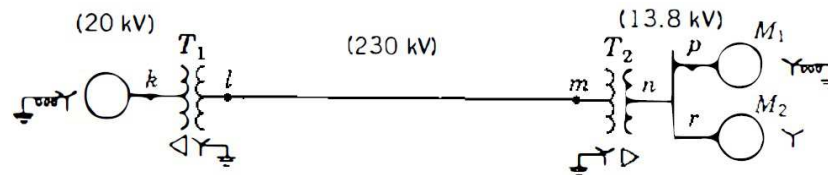


**ET720 - Sistemas de energia elétrica I**  
**Capítulo 3 – Cálculo de curto-circuito**  
**Exercícios**

**3.1** Considere que uma carga desequilibrada em  $\Delta$  é alimentada por uma fonte trifásica equilibrada.

- (a) Mostre que as correntes de linha (fornecidas pela fonte) não têm componentes de sequência zero.
- (b) Se as tensões de linha da fonte são de 100 V e a carga é composta por  $R_{ab} = 100 \Omega$ ,  $R_{bc} = 10 \Omega$  e  $R_{ca} = 50 \Omega$ , calcule a corrente de sequência zero que circula pela carga em  $\Delta$ .

**3.2** Um gerador trifásico de 300 MVA, 20 kV tem uma reatância subtransitória de 20%. O gerador alimenta um conjunto de motores síncronos através de uma linha de transmissão de 64 km e transformadores, conforme o diagrama unifilar a seguir.



Os motores, ambos de 13,2 kV, são representados por dois motores equivalentes. O neutro do motor  $M_1$  é aterrado através de uma reatância. O neutro do motor  $M_2$  não é aterrado (situação não usual). Os motores equivalentes  $M_1$  e  $M_2$  são de 200 MVA e 100 MVA, respectivamente, e suas reatâncias subtransitórias são de 20%. O transformador trifásico  $T_1$  é de 350 MVA, 20/230 kV, com uma reatância de dispersão de 10%. O transformador  $T_2$  é composto por três transformadores monofásicos, cada um de 100 MVA, 127/13,2 kV, com reatância de dispersão de 10%. A reatância série da linha de transmissão é de  $0,5 \Omega/\text{km}$ .

- (a) Obtenha o diagrama unifilar do circuito, adotando as especificações do gerador como base no lado de baixa tensão de  $T_1$ .
- (b) Os motores  $M_1$  e  $M_2$  operam demandando 120 e 60 MVA respectivamente, a 13,2 kV e fator de potência unitário. Obtenha a tensão nos terminais do gerador (barra  $k$ ).

**3.3** Considere o circuito do exercício 3.2.

- (a) Obtenha o circuito de sequência positiva.
- (b) Obtenha o circuito de sequência negativa.
- (c) Obtenha o circuito de sequência zero. Assuma que as reatâncias de sequência zero do gerador e dos motores são iguais a 0,05 pu. Reatores limitadores de corrente de  $0,4 \Omega$  estão conectados nos neutros do gerador e do motor  $M_1$ . A reatância de sequência zero da linha de transmissão é  $1,5 \Omega/\text{km}$ .

**3.4** Duas máquinas síncronas são conectadas através de uma linha de transmissão e dois transformadores, como mostrado a seguir.

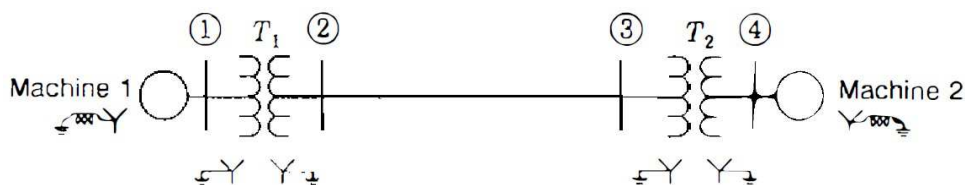


As especificações dos equipamento são:

Máquinas 1 e 2	100 MVA, 20 kV	$x_d'' = x_1 = x_2 = 20\%$ $x_0 = 4\%, x_n = 5\%$
Transformadores 1 e 2	100 MVA, 20/345 kV	$x = 8\%$
Linha de transmissão		$x_1 = x_2 = 15\%$ $x_0 = 50\%$

