TE140 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

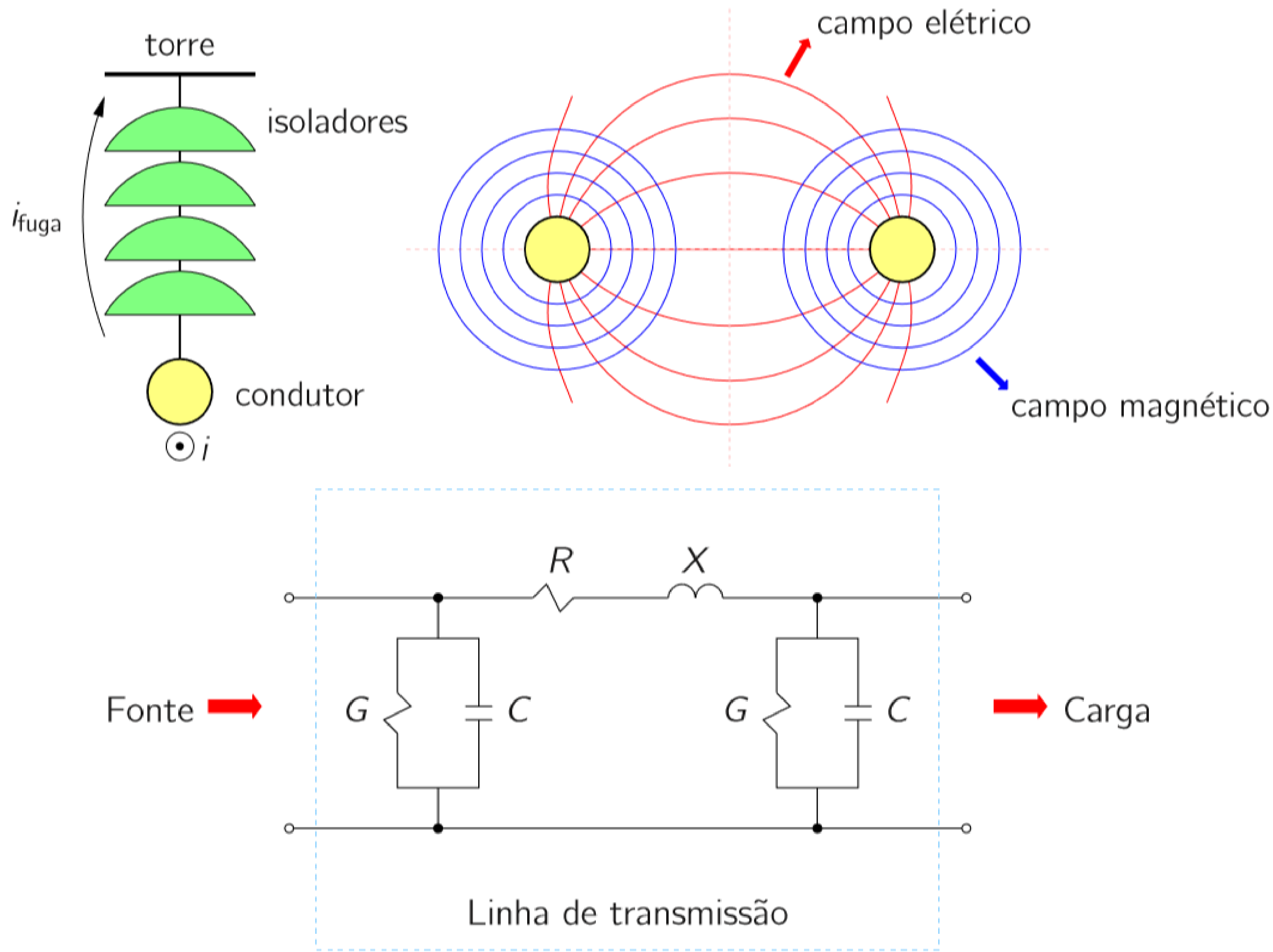
CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LT:

Parte I

Resistência e Indutância, Reatância Indutiva

PhD Eng. Clodomiro Unsihuay Vila
Federal University of Paraná, Curitiba-Brazil

Parâmetros das linhas de transmissão



Parâmetros das linhas de transmissão

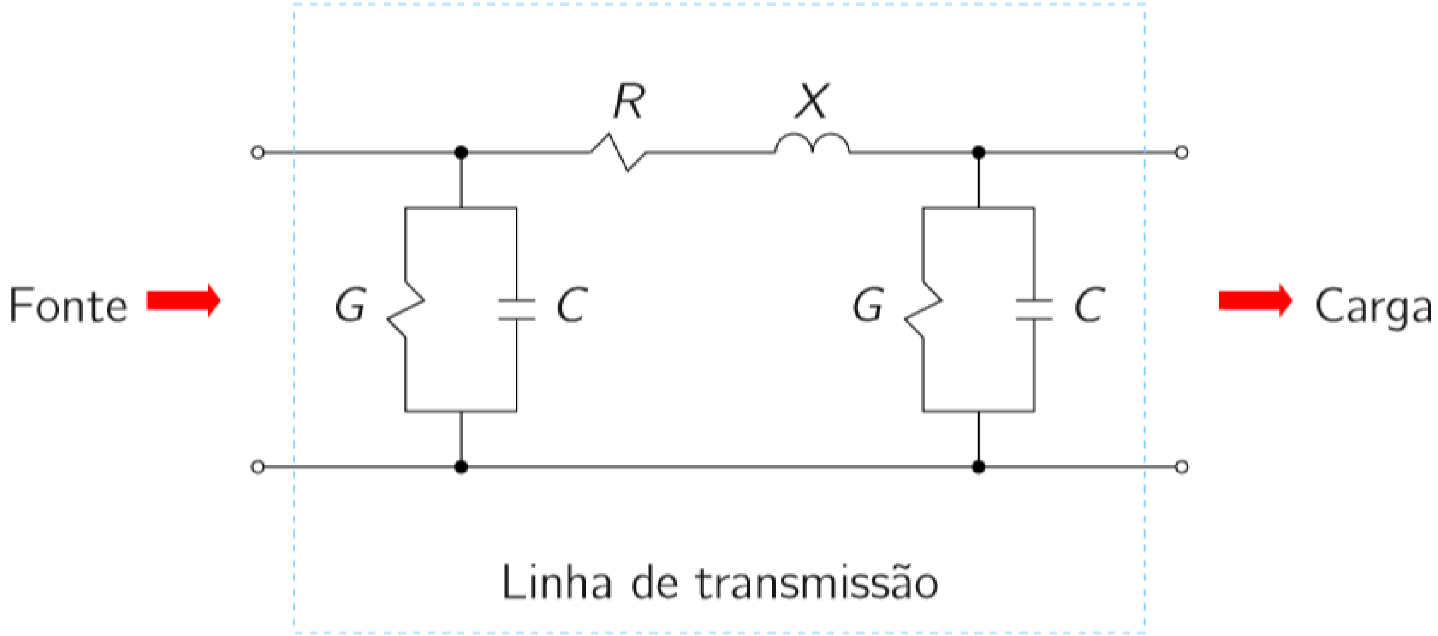
- Resistencia (R)
  - Dissipação de potência ativa devido à passagem de corrente
- Condutância (G)
  - Representação de correntes de fuga através dos isoladores (principal fonte de condutância) e do efeito corona.
  - Depende das condições de operação da linha
    - Umidade relativa do ar, nível de poluição, etc.
    - É muito variável
    - Seu efeito é em geral desprezado (sua contribuição no comportamento geral da linha é muito pequena)

Parâmetros das linhas de transmissão

- Indutância (L)
  - Deve-se aos campos magnéticos criados pela passagem das correntes
- Capacitância (C)
  - Deve-se aos campos elétricos: cargas nos condutores por unidade de diferença de potencial entre eles

Parâmetros das linhas de transmissão

- Com base nessas grandezas que representam fenômenos físicos que ocorrem na operação das linhas, pode-se obter um circuito equivalente (modelo) para a mesma, como por exemplo:



Resistência em Série

- Resistência do condutor em corrente contínua, é um dado do condutor a uma temperatura de operação, este valor é geralmente disponibilizado pelo fabricante do condutor. Caso esse valor no seja conhecido pode ser usado a seguinte equação:

$$R_{cc} = \rho.\frac{1000}{S} \qquad [\Omega/\mathrm{km}]$$

Donde:

R_{cc}: *Resistência do condutor em corrente contínua em* $\left[\frac{\Omega}{km}\right]$

S: *Seção reta transversal do condutor em* $[m^2]$.

