC monofásica

- A frequência especial apenas tem servido para aumentar redes existentes
- O motor série não deverá voltar a ser utilizado em novas composições
- Utilização massiva da frequência industrial para novas electrificações
- Os sistemas auxiliares de BT são executados a partir de uma BT monofásica obtida a partir de converores electrónicos abandonando-se por completo a conversão mecânica



Panorama em Portugal

- Extensão total de via férrea: 2601 km
  - Via única: 1993 km
  - Via dupla: 564 km
  - Via múltipla: 44 km
- Alimentação AC (25kV/50Hz): 1403 km
- Alimentação DC (1500 V): 26 km



Panorama em Portugal

- Alimentação DC (1500 V): 26 km

LINHA DE CASCAIS



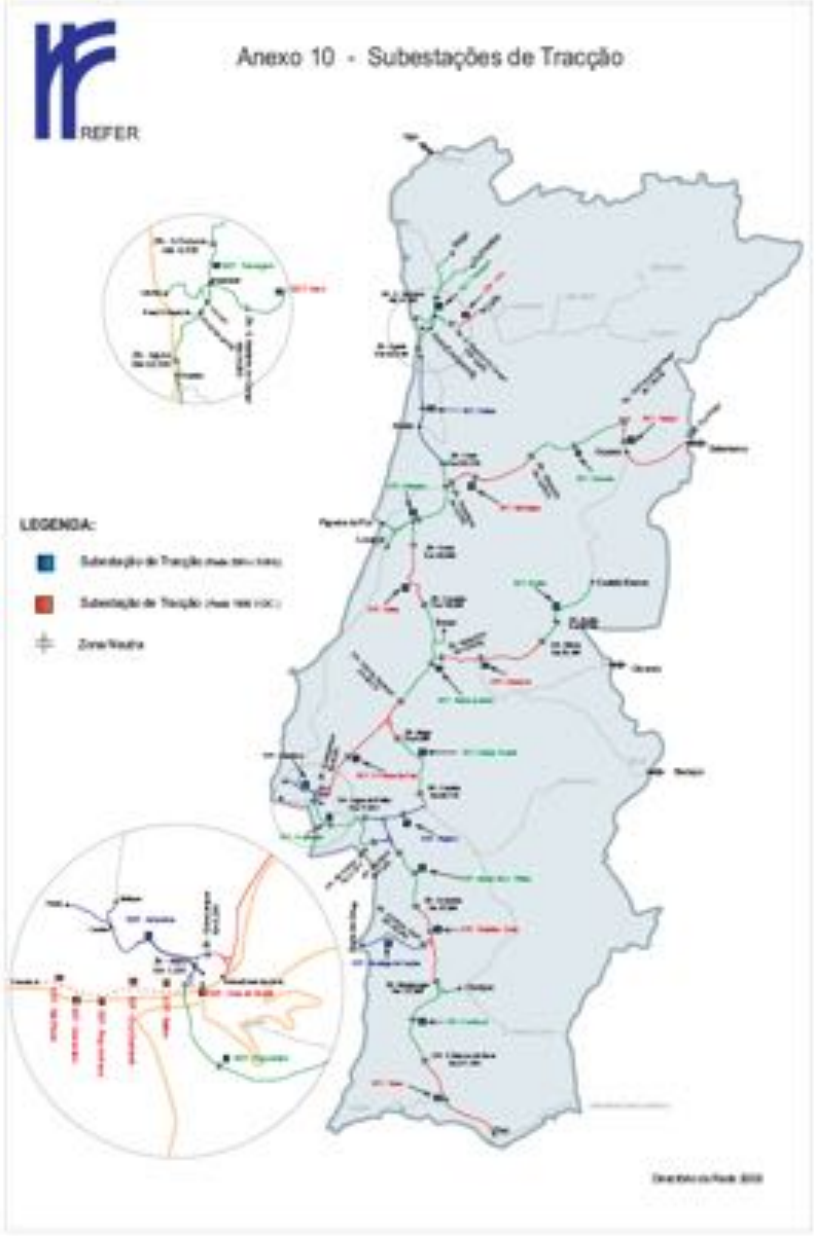
Panorama em Portugal



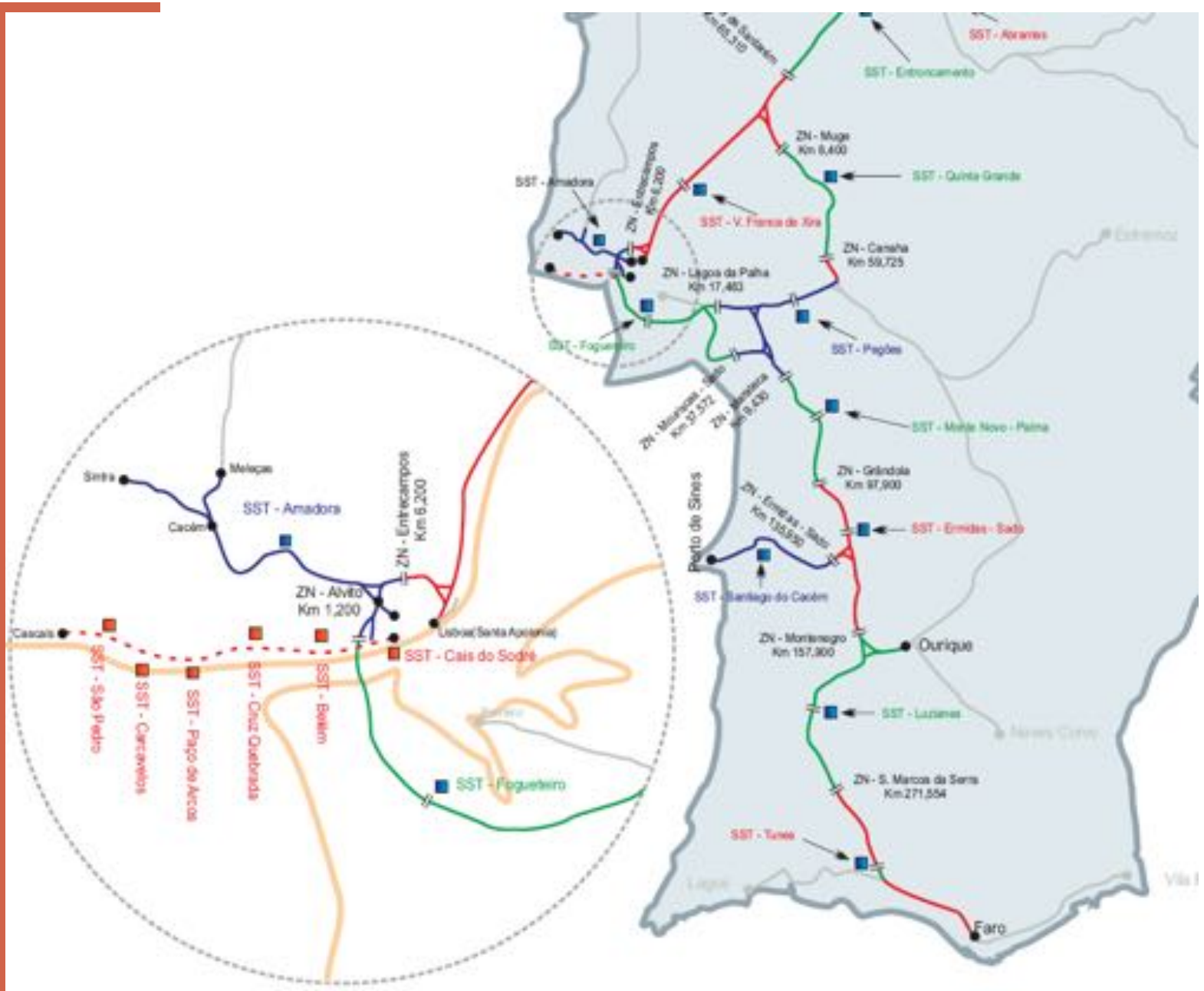


Panorama em Portugal



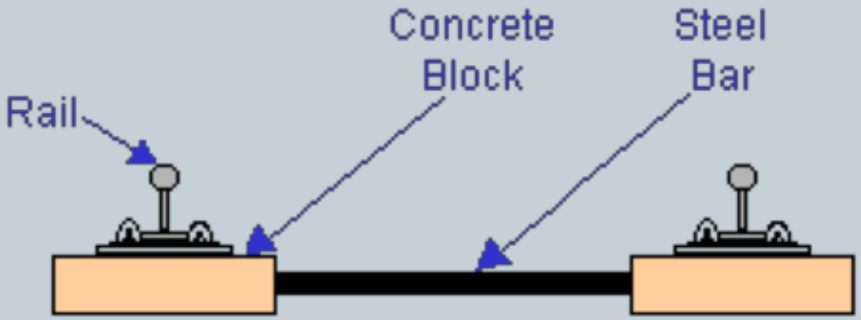


Panorama em Portugal



Carris





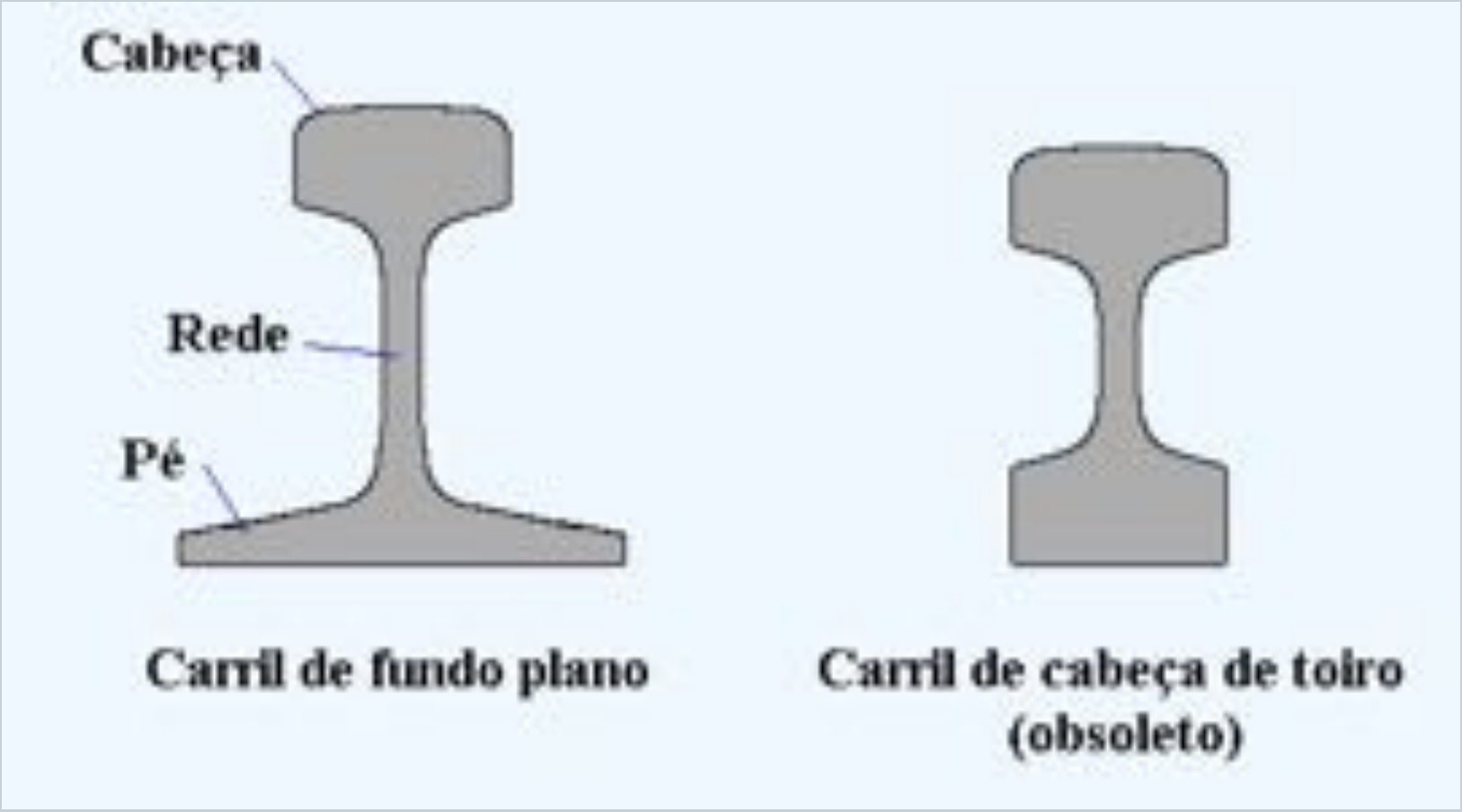
Solipas de **betão** completas e de **betão e barra de ferro** (estas têm a vantagem de serem mais leves e resistirem melhor ao movimento devido às quatro faces dos dois blocos de betão)

Carris



Utilização de solipas tradicionais de madeira no cruzamento, porque estas são muito mais fácies de cortar com a dimensão adequada...

Carris


Cabeça
Rede
Pé
Carril de fundo plano
Carril de cabeça de toiro
(obsoleto)

