C

Dimensionamento de Circuitos em Anel

Circuitos ligados em anel são aqueles em que as correntes seguem um circuito fechado, ou seja, ramificam-se em um nó a partir do ponto de alimentação.

Circuitos Monofásicos com Fator de Potência Unitário

Na Figura C.1, vemos uma linha monofásica ligada em anel, na qual, no ponto *a*, é recebida a alimentação da fonte, e, nos pontos *b*, *c*, *d* e *e*, são feitas ligações às cargas, cujos valores das correntes constam da figura. Estão registradas também as distâncias em metros de cada braço.

Supondo o fator de potência unitário, ou seja, somente cargas resistivas, temos as seguintes fórmulas:

$$I = I_1 + I_2$$

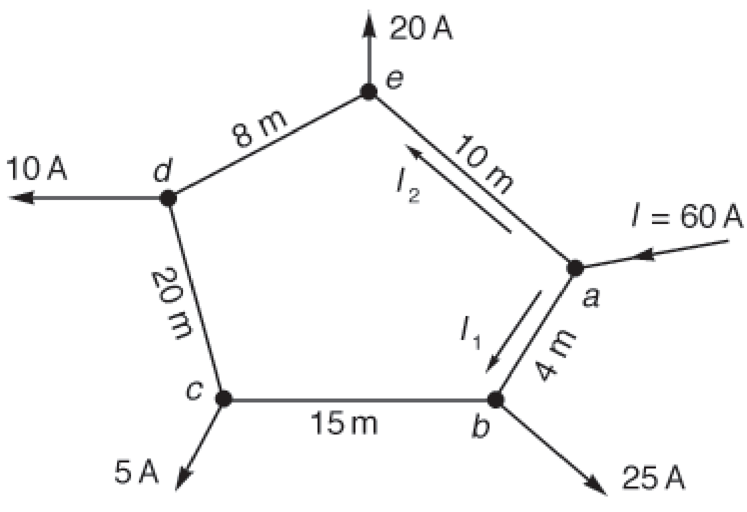
$$I_2 = \frac{\sum Il}{l}$$

em que:

I_1 e I_2 = correntes aparentes nos braços, em ampères;

$\sum Il$ = somatório dos produtos das correntes pelas distâncias, em cada braço;

l = distância total.

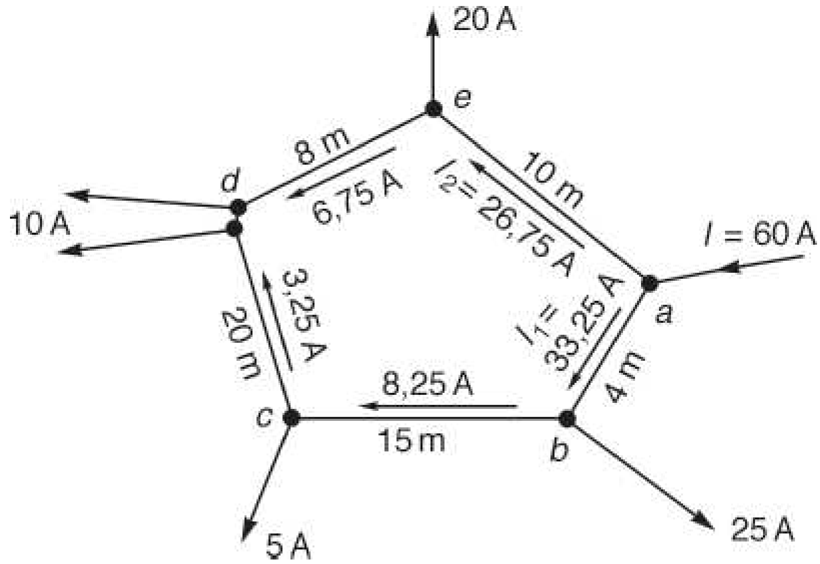


Circuito ligado em anel.

Figura C.1

Nos exemplos em foco, temos:

$$\begin{aligned} \Sigma Il = \quad & 25 \times 4 = 100\ \text{A} \times \text{m} \\ & 5 \times 19 = 95\text{A} \times \text{m} \\ & 10 \times 39 = 390\text{A} \times \text{m} \\ & 20 \times 47 = 940\text{A} \times \text{m} \\ \hline \Sigma Il = \quad & 1\,525\text{A} \times \text{m} \end{aligned}$$



Circuito em anel: distribuição das correntes.