ρ: *Resistividade do material em* $[\Omega.m]$.

Resistência em Série

- Cobre recozido a 20◦C: $\rho = 1{,}77\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$
- Alumínio a 20 ◦C: $\rho = 2{,}83\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$
- Cobre puro a 20◦C: $\rho = 1{,}7341x10^{-8}\ \Omega.m$
- Para Liga de alumínio a 20 ◦C: $\rho = 3{,}250x10^{-8}\ \Omega.m$
- Para o aço galvanizado a 20 ◦C: $\rho = 1{,}92x10^{-8}\ \Omega.m$

https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf

Resistência em Série

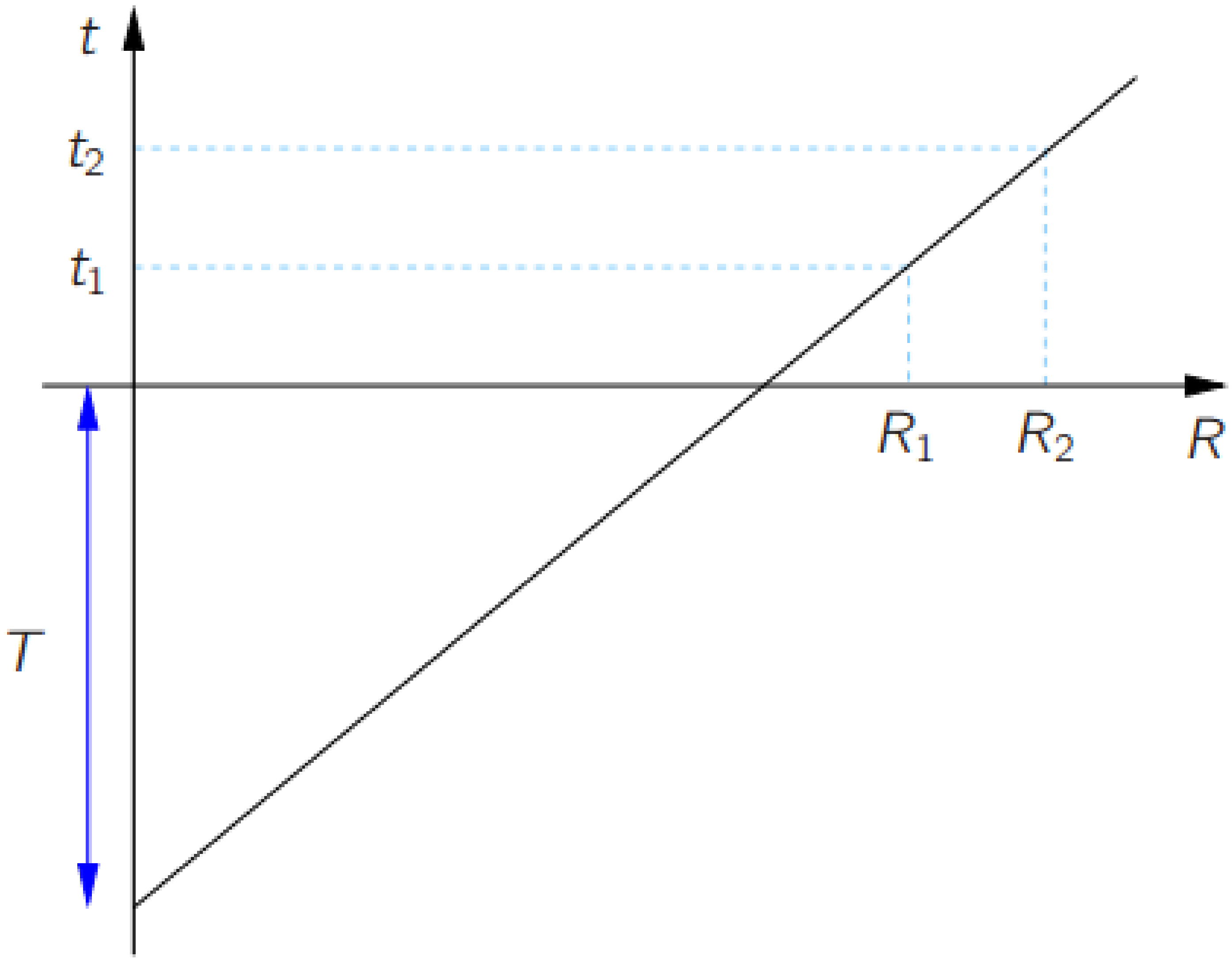
- ρ depende da temperatura → Rcc varia com a temperatura (ρ aumenta → Rcc aumenta):

$$R_{cc_{t2}} = \left[\frac{|T| + t_2}{|T| + t_1}\right] R_{cc_{t1}}$$

T: Temperatura de referência onde a resistência do material supostamente é insignificante

MATERIAL	TEMPERATURA T (°C)
Cobre Recozido com 100% de Condutividade	-234,5
Cobre Têmpera dura Em Frio 97,3% De Condutividade	-241,0
Alumínio Têmpera dura De 61% De Condutividade	-228,0

Resistência em Série



Resistência em Série

- $R_{cc_{t2}} = [1 + \alpha(t_2 - t_1)]R_{cc_{t1}}$
- Onde:
- α: coeficiente de variação com a temperatura.
- Rcc aumenta de 1 a 2% para cabos torcidos (fios de alumínio torcidos, p.ex. cabos ACSR)
- Para se ter x metros de cabo, necessita-se de 1,01x a 1,02x metros de fios para depois agrupá-los e torcê-los.

Resistência em Série

- Em corrente alternada a distribuição de corrente não é uniforme pela seção reta do condutor → a corrente concentra-se na periferia do condutor
- "Área útil" para passagem da corrente diminui → $R_{AC} > R_{CC}$ → efeito pelicular ("skin effect")
- https://www.youtube.com/watch?v=KfrGrZ3ZSjg&ab_channel=Jumosan1

Resistência em Série

- Geralmente a resistência em (CA) vem especificada pelos fabricantes e normas, no caso que se precise calcular, pode ser usado a seguinte equação:

$$R_{CA_{t2}} = R_{cc_{t2}}(1 + 7{,}5 f^2 D_{ext}^4 \mathbf{10^{-7}})$$

Donde:

- $R_{CA_{t2}}$: Resistencia em corrente alternada na temperatura t_2 em Ω/km;
- $R_{cc_{t2}}$: Resistencia em corrente contínua na temperatura t_2 em Ω/km;
- f: Frequência do sistema (em Hz)
- D_{ext}: Diâmetro do condutor (em cm)

EXEMPLO 1

Um cabo AAAC Greeley (6201-T81) apresenta as seguintes características (dados de tabela):

resistência CC a 20°	0,07133 Ω/km
resistência CA a 50°	0,08202 Ω/km
coeficiente de variação com a temperatura (α)	0,00347 °C^{-1}

Calcule o aumento percentual da resistência devido ao efeito pelicular

EXEMPLO 1: Solução

A resistência CC a 50° é:

$$
\begin{aligned}
R_{cc}^{50} &= R_{cc}^{20}\,[1+\alpha\,(50^\circ-20^\circ)] \\
&= 0{,}07133\cdot[1+0{,}00347\cdot(50^\circ-20^\circ)] = 0{,}07876\ \Omega/\mathrm{km}
\end{aligned}
$$

A relação entre as resistências CA (dada) e CC (calculada) a 50° é:

$$
\frac{R_{CA}^{50}}{R_{cc}^{50}} = \frac{0{,}08202}{0{,}07876} = 1{,}0414
$$

ou seja, o efeito pelicular faz com que a resistência CA aumente em 4,14%

Exemplo 2

- Considere um cabo condutor ACSR Ariola, cujos dados são:
- $R_{cc}(20\ {\circ}C) = 0{,}1698\ \Omega/km$
- Frequencia do sistema 60 Hz
- Diâmetro: 0,0188 m
- Encontre:

$R_{cc}(40\ {\circ}C)$??