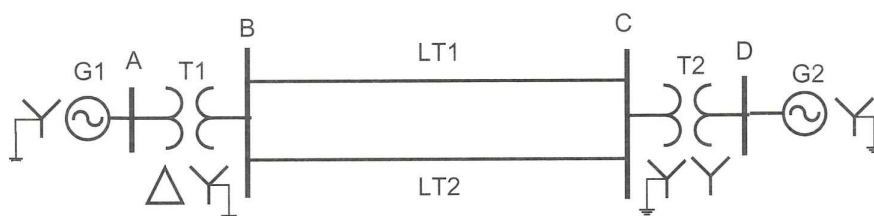
Adotando uma base de 100 MVA e 345 kV para a linha de transmissão, desenhe os três circuitos de sequência e obtenha as três matrizes de sequência.

**3.5** Considere o circuito mostrado a seguir. Note que ele é o mesmo que o mostrado no exercício 3.4, exceto que os transformadores neste caso apresentam conexão Y-Y.



O sistema opera em condições normais quando um curto-circuito fase-terra, sólido ( $Z_f = 0$ ), ocorre na fase A da barra 3. Usando as três matrizes de sequência, determine a corrente de curto-circuito e a tensão de fase nos terminais da máquina 2 (barra 4).

**3.6** Considere o diagrama unifilar a seguir.



Dados:

Gerador 1	–	100 MVA, 13,8 kV, $x_+ = 15\%$ , $x_- = 10\%$ , $x_0 = 5\%$
Gerador 2	–	100 MVA, 13,8 kV, $x_+ = 30\%$ , $x_- = 20\%$ , $x_0 = 10\%$
Transformador 1	–	100 MVA, 13,8/69 kV, $x_+ = 10\%$
Transformador 2	–	100 MVA, 69/13,8 kV, $x_+ = 15\%$
Linhas 1 e 2	–	$x_+ = 30\%$ , $x_0 = 60\%$

Os valores em pu estão na base nominal de cada equipamento.

- Obtenha os circuitos de sequência.
- Forneça as matrizes impedância de sequência.
- Calcule a corrente de curto-circuito fase-terra na fase A da barra B.
- Calcule a corrente no neutro do gerador 1.
- Calcule a corrente no neutro do transformador 1.

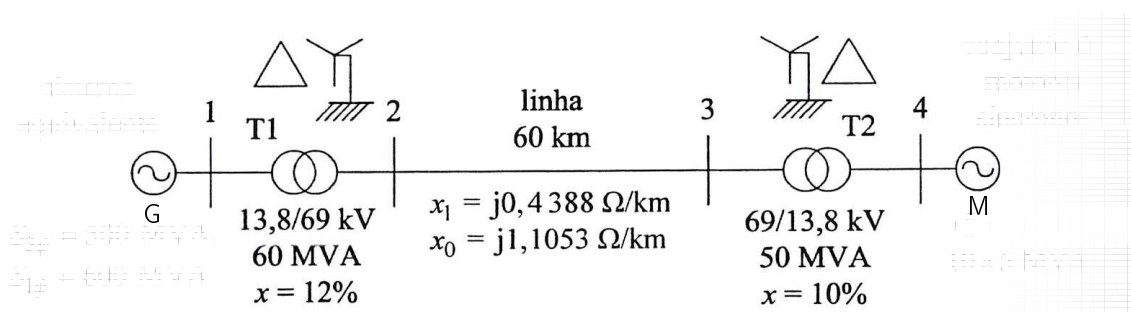
(f) Calcule a corrente de curto-circuito trifásico sólido na barra B.

**3.7** Uma carga trifásica conectada em estrela apresenta os seguintes parâmetros:  $R_a = 10\Omega$ ,  $R_b = 20\Omega$ ,  $R_c = 50\Omega$ . Esta carga é alimentada com tensões trifásicas equilibradas, com valor de fase igual a 100 V e sequência de fases ABC.

- (a) Considere que a carga em estrela tenha seu neutro solidamente aterrado. Calcule: as correntes de linha; a corrente de neutro; as correntes de linha de sequência. Verifique que a magnitude da corrente de neutro corresponde a três vezes a corrente de sequência zero.
- (b) Considere que a carga em estrela tenha seu neutro isolado. Calcule: a tensão de deslocamento de neutro; as tensões de fase sobre a carga; as tensões de fase de sequência; as correntes de linha; as correntes de linha de sequência. Verifique que a corrente de sequência zero é nula. Verifique que a magnitude da tensão de sequência zero é igual à tensão de deslocamento de neutro.

