

## Departamento de Engenharia Electrotécnica



### LEE – SEE Licenciatura em Engenharia Electrotécnica, Sistemas Eléctricos de Energia

### **Problemas de apoio à disciplina de SELE II - Sistemas Eléctricos de Energia 2**

António Pinto da Cunha  
Rui Manuel Sarmento  
Teresa Alexandra Nogueira

Janeiro de 2012

## Componentes Simétricas

1. Considere o sistema  $U_1 = 12 \text{ V}$ ;  $U_2 = -j12 \text{ V}$  e  $U_3 = j9 \text{ V}$   
 Determine as suas componentes simétricas, analítica e geometricamente.
2. Considere o sistema  $I_1 = 12 \text{ A}$ ;  $I_2 = 6 e^{-j120} \text{ A}$  e  $I_3 = 6\sqrt{3} e^{j150} \text{ A}$   
 Determine as suas componentes simétricas, analítica e geometricamente.
3. Considere o sistema  $U_1 = 10 \angle 60^\circ \text{ V}$ ;  $U_2 = 10\sqrt{3} \angle -90^\circ \text{ V}$  e  $U_3 = 10 \angle 120^\circ \text{ V}$   
 Determine as suas componentes simétricas, analítica e geometricamente.
4. Demonstre que para um sistema trifásico assimétrico de tensões  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ , as componente directa e inversa do sistema podem ser calculadas por:

$$V_d = \frac{1}{3} (U_1 + \alpha U_2 + \alpha^2 U_3)$$

$$V_i = \frac{1}{3} (U_1 - \alpha U_2)$$

5. Uma carga trifásica, ligada em estrela com neutro de impedância  $\bar{Z}_N = 0,51 \angle 0^\circ \Omega$ , é alimentada por uma fonte trifásica simétrica de tensão 220/380 V. As correntes simétricas que percorrem a carga são;

$$\bar{I}_d = 5,48 \angle 11,57^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_i = 6,44 \angle 12,24^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_h = 3,35 \angle -135,7^\circ \text{ V}$$

Determine as correntes nas fases da carga e a corrente no neutro.

Determine o potencial do ponto neutro da carga

Determine o sistema trifásico assimétrico de tensões aplicado às fases da carga.

6. Uma carga trifásica com as impedâncias óhmicas 10, 20,  $20\Omega$ , ligada em estrela e com impedância de neutro, é alimentada por uma fonte trifásica simétrica de tensão 400/230 V. As correntes que percorrem a carga são, respectivamente;

$$\bar{I}_1 = 20,45 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = 12,19 \angle -125,2^\circ \text{ A}$$

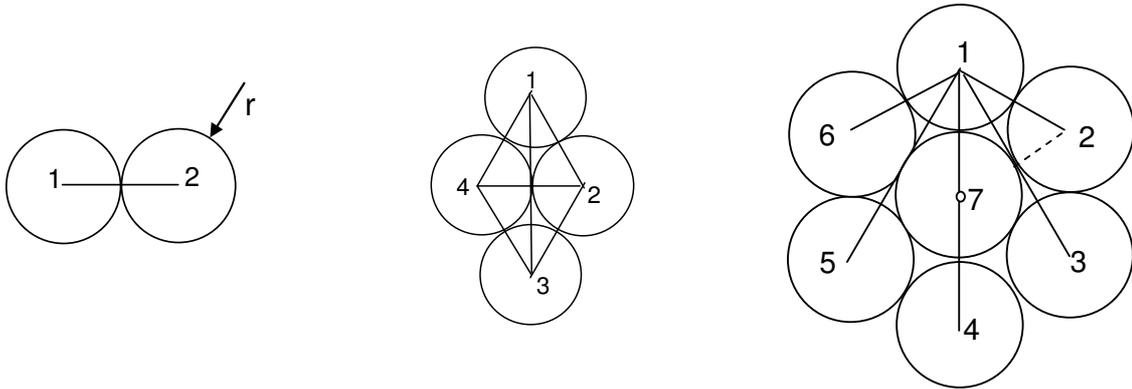
$$\bar{I}_3 = 12,19 \angle 125,2^\circ \text{ A}$$

Determine as componentes simétricas das correntes nas fases da carga e a corrente no neutro.

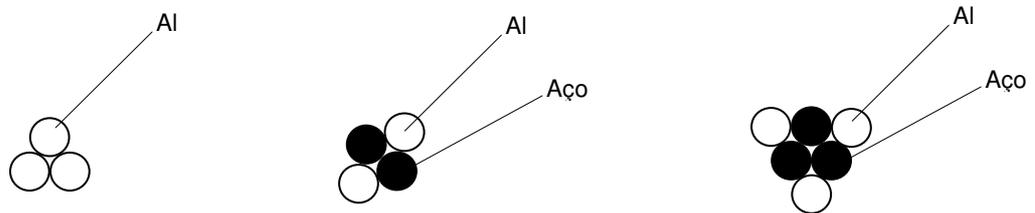
Determine a impedância do neutro da carga

## Linhas de Transmissão de Energia

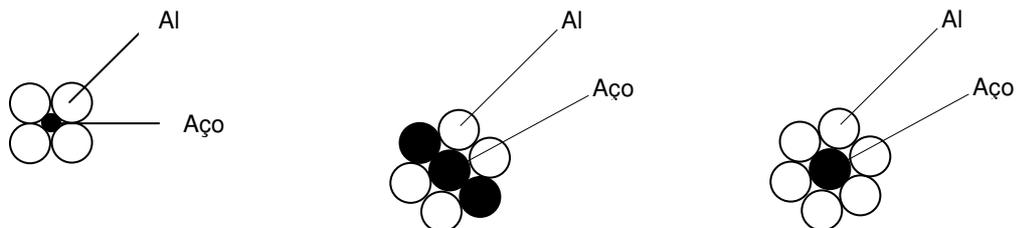
1. Considere os condutores de raio  $r$  em feixe apresentados nas figuras. Para os três casos apresentados, calcule o raio médio geométrico do feixe.



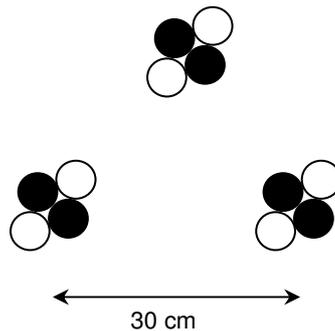
2. Considere os condutores em feixe geminados, distanciados de 30 cm e com uma secção condutora total de  $300 \text{ mm}^2$ . Para os seguintes casos calcule o raio médio geométrico do feixe.



3. Considere os condutores de Al/Aço esquematizados, trata-se de condutores trigeminados de uma linha aérea com as fases dispostas em toalha. Em cada fase os condutores estão dispostos em triângulo equilátero distanciados de 35 cm. A secção condutora total (por fase) é de  $600 \text{ mm}^2$ . Calcule o raio médio geométrico do feixe para os seguintes casos.

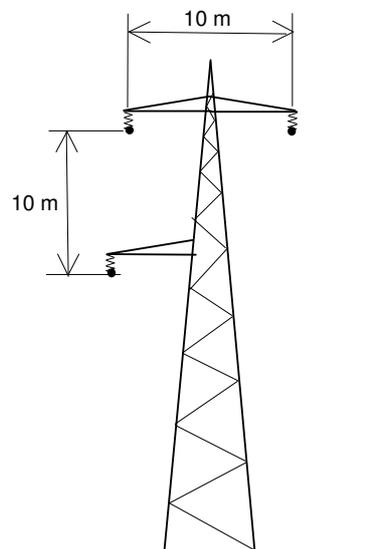
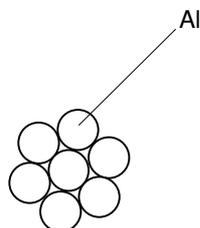


4. Calcule a indutância para a linha em triângulo descrita nos vários casos do ponto anterior, sabendo que a distância entre fases é de 12 m e considerando a linha ciclicamente transposta.
  
5. Considere uma linha aérea de transporte de energia com condutores em toalha de Al/Aço trigeminados e as fases distanciadas de 12 metros. Sendo a secção condutora total por fase de 660 mm<sup>2</sup>, calcule:



- a) O raio médio geométrico do feixe;
- b) A reactância e a capacitância quilométrica da linha sabendo que se efectua a transposição cíclica; Analise a influência da terra na capacitância (supor que a altura ao solo é de 18 m)
- c) A resistência quilométrica ( $\sigma_{Al} = 35 \Omega^{-1} \text{ mm}^{-2} \text{ m}$ );
- d) O peso linear do condutor, sabendo que a densidade do aço e alumínio é, respectivamente, 7,9 e 2,7.

6. Considere os condutores de alumínio esquematizados, a secção condutora total por fase é de 1120 mm<sup>2</sup>, dispostos em fases quadruplas distanciadas de 35 cm (maior distância), suspensos no poste esquematizado. Calcule a indutância e a capacitância para esta linha.



