TE140 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CÁLCULO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE LT:

Parte III

Exercícios

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

Importante!

- Unidades mais comumente usadas:

  - comprimento: metro [m], pé (foot) [ft], milha (mile) [mi]

$$
\begin{aligned}
1\,\text{ft} &= 0{,}3048\,\text{m} \\
1\,\text{mi} &= 1609\,\text{m} \\
1\,\text{in} &= 2{,}54\,\text{cm}
\end{aligned}
$$

  - área da seção reta: milimetro quadrado [mm^2], circular mil [CM][(*)]

    (*) 1 CM = área de um condutor de um milésimo de polegada (mil) de diâmetro

Exemplo 1

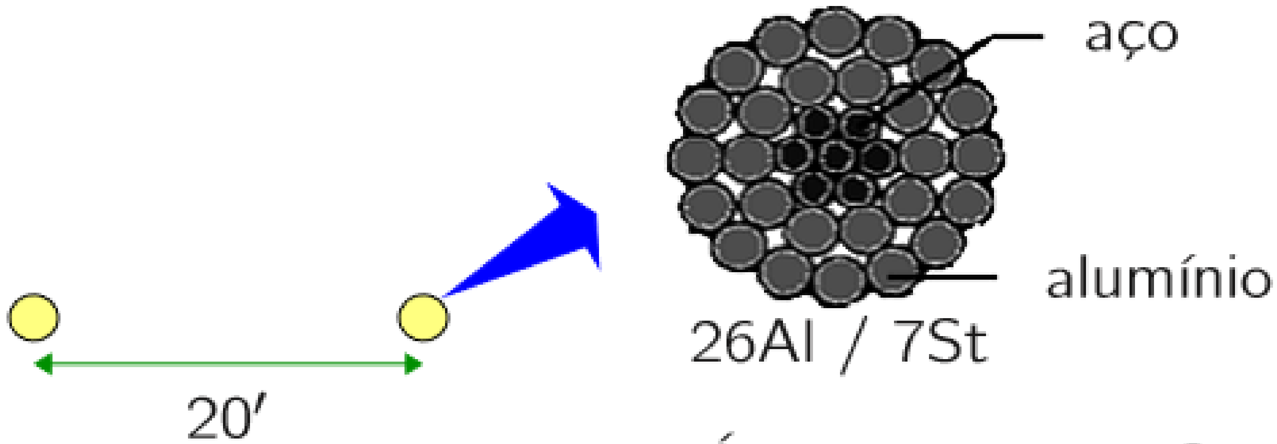
■ Exemplo

Determine a reatância indutiva por milha de uma linha monofásica com as seguintes características:

frequência	60 Hz
tipo dos cabos	Partridge
distância entre os centros dos cabos	20 ft

Solução

Tem-se portanto:



Área = 266.800 CM

Conforme definido anteriormente:

$$1 \text{ CM} = \pi \left(\frac{0{,}001}{2} \right)^2 \text{ in}^2 = 0{,}7854 \cdot 10^{-6} \text{ in}^2$$

Logo, para o cabo Partridge:

Área = 266.800 CM = 0,2095 in^2

Solução

que resulta em um diâmetro de 0,5165 in. Da tabela de condutores obtém-se:

$$\text{Diâmetro externo} = 0{,}642 \text{ in} > 0{,}5165 \text{ in !}$$

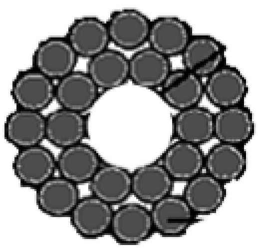
A razão da diferença é que a área em CM fornecida na tabela refere-se à área de alumínio, enquanto que o diâmetro é externo, o que inclui o espaçamento entre os condutores.

Além disso, o raio é igual a $0{,}5165/2 = 0{,}2583$ in, ou 0,0215 ft. Pela tabela de dados dos condutores tem-se:

$$\text{RMG} = 0{,}0217 \text{ ft} \neq (0{,}7788 \cdot 0{,}0215) \text{ !}$$

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_m}{D_s}\right) \quad \text{H/m}$$

Razão da diferença entre os RMG: o RMG $(0{,}7788 \cdot 0{,}0215)$ é calculado considerando um condutor sólido. No entanto, o condutor Partridge é encordoado, e o RMG deve ser calculado por:



$$\text{RMG} = \sqrt[26 \cdot 26]{D_{aa} D_{ab} D_{ac} \ldots}$$

Da tabela A.3 de dados dos condutores, o RMG para o condutor é $D_s = 0{,}0217$ ft. Pode-se utilizar diretamente a equação da indutância e obter a reatância por condutor:

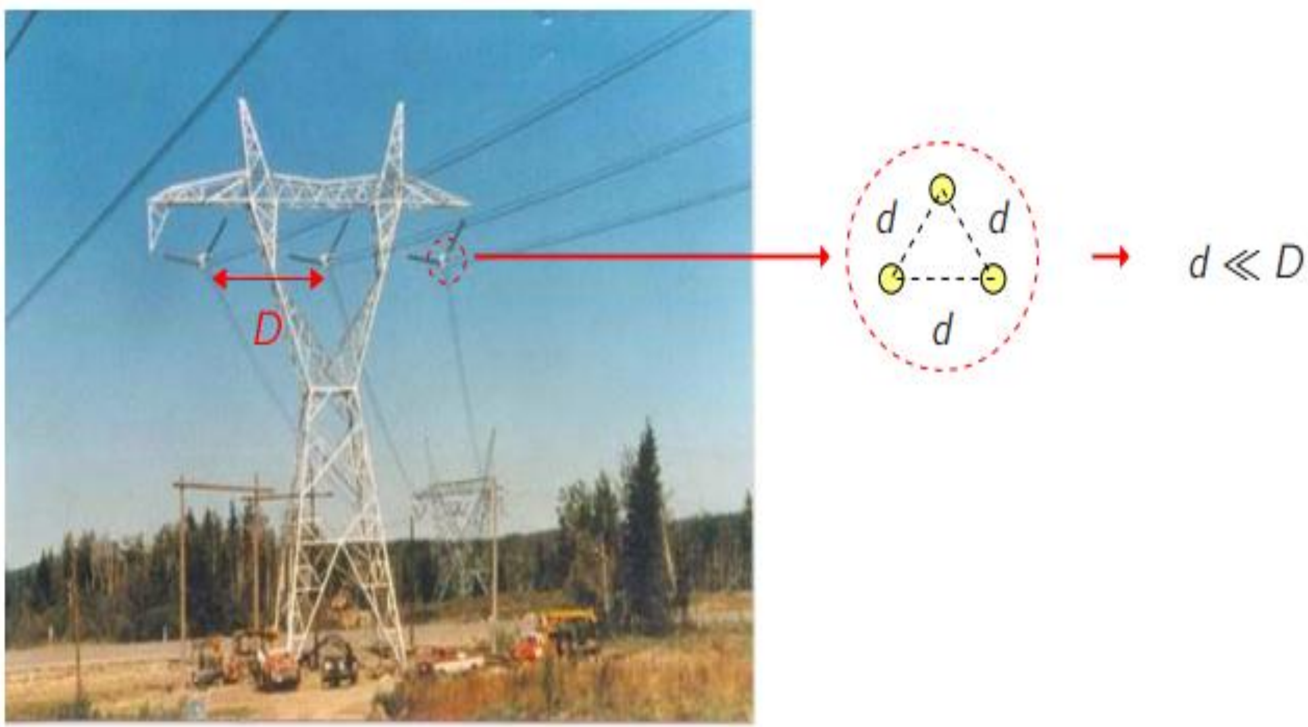
$$X = 2{,}022 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot \ln \frac{20}{0{,}0217} = 0{,}828\ \Omega/\text{mi}$$

e a reatância total será $X_L = 2\,X = 1{,}656\ \Omega/\text{mi}$

Indutância de linhas trifásicas com condutores múltiplos por fase

Indutância de linhas trifásicas com condutores múltiplos por fase

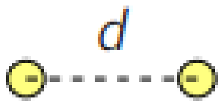
- Extra-alta tensão (EAT ou EHV) → por exemplo 440 kV → efeito corona excessivo
- Solução: colocação de dois ou mais condutores por fase → cabos múltiplos (bundled conductors)



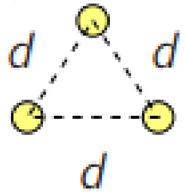
Indutância de linhas trifásicas (Condutores Sólidos)

- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- 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*

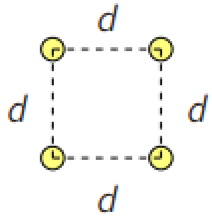
- **Para um grupo equilátero, o sea para conductores formando em polígonos de lado *d*. O RMG é (Condutores Sólidos):**