Figura C.2

$$l = 4 + 15 + 20 + 8 + 10 = 57\ \text{m}$$

$$I_2 = \frac{1525}{57} = 26{,}75\ \text{A}$$

$$I_1 = I - I_2 = 60 - 26{,}75 = 33{,}25\ \text{A}$$

Conhecendo-se I_1 e I_2, as demais correntes são obtidas por subtração em cada nó, resultando na Figura C.2. Nota-se que, no ponto *d*, a corrente de 10 A da carga foi suprida por dois caminhos diferentes. Esse ponto é chamado de “ponto de corte”, pois imagina-se que nesse local a linha tenha sido cortada.

Para o cálculo da seção do condutor, toma-se como base o ponto de corte *d*, percorrendo o circuito em qualquer sentido e utilizando a fórmula:

$$S = \frac{2\rho \sum Il}{u}$$

em que:

S = seção do condutor de cobre ou alumínio em mm^2;

ρ = resistividade do cobre = $\frac{1}{56}\ \frac{\text{ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ou do alumínio = $\frac{1}{32}\ \frac{\text{ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$;

$\sum Il$ = somatório dos produtos das correntes em ampères pelas distâncias em metros;

u = queda ôhmica absoluta.

Observação: A resistividade do cobre poderá ser $\frac{1}{56}$ ou $\frac{1}{58}$, dependendo do padrão utilizado.

No exemplo em estudo, temos, no sentido $a - b - c - d$:

$$\begin{aligned}
\Sigma Il = \quad & 25 \times 4 = & 100\text{A} \times \text{m} \\
& 5 \times 19 = & 95\text{A} \times \text{m} \\
& 3{,}25 \times 39 = & 126{,}75\text{A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma \Pi = \quad & & 321{,}75\text{A} \times \text{m}
\end{aligned}$$

No sentido $a - e - d$, temos:

$$\begin{aligned}
\Sigma Il = \quad & 20 \times 10 = & 200\text{A} \times \text{m} \\
& 6{,}75 \times 18 = & 121{,}5\text{A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma \Pi = \quad & & 321{,}5\text{A} \times \text{m}
\end{aligned}$$

resultado aproximadamente igual ao anterior. Para simplificar, tomaremos ambos como $\sum Il = 322$ A × m.

Supondo a tensão monofásica de alimentação igual a 220 volts e a queda de tensão percentual admissível de 2%, temos:

$$u = 2\% \text{ de } 220 = 4{,}4 \text{ volts}$$

Substituindo tais valores na fórmula da seção, temos:

$$S = \frac{2 \times 322}{56 \times 4{,}4} = 2{,}6\ \text{mm}^2$$

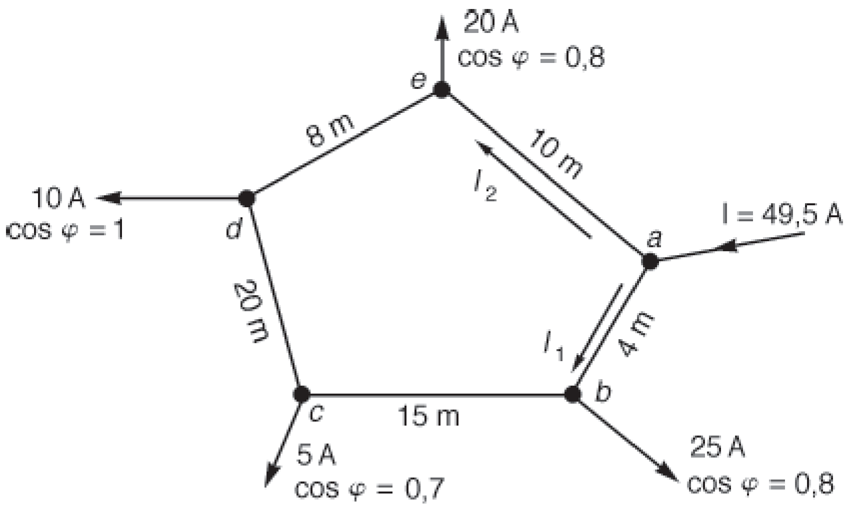
Para a linha aberta, pode-se utilizar o fio de 2,5 mm^2; porém, pelo critério da capacidade de corrente, será escolhido o fio de 4 mm^2 para o anel.