7. Considere uma linha trifásica disposta em toalha, ciclicamente transposta para a seguinte situação:

Raio médio geométrico = 59 mm

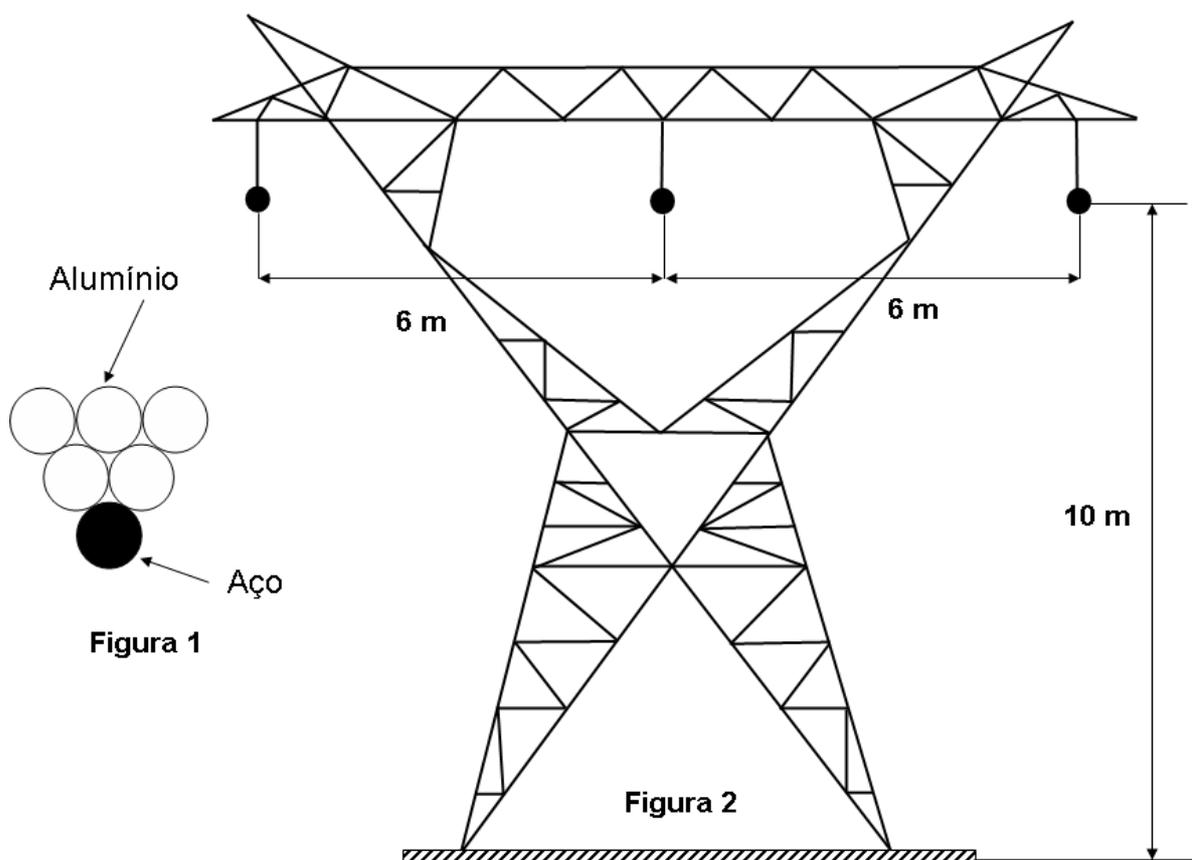
Distância entre fases = 10 m

Distância ao solo = 12 m

- Calcule a capacitância quilométrica da linha;
- Considerando que a secção condutora de cobre total por fase é de  $600 \text{ mm}^2$ , calcule a resistência quilométrica da linha (despreze influência do efeito pelicular);
- Estabeleça a relação entre as capacidades, com e sem a influência da terra.

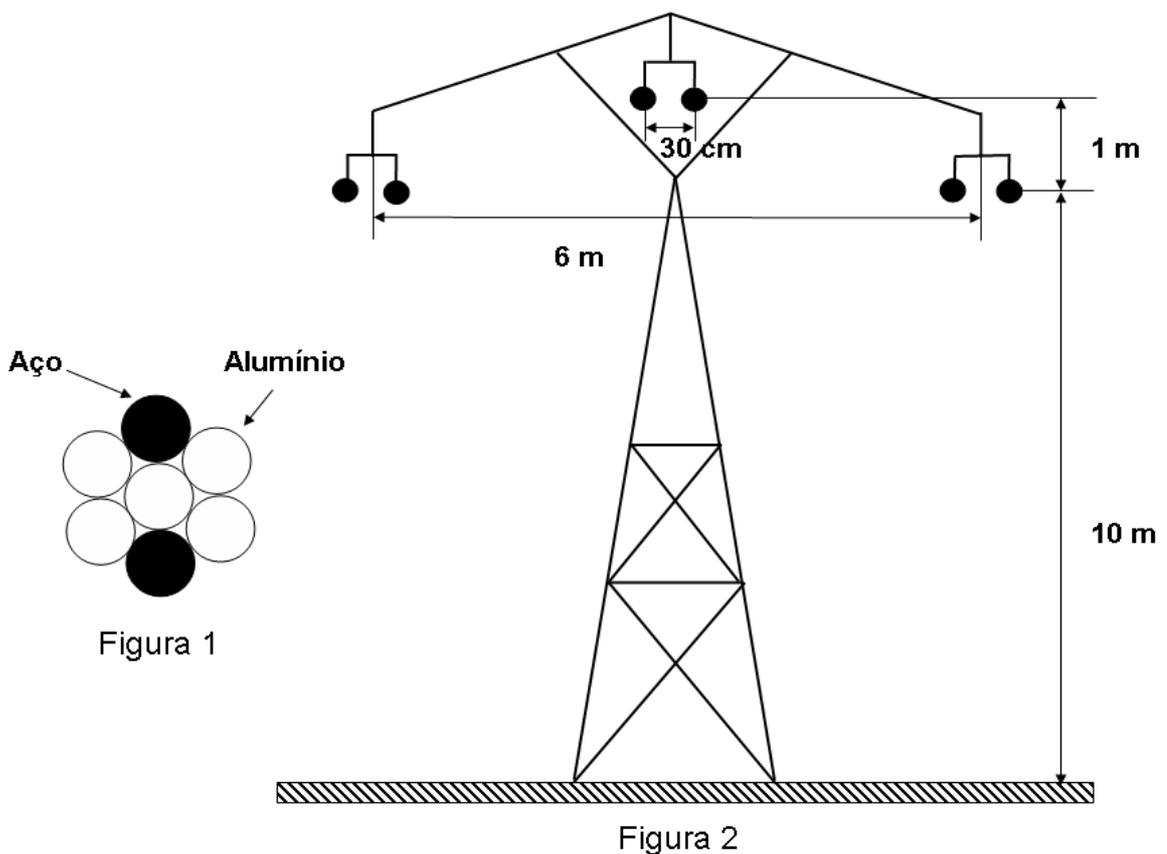
8. O condutor em alumínio/aço com a composição que se mostra na figura 1 é utilizado numa linha trifásica de transporte de energia representada na figura 2, que apresenta as fases dispostas em toalha horizontal com secção útil do alumínio por fase de  $300 \text{ mm}^2$ . Determine:

- A resistência quilométrica por fase da linha;
- A indutância quilométrica da linha;
- A capacitância quilométrica da linha.



9. O condutor em alumínio/aço com a composição que se mostra na figura 1 é utilizado numa linha trifásica de transporte de energia representada na figura 2, que apresenta as fases em feixe geminado e dispostas em triângulo isóscele com secção útil do alumínio por feixe de  $300 \text{ mm}^2$ .  
Determine

- a resistência quilométrica (por fase) da linha
- a indutância quilométrica da linha
- a capacitância quilométrica da linha (considere a aproximação da linha em toalha)



## Modelo Estacionário das Linhas

1. Suponha uma linha trifásica de transporte de 220 kV, com comprimento de 350 km e com as seguintes características:

$$\begin{aligned}R &= 60,5 \text{ m}\Omega / \text{km} \\L &= 1,07 \text{ mH} / \text{km} \\C &= 10,64 \text{ nF} / \text{km} \\G &= 0 \text{ S} / \text{km}\end{aligned}$$

Sabendo que na extremidade de recepção da linha a potência é de 200 MVA e  $\varphi = 15^\circ$  indutivo, calcule:

- Tensão e a corrente da linha na extremidade de emissão;
  - Queda de tensão, perdas totais e o rendimento da linha;
  - Parâmetros do esquema equivalente em  $\Pi$ .
2. Considere a linha do exercício anterior a funcionar em vazio. Admitindo que a tensão na emissão se mantém igual, calcule a tensão na recepção e a corrente na emissão para as duas situações:
- $L = 350 \text{ km}$
  - $L = 700 \text{ km}$

3. Considere uma linha de transporte de energia da qual se conhecem os seguintes dados:

$$Z_c = 400 \Omega, \quad \gamma = 1,03 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \quad \text{e} \quad R = 0,06 \Omega/\text{km}$$

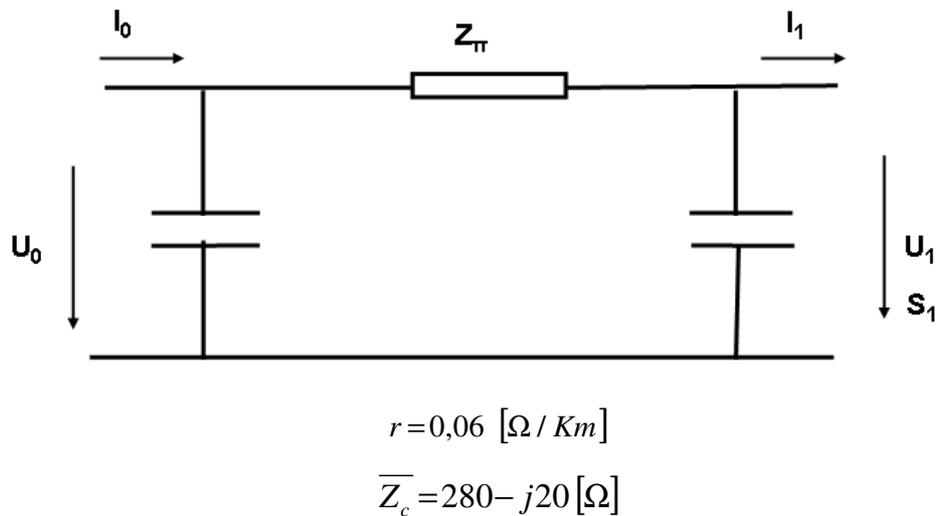
- Calcule a capacidade e indutância quilométricas supondo a linha regularmente transposta;
- Diga qual o comprimento máximo admissível para que a linha possa ser tratada como média;
- Suponha que a linha tem 135 km (350 km) de comprimento e que entrega à chegada 78 MW sob 150 kV, com  $\cos\varphi = 0,8$  ind. Calcule a tensão e corrente na extremidade de emissão, utilizando o esquema equivalente em  $\Pi$ ;
- Calcule as perdas por fase e o rendimento da linha.

4. Considere uma linha trifásica de transporte de energia em alta tensão em que a distância média geométrica entre fases é de 6 m e o raio médio geométrico do feixe é 58 mm.

A linha de transporte apresenta uma impedância característica  $Z_c = 360 - j 36 \Omega$ .