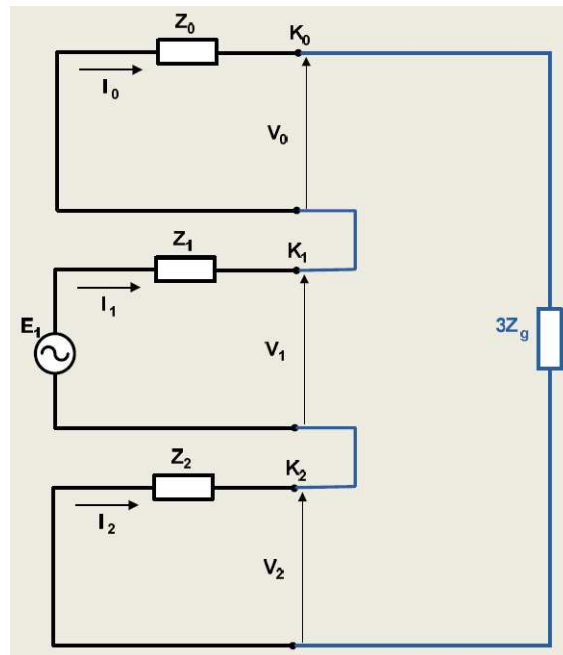
**3.8** Considere a rede a seguir, em que, além dos dados mostrados no próprio diagrama, tem-se:

- um gerador síncrono trifásico (G) de 13,8 kV, 100 MVA, conectado em Y solidamente aterrado, com suas reatâncias de sequência positiva e zero, respectivamente, de 20% e 10%;
- um motor síncrono trifásico (M) de 13,8 kV, 50 MVA, conectado em Y solidamente aterrado, e reatância interna é de 18%.



O motor opera na tensão nominal (barra 4) e consome 46,5 MW com fator de potência unitário.

- (a) Obtenha o circuito em por unidade, adotando uma base de 13,8 kV e 100 MVA para o lado de baixa tensão de T1.
- (b) Calcule a tensão na barra 2, em por unidade e em kV.
- (c) Calcule a corrente fornecida pelo gerador e a corrente que flui pela linha de transmissão em Ampères.
- (d) Caso ocorra uma falta trifásica na barra 2, calcule a corrente de curto-circuito. Adicionalmente, calcule as contribuições de corrente do lado do gerador e do lado da LT no ponto de curto.
- (e) Obtenha os circuitos de sequência positiva, negativa e zero da rede.
- (f) Caso ocorra uma falta fase-terra na barra 2, calcule a corrente de curto-circuito monofásico.
- (g) Considerando que a composição dos circuitos de sequência positiva, negativa e zero para o cálculo da corrente de curto-circuito monofásico pode ser visto, de forma simplificada, como mostrado a seguir (no caso desta rede com  $Z_g = 0$ ), calcule as tensões de sequência ( $V_0$ ,  $V_1$  e  $V_2$ ) e de fase ( $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ ) de curto-circuito na barra 2.

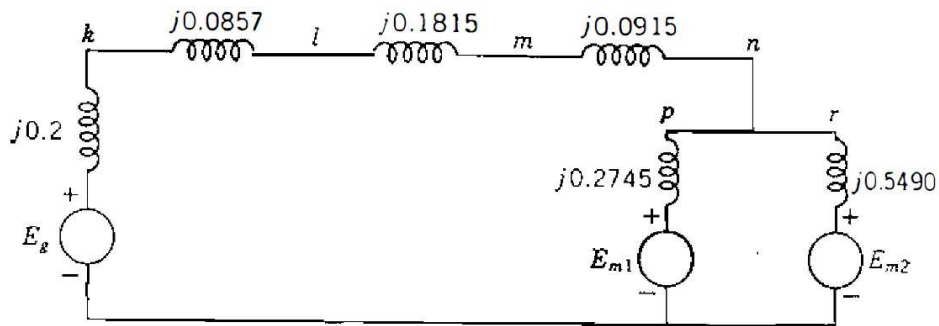


## Respostas

3.1 (a)