Carris

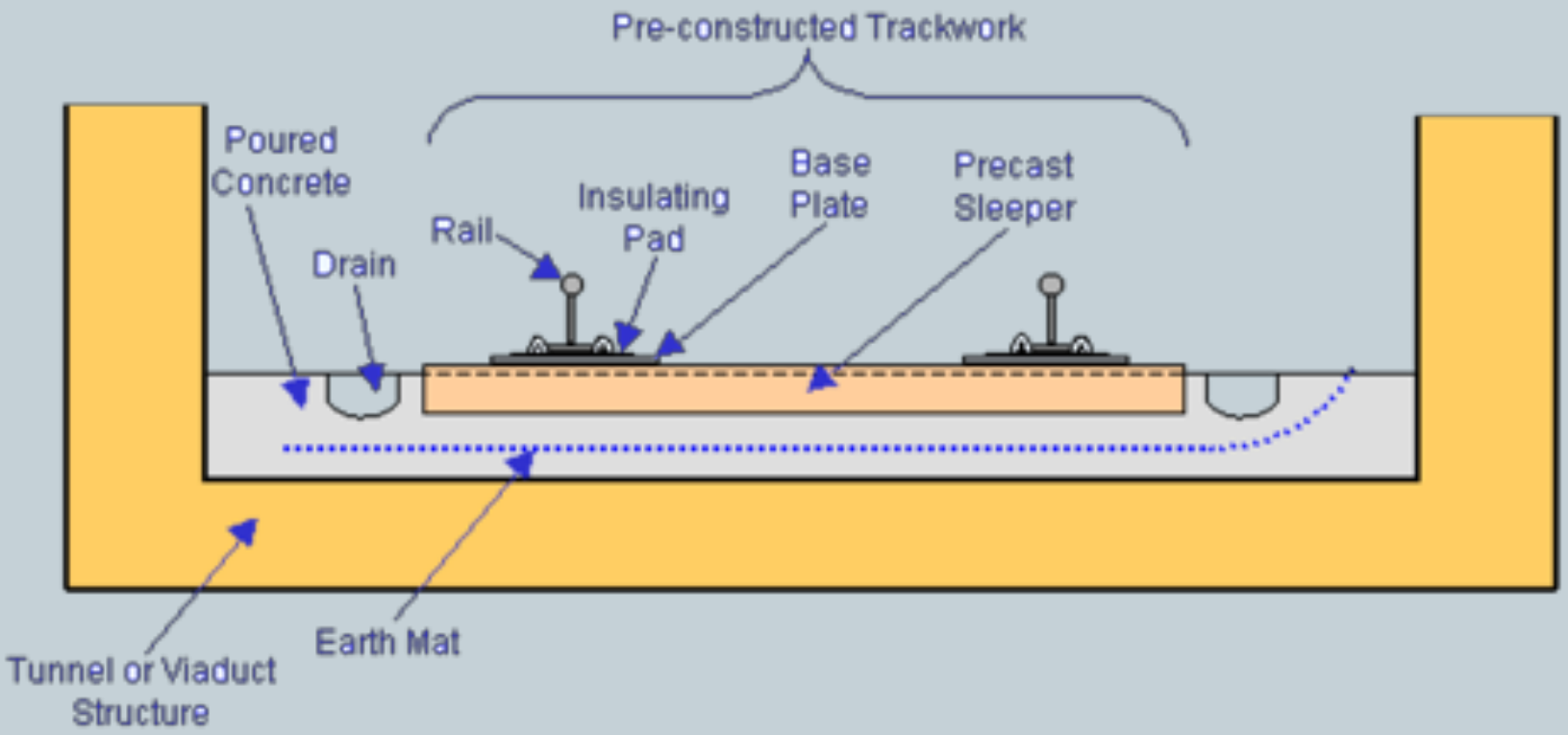
- Carril de fundo plano



- Carril de cabeça de toiro

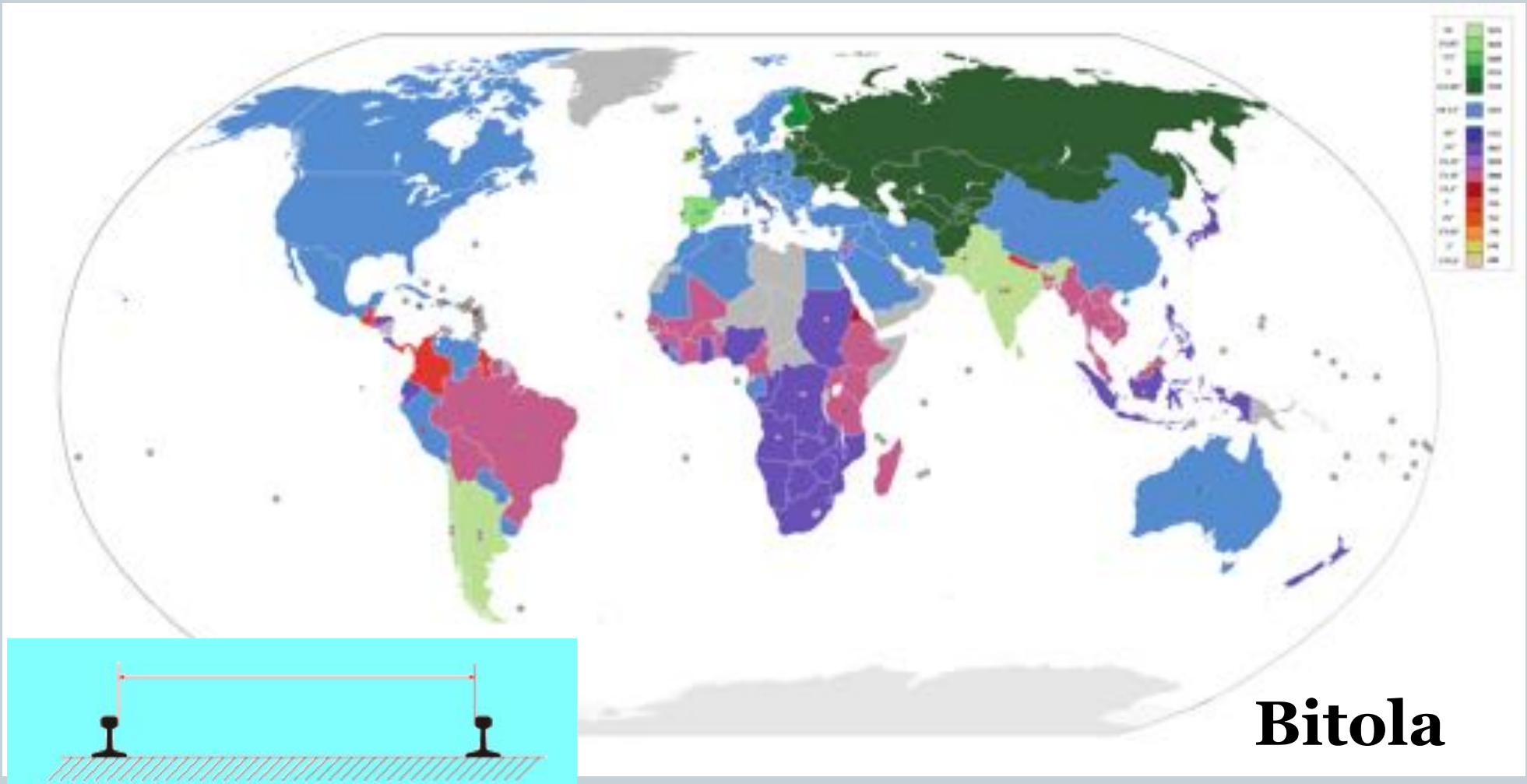


Carris



Carris Modernos - são geralmente utilizadas em locais especiais, como túneis ou pontes onde uma base rígida é necessária para assegurar a estabilidade em relação às estruturas

Carris



Bitola

Carris

Bitola larga (Espanha):	1674 mm
Bitola larga (Portugal):	1665 mm
Bitola larga (Irlanda):	1600 mm
Bitola larga (Filandia):	1524 mm
Bitola larga (antigaUSSR):	1520 mm
Bitola Standard (todo o mundo):	1435 mm
Bitola estreita/cape (África, Ásia…):	1067 mm
Bitola estreita/metro (India):	1000 mm
Bitola estreita (America Latina)	950 mm
Bitola estreita (Austria):	750 mm

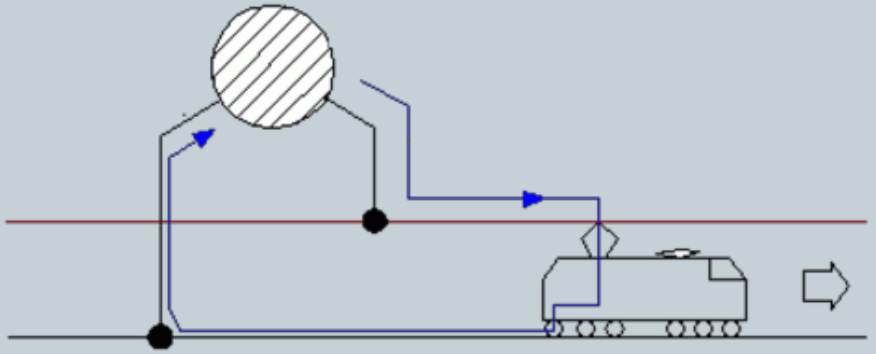
Bitola

Subestações de alimentação

- **Subestação** (de um sistema de energia) é parte de um sistema de energia, concentrada num determinado local, incluindo principalmente as terminações das linhas de transmissão ou distribuição, seccionadores, e que podem também incluir transformadores. São geralmente incluidos equipamentos necessários para o sistema de segurança e de controlo (por exemplo, os dispositivos de protecção)