$R_{ca}(40\ {\circ}C)$???

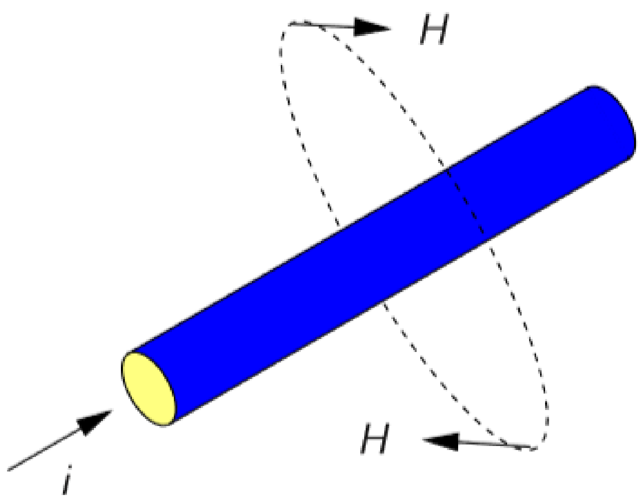
Exemplo 2:Solução

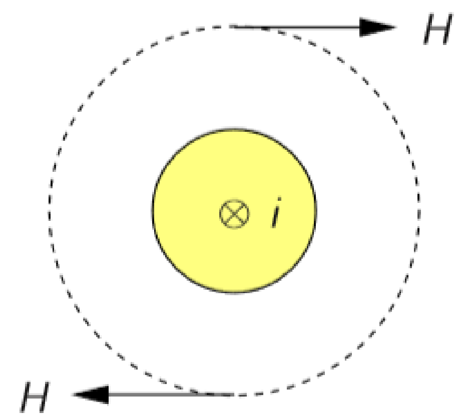
- $R_{cc_{t2}} = \left[\frac{|T|+t_2}{|T|+t_1}\right] R_{cc_{t1}}$

- Rcc(40 ◦C)=(228+40)/(228+20)* 0,1698= 0,1835 Ω/km
- $R_{CA_{t2}} = R_{cc_{t2}}(1 + 7{,}5f^2 D_{ext}^4 10^{-7})$
- Rca(40 ◦C)= 0,1835*(1+7,5*60^2*(0,0188 *100)^4*10^(-7))=
- Rca(40 ◦C)= 0,1897 Ω/km
-

INDUCTANCIA

- Relacionada com os campos magnéticos produzidos pela passagem de corrente pelo condutor → corrente produz campo magnético

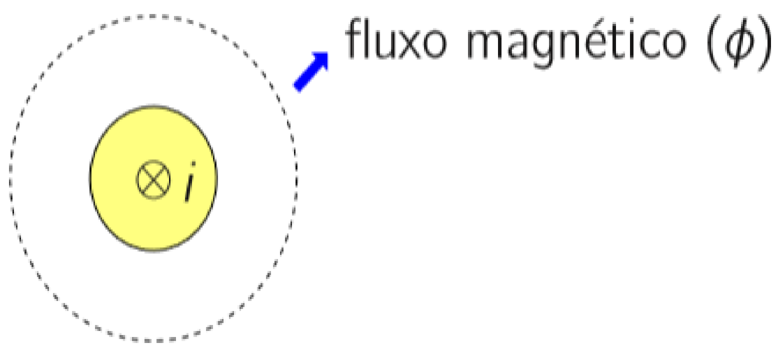




INDUCTANCIA

- Fluxo concatenado com uma corrente (λ): é aquele que enlaça a corrente líquida

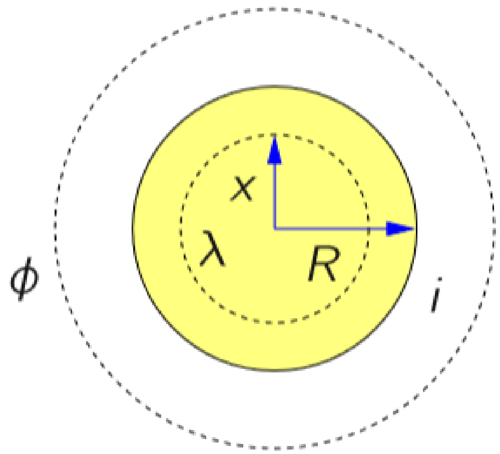
  - Fluxo concatenado externo ao condutor: a corrente produz um campo magnético (ϕ). O fluxo externo concatenado com a corrente enlaça *toda* a corrente, portanto:



$$\lambda = \phi$$

INDUCTANCIA

- Fluxo concatenado interno ao condutor: o fluxo interno concatenado com a corrente a uma distância x do centro do condutor de raio R é:



$$\lambda = \phi \left(\frac{x}{R}\right)^2$$

Assumindo densidade de corrente (distribuição de carga por área) uniforme, a corrente enlaçada a uma distância x é proporcional à corrente total. Aparece portanto na expressão de λ a relação entre áreas $\left(\pi x^2/\pi R^2\right)$

Indutância devido ao fluxo interno

- Considerar um condutor sólido pelo qual circula uma corrente i

- Lei de Ampère:

$$\oint_c H \, d\ell = i_c$$

"a intensidade de campo magnético (A/m) ao longo de qualquer contorno é igual à corrente que atravessa a área delimitada por este contorno"

Esta expressão é válida para CC ou CA (utilizar fasores neste caso)

Indutância devido ao fluxo interno

- Considerar um condutor sólido pelo qual circula uma corrente i

- Lei de Ampère:

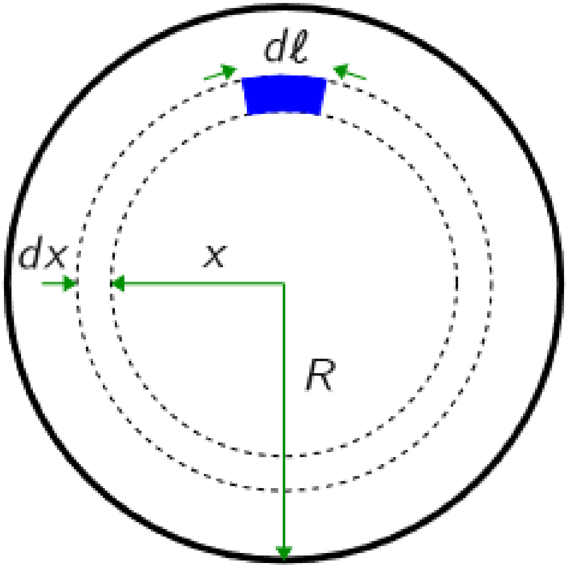
$$\oint_c H \, d\ell = i_c$$

"a intensidade de campo magnético (A/m) ao longo de qualquer contorno é igual à corrente que atravessa a área delimitada por este contorno"

Esta expressão é válida para CC ou CA (utilizar fasores neste caso)

Indutância devido ao fluxo interno

- Considerar a seguinte situação (condutor visto de frente):



- Resolvendo a equação de Ampère:

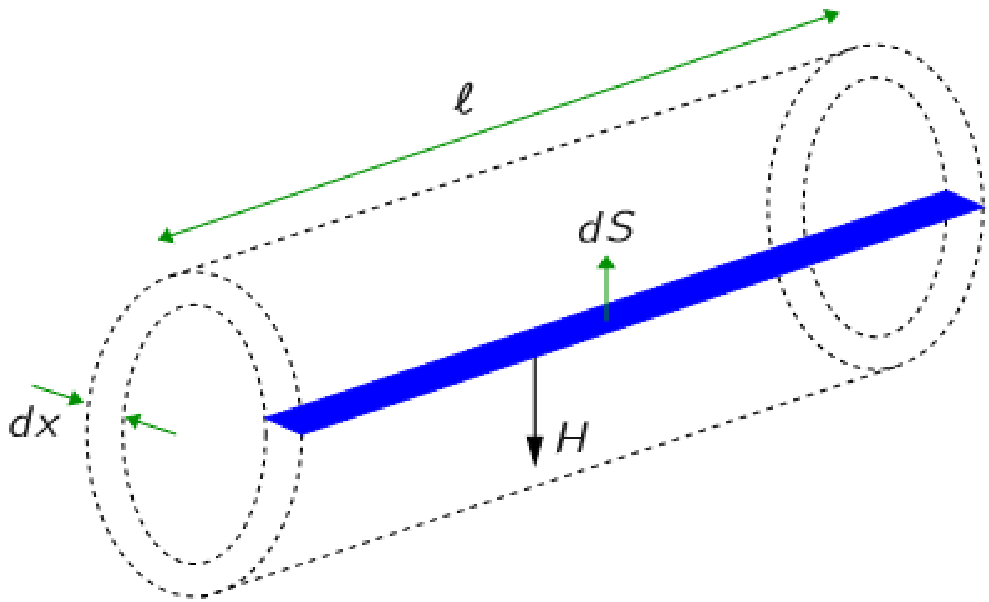
$$H\ (2\pi\, x) = \frac{\pi x^2}{\pi R^2}\, i \qquad \rightarrow \qquad H = \frac{x}{2\pi R^2}\, i \ \text{A/m}$$

- Densidade de fluxo:

$$B = \mu_r \, \mu_0 \, H \text{ Wb/m}^2$$

em que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade do vácuo e μ_r é a permeabilidade relativa do material

- Considerar o elemento tubular de espessura dx e comprimento ℓ:



$\Rightarrow$ $dS = \ell \, dx$

O fluxo magnético é igual à densidade de fluxo B vezes a área da seção transversal que o campo atravessa ($H \perp dS$):

$$d\phi = B \, dS \text{ Wb}$$

Da figura tem-se $dS = \ell \, dx$ e:

$$d\phi = \mu_r \mu_o H \ell dx \text{ Wb}$$

- O fluxo concatenado com a corrente é proporcional à área de raio x:

$$\begin{aligned}
d\lambda &= \frac{x^2}{R^2} d\phi \\
&= \frac{x^2}{R^2} \mu_r \mu_0 H dx \\
&= \frac{x^2}{R^2} \mu_r \mu_0 \underbrace{\frac{x}{2\pi R^2}}_{H} i dx \\
&= \mu_r \mu_0 \frac{x^3}{2\pi R^4} i dx \text{ Wb/m}
\end{aligned}$$

Integrando:

$$\lambda_{\text{int}} = \int_0^R \mu_r \mu_0 \frac{x^3}{2\pi R^4} i dx = \frac{\mu_r \mu_0}{8\pi} i \text{ Wb/m}$$

e independe do raio do condutor, dependendo somente do material e da intensidade da corrente

Indutância devido ao fluxo interno

- A indutância devido ao fluxo interno é dada por:

$$L_{\text{int}} = \frac{d}{di}\lambda_{\text{int}} \overset{(*)}{=} \frac{\lambda_{\text{int}}}{i} \qquad \rightarrow \qquad L_{\text{int}} = \frac{\mu_r \mu_0}{8\pi} \text{ H/m}$$

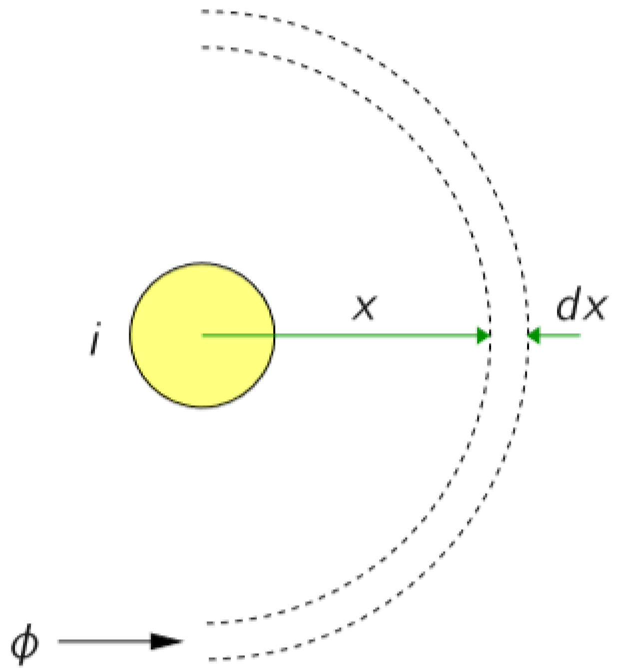
$(*)$ considerando permeabilidade constante

e é constante. Para materiais como o alumínio, cobre, ar, água, tem-se $\mu_r = 1$ e:

$$L_{\text{int}} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Indutância devido ao fluxo externo

- Considere a seguinte situação em que se deseja obter o fluxo concatenado externo ao condutor:



- A corrente total i é enlaçada. Aplicando a Lei de Ampère:

$$\oint_c H\, d\ell = i$$

$$2\pi x H = i$$

$$H = \frac{i}{2\pi x}$$

- Densidade de campo magnético:

$$B \overset{(*)}{=} \mu_0 H = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$$

$(*)$ $\mu_r = 1$ (ar)

Indutância devido ao fluxo externo

- Fluxo magnético (lembrando do elemento tubular de comprimento ℓ e espessura dx):

$$d\phi = BdS = B\ell dx$$

- Fluxo por unidade de comprimento:

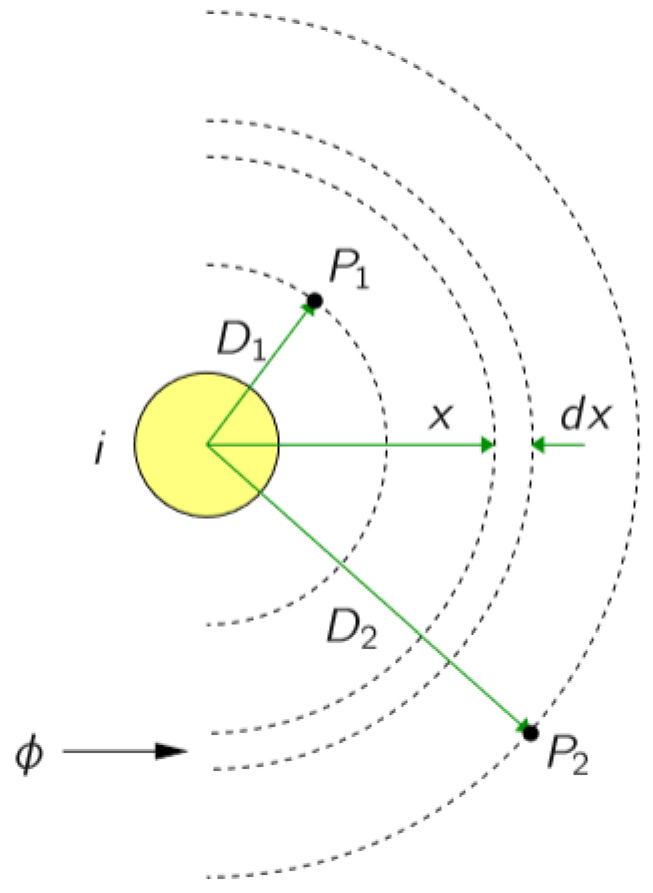
$$d\phi = Bdx = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}dx$$

- O fluxo concatenado é igual ao fluxo pois o mesmo enlaça toda a corrente uma vez:

$$d\lambda = d\phi = Bdx = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}dx$$

Indutância devido ao fluxo externo

- O fluxo concatenado externo deve ser calculado entre dois pontos externos ao condutor:



- O fluxo entre dois pontos P_1 e P_2 quaisquer externos ao condutor é obtido pela integração de $d\lambda$:

$$\lambda_{\text{ext}} = \lambda_{12} = \int_{D_1}^{D_2} d\lambda$$

em que D_1 e D_2 são as distâncias dos pontos ao condutor (considera-se que $r \ll x$). Logo:

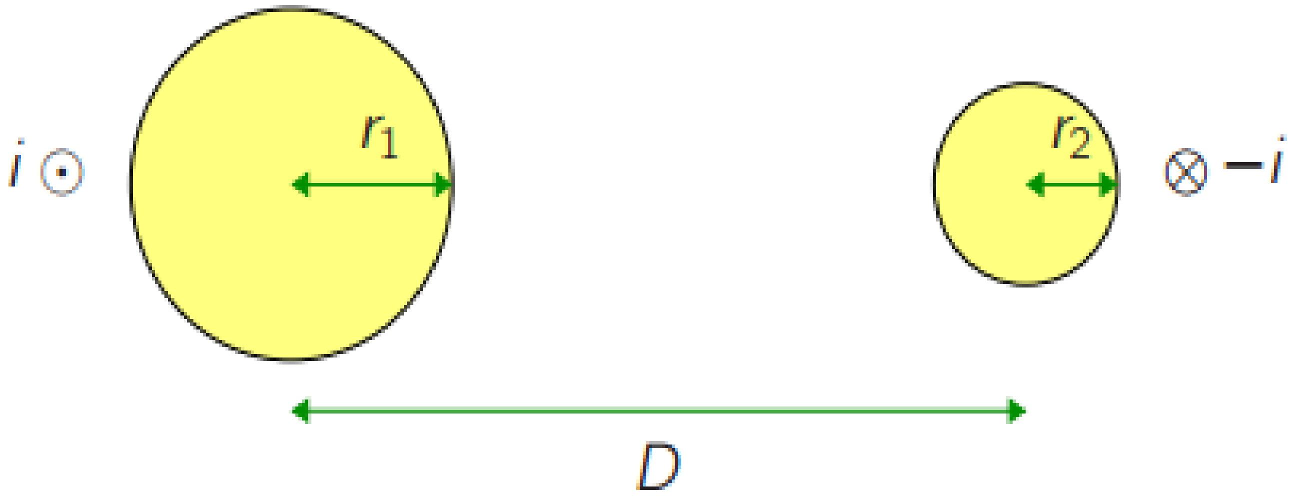
$$\lambda_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \text{ Wb/m}$$

- Indutância devido ao fluxo externo entre os dois pontos:

$$L_{12} \overset{(*)}{=} \frac{\lambda_{12}}{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \text{H/m}$$

(*) considerando permeabilidade constante

Indutância de uma linha monofásica



L1 = L1,int + L1,ext

L2 = L2,int + L2,ext

L=L1+L2

- $L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt{r_1^{'} r_2^{'}}}\right) \qquad \mathrm{H/m}$
- Onde:
- L : **Indutância de una línea monofásica H/m**
- D: Distancia entre os dois condutores em [m];
- $r_1^{'} = r_1 e^{1/4} = 0{,}7788\, r_1$: É o raio efetivo ou GMR – Geometric Mean Radius o RMG – Radio Médio Geométrico do condutor 1 em [m].
- $r_2^{'} = r_2 e^{1/4} = 0{,}7788\, r_2$: É o radio efetivo ou GMR – Geometric Mean Radius o RMG – Raio Médio Geométrico do condutor 2 en [m].
- r_1 :Raio do condutor 1 em [m]
- r_2 :Raio do condutor 2 em [m]
- A constante 0,7788 é devido à contribuição do fluxo magnético interno que também é chamado de *raio elétrico modificado*.

Indutância de uma linha monofásica

- Exemplo

Determine a indutância de uma linha monofásica cuja distância entre condutores é de 1,5 m e o raio dos condutores é igual a 0,5 cm

Os dois condutores têm mesmo raio. O raio efetivo (GMR) é:

$$r' = 0{,}7788 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2} = 0{,}0039 \text{ m}$$

A indutância da linha vale:

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{1{,}5}{0{,}0039}\right) = 2{,}38 \ \mu\text{H/m}$$

Indutância de linhas monofásica com condutores compostos (mais de um condutor por fase)

- Considere a seguinte linha monofásica:

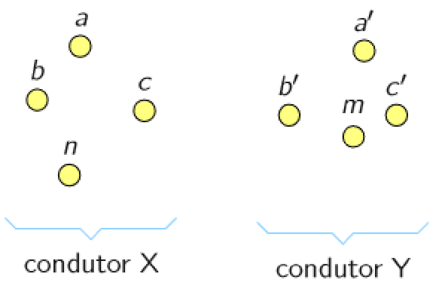
- Características da linha:

  - Condutor composto: condutores encordoados, cabos.

  - A fase X (condutor X) é composto por n fios idênticos em paralelo e conduz uma corrente I uniformemente distribuída pelos fios. A corrente em cada fio é I/n.

  - A fase Y (condutor Y) é composto por m fios idênticos em paralelo e conduz uma corrente $-I$ uniformemente distribuída pelos fios. A corrente em cada foi é $-I/m$.

Indutância de linhas monofásica com condutores compostos

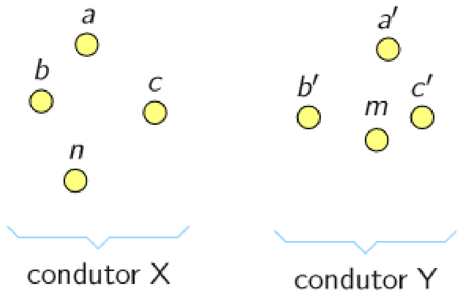


- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sX}}\right) + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sY}}\right) \quad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$

- L : Indutância de uma línea monofásica H/m
- D_m: produto das distancias dos condutores da fase X e da fase Y. Distancia Média Geométrica – DMG, ou *Geometric Mean Distance – GMD*.

- $D_m = \sqrt[nm]{(D_{aa'}D_{ab'} \dots D_{am})(D_{ba'}D_{bb'} \dots D_{bm}) \dots (D_{na'}D_{nb'} \dots D_{nm})}$

Indutância de linhas monofásica com condutores compostos



- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sX}}\right) + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sY}}\right) \quad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$

- D_{sX}: Produto das distancias dos condutores da fase X. Raio Médio geométrico (RMG) o *Geometric Mean Radius – GMR*.

- $D_{sX} = \sqrt[n^2]{(D_{aa}D_{ab} \ldots D_{an})(D_{ba}D_{bb} \ldots D_{bn}) \ldots (D_{na}D_{nb} \ldots D_{nn})}$

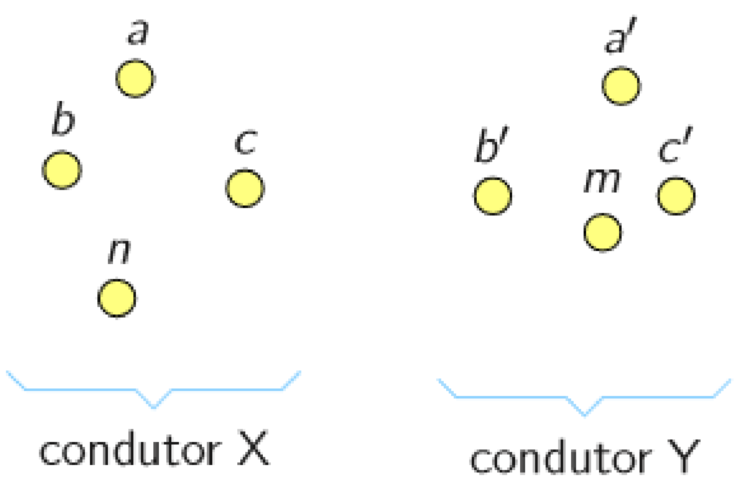
- D_{sY}: Produto das distancias dos condutores da fase Y. Raio Médio geométrico (RMG) o *Geometric Mean Radius – GMR*.