(b)  $2,848 \angle -125,82^\circ$  A

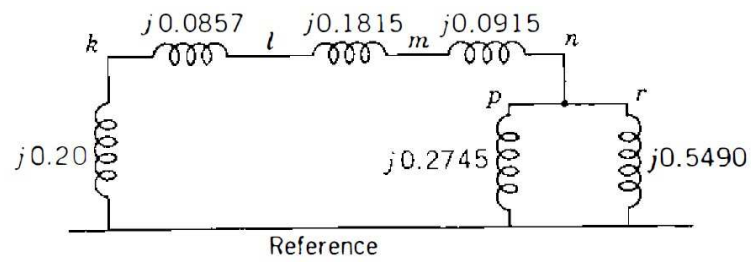
3.2 (a)



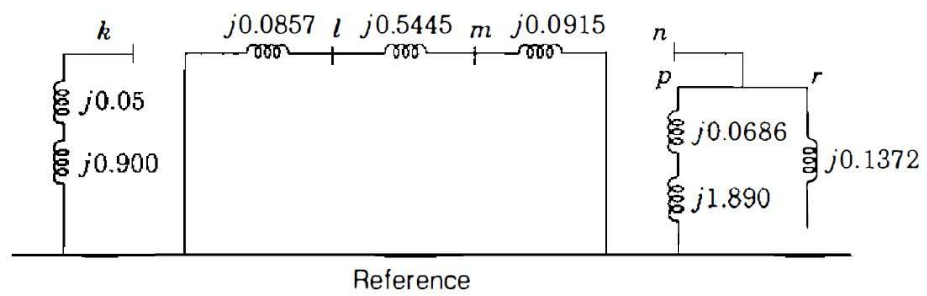
(b) 19,65 kV

3.3 (a) O circuito de sequência positiva é o mesmo obtido no do exercício 3.2.

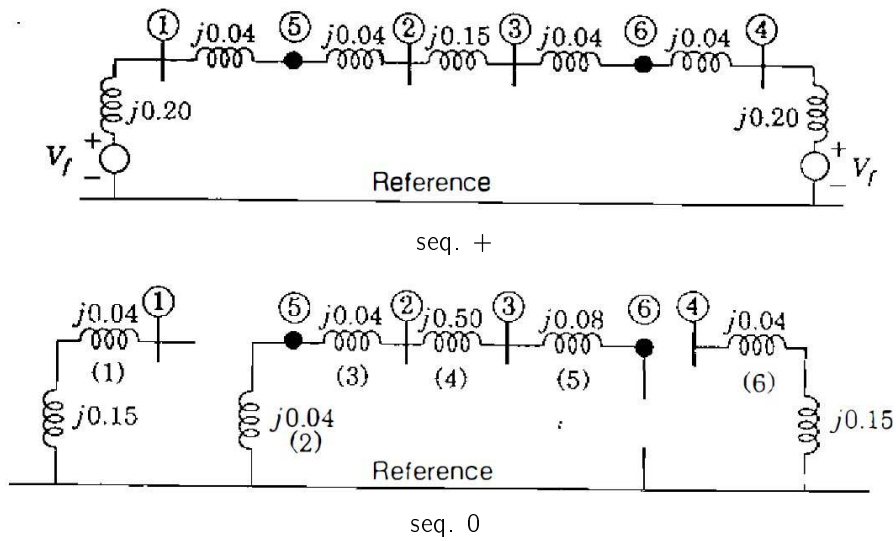
(b)



(c)



3.4



$Y_p =$

0 -17.5000i	0 +12.5000i	0	0
0 +12.5000i	0 -19.1667i	0 + 6.6667i	0
0	0 + 6.6667i	0 -19.1667i	0 +12.5000i
0	0	0 +12.5000i	0 -17.5000i

$Z_p =$

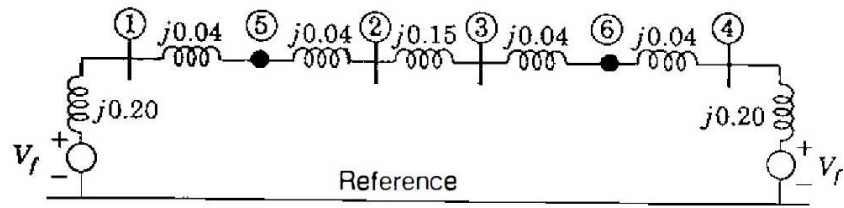
0 + 0.1437i	0 + 0.1211i	0 + 0.0789i	0 + 0.0563i
0 + 0.1211i	0 + 0.1696i	0 + 0.1104i	0 + 0.0789i
0 + 0.0789i	0 + 0.1104i	0 + 0.1696i	0 + 0.1211i
0 + 0.0563i	0 + 0.0789i	0 + 0.1211i	0 + 0.1437i