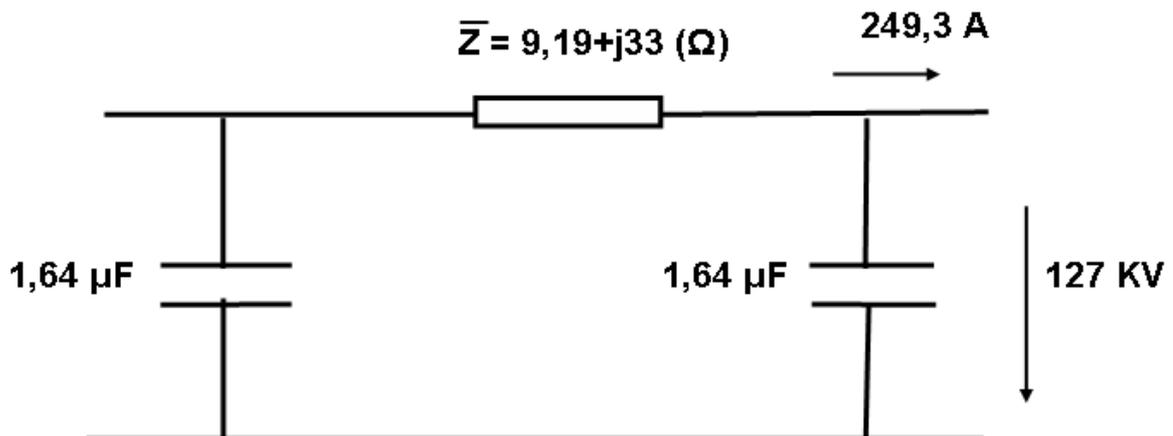
Determine a impedância da linha, sabendo que o seu comprimento corresponde ao valor mínimo a partir do qual a linha é classificada como média.

5. Considere uma linha de transporte com 300 km que entrega na recepção uma potência de 100 MVA com factor de potência 0,9 ind, sob 150 kV e com as seguintes características:



Utilizando as expressões hiperbólicas da linha determine a tensão e a corrente na extremidade de emissão.

6. Considere o seguinte esquema em  $\pi$  de uma linha de transporte :



Sabendo que o comprimento da linha é de **90 km**, calcule:

- O ângulo característico da linha de forma a classificá-la.
- A tensão e a intensidade de corrente de entrada, bem como a potência na emissão, sabendo que  $\phi_1 = 30^\circ$ .

7. Pretende-se que uma linha trifásica de transporte de energia em alta tensão entregue na recepção 95 MVA, sob 150 kV, com um  $\cos\phi = 0,8$  ind. A linha tem como características:

$$r = 0,098 \Omega/\text{km} \quad l = 1,101 \text{ mH/km} \quad c = 11,56 \text{ nF/km}$$

Considere a linha com os comprimentos de 60, 210 (e 470) Km

- Utilizando as equações hiperbólicas da linha, calcule a tensão, a corrente e o factor de potência na extremidade de emissão;
- Calcule o valor da potência aparente, activa e reactiva na extremidade de emissão;
- Calcule a queda de tensão, as perdas totais e o rendimento da transmissão;
- Estabeleça um circuito em  $\pi$  equivalente.
- Considerando a linha com o comprimento de 210 km, mantendo o valor da tensão à partida, calcule os novos valores da tensão à chegada e da corrente à partida, supondo a linha a funcionar em vazio. Comente os valores obtidos.

8. Considere uma linha trifásica de transporte de energia eléctrica em alta tensão que entrega na recepção 100 MVA, sob uma tensão de 150 kV e com um  $\cos\phi = 0,86$  ind. Sabendo que a constante de fase  $\beta = 1,23 \times 10^{-3}$  km e que a impedância quilométrica é  $z = 0,055 + j0,658 \Omega/\text{km}$ :

- Calcule o comprimento máximo que a linha poderá ter para ser classificada como linha curta;
- Estabeleça o esquema equivalente em  $\pi$  da linha, utilizando o comprimento calculado na alínea anterior;
- Determine os valores da corrente e tensão da extremidade de emissão, usando as equações hiperbólicas da linha.

## Isoladores

1. Pretende-se construir uma cadeia de isoladores para uma linha de transporte de 220 kV. Cada isolador tem uma tensão de contornamento de 95 kV, mas, deve trabalhar com uma tensão inferior em pelo menos 55 %  
Capacidade de cada isolador: C  
Capacidade entre ferragens e poste:  $1/8 C$   
Calcule:
  - a) O nº de isoladores da cadeia;
  - b) A distribuição dos potenciais da cadeia;
  - c) O rendimento da cadeia.
  
2. Uma linha de transporte é dimensionada com 4 isoladores de 60 kV de tensão de contornamento. A relação entre a capacidade entre ferragens e poste e a capacidade de cada isolador é de 0,2.  
Sabendo que o último elemento da cadeia está sob 33,4 kV, calcule:
  - a) A tensão nominal da rede;
  - b) A distribuição dos potenciais;
  - c) O rendimento da cadeia sabendo que os isoladores não deverão funcionar a mais de 80 % da tensão de contornamento;
  - d) Calcule a tensão de contornamento da cadeia.
  
3. Para uma linha aérea de tensão nominal 220 kV ( $245 \text{ kV}_{\text{max}}$ ), utilizou-se isoladores de cadeia U-100-... com uma tensão de contornamento à chuva de 60 kV e uma linha de fuga de 460 mm.  
A linha de fuga nominal específica mínima entre fase e terra é de  $20 \text{ mm} / \text{kV} \text{ Max}_{\text{nom}}$  para zonas de nível de poluição média.  
Calcule o número de elementos isoladores das cadeias de amarração ou de suspensão e o potencial médio a que cada elemento fica sujeito.
  
4. 4. Para uma linha aérea de tensão nominal 60 kV, a tensão máxima estipulada é de 72,5 kV. A linha de fuga nominal específica mínima entre a fase e terra é de  $25 \text{ mm} / \text{kV} \text{ max}_{\text{nom}}$  para zonas próximas do mar.  
São utilizados isoladores de cadeia U-100-127 cujas características são indicadas no quadro seguinte:

<b>Dimensões</b>	
Diâmetro do dielétrico	255 mm
Passo	127 mm
Linha de fuga	315 mm
Norma de acoplamento segundo IEC-120	16 A mm
Peso aproximado	3,75 kg
<b>Características eléctricas</b>	
Tensão suportada à frequência industrial	
A seco – 1 elemento	70 Kv
Sob chuva – 1 elemento	40 kV
A seco – 5 elementos	245 kV
Sob chuva – 5 elementos	165 kV
Tensão de impulso suportada	
Tipo raio a seco – 1 elemento	100 kV
Tipo raio a seco – 5 elementos	380 kV
Tensão mínima de perfuração	130 kV
<b>Características mecânicas</b>	
Carga de rotura mecânica mínima	100 kN
<b>Ensaios</b>	
De acordo com EN -60383.1 (1993)	

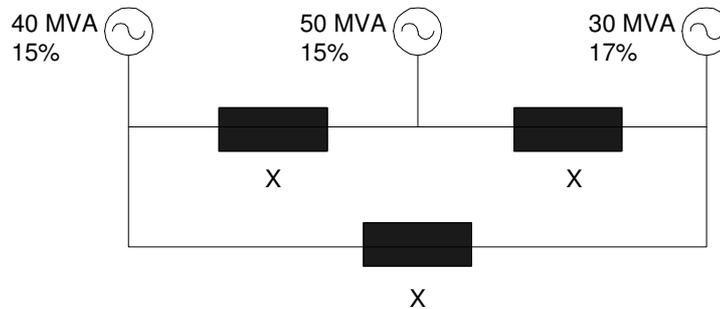
Calcule o número de isoladores que devem constituir a cadeia de isoladores.

Calcule a tensão a que fica sujeito o elemento isolador junto à linha.

Calcule o rendimento da cadeia

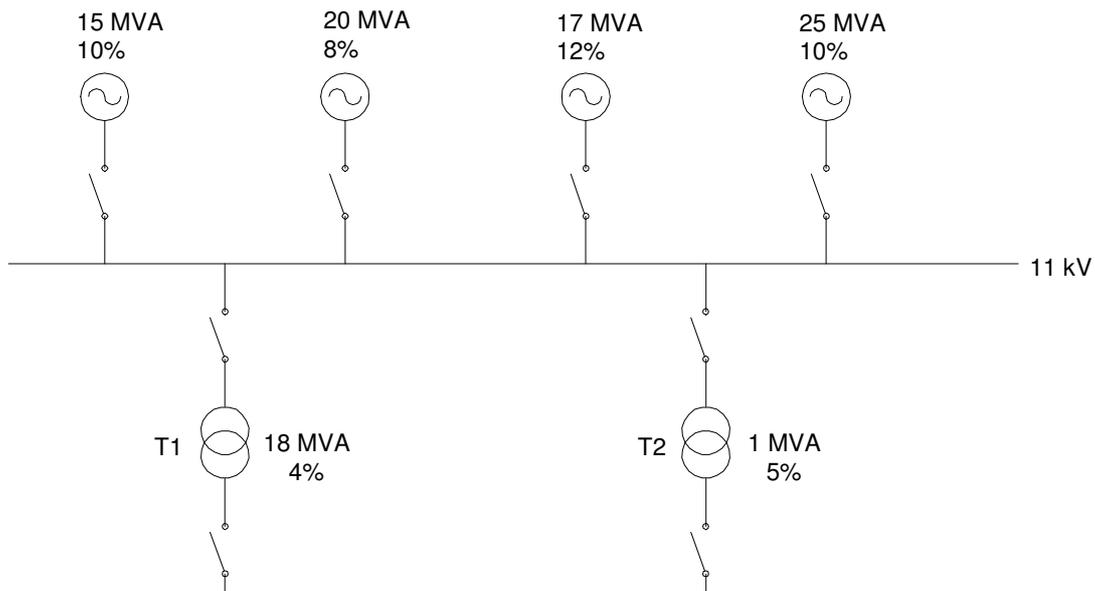
## Análise de Curto-circuitos

1. Considere uma central a 15 kV, equipada com 3 grupos geradores cujas capacidades e reactâncias subtransitórias estão indicadas na figura:

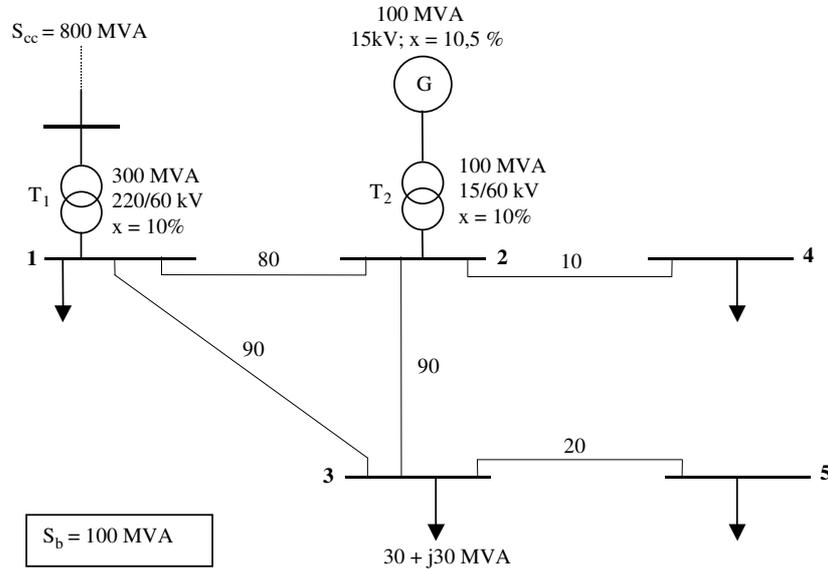


Calcular o valor das bobinas X de modo que a potência de curto-circuito simétrico no barramento de qualquer dos 3 alternadores seja limitada a 500 MVA.