Circuitos Monofásicos com Fator de Potência Diferente da Unidade

É muito comum, em instalações prediais ou industriais, a mesma rede alimentar cargas resistivas (fator de potência unitário) e cargas reativas (fator de potência diferente da unidade). Vamos supor o mesmo exemplo da Figura C.1, porém com cargas resistivas e reativas, resultando na Figura C.3.

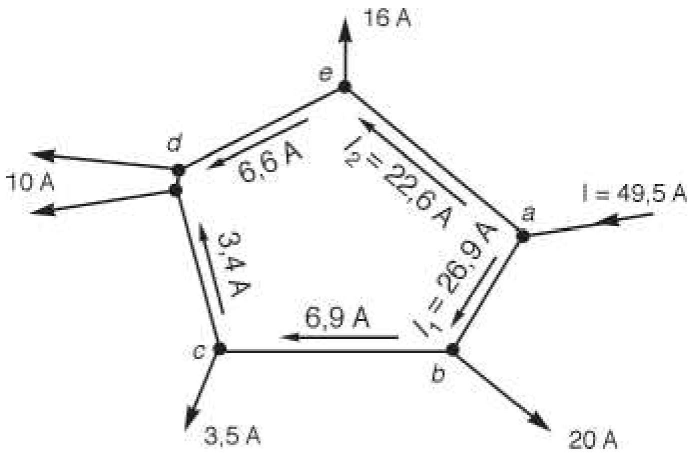
Faremos os cálculos de forma semelhante ao exemplo anterior, porém apenas com as correntes ativas:

$$I_a = I \cos \phi$$



Circuitos em anel com fator de potência diferente da unidade.

Figura C.3



Circuitos em anel: correntes ativas.

Figura C.4

Assim, temos as correntes ativas:

$$\begin{aligned}
\text{no ponto } b\text{: } I_a &= 25 \times 0{,}8 = 20 \text{ A} \\
\text{no ponto } c\text{: } I_a &= 5 \times 0{,}7 = 3{,}5 \text{ A} \\
\text{no ponto } d\text{: } I_a &= 10 \times 1{,}0 = 10 \text{ A} \\
\text{no ponto } e\text{: } I_a &= 20 \times 0{,}8 = 16 \text{ A} \\
\hline
& \qquad\qquad 49{,}5 \text{ A}
\end{aligned}$$

A fórmula para o cálculo de I_2 ativa será:

$$I_{2a} = \frac{\sum(I\cos\varphi)l}{l}$$

Substituída pelos valores já obtidos:

$$\begin{aligned}
\Sigma I\cos\phi l = \quad & 20 \times 4 = 80 \text{ A} \times \text{m} \\
& 3{,}5 \times 19 = 66{,}5 \text{ A} \times \text{m} \\
& 10 \times 39 = 390 \text{ A} \times \text{m} \\
& 16 \times 47 = 752 \text{ A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma I\cos\phi l = \quad & 1\,288{,}5 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}$$

$$I_{2a} = \frac{1\,288{,}5}{57} = 22{,}6 \text{ A}$$

$$I_{1a} = I - I_{2a} = 49{,}5 - 22{,}6 = 26{,}9 \text{ A}$$

As demais correntes aparecem na Figura C.4. Vemos que, pela figura, o ponto de corte permanece em *d*.

Para calcular a seção do condutor, temos uma expressão semelhante à anterior, porém com correntes ativas:

$$S = \frac{2\rho\sum(I\cos\varphi)l}{u}$$

Vamos calcular o somatório no sentido *a*-*b*-*c*-*d*:

$$
\begin{aligned}
\Sigma I \cos\phi \cdot l = \quad & 20 \times 4 = 80 \text{ A} \times \text{m} \\
& 3{,}5 \times 19 = 66{,}5 \text{ A} \times \text{m} \\
& 3{,}4 \times 39 = 132{,}6 \text{ A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma(I\cos\phi)l = \quad & 279{,}1 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}
$$

No sentido $a - e - d$, temos:

$$
\begin{aligned}
\Sigma(I\cos\phi)l = \quad & 16 \times 10 = 160 \text{ A} \times \text{m} \\
& 6{,}6 \times 18 = 118{,}8 \text{ A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma(I\cos\phi)l = \quad & 278{,}8 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}
$$

com o resultado aproximadamente igual ao anterior. Tomaremos ambos como 279 A × m. Assim, a seção dos condutores será:

$$S = \frac{2 \times 279}{56 \times 4{,}4} = 2{,}26 \text{ mm}^2$$

Poderíamos utilizar o condutor de 2,5 mm^2 pelo critério da capacidade de corrente. Para a escolha final, temos de calcular as correntes reativas e, depois, somar vetorialmente (apenas os módulos) para obtermos a corrente aparente.