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



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

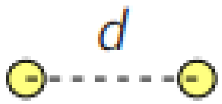


$$D_s = \mathbf{1{,}09}\sqrt[4]{0{,}7788rd^3}$$

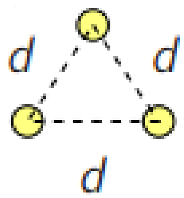
Indutância de linhas trifásicas (Condutores encordoados)

- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- 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 **RMG do condutor encordoado** é obtido por Tabelas!!.
- D_{ij}: É a distância entre os condutores *i* e *j*

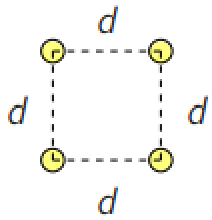
- **Para um grupo equilátero, o sea para conductores formando em polígonos de lado *d*. O RMG é (Condutores Encordoado):**



$$D_s = \sqrt{D_{ii} d}$$



$$D_s = \sqrt[3]{D_{ii} d^2}$$

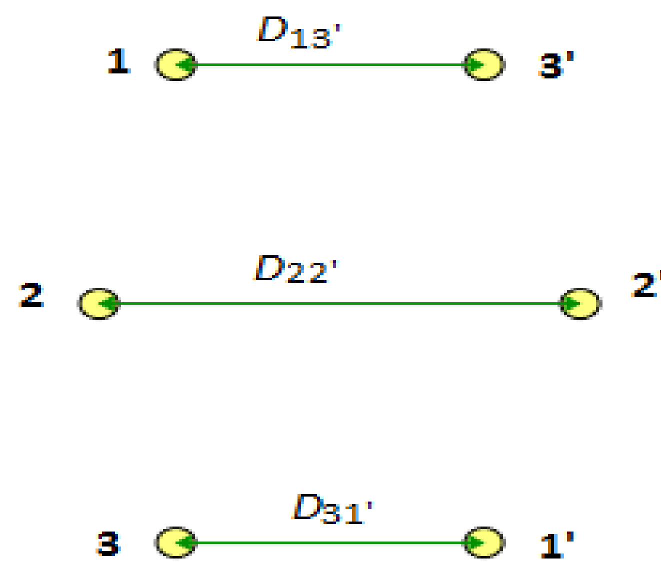


$$D_s = \mathbf{1{,}09}\ \sqrt[4]{D_{ii} d^3}$$

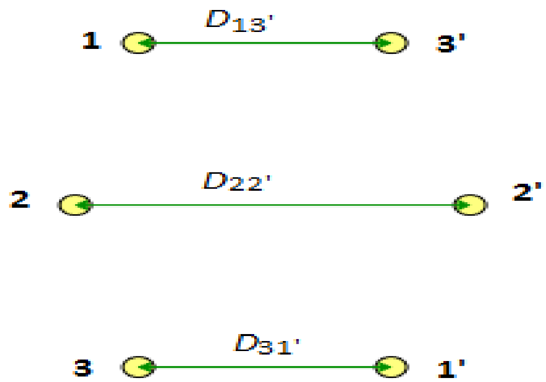
D_{ii}: é o **RMG do condutor encordoado** é obtido por Tabelas!!.

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo (Condutores Sólidos)

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



Linhas trifásicas de circuitos em paralelo (Condutores Sólidos)



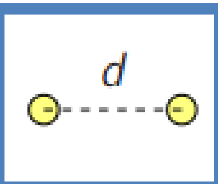
- $Ind. em\ uma\ fase$:
- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
- RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase
- **Doble circuito simplex (1 conductor por fase):**
- $RMG_f = \sqrt[6]{D_{11}D_{11'}D_{22}D_{22'}D_{33}D_{33'}}$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

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo (Condutores Sólidos)

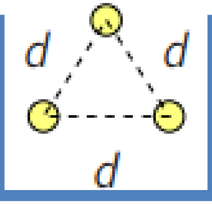
- Para mais condutores por fase:

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

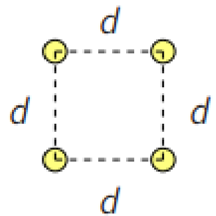
DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase



$$RMG = D_s = \sqrt[5]{0{,}7788 r d D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$