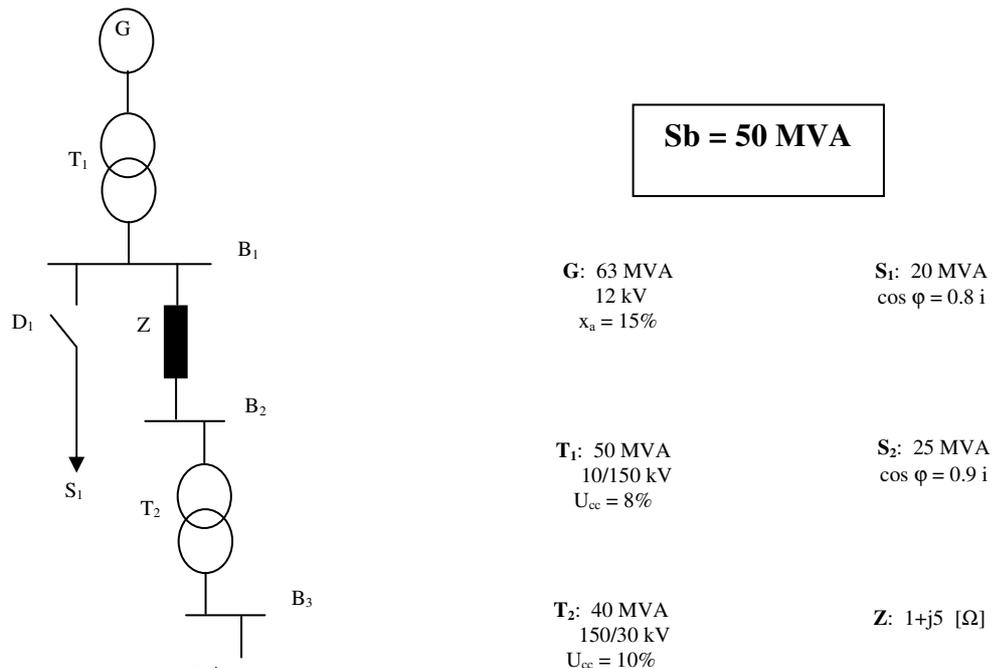
2. Considere o sistema eléctrico esquematizado que corresponde a uma central equipada com 4 grupos geradores ligados em paralelo sobre um barramento do qual saem duas linhas com interposição dos transformadores T1 (11/60 kV) e T2 (11/0,4 kV). Calcule:
- A corrente inicial de curto-circuito simétrico correspondente a um curto-circuito no barramento;
  - Idem para um curto-circuito a jusante do transformador T1;
  - Idem para um curto-circuito a jusante do transformador T2;
  - O poder de corte dos disjuntores de cada alternador e transformador.



3. Considere o sistema eléctrico de energia representado pelo seu esquema unifilar. A impedância dos ramos é de  $0,01+j0,2$  [ $\Omega/\text{km}$ ], sendo o comprimento de cada ramo assinalado na figura em km:

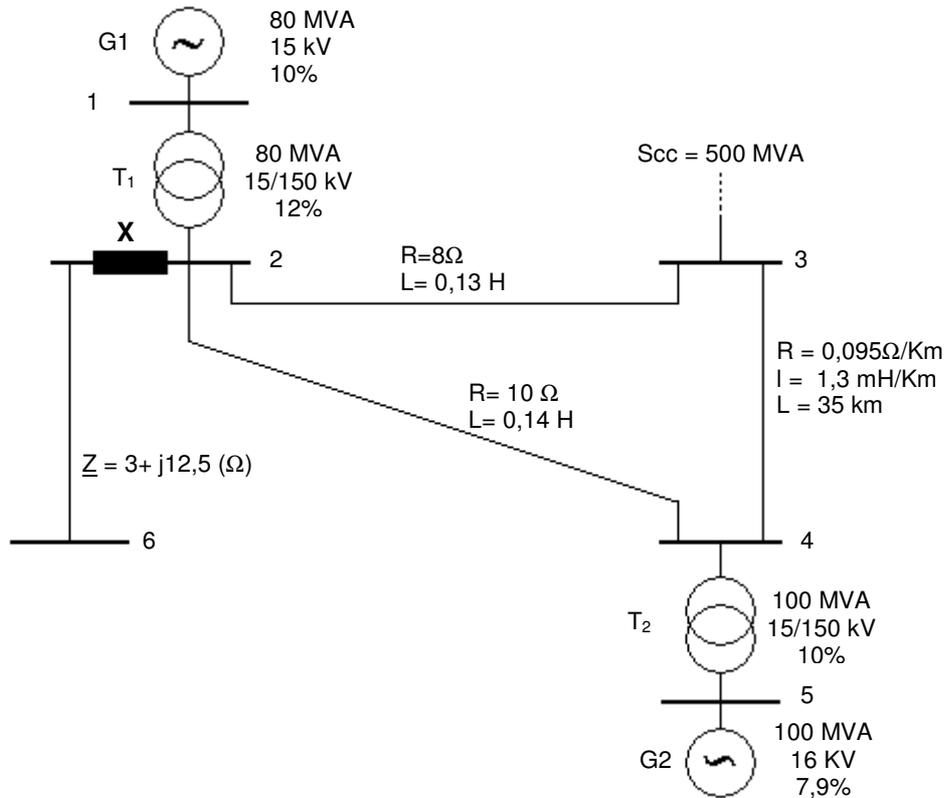


- a) Supondo que a rede está a ser explorada com  $V_1 = 1,07 \angle 1.5^\circ$ ,  $V_2 = 1$  e  $V_3 = 0,95 \angle -1.8^\circ$  pu, calcule a corrente na linha 3 - 5;  
 b) Calcule a potência e corrente de curto-circuito no barramento 4;  
 c) Calcule a potência e corrente de curto-circuito no barramento 3.
4. Considere o sistema eléctrico de energia representado pelo seu esquema unifilar. Calcule o poder de corte do disjuntor D2.

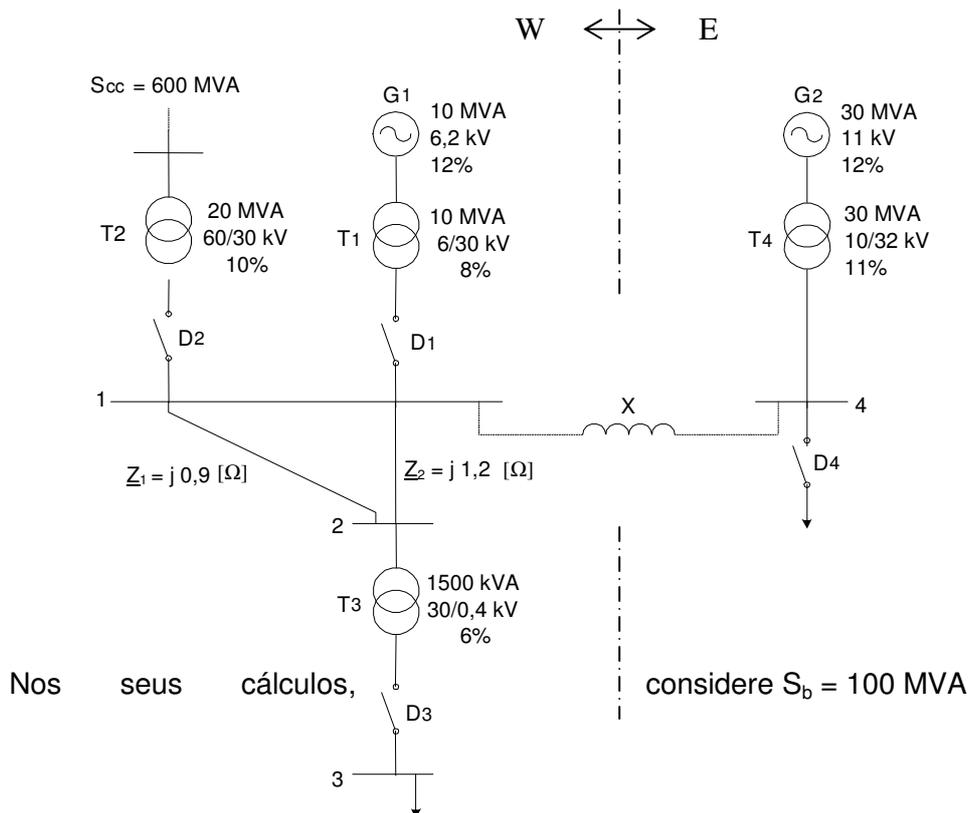


5. Considere o sistema eléctrico esquematizado na figura.

Determine o valor da reactância "X" em  $\Omega$ , de modo a garantir uma potência de curto-circuito máxima no barramento 6 igual a 300 MVA.