(www.electropedia.org)

- Grande ou pequena potência / tensão
- Alimentação DC ou AC
- Estacionária ou móvel



Subestações de alimentação

Estacionária **(em construção)**





Subestações de alimentação

Móvel

Todo o equipamento está instalado em plataformas ferroviárias, o que permite a sua utilização móvel

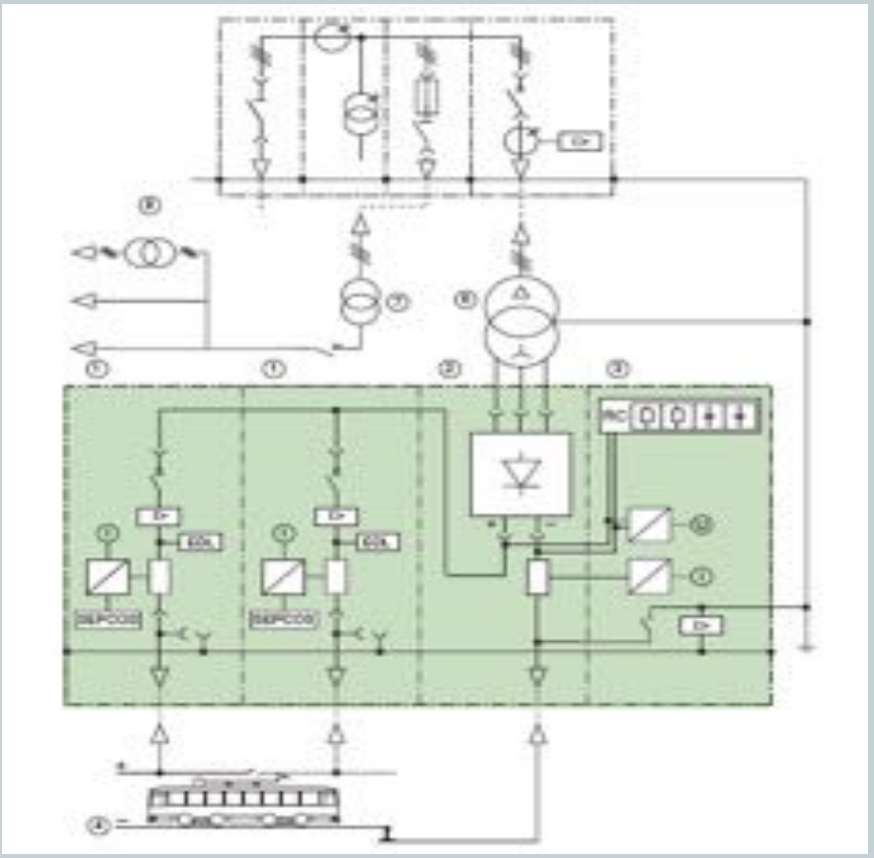




Subestações de alimentação

Subestação DC



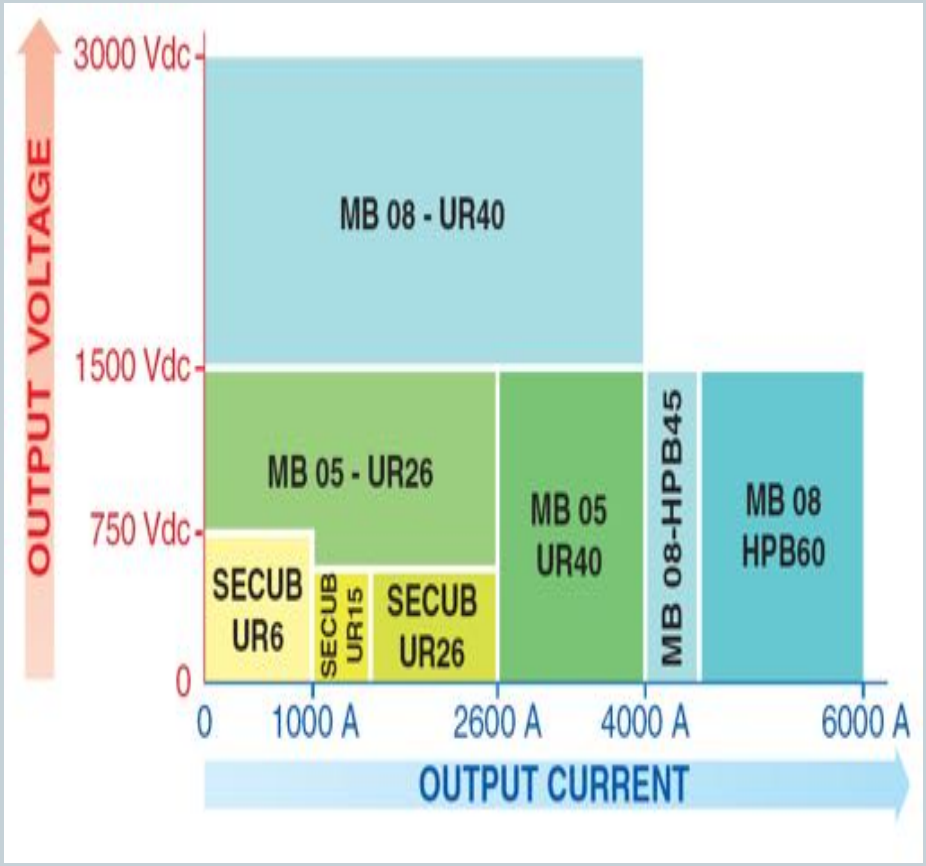


Subestações de alimentação

Equipamento modular



Gama de potência (DC)



Subestações de alimentação - posicionamento

Objectivos

A tensão média, ao longo da linha, deve estar suficientemente próxima da tensão nominal

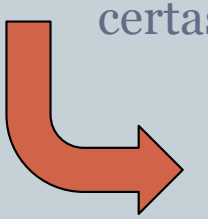
- As locomotivas podem assim utilizar normalmente a sua capacidade de tracção e assegurar uma marcha regular

Em nenhum ponto da linha a tensão deve descer abaixo de um determinado limiar mínimo

- Para assegurar a estabilidade do funcionamento dos vários equipamentos

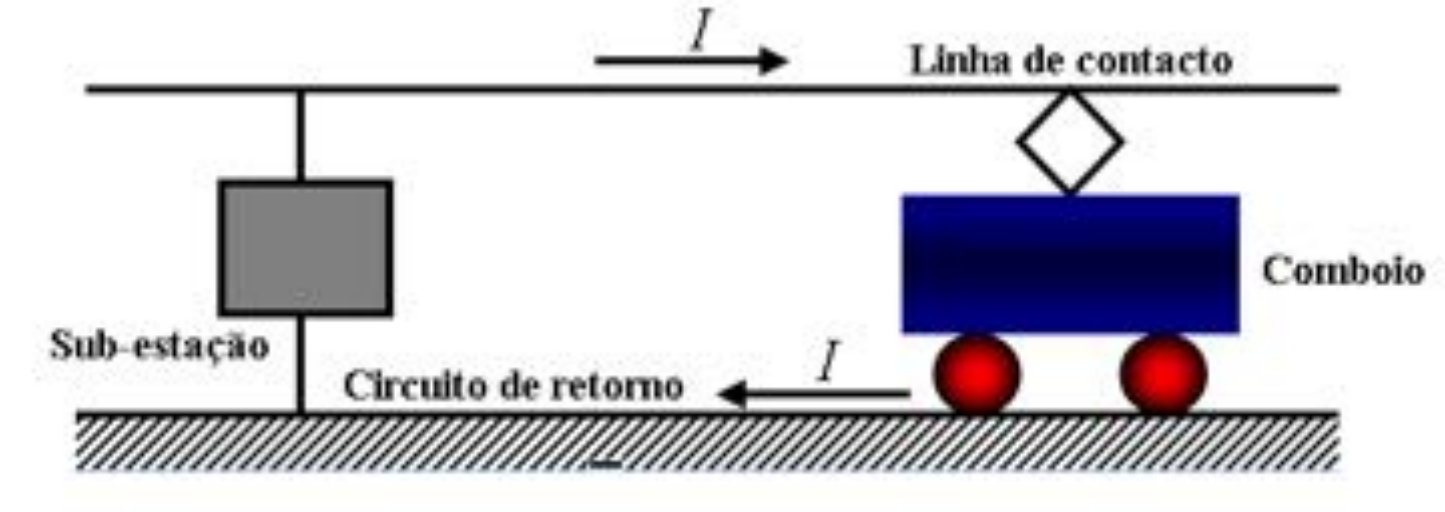
  Queda de tensão média em serviço normal