As correntes reativas são calculadas pela expressão:

$$I_r = I \text{ sen } \phi$$

Assim, temos as correntes reativas:

$$
\begin{aligned}
&\text{no ponto } b\text{: } 25 \times 0{,}6 = 15 \text{ A} \\
&\text{no ponto } c\text{: } 5 \times 0{,}7 = 3{,}5 \text{ A} \\
&\text{no ponto } d\text{: } 10 \times 0{,}0 = 0 \text{ A} \\
&\text{no ponto } e\text{: } 20 \times 0{,}6 = 12 \text{ A} \\
\hline
&\Sigma I_r = 30{,}5 \text{ A}
\end{aligned}
$$

A fórmula para o cálculo da corrente reativa I_2 será:

$$I_{2r} = \frac{\sum(I \text{ sen } \varphi)l}{i}$$

Substituída pelos valores das correntes reativas, temos:

$$
\begin{aligned}
\Sigma(I \text{ sen } \phi)l = \quad & 15 \times 4 = 60 \text{ A} \times \text{m} \\
& 3{,}5 \times 19 = 66{,}5 \text{ A} \times \text{m} \\
& 12 \times 47 = 564 \text{ A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma(I \text{ sen } \phi)l = \quad & 690{,}5 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}
$$

$$I_{2r} = \frac{690{,}5}{57} = 12{,}1 \text{ A}$$

$$I_{1r} = I_r - I_{2r} = 30{,}5 - 12{,}1 = 18{,}4 \text{ A}$$

As correntes I_1 e I_2 totais são:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} = \sqrt{26^2 + 18{,}4^2} = 32{,}5 \text{ A}$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2r}^2} = \sqrt{22{,}6^2 + 12{,}1^2} = 25{,}6 \text{ A}$$

$$I = I_1 + I_2 = 32{,}5 + 25{,}6 = 58{,}1 \text{ A}.$$

Verificação:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{49{,}5^2 + 30{,}5^2} = 58{,}1 \text{ A}$$

Conclui-se, então, que deverá ser escolhido o condutor de 10 mm^2 em linha aberta para o anel.