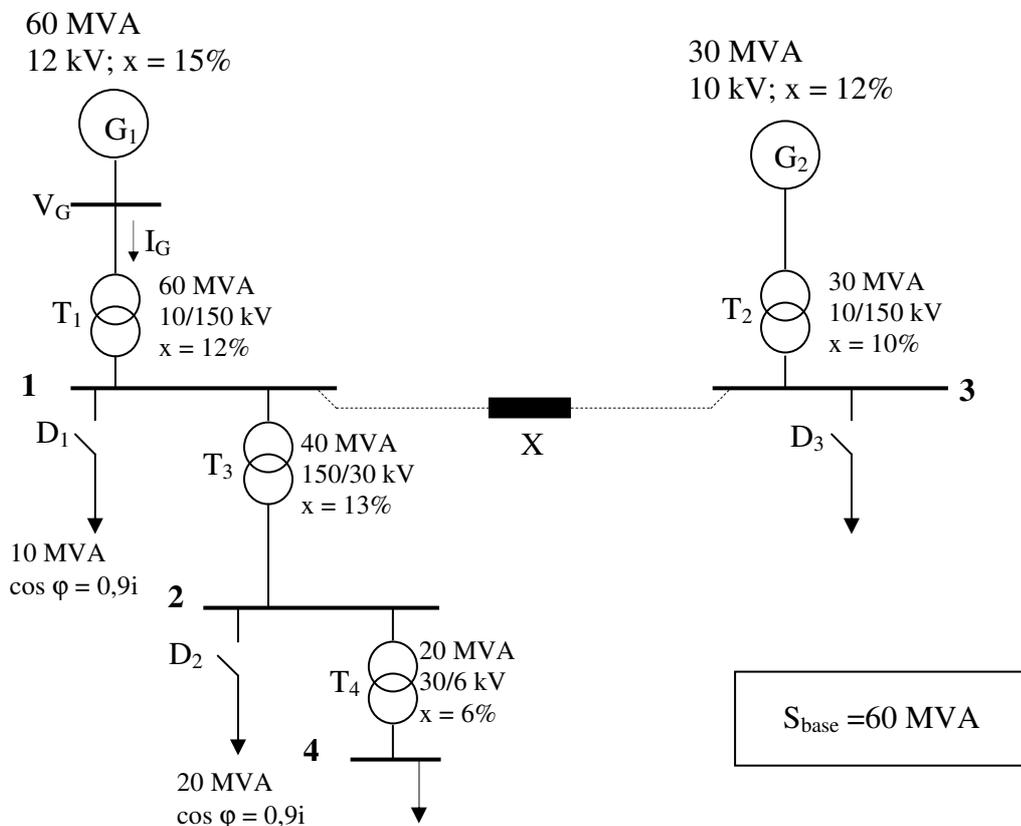
6. Considere a rede esquematizada:



- Suponha que a interligação  $W \leftrightarrow E$  não está realizada. Nestas circunstâncias, calcule a potência de curto-circuito simétrico nos barramentos 1 e 3;
- Suponha agora que o sistema eléctrico recebeu a interligação  $W \leftrightarrow E$  através da reactância  $X$ , conforme ilustra o desenho. Calcule  $X$  de modo a garantir a potência de CC simétrico de 250 MVA para o disjuntor a montante de T3 (barramento 2);
- Calcule o poder de corte do disjuntor D4.

$$(S_c \text{ ou } S_p = 1,8\sqrt{2} S_{cc3} \rightarrow I_p \cong 2,6 I_{cc})$$

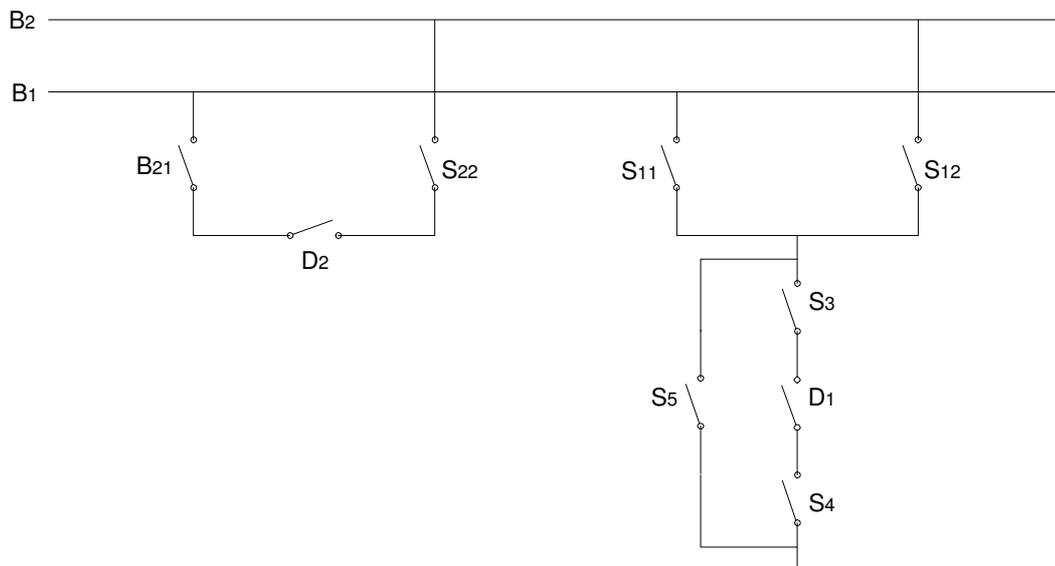
7. Considere o sistema eléctrico de energia, com dois grupos produtores que, por facilidade de exploração, poderão ser interligados através da reactância  $X$ :



- Admita o seguinte regime de exploração: sem interligação, tensão no barramento 2 de 28 kV e corrente no lado do primário do transformador  $T_4$  de  $380 \angle -30^\circ$  A. Neste caso, calcule a tensão e corrente no barramento  $V_G$ ;
- O disjuntor  $D_1$  foi dimensionado para uma potência de CC simétrico de 300 MVA. Efectuada a interligação, qual deverá ser o valor de  $X$  (em Ohm) de modo a não ser necessário substituir o referido disjuntor;
- Considerando o valor da reactância calculada na alínea anterior, qual deverá ser o poder de corte do disjuntor  $D_3$ .

## Transferência de Carga entre Barramentos

1. Considere o esquema unifilar de uma rede:



Descreva o conjunto de manobras para retirar da rede o disjuntor D1 sem interrupção de serviço.

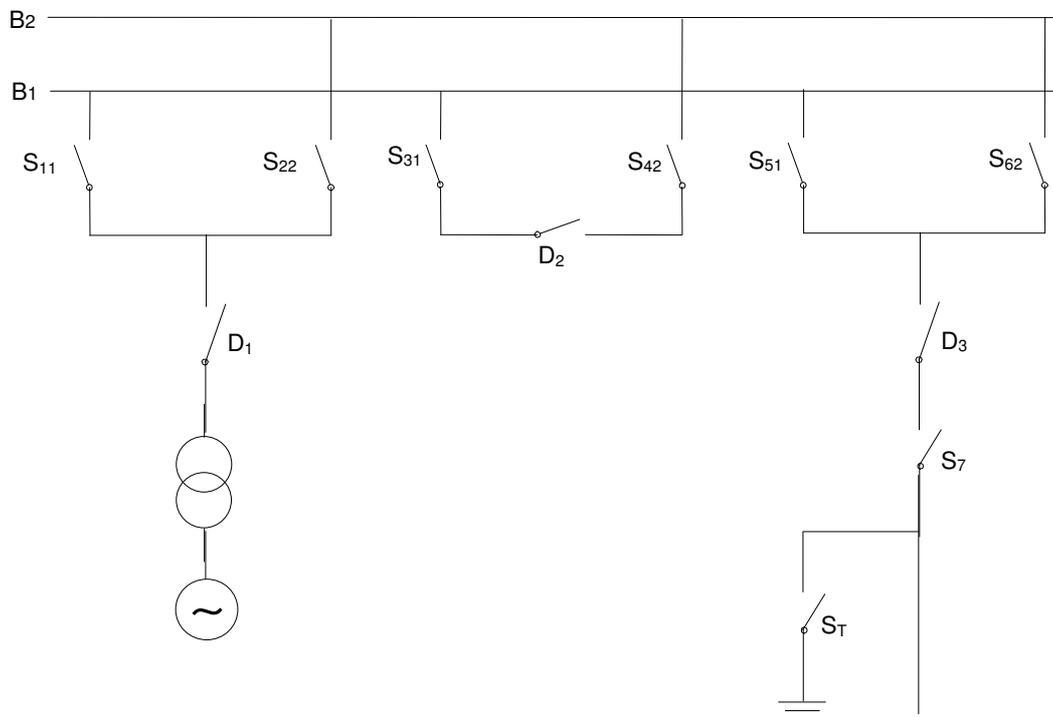
2. Considere o esquema unifilar representado partindo da situação inicial descrita:

Aparelhagem	D <sub>1</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>22</sub>	D <sub>2</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>42</sub>	D <sub>3</sub>	S <sub>51</sub>	S <sub>62</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>T</sub>
Situação inicial	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0

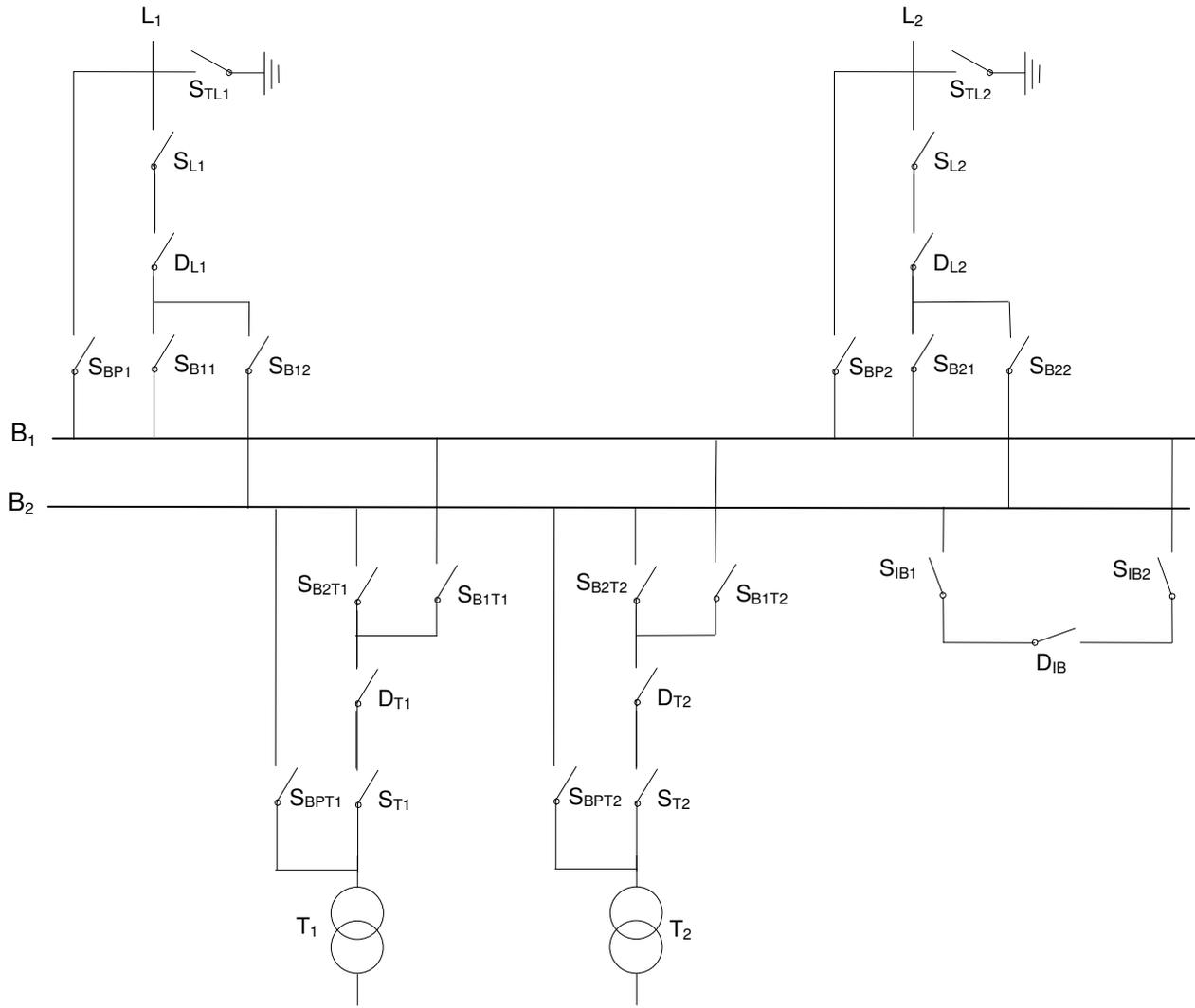
0 – Aberto/Desligado

1 – Fechado/Ligado

Transferir a carga do barramento B<sub>1</sub> para B<sub>2</sub> sem interrupção de serviço