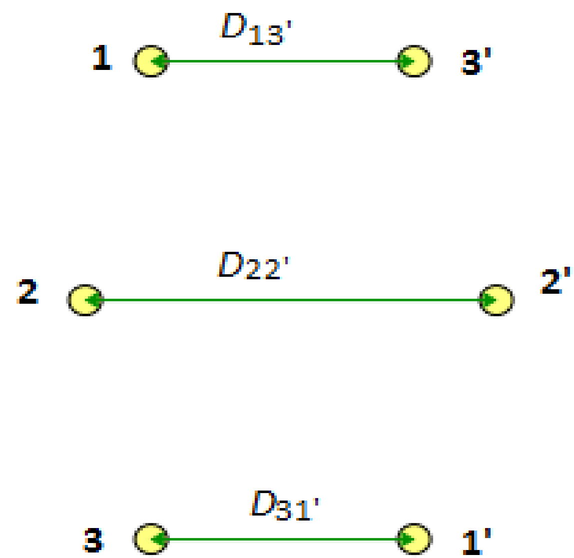
$$RMG = D_s = \sqrt[6]{0{,}7788 r d^2 D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$



$$RMG = D_s = \sqrt[7]{0{,}7788 r d^3 D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$

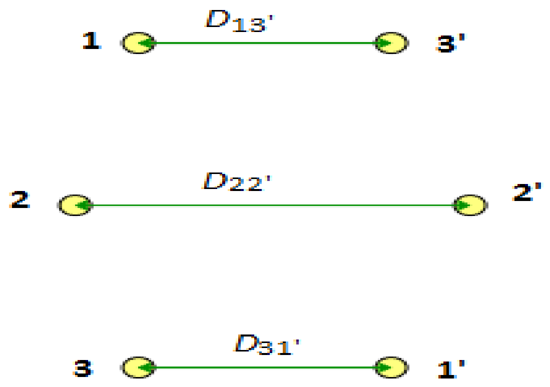
Linhas trifásicas de circuitos em paralelo (Condutores ENCORDOADOS)

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



Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

(Condutores Encordoados)



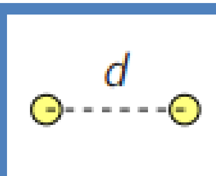
- $Ind.\, em\, uma\, fase$:
- $L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right) \qquad \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$
- DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
- RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase
- **Doble circuito simplex (1 conductor por fase):**
- $RMG_f = \sqrt[6]{D_{11}D_{11'}D_{22}D_{22'}D_{33}D_{33'}}$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

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo (Condutores Encordoados)

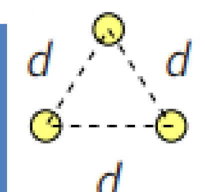
- Para mais condutores por fase:

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

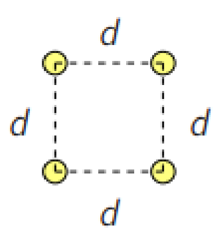
DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
RMG_f: Raio médio geométrico de uma fase



$$RMG = D_s = \sqrt[5]{D_{ii} d D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$



$$RMG = D_s = \sqrt[6]{D_{ii} d^2 D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$

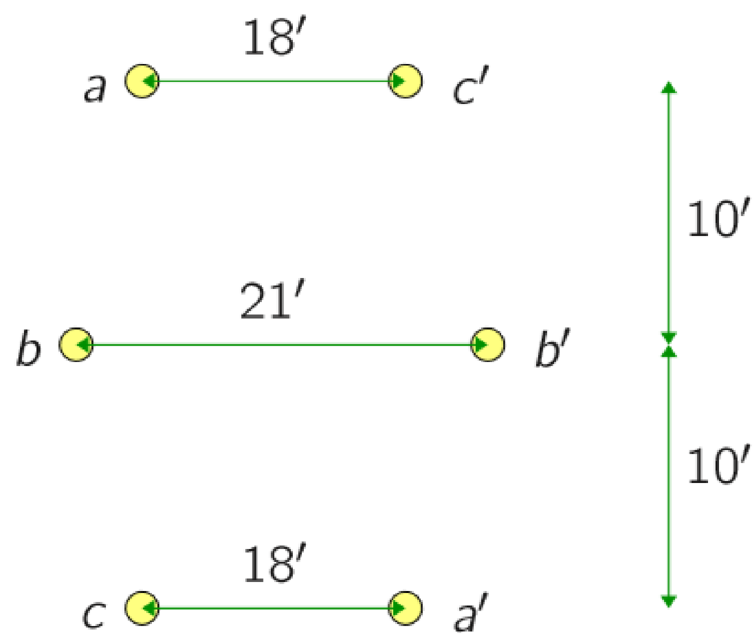


$$RMG = D_s = \sqrt[7]{D_{ii} d^3 D_{11'} D_{22'} D_{33'}}$$

Transformar	Em	Multiplicar por
Metros	Polegadas	39,37
Metros	Pés	3,281
Pés	Polegadas	12
Pés	Metros	0,3048
Polegadas	Pés	0,0833
Polegadas	Metros	0,0254