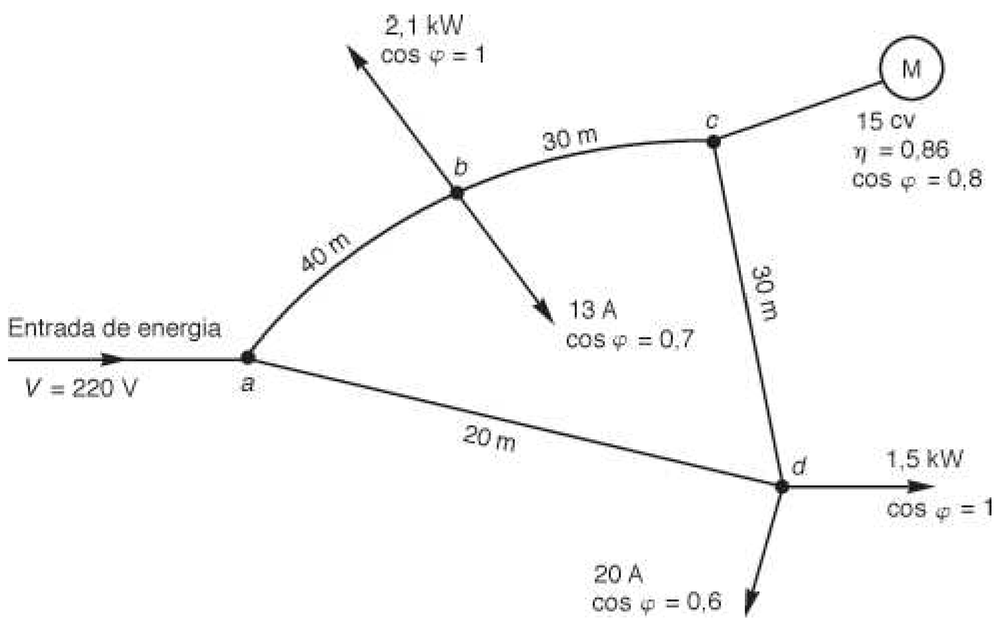
Circuitos Trifásicos

Para os circuitos com cargas trifásicas equilibradas, a sequência de cálculo é semelhante à dos circuitos monofásicos, porém a fórmula para o cálculo da seção dos condutores é a seguinte:

$$S = \frac{\sqrt{3}\,\rho \sum (I \cos\varphi) l}{u}$$

EXEMPLO

Deseja-se saber quais os condutores à prova de tempo (WP) serão necessários para se abastecer uma pequena indústria com cargas trifásicas equilibradas, dispostas no terreno conforme o diagrama unifilar da Figura C.5, sendo a tensão de entrada de 220 volts e a queda admissível de 1,5%.



Exemplo de circuito trifásico em anel.

Figura C.5

Solução

1. Cálculo das correntes ativas

   Como se trata de circuito trifásico equilibrado, temos a fórmula da potência:

$$P = \sqrt{3} V I \cos\phi$$

em que:

$$I \cos \phi = \frac{P}{\sqrt{3}V}$$

P = potência trifásica em watts;

I = corrente de linha em ampères;

V = tensão entre fases em volts.

No ponto *b*, temos as correntes ativas:

$$I \cos \phi = \frac{2\,100}{\sqrt{3} \times 220} = 5{,}5 \text{ A}$$

e

$$I \cos \phi = 13 \times 0{,}7 = 9{,}1 \text{ A}$$

No ponto *c*, temos um motor elétrico, cuja corrente ativa é:

$$I \cos \phi = \frac{15 \times 736}{\sqrt{3} \times 220 \times 0{,}86} = 33{,}7 \text{ A}$$

(Ver Seção 6.1 — Instalações de Motores.)

No ponto *d*, temos:

$$I \cos \phi = \frac{1\,500}{380} = 3{,}9 \text{ A}$$

e

$$I \cos \phi = 20 \times 0{,}6 = 12 \text{ A}$$

Conhecendo as correntes ativas, podemos juntar os resultados na Figura C.6:

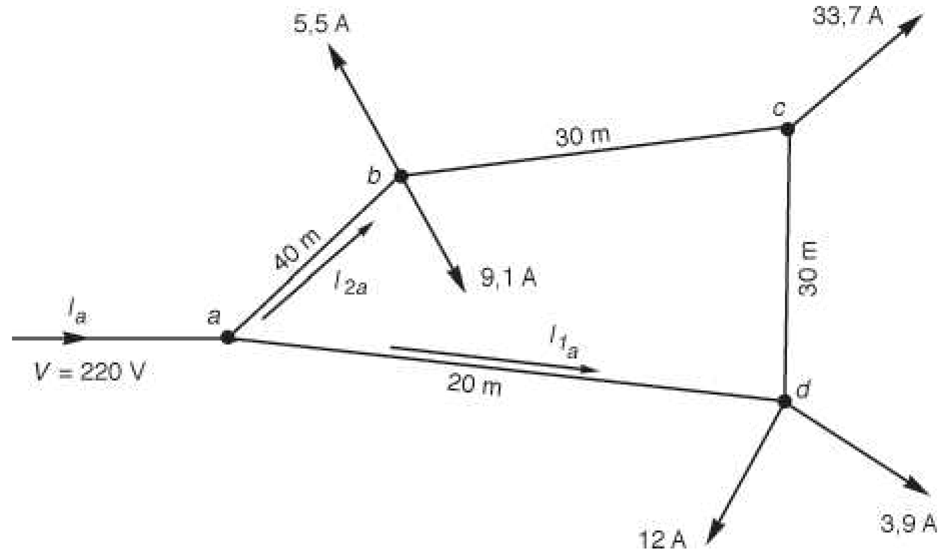
$$I_{2a} = \frac{\sum (I \cos \varphi) l}{l}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma (I \cos \phi) l = \quad & 15{,}9 \times 20 = \quad 318 \text{ A} \times \text{m} \\
& 33{,}7 \times 50 = 1\,685 \text{ A} \times \text{m} \\
& 14{,}6 \times 80 = 1\,168 \text{ A} \times \text{m} \\
\hline
\Sigma (I \cos \phi) l = \quad & \qquad\qquad 3\,171 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}$$