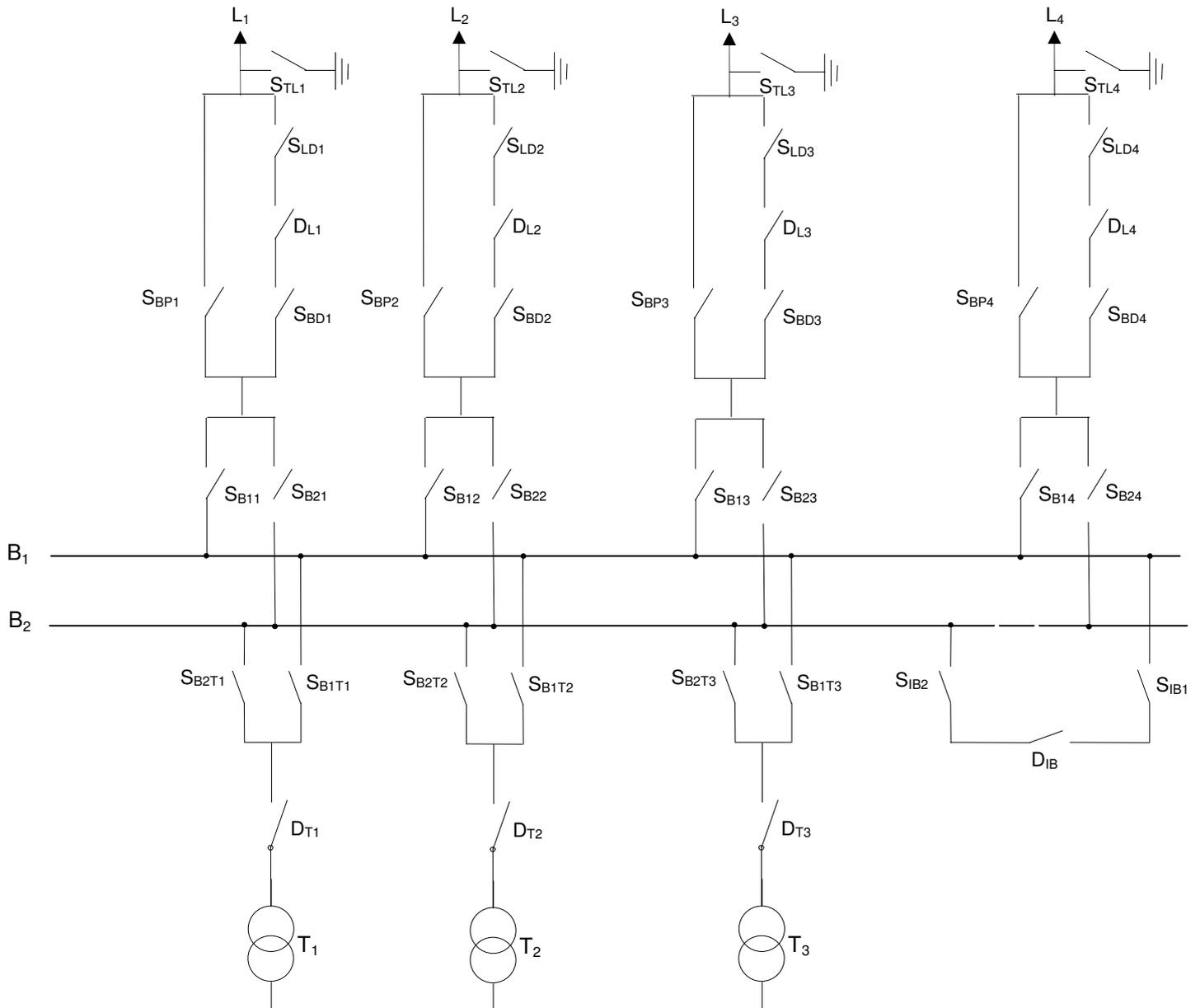


3. Considere o esquema unifilar simplificado da subestação que segue.  
 Situação inicial: T1, T2 e L2 em funcionamento, ligados ao barramento 2.  
 Descreva o conjunto de manobras a executar de modo a não interromper o serviço para as seguintes situações:
- Transferência de carga de B2 para B1.
  - Retirada do disjuntor DL2 para manutenção



Aparelhagem	Situação inicial	Sequência de manobras																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S <sub>L1</sub>	0																		
D <sub>L1</sub>	0																		
S <sub>B11</sub>	0																		
S <sub>B12</sub>	0																		
S <sub>BP1</sub>	0																		
S <sub>TL1</sub>	0																		
S <sub>L2</sub>	1																		
D <sub>L2</sub>	1																		
S <sub>B21</sub>	0																		
S <sub>B22</sub>	1																		
S <sub>BP2</sub>	0																		
S <sub>TL2</sub>	0																		
S <sub>B2T1</sub>	1																		
S <sub>B1T1</sub>	0																		
D <sub>T1</sub>	1																		
S <sub>T1</sub>	1																		
S <sub>BP1</sub>	0																		
S <sub>B2T2</sub>	1																		
S <sub>B1T2</sub>	0																		
D <sub>T2</sub>	1																		
S <sub>T2</sub>	1																		
S <sub>BP2</sub>	0																		
S <sub>IB1</sub>	0																		
S <sub>IB2</sub>	0																		
D <sub>IB</sub>	0																		

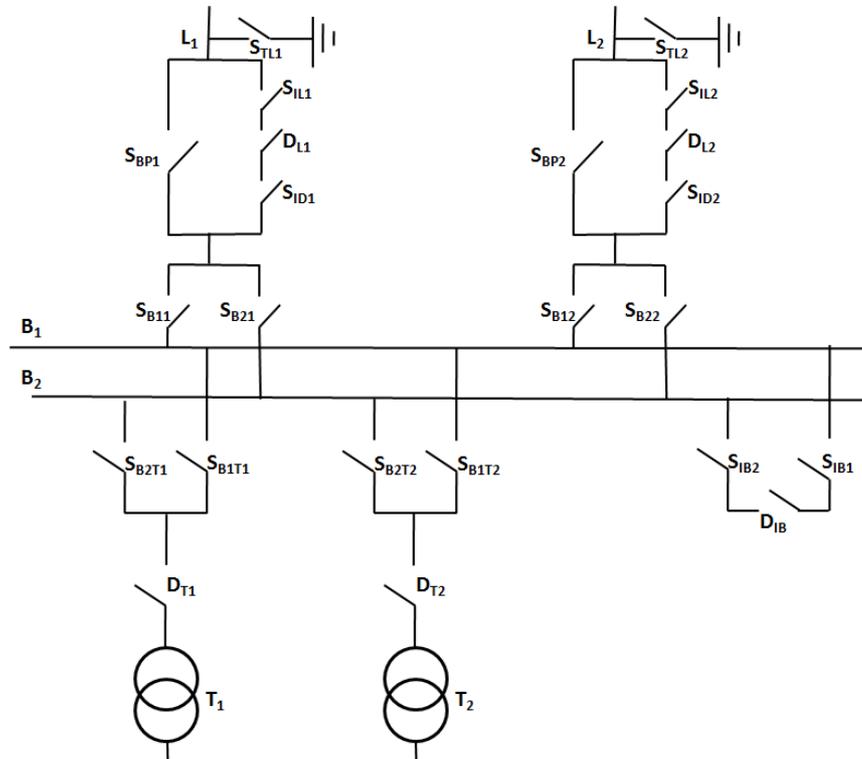
4. Considere o seguinte esquema unifilar simplificado de uma subestação.  
Descreva o conjunto de manobras a realizar para retirar o disjuntor da linha 1 (DL1) para manutenção, sem interromper o serviço, para as seguintes situações iniciais:
- T1, T2, L1 e L4 ligados ao barramento 1  
T3, L2 e L3 ligados ao barramento 2
  - T1, T3, L1 e L3 ligados ao barramento 1  
T2, L2 e L4 ligados ao barramento 2



a)

Aparelhagem	Situação inicial	Sequência de manobras																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S <sub>LD1</sub>	1																		
D <sub>L1</sub>	1																		
S <sub>BD1</sub>	1																		
S <sub>BP1</sub>	0																		
S <sub>B11</sub>	1																		
S <sub>B21</sub>	0																		
S <sub>B1T1</sub>	1																		
S <sub>B2T1</sub>	0																		
D <sub>T1</sub>	1																		
S <sub>LD2</sub>	1																		
D <sub>L2</sub>	1																		
S <sub>BD2</sub>	1																		
S <sub>BP2</sub>	0																		
S <sub>B12</sub>	0																		
S <sub>B22</sub>	1																		
S <sub>B1T2</sub>	1																		
S <sub>B2T2</sub>	0																		
D <sub>T2</sub>	1																		
S <sub>LD3</sub>	1																		
D <sub>L3</sub>	1																		
S <sub>BD3</sub>	1																		
S <sub>BP3</sub>	0																		
S <sub>B13</sub>	0																		
S <sub>B23</sub>	1																		
S <sub>B1T3</sub>	0																		
S <sub>B2T3</sub>	1																		
D <sub>T3</sub>	1																		
S <sub>LD4</sub>	1																		
D <sub>L4</sub>	1																		
S <sub>BD4</sub>	1																		
S <sub>BP4</sub>	0																		
S <sub>B14</sub>	1																		
S <sub>B24</sub>	0																		
S <sub>IB1</sub>	0																		
S <sub>IB2</sub>	0																		
D <sub>IB</sub>	0																		

5. Considere o esquema unifilar de uma subestação ilustrado na figura que se apresenta. Na situação inicial de funcionamento os transformadores T1 e T2 estão ligados ao barramento 1, o disjuntor da linha 1 (DL1) foi retirado para manutenção sem interrupção de serviço e a linha 2 está em situação normal de funcionamento, protegida pelo disjuntor DL2 e ligada ao barramento 1.