  Queda de tensão máxima em certos pontos do percurso e em certas circunstâncias



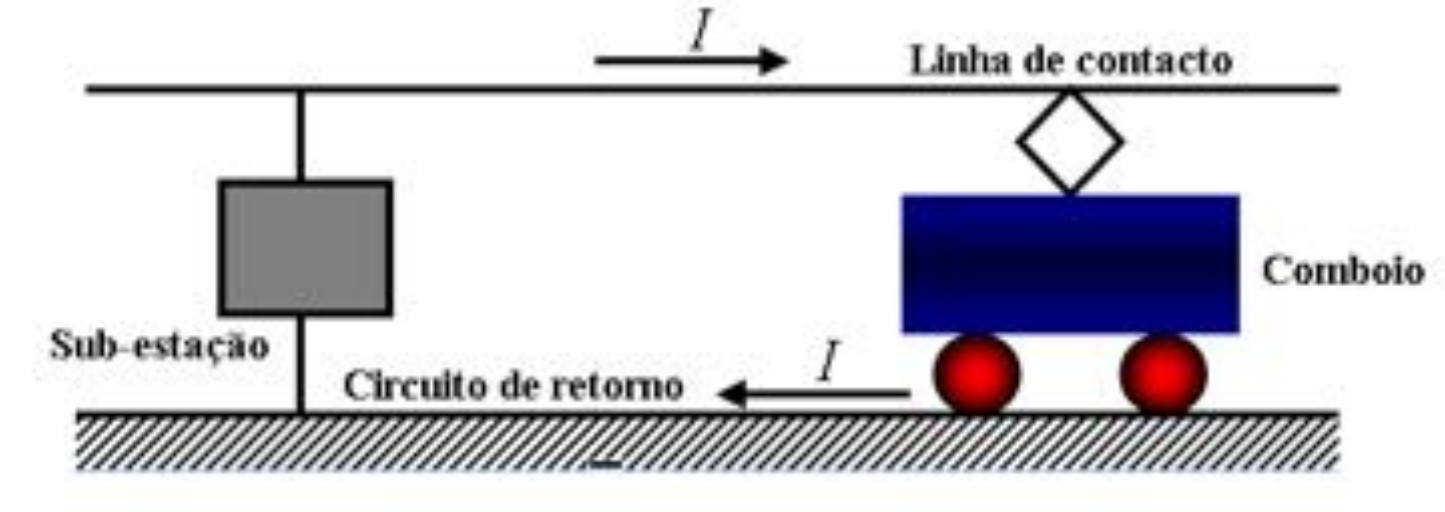
TIPICAMENTE 10%

Subestações de alimentação - posicionamento



	Mínimo instantâneo	Mínimo	Valor nominal	Máximo
DC	-	500	750	900
DC	-	1000	1500	1800
DC	-	2000	3000	3600
AC ($16_{2/3}$ Hz)	11000	12000	15000	16500
AC (50Hz)	17500	19000	25000	27500

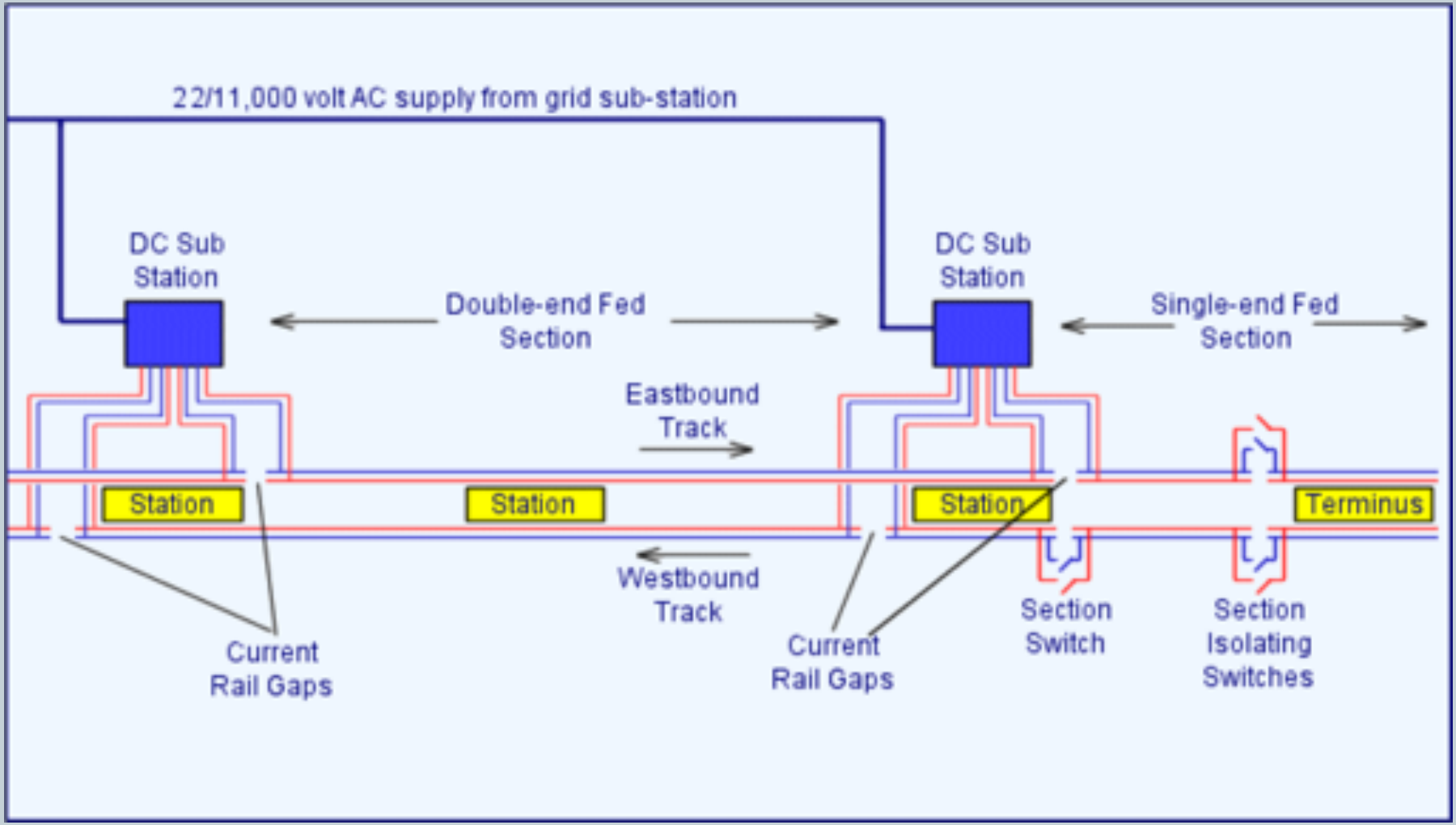
Subestações de alimentação - posicionamento