$$I_{2a} = \frac{3\,171}{120} = 26{,}4 \text{ A}$$

$$I_a = 15{,}9 + 33{,}7 + 14{,}6 = 64{,}2 \text{ A}$$

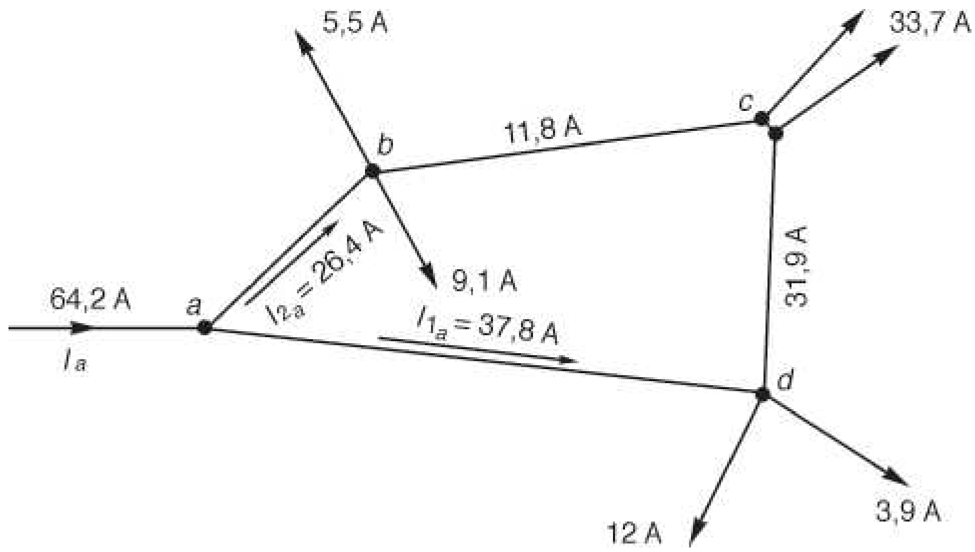
$$I_{1a} = 64{,}2 - 26{,}4 = 37{,}8 \text{ A}$$



Circuito trifásico em anel: correntes ativas.

Figura C.6

Vejamos o ponto de corte para as correntes ativas:



Exemplo de um circuito trifásico em anel.