- $D_{sY} = \sqrt[m^2]{(D_{a'a'}D_{a'b'} \ldots D_{a'm})(D_{b'a'}D_{b'b'} \ldots D_{b'm}) \ldots (D_{ma'}D_{mb'} \ldots D_{mm})}$

Indutância de linhas monofásica com condutores compostos

- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sX}}\right) + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_{sY}}\right) \quad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$

- Em el caso que las fases X e Y sean idénticas:
- $L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_s}\right) \quad \mathrm{H/m}$
- Donde:
- $D_s = D_{sX=}D_{sY}$



Indutância de linhas monofásica com condutores compostos

- Relembrando a expressão da indutância de uma fase de uma linha monofásica com um condutor por fase:

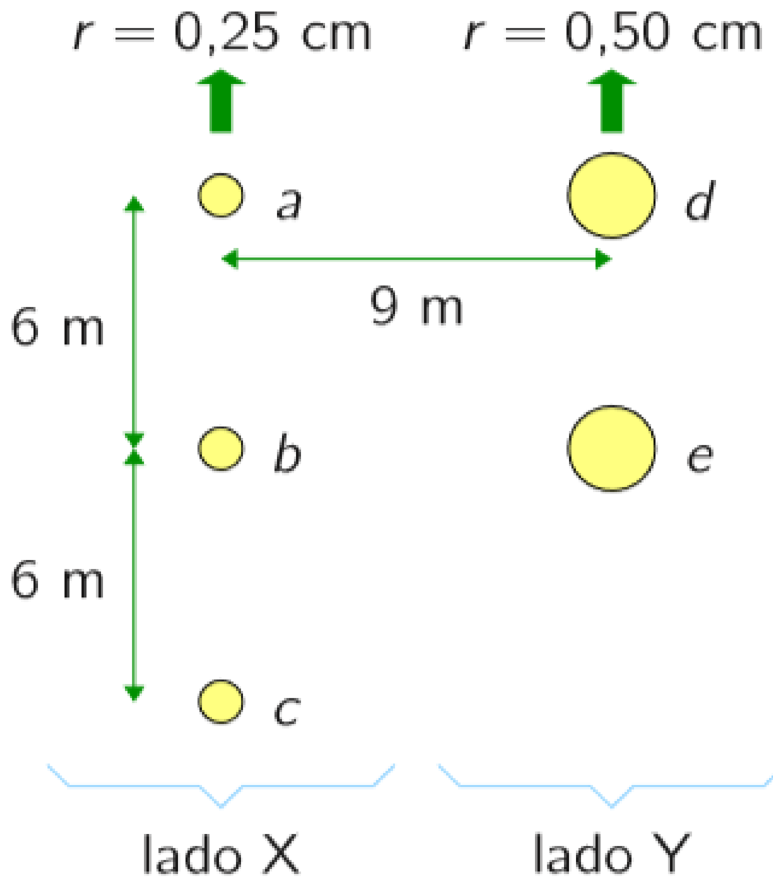
$$L_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{D}{r_1'} \right) \text{ H/m}$$

e comparando com a indutância da fase X da linha com condutores compostos L_X, percebe-se que a expressão de L_1 é um caso particular da expressão de L_1:

Condutor único por fase	Condutores múltiplos por fase
Distância entre fases (D)	Distância média geométrica – DMG (D_m)
Raio efetivo do condutor (r_1')	Raio médio geométrico – RMG (D_s)

Exemplo

Calcule a indutância da linha monofásica mostrada a seguir.



Solução

Cálculo da DMG entre os lados X e Y (D_m):

$$D_m = \sqrt[6]{D_{ad} D_{ae} D_{bd} D_{be} D_{cd} D_{ce}} = 10{,}743 \text{ m}$$

em que:

$$D_{ad} = D_{be} = 9 \text{ m}$$

$$D_{ae} = D_{bd} = D_{ce} = \sqrt{6^2 + 9^2} = \sqrt{117} \text{ m}$$

$$D_{cd} = \sqrt{9^2 + 12^2} = 15 \text{ m}$$

Solução

RMG do lado X (D_{sX}):

$$D_{sX} = \sqrt[9]{D_{aa}D_{ab}D_{ac}D_{ba}D_{bb}D_{bc}D_{ca}D_{cb}D_{cc}} = 0{,}481 \text{ m}$$

em que:

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = e^{-1/4}r = 0{,}7788 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-2} = 1{,}9470 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{ab} = D_{ba} = D_{bc} = D_{cb} = 6 \text{ m}$$

$$D_{ac} = D_{ca} = 12 \text{ m}$$

Solução

RMG do lado Y (D_{sY}):

$$D_{sY} = \sqrt[4]{D_{dd}D_{de}D_{ed}D_{ee}} = 0{,}153 \text{ m}$$

em que:

$$D_{dd} = D_{ee} = e^{-1/4}r = 0{,}7788 \cdot 0{,}50 \cdot 10^{-2} = 3{,}8940 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$
$$D_{de} = D_{ed} = 6 \text{ m}$$

Indutâncias dos lados X e Y:

$$L_X = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D_m}{D_{sX}} = 6{,}212 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

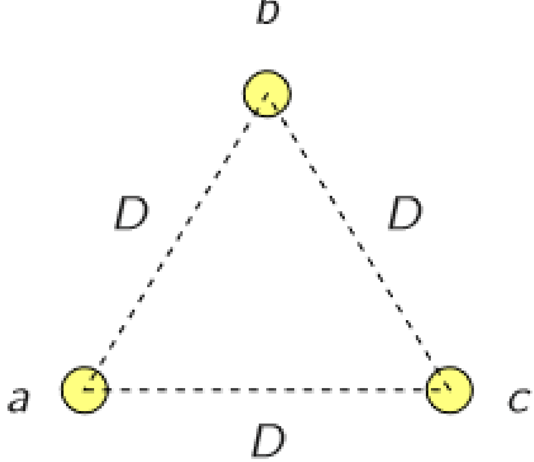
$$L_Y = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D_m}{D_{sY}} = 8{,}503 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Indutância completa da linha por unidade de comprimento:

$$L = L_X + L_Y = 14{,}715 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Indutância de linhas trifásicas com espaçamento simétrico

- Considere a linha trifásica:



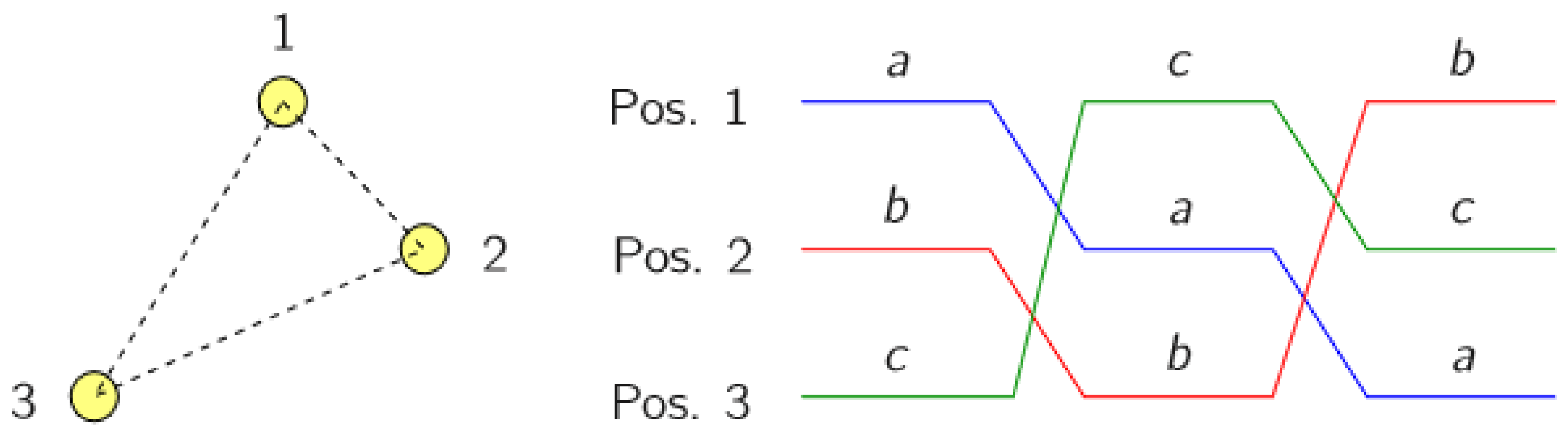
em que:

- os três condutores têm raios iguais, portanto o mesmo RMG, igual a D_s
- a distância entre condutores é D
- não há fio neutro ou o circuito é equilibrado $\rightarrow I_a + I_b + I_c = 0$

Indutância de linhas trifásicas com espaçamento assimétrico

- O fluxo concatenado e a indutância de cada fase são diferentes $\rightarrow$ circuito desequilibrado