$Y_o =$

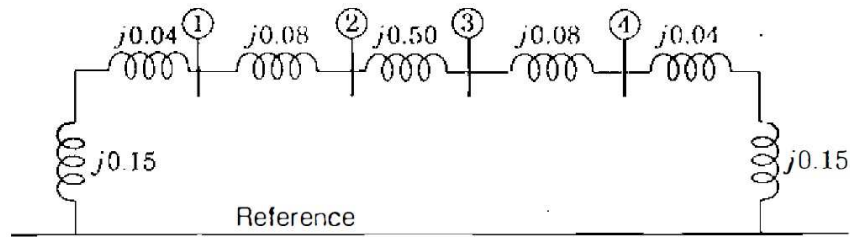
0 - 5.2632i	0	0	0
0	0 -14.5000i	0 + 2.0000i	0
0	0 + 2.0000i	0 - 2.0000i	0
0	0	0	0 - 5.2632i

$Z_o =$

0 + 0.1900i	0	0	0
0	0 + 0.0800i	0 + 0.0800i	0
0	0 + 0.0800i	0 + 0.5800i	0
0	0	0	0 + 0.1900i



seq. +



seq. 0

$Y_p =$

0 -17.5000i	0 +12.5000i	0	0
0 +12.5000i	0 -19.1667i	0 + 6.6667i	0
0	0 + 6.6667i	0 -19.1667i	0 +12.5000i
0	0	0 +12.5000i	0 -17.5000i

$Z_p =$

0 + 0.1437i	0 + 0.1211i	0 + 0.0789i	0 + 0.0563i
0 + 0.1211i	0 + 0.1696i	0 + 0.1104i	0 + 0.0789i
0 + 0.0789i	0 + 0.1104i	0 + 0.1696i	0 + 0.1211i
0 + 0.0563i	0 + 0.0789i	0 + 0.1211i	0 + 0.1437i

$Y_o =$

0 -17.7632i	0 +12.5000i	0	0
0 +12.5000i	0 -14.5000i	0 + 2.0000i	0
0	0 + 2.0000i	0 -14.5000i	0 +12.5000i
0	0	0 +12.5000i	0 -17.7632i

$Z_o =$

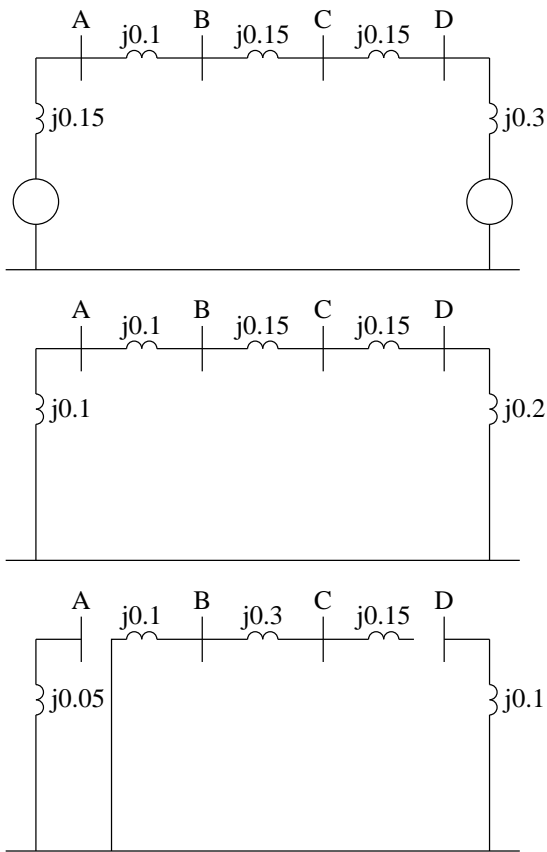
0 + 0.1553i	0 + 0.1407i	0 + 0.0493i	0 + 0.0347i
0 + 0.1407i	0 + 0.1999i	0 + 0.0701i	0 + 0.0493i
0 + 0.0493i	0 + 0.0701i	0 + 0.1999i	0 + 0.1407i
0 + 0.0347i	0 + 0.0493i	0 + 0.1407i	0 + 0.1553i

$$\hat{I}_A = -j931 \text{ A}$$

$$\begin{bmatrix} 3,345 \angle 0^\circ \\ 11,762 \angle -121,8^\circ \\ 11,762 \angle 121,8^\circ \end{bmatrix} \text{ kV} \quad \text{Base de tensão de fase } 20/\sqrt{3} \text{ kV}$$