Figura C.7

2. Cálculo da seção dos condutores

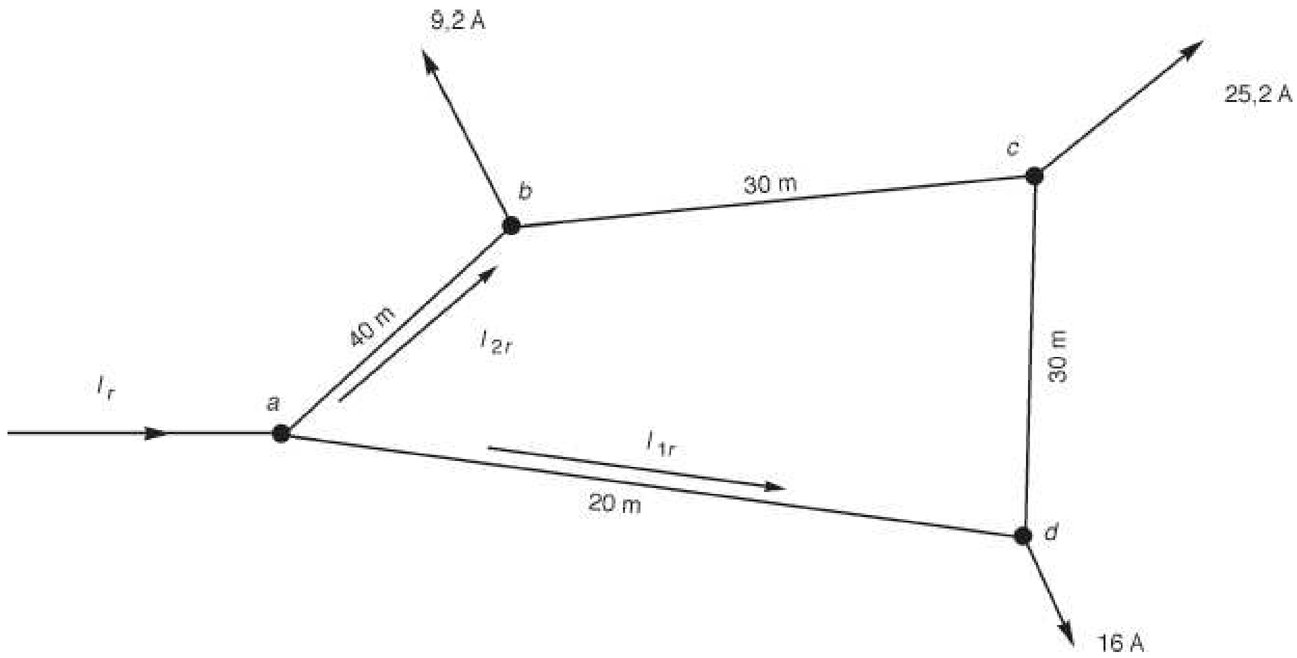
$$
\begin{aligned}
&\text{Sentido } a - d - c: \\
&\Sigma(I\cos\phi)l = 15{,}9 \times 20 = \quad 318 \text{ A} \times \text{m} \\
&\qquad\qquad\qquad\; 21{,}9 \times 50 = 1\,095 \text{ A} \times \text{m} \\
&\Sigma(I\cos\phi)l = \qquad\qquad\quad 1\,413 \text{ A} \times \text{m} \\
&\text{Sentido } a - b - c: \\
&\Sigma(I\cos\phi)l = 14{,}6 \times 40 = 584 \text{ A} \times \text{m} \\
&\qquad\qquad\qquad\; 11{,}8 \times 70 = 826 \text{ A} \times \text{m} \\
&\Sigma(I\cos\phi)l = \qquad\qquad\quad 1\,410 \text{ A} \times \text{m}
\end{aligned}
$$

Tomando o valor 1 410 A × m para o somatório e u = 1,5% de 220 V = 3,3 volts, temos:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 1\,410}{56 \times 3{,}3} = 13{,}2 \text{ mm}^2$$

3. Cálculo das correntes ativas

No ponto *b*, temos: $I \operatorname{sen} \phi = 13 \times 0{,}71 = 9{,}2$ A



Circuito trifásico em anel.

Figura C.8

No ponto *c*, temos:

$$I \operatorname{sen} \phi = \frac{33{,}7}{0{,}8} \times 0{,}6 = 25{,}2 \text{ A}$$

No ponto *d*, temos:

$$I \operatorname{sen} \phi = 20 \times 0{,}8 = 16 \text{ A}$$

Conhecendo as correntes reativas, temos a Figura C.8.

$$I_{2r} = \frac{\sum (I \cos \varphi) l}{l} \qquad I_{2r} = \frac{2\,316}{120} = 19{,}3 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \Sigma (I \operatorname{sen} \phi) l = {} & 16 \times 20 = 320 \text{ A} \times \text{m} \\ & 25{,}2 \times 50 = 1\,260 \text{ A} \times \text{m} \\ & 9{,}2 \times 80 = 736 \text{ A} \times \text{m} \\ \hline \Sigma (I \operatorname{sen} \phi) l = {} & 2\,316 \text{ A} \times \text{m} \end{aligned}$$

$$I_r = 16 + 25{,}2 + 9{,}2 = 50{,}4 \text{ A}$$

$$I_{1r} = 50{,}4 - 19{,}3 = 31{,}1 \text{ A}$$

As correntes I_1 e I_2 totais são:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} = \sqrt{37{,}8^2 + 31{,}1^2} = 49{,}2 \text{ A}$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2r}^2} = \sqrt{26{,}4^2 + 19{,}3^2} = 32{,}7 \text{ A}$$

$$I = I_1 + I_2 = 81{,}9 \text{ A}$$

Verificação:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{64{,}2^2 + 50{,}4^2} = 81{,}6 \text{ A}$$

Constata-se que a capacidade de corrente para o cabo de 25 mm^2 – linha aérea – é de 101 A, sendo, portanto, o condutor escolhido.