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 $D_s = 0{,}0229'$

Solução

$$DMG_{ab} = \sqrt[4]{D_{ab} D_{a'b'} D_{ab'} D_{a'b}}$$

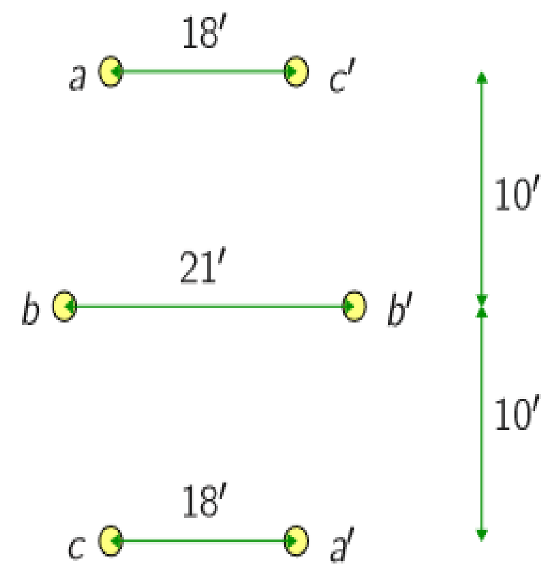
- DMG entre as fases *a* e *b*:

$$D_{ab} = \sqrt{10^2 + 1{,}5^2} = 10{,}1119' = D_{a'b'}$$

$$D_{ab'} = \sqrt{10^2 + 19{,}5^2} = 21{,}9146' = D_{a'b}$$

$$\mathrm{DMG}_{ab} = \left[(10{,}1119 \cdot 21{,}9146)^2\right]^{1/4} = 14{,}8862'$$

$$\mathrm{DMG}_{bc} = \mathrm{DMG}_{ab} = 14{,}8862'$$



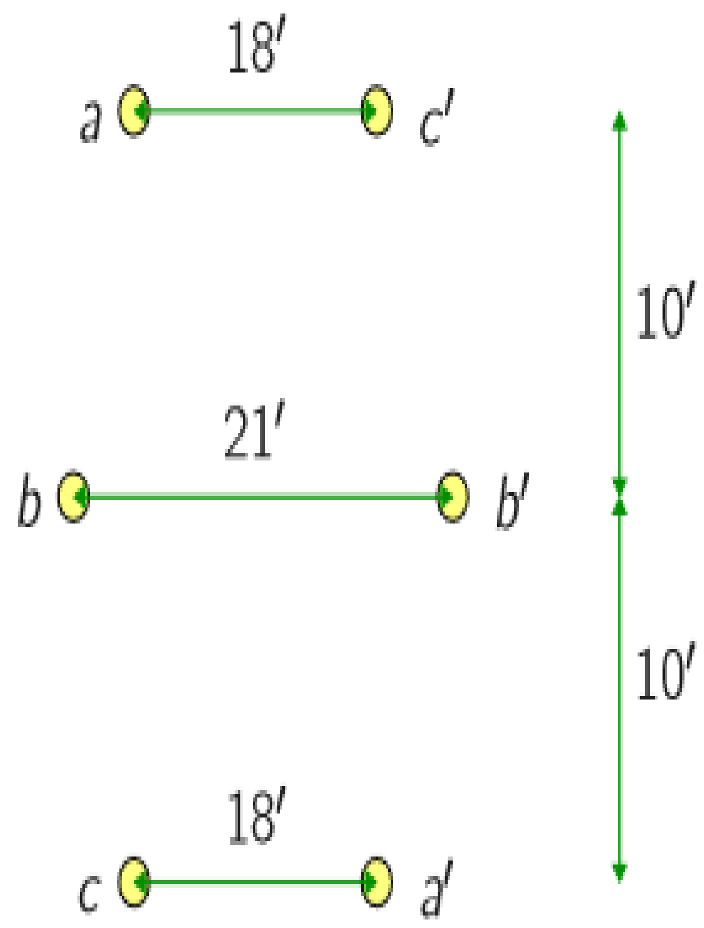
Solução

- DMG entre as fases c e a:

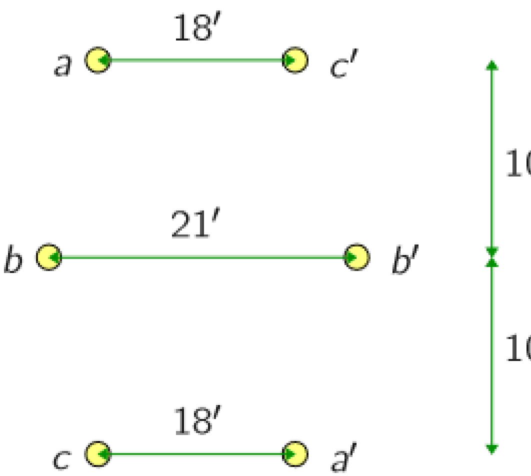
$$\mathrm{DMG}_{ca} = \left[(20 \cdot 18)^2\right]^{1/4} = 18{,}9737'$$

- Espaçamento equilátero equivalente:

$$D_{eq} = (\mathrm{DMG}_{ab}\,\mathrm{DMG}_{bc}\,\mathrm{DMG}_{ca})^{1/3} = 16{,}1401'$$



- $RMG_f = \sqrt[6]{D_{aa}D_{aa'}D_{bb}D_{bb'}D_{cc}D_{cc'}}$
- Onde:
- $D_{ii} = D_{aa} = D_{bb} = D_{bb} = RMG = DO\ CONDUTOR$ ECORDOADO, POR Tabelas do fabricante!!
- Dii=0,0229’
- Daa’=(20^2+18^2)^1/2= 26,9072’
- Dbb’= 21’
- Dcc’= 26,9072’
- RMGf=(0,0229^3*(26,9072)^2*21)^(1/6)
- RMGf=0,753200256’



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

- Indutância:

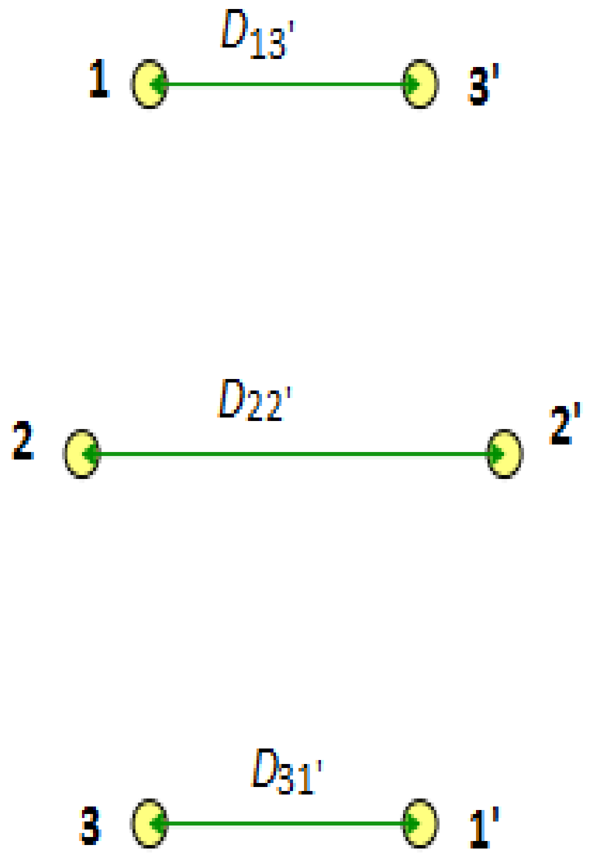
$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{16{,}1401}{0{,}7532}\right) = 6{,}1295 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{H/m}$$

- Reatância por fase:

$$X_L = 2\pi f L = 2{,}3108 \cdot 10^{-4}\ \Omega/\mathrm{m}$$

Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

- $C_{an} = \dfrac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\dfrac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right)}$ $\qquad \dfrac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$
- ε_0: 8,85x 10^{-12}
- $C_{an} = \dfrac{0{,}0556062}{\ln\left(\dfrac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right)}$ $\qquad \dfrac{\mu\mathrm{F}}{\mathrm{km}}$
- DMG_{ff}: Distância média Geométrica entre fases
- RMG_f: Radio médio geomêtrico de uma fase



Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

- **Doble circuito simplex (1 conductor por fase):**

$$DMG_{ff} = \sqrt[3]{DMG_{12}DMG_{13}DMG_{23}}$$

$$DMG_{12} = \sqrt[4]{D_{12}D_{1'2'}D_{12'}D_{1'2}}$$

$$DMG_{13} = \sqrt[4]{D_{13}D_{1'3'}D_{13'}D_{1'3}}$$

$$DMG_{23} = \sqrt[4]{D_{23}D_{2'3'}D_{23'}D_{2'3}}$$

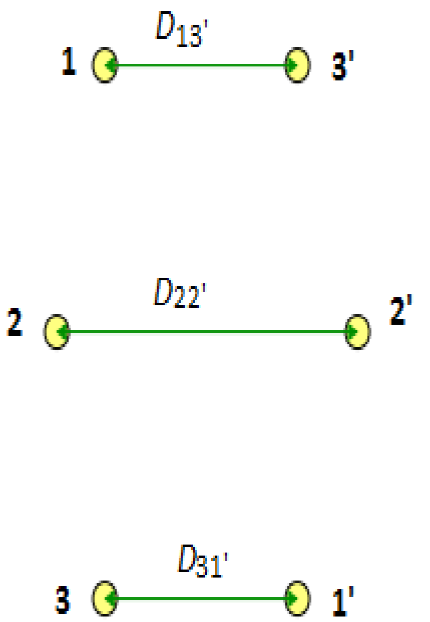
$$RMG_{f} = \sqrt[6]{D_{11}D_{11'}D_{22}D_{22'}D_{33}D_{33'}}$$

$$Donde:$$

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = RMG = r$$

r=raio do condutor sólido.

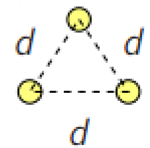
r= raio externo do condutor encordoado encontrado em Tabelas!



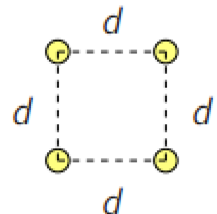
Linhas trifásicas de circuitos em paralelo

- **Capacitância por fase de una Línea Trifásica Doble circuito duplex (2, 3 e 4 condutores por fase):**
- DMG_{ff}: Distancia média Geométrica entre fases é calculada em forma similar ao caso de um condutor por fase.

$$RMG = \sqrt[5]{rdD_{11'}D_{22'}D_{33'}}$$



$$RMG = \sqrt[6]{rd^2D_{11'}D_{22'}D_{33'}}$$



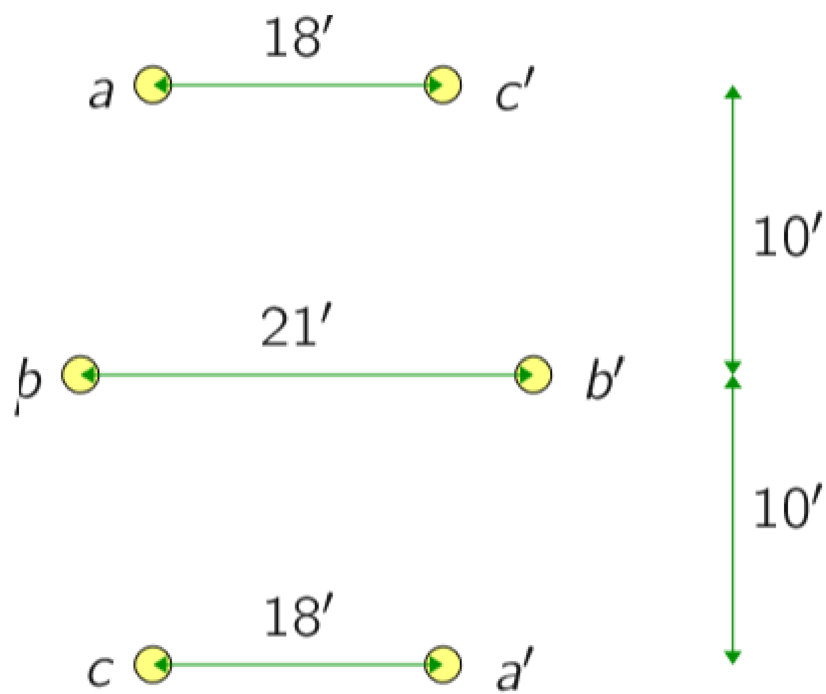
$$RMG = \sqrt[7]{rd^3D_{11'}D_{22'}D_{33'}}$$

r=raio do condutor sólido.

r= raio externo do condutor encordoado encontrado em Tabelas!