- a) Preencha a tabela com 0 (Desligado) ou 1 (Ligado) para a situação inicial de funcionamento;

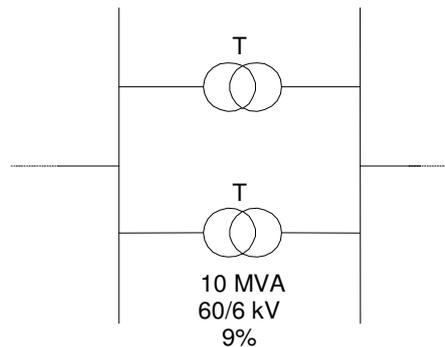
$D_{T1}$	$S_{B2T1}$	$S_{B1T1}$	$D_{T2}$	$S_{B2T2}$	$S_{B1T2}$	$S_{IB1}$	$S_{IB2}$	$D_{IB}$

$S_{TL1}$	$S_{IL1}$	$S_{ID1}$	$D_{L1}$	$S_{BP1}$	$S_{B11}$	$S_{B21}$	$S_{TL2}$	$S_{IL2}$	$S_{ID2}$	$D_{L2}$	$S_{BP2}$	$S_{B12}$	$S_{B22}$

- b) A partir da situação inicial descreva a sequência de manobras a realizar para repor o disjuntor da linha 1 ( $D_{L1}$ ) em funcionamento e retirar o disjuntor da linha 2 ( $D_{L2}$ ) para manutenção sem interrupção de serviço;
- c) Explique sucintamente a função do disjuntor  $D_{IB}$  e dos seccionadores  $S_{BP1}$  e  $S_{TL2}$ .

## Dimensionamento de Barramentos

1. Dimensione o barramento de MT esquematizado utilizando condutores simples de alumínio com secção em U pintado. A potência de curto-circuito em AT é 2000 MVA. O comprimento dos vãos é de 1,85 m e a distância entre fases de 300 mm. O tempo de actuação das protecções é de 0,3 segundos e para o local considera-se que  $I_p = 0.5 I_{cc}$



Algumas características dos materiais:

Característica	Definição	Unidade	Cobre	Alumínio
E	Módulo de elasticidade	Kgf/cm <sup>2</sup>	$1.2 \cdot 10^6$	$0.7 \cdot 10^6$
$\alpha$	Coeficiente de dilatação linear	°C <sup>-1</sup>	0.000017	0.000024
$\sigma$	Carga de segurança à flexão	Kgf/cm <sup>2</sup>	1000 a 1200	400 a 600
$\rho$	Densidade	.	8.9	2.7
K	Constante característica		0.0058	0.0135

2. Dimensione os barramentos do QGBT de um PT utilizando barras rectangulares duplas de cobre não pintadas.

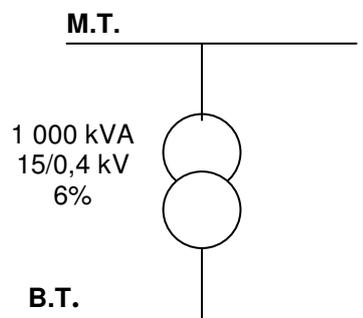
### Dados:

- A potência do transformador do PT é 800 kVA (com uma reactância de fugas de 6%) e a potência de curto-circuito em BT é 33 (12) MVA.
- O comprimento dos vãos deverá ser limitado a 1,75 m (0,80 m) e a distância entre fases 150 mm.
- Os barramentos serão montados num invólucro com IP>30.
- O tempo de actuação das protecções é de 0,3 segundos.
- Para o local  $I_p = 0,67 I_{cc}$ .

3. Uma dada instalação dispõe de um transformador de 40 MVA, 150/7 kV,  $U_{cc}= 9\%$ . O barramento de AT tem uma  $I_{cc}= 1240$  A. Prevê-se para o seu dimensionamento do barramento de MT um sistema com barras duplas de cobre, pintadas, com comprimento de vãos de 1,5 metros e distância entre fases de 30 cm.
- Calcule a secção mais económica, garantindo a resistência à flexão;
  - Verifique se as barras encurvam quando sujeitas a uma sobrelevação de temperatura de 90 °C devido ao curto-circuito;
  - Calcule a frequência de ressonância do barramento.
4. Para o dimensionamento de um certo barramento de 60 kV está prevista a utilização de cavilha de alumínio, com vãos de 2,5 distanciados de 50 cm. A potência de curto-circuito neste barramento é de 294 MVA. Calcule:
- A secção necessária para este perfil que garanta os esforços electrodinâmicos;
  - A frequência de ressonância para o perfil dimensionado.
5. Sabendo que um PT dispõe de um transformador com as seguintes características:

Potência nominal: 1000 kVA  
Tensões: 15 / 0.4 kV  
Tensão de curto-circuito nominal: 6%

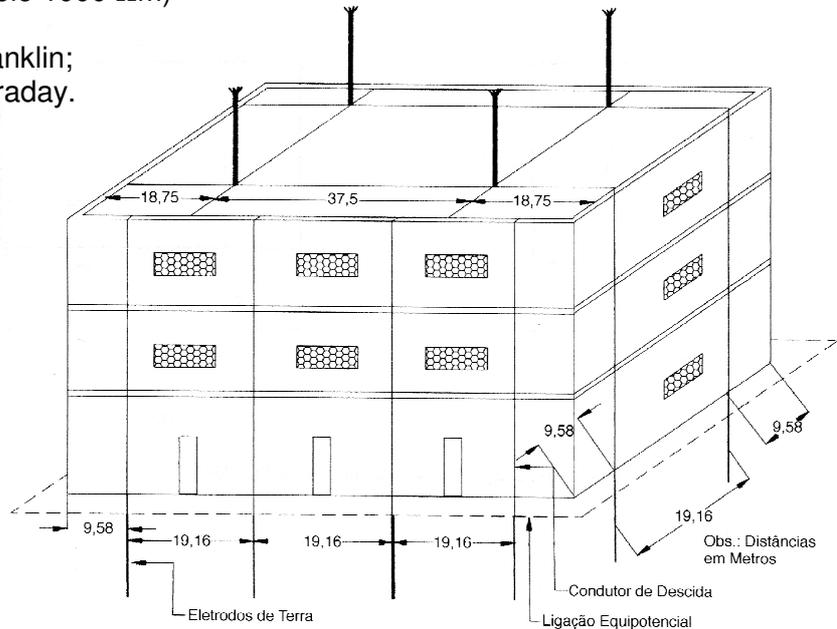
Dimensione, de forma organizada, os barramentos do QGBT do PT, utilizando para o efeito condutores de cobre nu, não pintados, de secção rectangular. O comprimento dos vãos será 1,5 m e a distância entre fases 200 mm. A impedância equivalente vista a montante do PT é de  $j6.25$  pu ( $S_b= 100$  MVA), o tempo de actuação das protecções é de 0,5 s e, no local da instalação,  $I_p=0,6 I_{cc}$ .



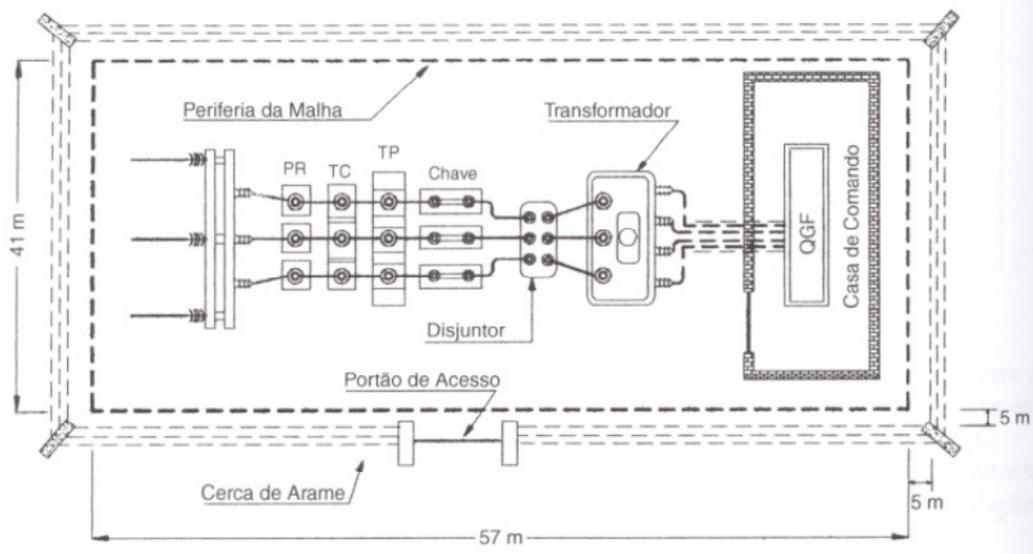
## Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas

1. Considere as dimensões do prédio assinalado na figura e projecte um sistema de protecção contra descargas atmosféricas.  
(Resistividade do solo  $1000 \Omega\text{m}$ )

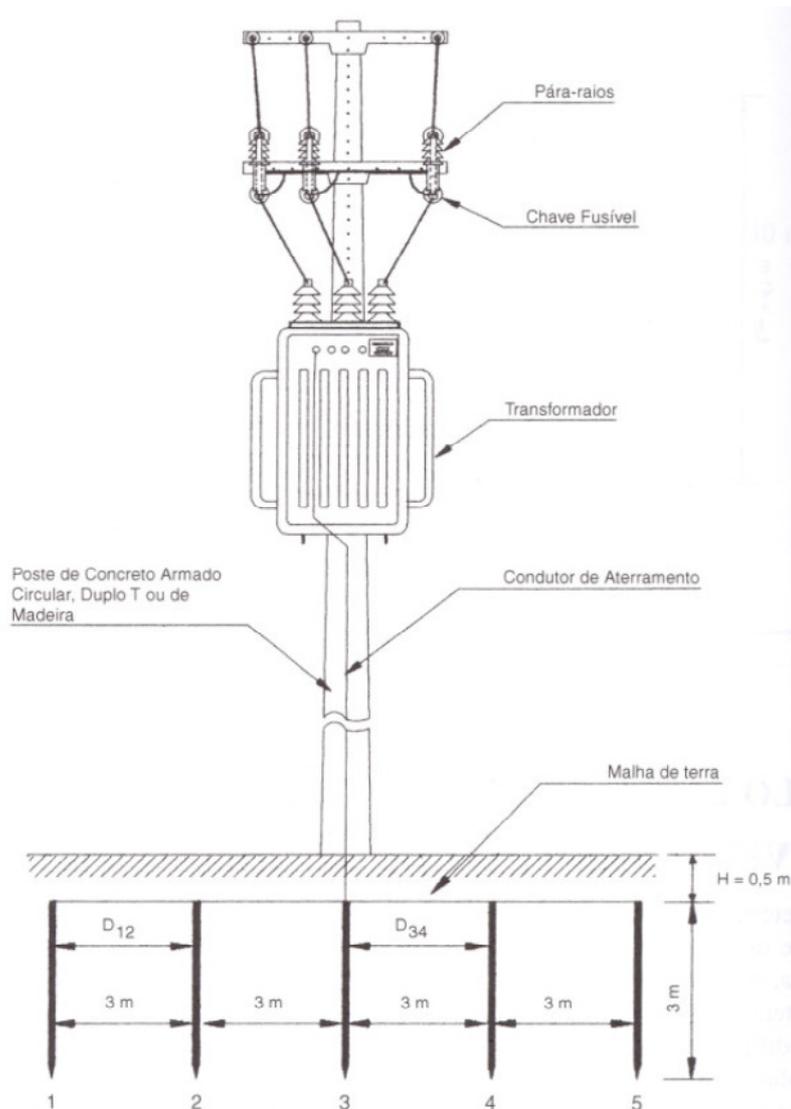
- a) Pelo método de Franklin;  
b) Pelo método de Faraday.