Elementos a ter em conta:

- Posicionamento das várias composições e respectivas correntes absorvidas
- Tensão nas sub-estações
- Distância a uma sub-estações ou distância entre duas sub-estações
- Impedância kilométrica do circuito de tracção / catenária + retorno

Subestações de alimentação - posicionamento



Alimentação em DC

ρ: Resistência kilométrica do circuito de tracção [Ω/km]

Depende da secção do condutor da catenária e do tipo de carril

$\frac{18,8}{s}$ $a\ 40^{o}C$

s : secção da catenária [mm²]

$\frac{0,9}{p}$

p : massa por metro de carril [kg/m]

Para o cobre

Fórmula empírica

Subestações de alimentação - posicionamento

EXEMPLO: Catenária em cobre, com 400 mm2 de secção, e carris de 50kg/m

$$\rho = \frac{18,8}{400} + \frac{0,9}{50} = 0,047 + 0,018 = 0,065\ \Omega / \mathrm{Km}$$

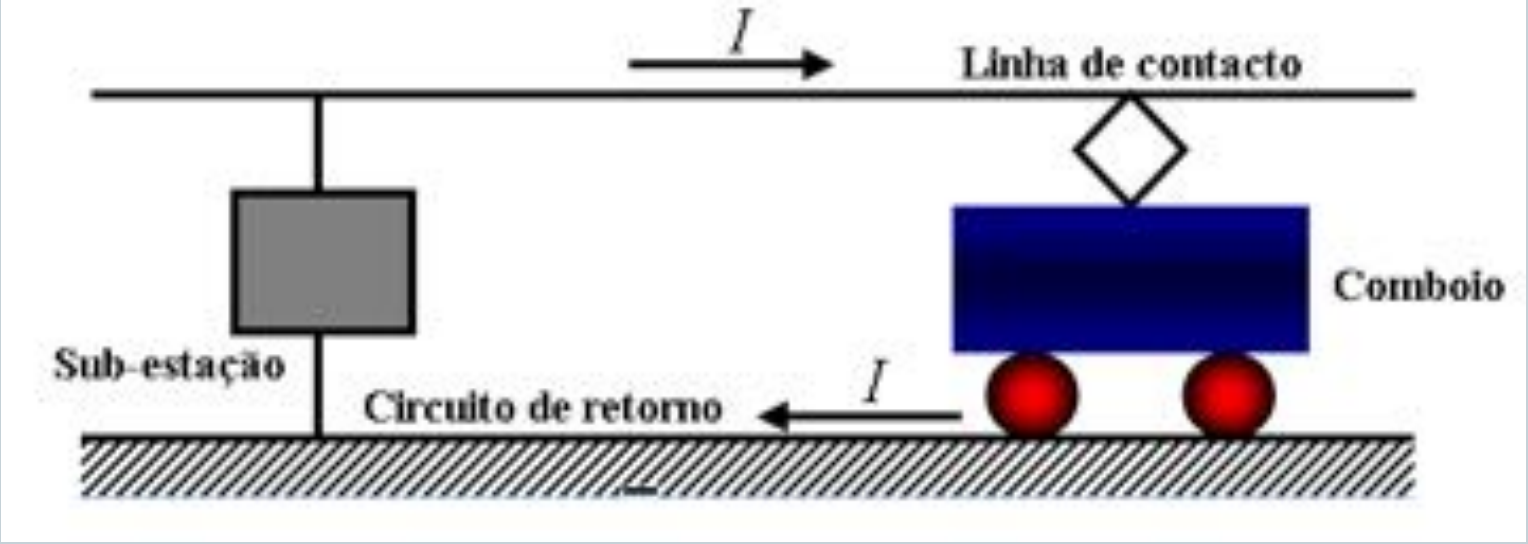


Subestações de alimentação - posicionamento

Hipóteses simplficativas:

1. A tensão na subestação é independente da carga

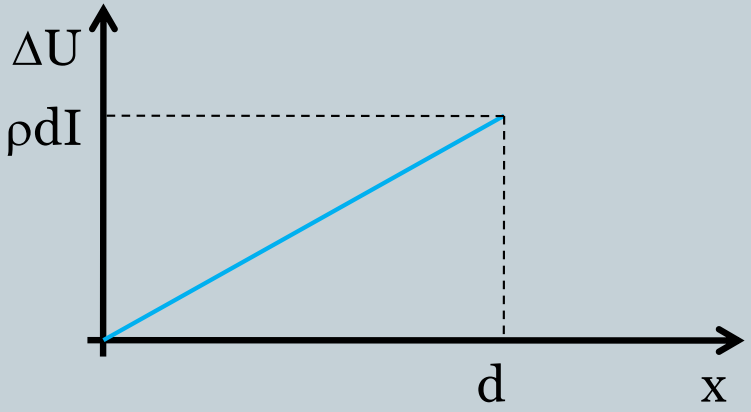
2. A intensidade de corrente absorvida por um comboio é constante ao longo de todo o percurso

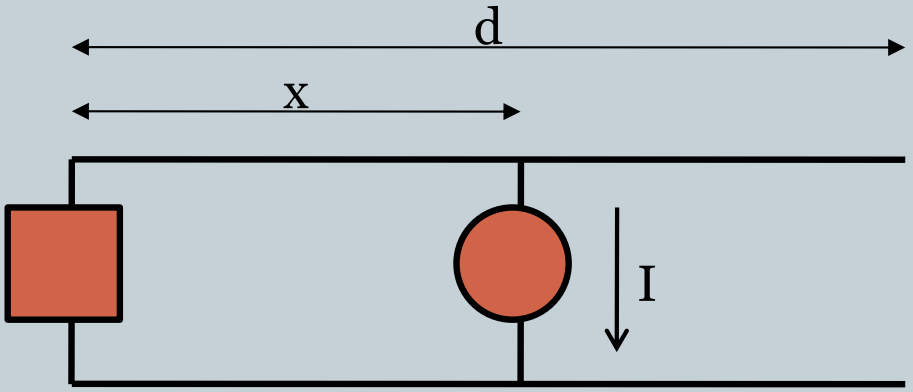


Subestações de alimentação - posicionamento

Comboio único numa secção alimentada unicamente por uma sub-estação

$$\Delta U = \rho x I$$





$$\Delta U_{med} = \frac{\rho d I}{2}$$

$$\Delta U_{max} = \rho d I$$

Subestações de alimentação - posicionamento

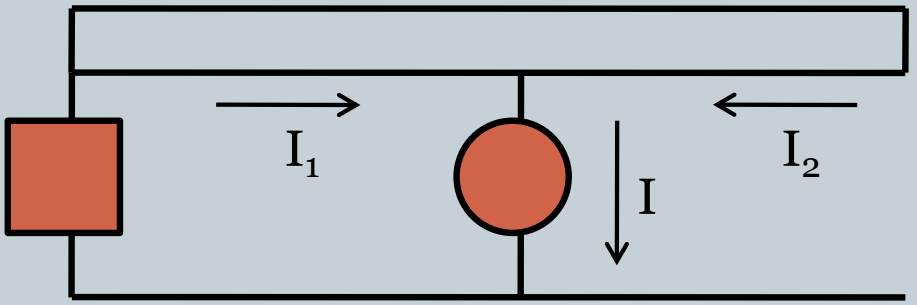
Comboio único numa secção de via dupla alimentada unicamente por uma sub-estação (com ligação paralela na extremidade)