Tarefa para casa

Obtenha a susceptância capacitiva por fase da linha trifásica de circuito duplo mostrada a seguir, que é composta por condutores CAA 26/7 Ostrich



O raio externo em pés é: $r = 0{,}0283'$

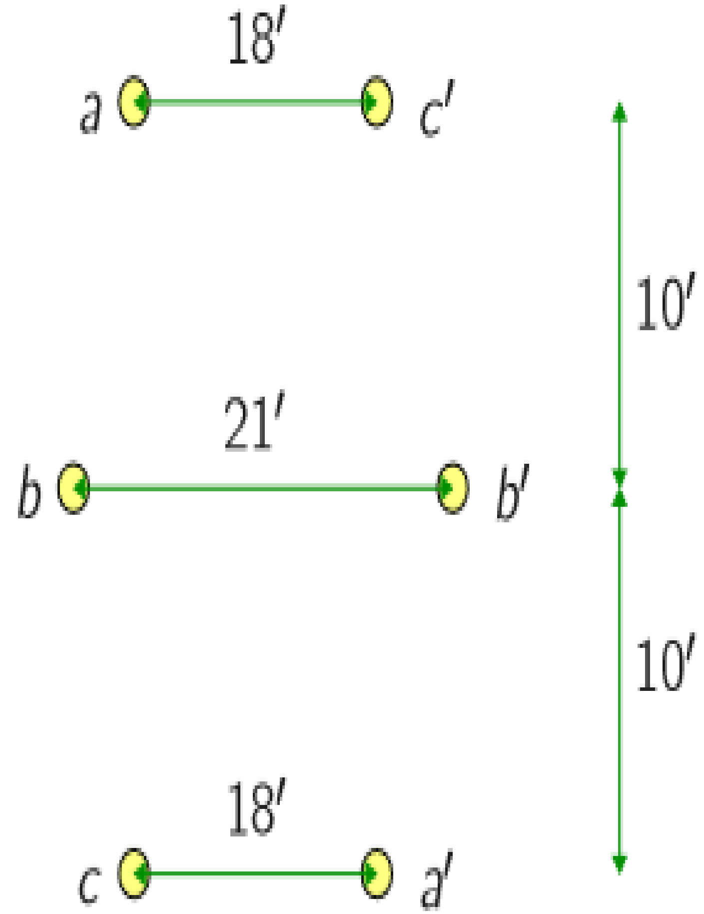
Solução

- DMG entre as fases c e a:

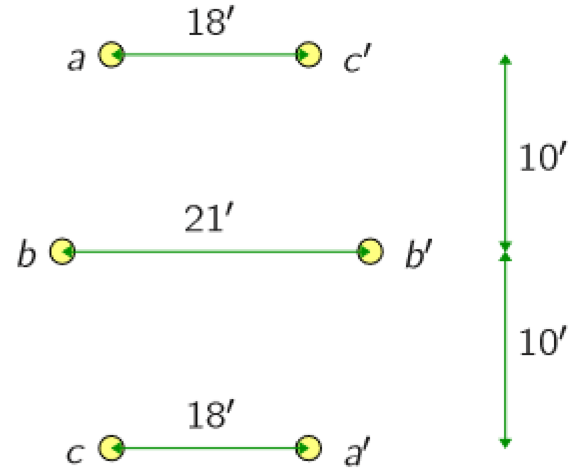
$$\text{DMG}_{ca} = \left[(20 \cdot 18)^2\right]^{1/4} = 18{,}9737'$$

- Espaçamento equilátero equivalente:

$$D_{eq} = (\text{DMG}_{ab}\,\text{DMG}_{bc}\,\text{DMG}_{ca})^{1/3} = 16{,}1401'$$



- $RMG_f = \sqrt[6]{D_{aa}D_{aa'}D_{bb}D_{bb'}D_{cc}D_{cc'}}$
- Onde:
- $D_{ii} = D_{aa} = D_{bb} = D_{bb} = Raio\ externo$ $DO\ CONDUTOR$ ECORDOADO, POR Tabelas do fabricante!!



- Dii=r=0,68/2*0,0833= 0,0283’
- Daa’=(20^2+18^2)^1/2= 26,9072’
- Dbb’= 21’
- Dcc’= 26,9072’
- RMGf=(0,0283^3*(26,9072)^2*21)^(1/6)
- RMGf= 0,83730934’

- Capacitância por fase:

$$C_{an} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{DMG_{ff}}{RMG_f}\right)} \quad \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}} = 18{,}58\ \mathrm{pF/m}$$

- Susceptância por fase:

$$B_c = 2\pi f C_n = 7\ \mathrm{nS/m}$$