2. Considere uma construção predial comercial de 12 andares (cada andar tem cerca de 3,5 metros de altura) e uma área quadrada de implantação de  $36 \text{ m}^2$ , para a qual se pretende dimensionar um sistema de protecção contra descargas atmosféricas, pelo método de Franklin.
- a) Qual deverá ser altura da ponta captora a instalar no topo do edifício, para garantir um ângulo de protecção de  $25^\circ$ ;  
b) Calcule o raio da base do cone de protecção no solo;  
c) Assumindo que os condutores de descida estão espaçados de 10 metros, calcule o número de condutores de descida que garantem a protecção.
3. Avaliar a necessidade de instalação de um SPDA no caso de um edifício isolado de  $30 \times 20 \times 10 \text{ m}$ . Localização - arredores de Lisboa, local isolado, valor comum normalmente inflamável, ocupado normalmente se necessidade de continuidade de serviço. Avalie o caso desta instalação localizada no Porto
4. Considere a planta da subestação de  $15 \text{ kV}$ , instalada num terreno para o qual se considera uma resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ ) de  $448 \Omega\text{m}$ . A corrente de curto-circuito máxima fase-terra é  $55 \text{ kA}$  e a mínima é de  $871$  com um tempo de duração de  $0,5$  segundos. Calcule a resistência total de uma malha de terra, colocada  $0,5$  metros abaixo da superfície do solo, com eléctrodos verticais de  $3$  metros de comprimento e diâmetro de  $\frac{3}{4}$  polegadas.



5. Calcular a resistência de terra de subestação que contém um conjunto de 5 eléctrodos verticais e alinhados conforme a figura anexa. As hastes são de 3 metros de comprimento e diâmetro de  $\frac{3}{4}$  polegadas. A resistividade aparente do solo é de  $300 \Omega\text{m}$ .



## Análise Económica e Mercados de Energia Eléctrica

1. Pretende-se calcular o custo médio anual (custo unitário) da energia produzida numa central térmica de ciclo combinado alimentada a gás natural, caracterizada pelos seguintes dados:
  - Custo unitário da potência instalada:  $C_p = 600 \text{ €/kW}$
  - Taxa de actualização anual:  $t = 8\%$
  - Vida útil do empreendimento:  $n = 25 \text{ anos}$
  - Utilização anual da potência instalada:  $\mu_{inst} = 7500 \text{ horas}$
  - Custo de operação e manutenção:  $C_{om} = 1,5 \text{ €/MWh}$
  - Consumo específico do calor:  $q_e = 6,545 \text{ GJ/MWh}$
  - Poder calorífico inferior do GN –  $37,8 \text{ MJ/m}^3$
  - Preço do gás natural –  $0,15 \text{ €/m}^3$
  
2. Considere novamente a central térmica do exercício 1. Admitindo a potência instalada de 400 MW e o preço médio de venda de energia produzida de 50 €/MWh, calcule o VAL e a TIR (a preços constantes e ignorando as funções financeira e fiscal), para duas situações de investimento:
  - a) Supondo que o investimento é efectuado todo de uma vez, no ano anterior ao arranque da central;
  - b) Supondo que o investimento é realizado em dois anos.
  
3. São apresentadas ao mercado as propostas de compra e venda de energia eléctrica de 6 compradores e 3 vendedores, para uma certa hora do dia, de acordo com os quadros:

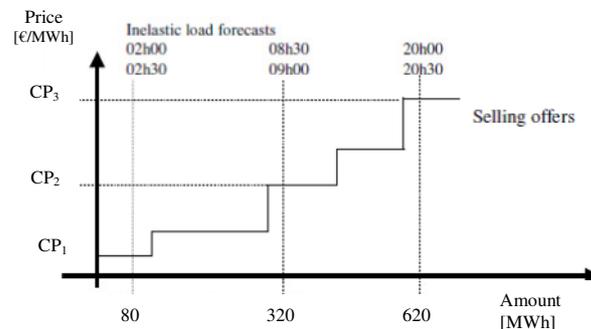
Comprador	Nó	Quantidade (MWh)	Preço (c€/kWh)
1	1	90	-
2	2	90	-
3	3	75	8.5
4	4	100	8.0
5	5	100	9.0
6	6	70	-

Vendedor	Oferta	Quantidade (MWh)	Preço (c€/kWh)
1	1	120	6.8
	2	50	6.9
	3	30	7.3
	4	20	8.0
	5	10	9.0
2	1	140	6.6
	2	60	6.7
	3	30	6.9
	4	20	8.1
	5	10	10.0
3	1	100	6.9
	2	30	7.5
	3	20	7.6
	4	20	8.6

- Calcule o preço do mercado estabelecido para aquele período horário;
- Identifique as propostas aceites e as descartadas;
- Apresente o pré-despacho estabelecido pelo operador do mercado.

4. Considere um pequeno sistema eléctrico com dois produtores de energia que oferecem ao mercado a suas propostas de venda, organizadas na tabela apresentada. Na figura estão ilustradas a curva de oferta (selling offers) e as rectas de procura (elasticidade nula, ou seja, consumidores insensíveis ao preço) para três horários distintos do dia.

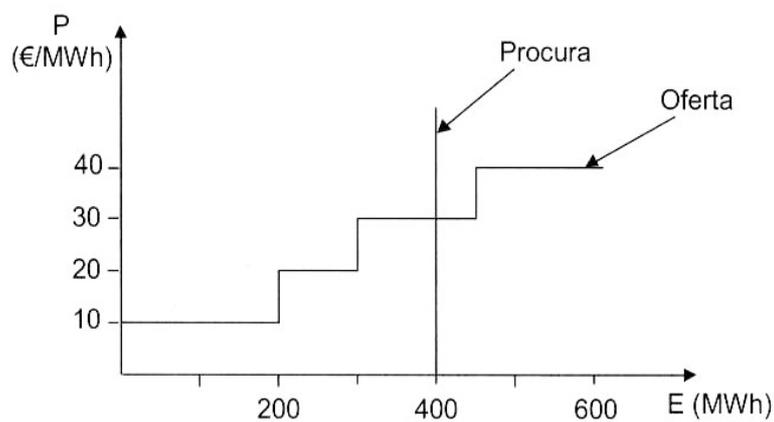
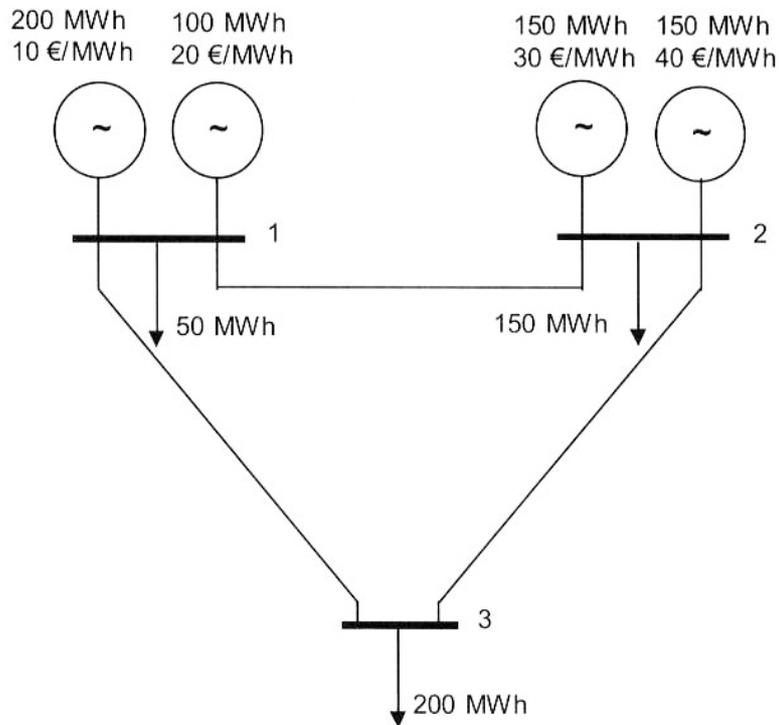
Produtor	Oferta Venda	Quantidade $Q_i$ [MWh]	Preço [€/MWh]
1	$OV_1$	100	$CP_1$
2	$OV_2$	200	X
1	$OV_3$	150	$CP_2$
1	$OV_4$	150	3X
2	$OV_5$	150	$CP_3$



Calcule:

- O custo de produção durante o período das 2:00 às 2:30h, sabendo que o valor de  $CP_1$  é de 10 €/MWh;
- O valor de  $CP_2$ , considerando que no período das 8:30 às 9:00h o custo total de produção foi de 5800€ e que  $X=20$ ;
- O valor de  $CP_3$ , sabendo que no período do final do dia (20:00 às 20:30h) o custo da produção do produtor 2 foi de 5700€;
- O lucro de cada produtor, no período de tempo referente à alínea anterior.

5. Considere o SEE com 3 nós e 4 geradores, com os montantes de energia oferecida, respectivos preços e cargas (com elasticidade nula em relação ao preço).



- Calcule o preço marginal do mercado e o despacho da rede;
- Sabendo que a capacidade de transporte da rede é de 120 MW, verifique as condições de congestionamento e efectue novo despacho, se necessário, diferenciando o preço da energia fornecida em cada nó (preços nodais);
- Calcule o preço do congestionamento.