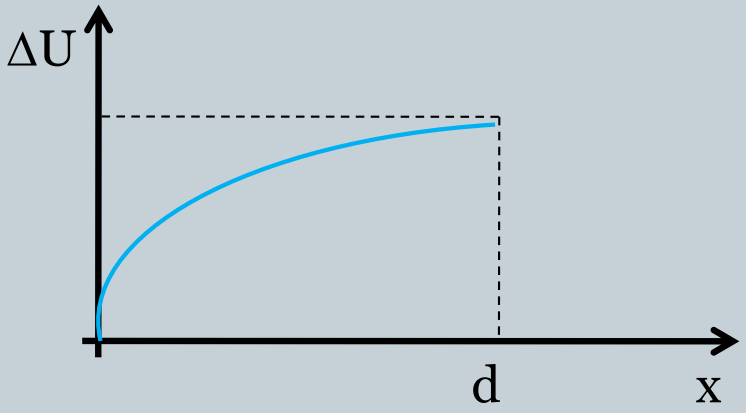
$$\Delta U = \rho x I_1 = \rho(2d - x) I_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$\rho x(I - I_2) = \rho(2d - x) I_2$$

$$\Delta U = \rho x \frac{2d - x}{2d} I$$





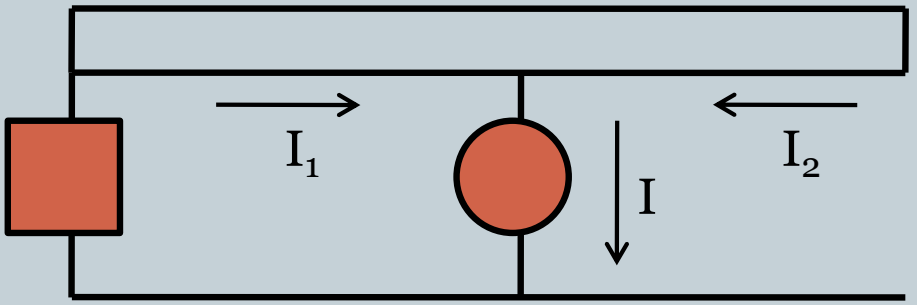
Subestações de alimentação - posicionamento

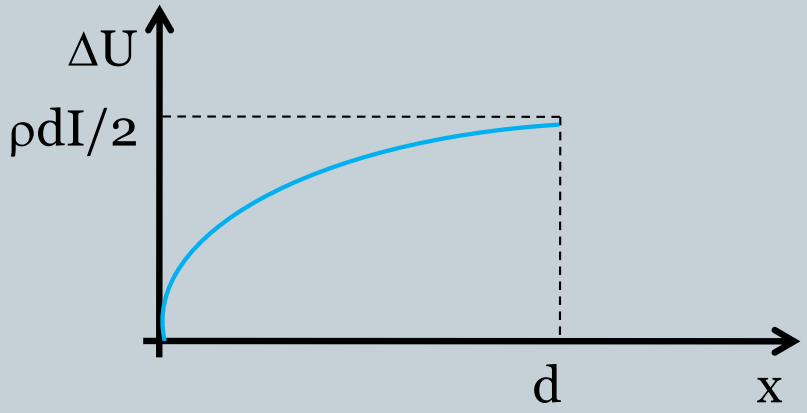
Comboio único numa secção de via dupla alimentada unicamente por uma sub-estação (com ligação paralela na extremidade)

$$\Delta U = \rho x \frac{2d - x}{2d} I$$

$$\Delta U_{\max} = \frac{\rho d I}{2}$$

$$\Delta U_{med} = \frac{1}{d}\int_0^d \Delta U dx = \frac{\rho d I}{3} = \frac{2}{3}\Delta U_{\max}$$





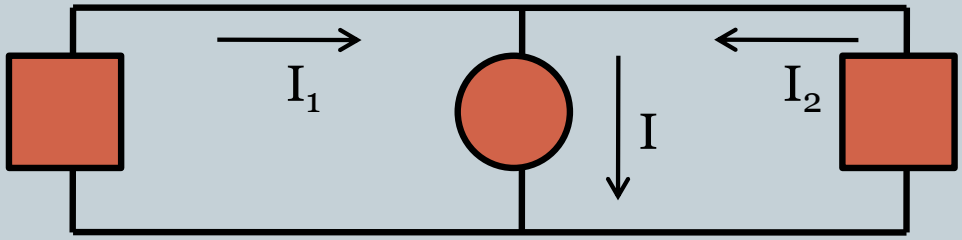
Subestações de alimentação - posicionamento

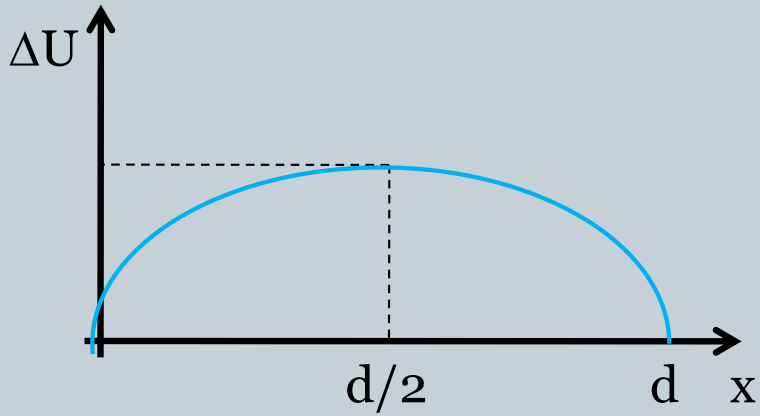
Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações

$$\Delta U = \rho x\left(I - I_2\right) = \rho\left(d - x\right)I_2$$

$$I_2 = \frac{x}{d} I$$

$$\Delta U = \rho x \frac{d - x}{d} I$$

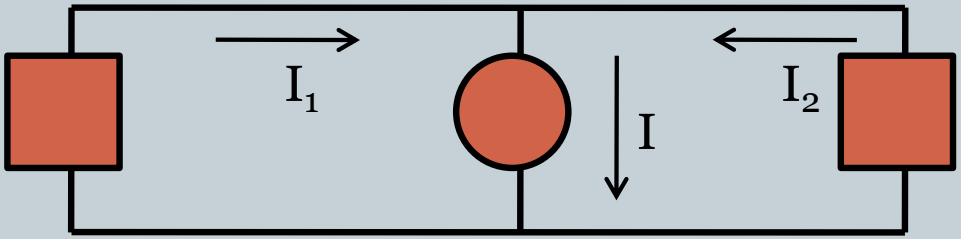




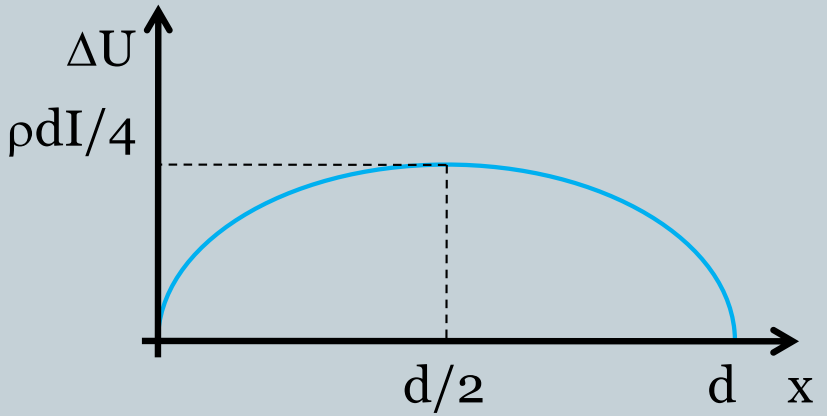
Subestações de alimentação - posicionamento

Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações

$$\Delta U_{max} = \frac{\rho dI}{4}$$



$$\Delta U_{med} = \frac{1}{d}\int_0^d \rho x \frac{d-x}{d} I dx = \frac{\rho dI}{6} = \frac{2}{3}\Delta U_{max}$$

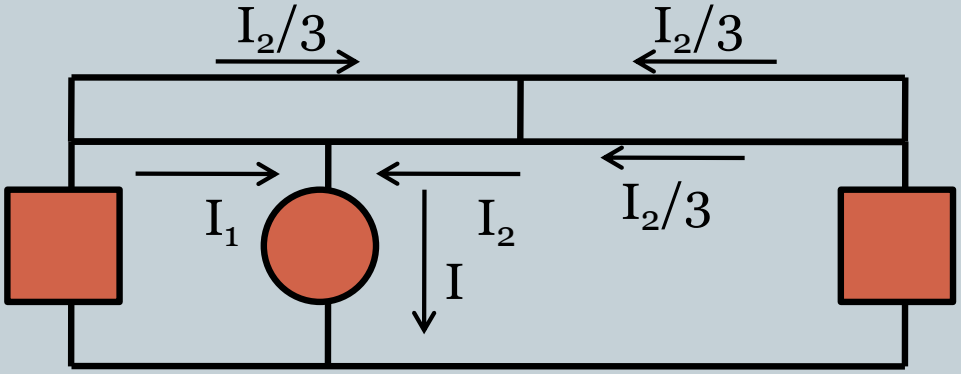


Subestações de alimentação - posicionamento

Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações (com ligação paralela na meia distância)

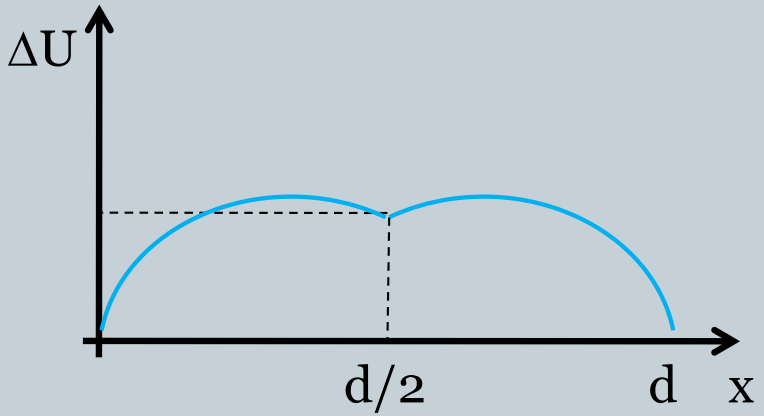
Para d/2<x<d :

$$\Delta U = \rho\left(x - \frac{d}{3}\right)I_1 = \rho(d - x)I_2$$



Para cada um dos casos anteriores obtem-se uma parábola dada pela equação:

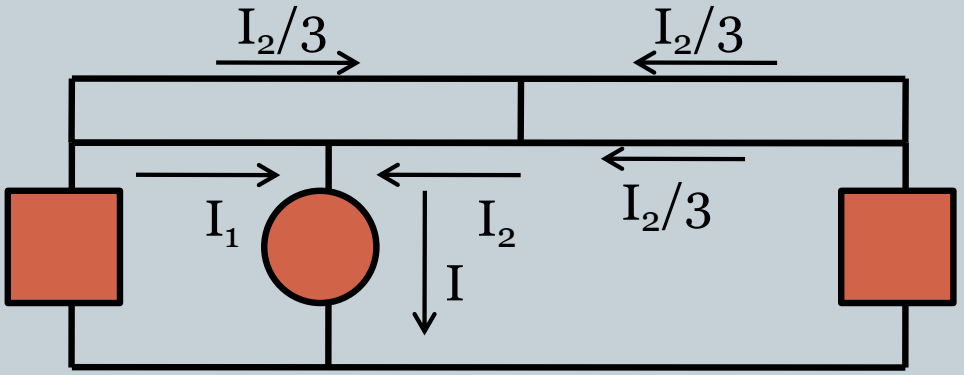
$$\Delta U = \rho x I_1\left(1 - \frac{3}{2}\frac{x}{d}\right)$$



Subestações de alimentação - posicionamento

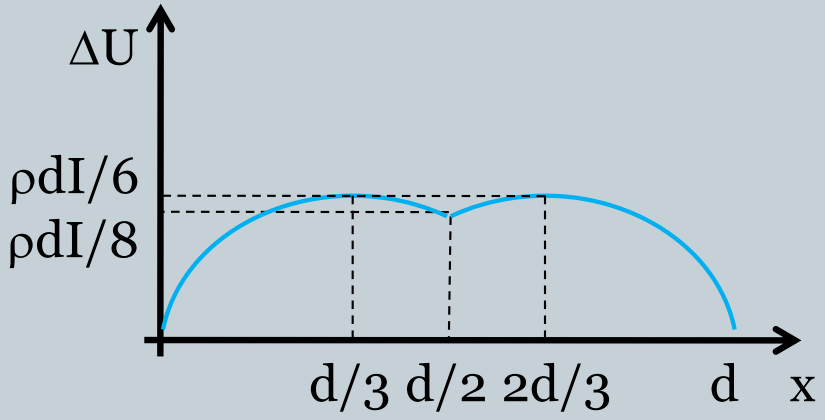
Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações (com ligação paralela na meia distância)

A tensão máxima obtem-se para x=2/3 d/2 = d/3



$$\Delta U_{max} = \frac{\rho dI}{6}$$

$$\Delta U_{med} = \rho \frac{I}{d/2} \int_0^{d/2} x\left(1 - \frac{3}{2}x\right) dx = \frac{\rho dI}{8}$$



Notar que este valor é apenas 3/4 do obtido sem ligação paralela...

Subestações de alimentação - posicionamento

Tipo	ΔUmax	ΔUmed
Comboio único numa secção alimentada unicamente por uma sub-estação	ρdI	ρdI/2
Comboio único numa secção de via dupla alimentada unicamente por uma sub-estação (com ligação paralela na extremidade)	ρdI/2	ρdI/3
Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações	ρdI/4	ρdI/6
Comboio único numa secção alimentada por duas sub-estações (com ligação paralela na meia distância)	ρdI/6	ρdI/8

Subestações de alimentação - posicionamento

Distância económica entre Sub-Estações

Factores a ter em conta:

- **Preço das sub-estações**
- **Preço kilométrico da catenária**

Distância entre Sub-Estações aumenta ⇒

- **Preço por kilómetro das sub-estações diminui**
- **Secção da catenária aumenta**

Tensão	Valores típicos
1500 V DC	6 < d <20 km
	400 < S < 480 mm²
3000 V DC	25 < d <60 km
	300 < S < 400 mm²

Correntes mais baixas, raramente é necessário aplicar feeders em paralelo

Subestações de alimentação - posicionamento

Alimentação em AC (breve comentário...)

Resistência kilométrica do circuito de tracção é substituida pela **Impedância Kilométrica** [Ω/km].

A corrente absorvida depende também do factor de potência (Potência Deformante e Factor de Potência)

Valores típicos para 50Hz:

$$\rho = 0{,}5e^{j70^\circ}\ \Omega/km \quad \textit{em via única}$$

$$\rho = 0{,}3e^{j72^\circ}\ \Omega/km \quad \textit{em via dupla}$$