- Equilíbrio é obtido através da transposição:



- Cálculos considerando a transposição são mais simples

  Linhas não transpostas $\rightarrow$ considera-se a linha como transposta e a sua indutância como a média das indutâncias das fases

Indutância de linhas trifásicas

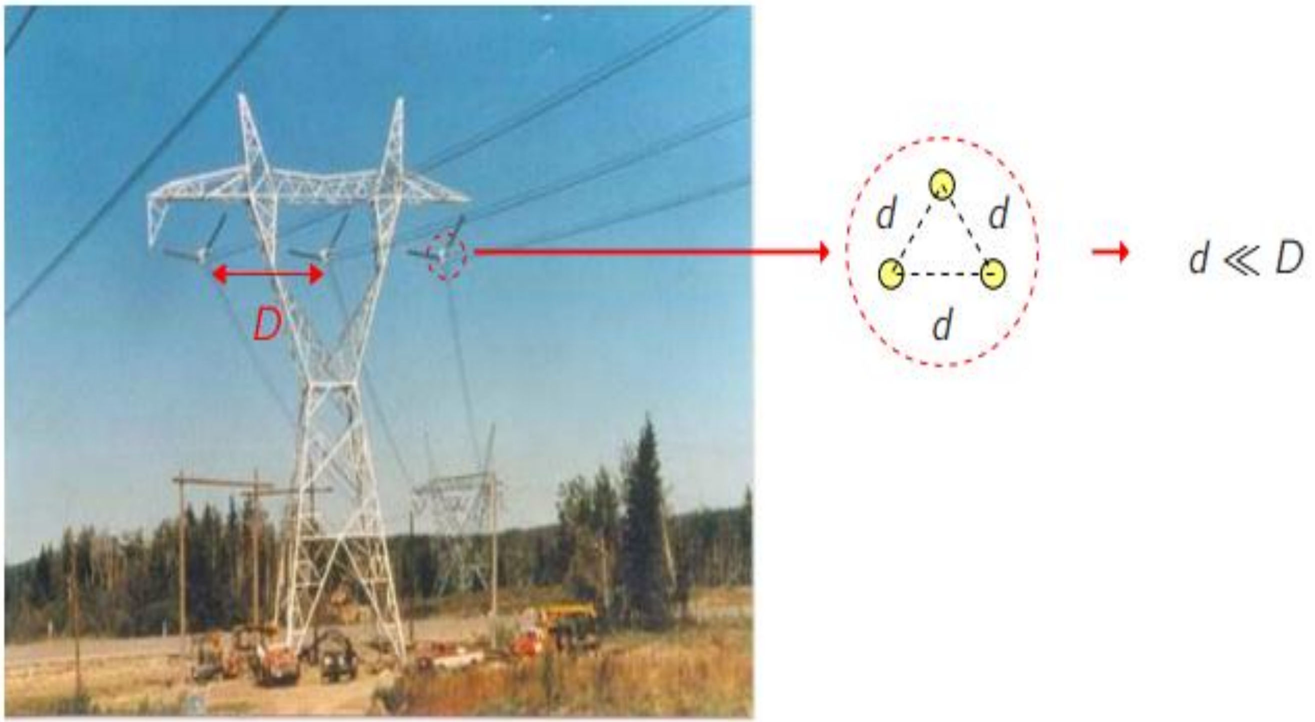
- L$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right)$ H/m
- D_{eq}: Distância média Geométrica (DMG):
- $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$
- D_s: Produto das distancias dos condutores de uma fase. Raio Médio geométrico (RMG) ou *Geometric Mean Radius – GMR*.
- Quando os três condutores são idênticos:
  - $\mathrm{D}_s = 0{,}7788\, r$. Donde r é o raio do condutor de cada fase.

- La constante 0,7788 es devido à contribuição do fluxo magnético interno que resulta num *raio elétrico modificado*.

Indutância de linhas trifásicas com condutores múltiplos por fase

Indutância de linhas trifásicas com condutores múltiplos por fase

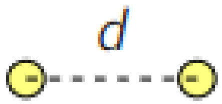
- Extra-alta tensão (EAT ou EHV) → por exemplo 440 kV → efeito corona excessivo
- Solução: colocação de dois ou mais condutores por fase → cabos múltiplos (bundled conductors)



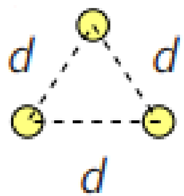
Indutância de linhas trifásicas

- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- D_{eq}: Distância média Geométrica (DMG):
  - $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$
- D_s: É o Raio Médio Geométrico (RMG) do grupo de condutores
- $D_s = \sqrt[n^2]{\prod_{i=a}^{n} \prod_{j=a}^{n} D_{ij}}$
- $D_s = \sqrt[n^2]{(D_{aa}D_{ab} \ldots D_{an})(D_{ab}D_{bb} \ldots D_{bn}) \ldots (D_{na}D_{nb} \ldots D_{nn})}$
- D_{ii}: É o raio efetivo do condutor: $0{,}7788\, r$. Donde r é o raio do condutor de cada fase.
- D_{ij}: É a distância entre os condutores *i* e *j*

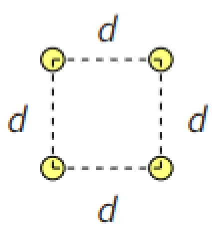
- **Para um grupo equilátero, o sea para conductores formando em polígonos de lado *d.* O RMG é:**



$$D_s = \sqrt{0{,}7788rd}$$



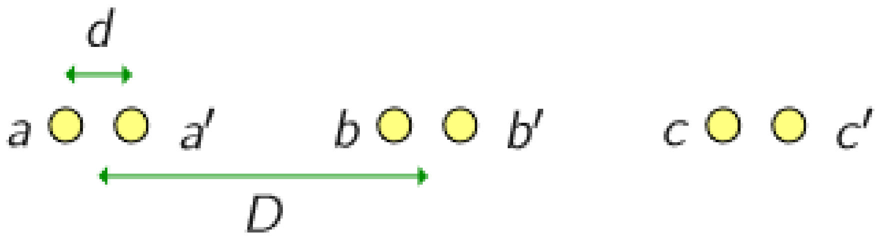
$$D_s = \sqrt[3]{0{,}7788rd^2}$$



$$D_s = \sqrt[4]{0{,}7788rd^3}$$

Exemplo

Determine a reatância da linha trifásica mostrada a seguir.



Condutor ACSR Pheasant

$d = 45$ cm

$D = 8$ m

Comprimento da linha $\ell = 160$ km

r = 0,018233179

Solução

$$0{,}7788 * r = 0{,}7788 * 0{,}018233179 = 0{,}0142\ \mathrm{m}$$

- No entanto, cada fase é composta por dois condutores $\rightarrow$ deve-se calcular o RMG do cabo:

$$D_s^b = \sqrt{0{,}0142 \cdot 0{,}45} = 0{,}0799\ \mathrm{m}$$

- Espaçamento equilátero equivalente para a configuração dada (DMG mútua) –

$$D_{eq} = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 16} = 10{,}0794\ \mathrm{m}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{10{,}0794}{0{,}0799} = 0{,}000965517\ \mathrm{H/m}$$

Reatância Indutiva

- Conhecido a Indutância unitária (L) em H/m, a Indutância Total (L_{total}) se obtém multiplicando-o pela *Longitude* em metros (m) da línea de transmissão.
- La reatância indutiva em serie X_L unitária (Ω/m) da línea é calculada assim:
- $X_L = 2\pi f L \quad [\frac{\Omega}{m}]$
- Finalmente reatância indutiva em serie total:
- $X_{Ltotal} = 2\pi f L_{\ total} = X_L Longitude \quad [\ \Omega]$
- f: frequência em Hz (geralmente 60 Hz o 50 Hz dependendo do país)
- Finalmente se obtém a Impedância em Serie (Z) da LT:
- $\boldsymbol{Z} = R + jX_L$

Exemplo

- No exercício anterior calcule XL:
- Solução

- Reatância por metro por fase:

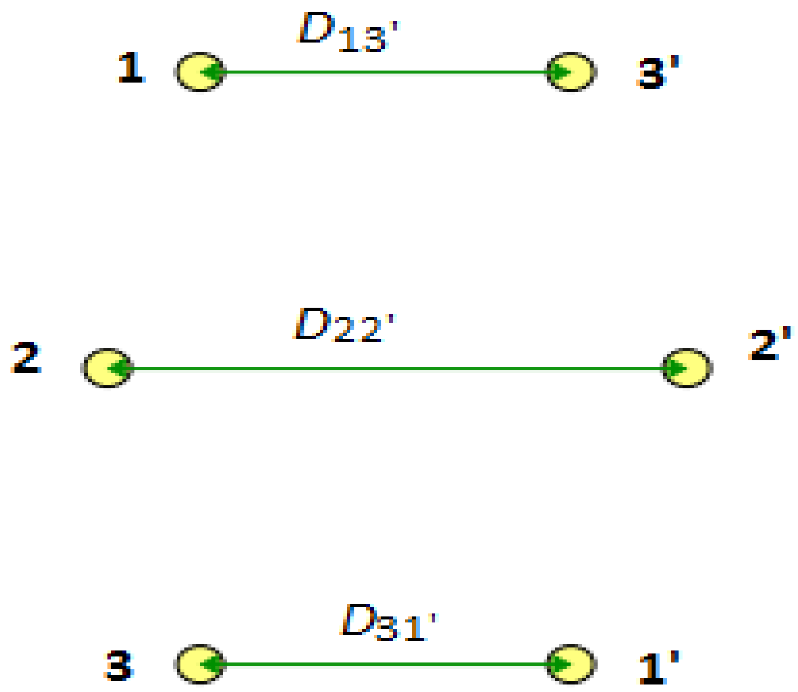
$$X_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{10{,}0794}{0{,}0799} = 0{,}3647\ \mathrm{m}\Omega/\mathrm{m}$$

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

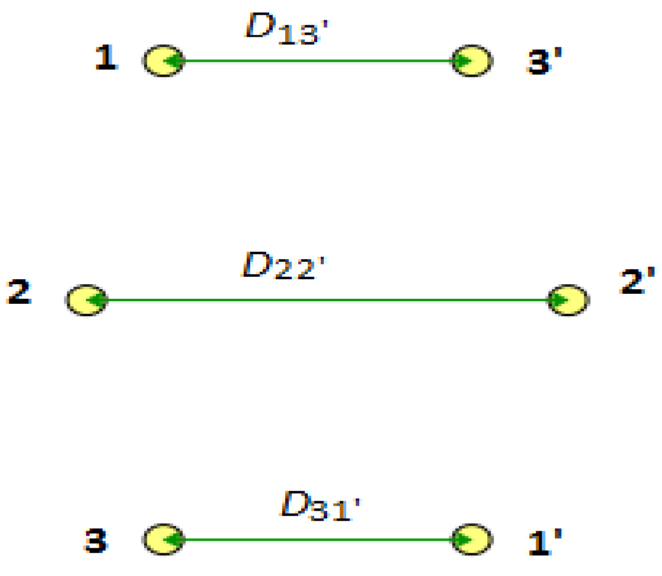
- Duas linhas trifásicas idênticas em paralelo possuem a mesma reatância indutiva. A reatância equivalente será igual `a metade de cada reatância individual, desde que a distancia entre as linhas seja tão grande que a indutância mútua entre elas possa ser desprezada
- Duas linhas trifásicas em paralelo na mesma torre → indutâncias mútuas entre os circuitos deve ser considerada
- O método de cálculo é semelhante ao que foi mostrado anteriormente
- Considera-se sempre que haja a transposição, resultando em cálculos mais simples e resultados suficientemente precisos

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

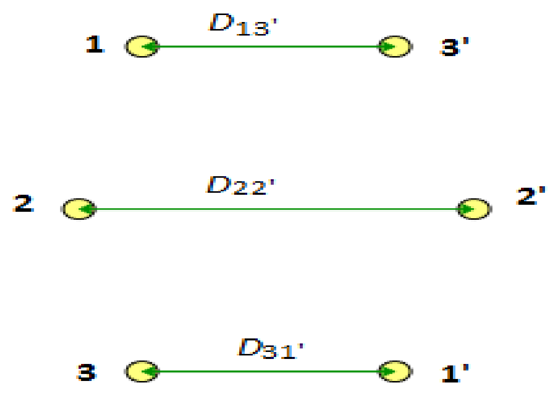


Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

- $Ind. em\ uma\ fase$:
- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
- RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase
- **Doble circuito simplex (1 conductor por fase):**
- $DMG_{13} = \sqrt[4]{D_{13} D_{1'3'} D_{13'} D_{1'3}}$
- $DMG_{ff} = \sqrt[3]{DMG_{12} DMG_{13} DMG_{23}}$
- $DMG_{12} = \sqrt[4]{D_{12} D_{1'2'} D_{12'} D_{1'2}}$
- $DMG_{13} = \sqrt[4]{D_{13} D_{1'3'} D_{13'} D_{1'3}}$
- $DMG_{23} = \sqrt[4]{D_{23} D_{2'3'} D_{23'} D_{2'3}}$



Linhas trifásicas de circuitos em paralelo



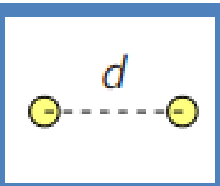
- $Ind. em\, uma\; fase$:
- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
- RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase
- **Doble circuito simplex (1 conductor por fase):**
- $RMG_f = \sqrt[6]{D_{11}D_{11'}D_{22}D_{22'}D_{33}D_{33'}}$
- Onde:
- $D_{11} = D_{22} = D_{33} = RMG = 0{,}7788r$

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

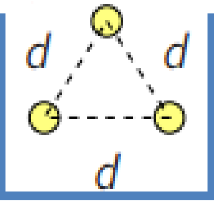
- Para mais condutores por fase:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$$

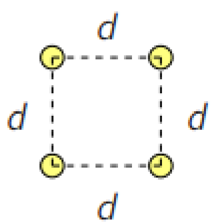
DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase



$$RMG = D_s = \sqrt{0{,}7788rd}$$



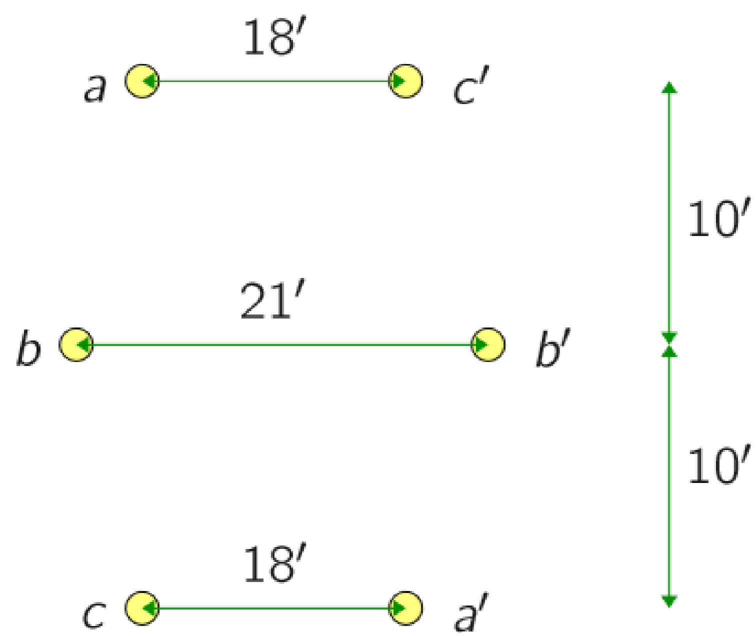
$$RMG = D_s = \sqrt[3]{0{,}7788rd^2}$$



$$RMG = D_s = \sqrt[4]{0{,}7788rd^3}$$

Exercício Para Casa

Uma linha trifásica de circuito duplo é constituída de condutores ACSR 26/7 tipo Ostrich de 300.000 CM dispostos de acordo com a figura a seguir. Determine a reatância indutiva por fase a 60 Hz em Ω/m .



- Pela tabela A.3, o RMG do condutor tipo Ostrich é $D_s = 0{,}0229'$