3.6

(a)



(b)



$Y_p =$

$0 -16.6667i$	$0 +10.0000i$	$0$	$0$
$0 +10.0000i$	$0 -16.6667i$	$0 + 6.6667i$	$0$
$0$	$0 + 6.6667i$	$0 -13.3333i$	$0 + 6.6667i$
$0$	$0$	$0 + 6.6667i$	$0 -10.0000i$

$Z_p =$

$0 + 0.1235i$	$0 + 0.1059i$	$0 + 0.0794i$	$0 + 0.0529i$
$0 + 0.1059i$	$0 + 0.1765i$	$0 + 0.1324i$	$0 + 0.0882i$
$0 + 0.0794i$	$0 + 0.1324i$	$0 + 0.2118i$	$0 + 0.1412i$
$0 + 0.0529i$	$0 + 0.0882i$	$0 + 0.1412i$	$0 + 0.1941i$

$Y_n =$

$0 -20.0000i$	$0 +10.0000i$	$0$	$0$
$0 +10.0000i$	$0 -16.6667i$	$0 + 6.6667i$	$0$
$0$	$0 + 6.6667i$	$0 -13.3333i$	$0 + 6.6667i$
$0$	$0$	$0 + 6.6667i$	$0 -11.6667i$

$Z_n =$

$0 + 0.0857i$	$0 + 0.0714i$	$0 + 0.0500i$	$0 + 0.0286i$
$0 + 0.0714i$	$0 + 0.1429i$	$0 + 0.1000i$	$0 + 0.0571i$
$0 + 0.0500i$	$0 + 0.1000i$	$0 + 0.1750i$	$0 + 0.1000i$
$0 + 0.0286i$	$0 + 0.0571i$	$0 + 0.1000i$	$0 + 0.1429i$

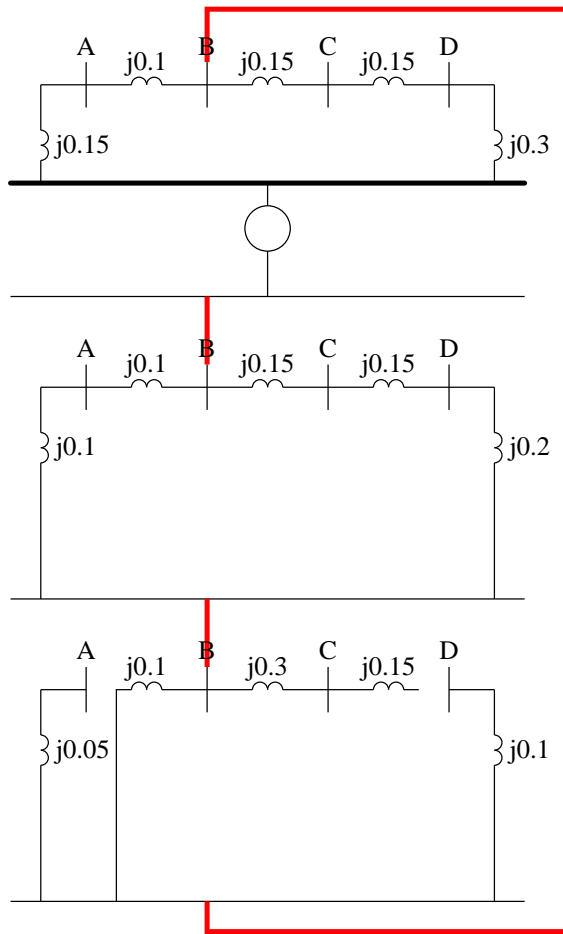
$Y_o =$

$0 -20.0000i$	$0$	$0$	$0$
$0$	$0 -13.3333i$	$0 + 3.3333i$	$0$
$0$	$0 + 3.3333i$	$0 - 3.3333i$	$0$
$0$	$0$	$0$	$0 -10.0000i$

$Z_o =$

$0 + 0.0500i$	$0$	$0$	$0$
$0$	$0 + 0.1000i$	$0 + 0.1000i$	$0$
$0$	$0 + 0.1000i$	$0 + 0.4000i$	$0$
$0$	$0$	$0$	$0 + 0.1000i$

(c) 5,99 kA



(d) A corrente no neutro do gerador 1 é nula.

(e) 5,99 kA

(f) 4,74 kA

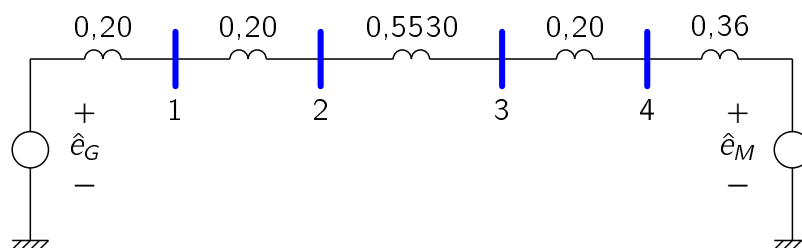
### 3.7

(a)  $I_n = 7 \text{ A} = 3 I_0$

(b)  $V_{nN} = 41,176 \text{ V} = V_0$

### 3.8

(a)

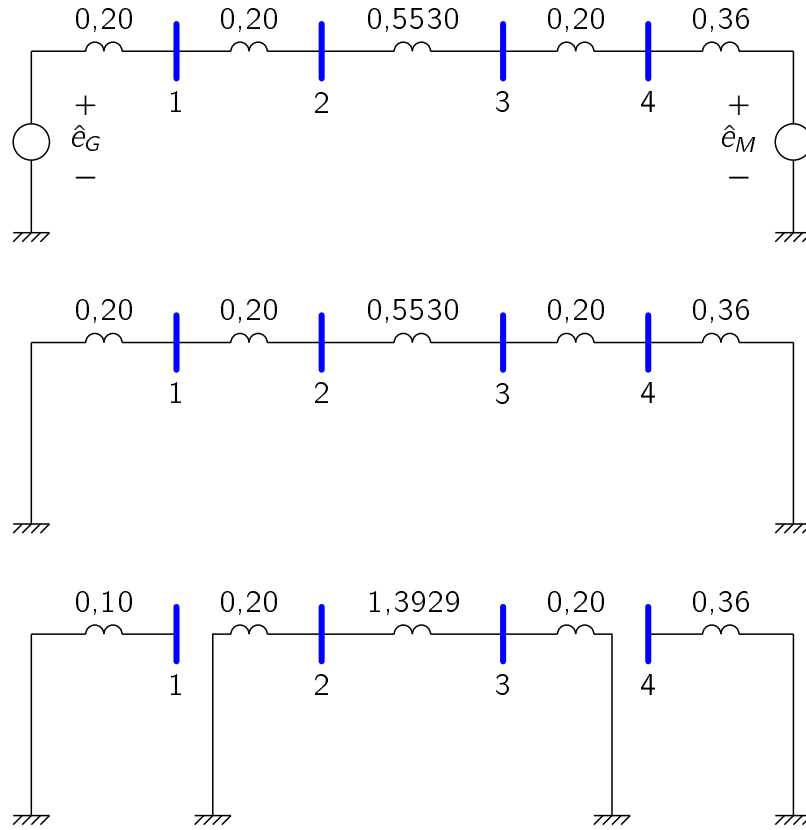


(b) 1,0595 pu ou 73,1 kV

(c) 1945,4 A e 389,1 A

(d) 3,4 pu ; 2,50 pu ; 0,90 pu

(e)



(f)  $4,1478 \angle -90^\circ$  pu

(g)

$$\begin{aligned}\hat{v}_2^0 &= -Z_0 \cdot \hat{i}^0 \\ &= -Z_{2,2}^0 \cdot \hat{i}^0 = 0,2457 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{v}_2^- &= -Z_2 \cdot \hat{i}^- \\ &= -Z_{2,2}^- \cdot \hat{i}^- = 0,4069 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{v}_2^+ &= -(\hat{v}_2^0 + \hat{v}_2^-) \\ &= -0,6526 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{V}^{ABC} &= \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} 0,2457 \\ -0,6526 \\ 0,4069 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0,989 \angle 68,12^\circ \\ 0,989 \angle -68,12^\circ \end{bmatrix} \text{ pu}\end{aligned}$$

Ou seja, a tensão na fase A é nula (curto-circuito), e as tensões nas fases B e C são de aproximadamente 39,4 kV.