



EDITAL 02/2026 – PROVA ESCRITA

CAMPUS: Maracanã

Área de Conhecimento: Engenharia Elétrica - Sistemas Elétricos de Potência

Questão 1

A Figura 1.1 mostra um sistema de 7 barras. O sistema possui dois geradores, G1 e G3, com impedâncias na base de cada gerador. Ambos estão com o neutro solidamente aterrados. Os transformadores de cada gerador estão na configuração estrela-delta, sendo delta do lado da linha. Os parâmetros da linha estão na base da linha. Os dados do sistema estão na Tabela 1.1. Os módulos e ângulos das tensões pré-falta nas barras podem ser expressas como $V_k \angle \theta_k$ sendo k o número da barra.

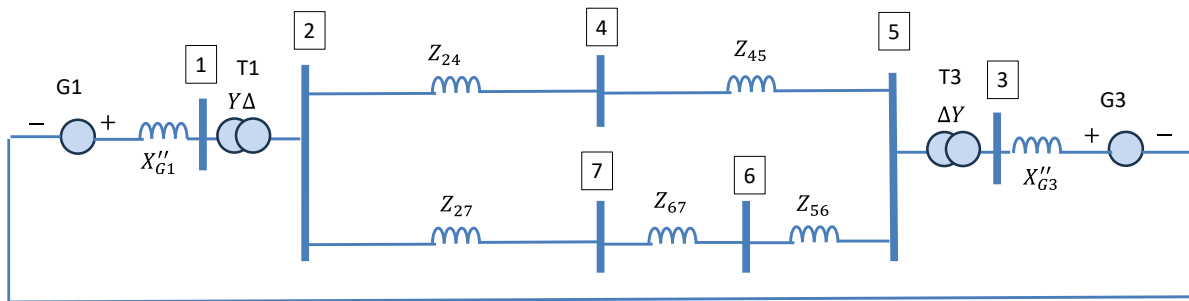


Figura 1.1 – Sistema de 5 barras.

Tabela 1.1 – Dados do Sistema

	REATÂNCIA SUBTRANSITÓRIA	IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA POSITIVA	IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA NEGATIVA	IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO	TENSÃO DE LINHA (KV)	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)
GERADOR G1 Reatância de neutro - X_n	X''_{G1}	$X_{G1}^{(1)}$	$X_{G1}^{(2)}$	$X_{G1}^{(0)}$	V_{G1}	S_{G1}
GERADOR G3 Reatância de neutro - X_n	X''_{G3}	$X_{G3}^{(1)}$	$X_{G3}^{(2)}$	$X_{G3}^{(0)}$	V_{G3}	S_{G3}
TRANSFORMADOR T1		$Z_{T1}^{(1)}$	$Z_{T1}^{(2)}$	$Z_{T1}^{(0)}$	Δ - V_{LINHA} γ - V_{G1}	S_{T1}
TRANSFORMADOR T3		$Z_{T3}^{(1)}$	$Z_{T3}^{(2)}$	$Z_{T3}^{(0)}$	Δ - V_{LINHA} γ - V_{G3}	S_{T3}
LINHAS - n e m são as barras do circuito (1 a 7)		$Zb_n^{(1)-m}$	$Zb_n^{(2)-m}$	$Zb_n^{(0)-m}$	V_{LINHA}	S_{LINHA}

Com base nestes dados resolva os itens a), b) e c) abaixo. É importante notar que para a solução destes itens, deve-se apresentar, de forma detalhada, o passo a passo da dedução matemática, incluindo a modelagem em componentes simétricas, as equações das redes de sequência envolvidas, etc. Ainda, note que não é necessário realizar o passo-a-passo de etapas de cálculo, como integrais ou inversões de matriz, por exemplo. Essas etapas podem ser apenas indicadas, mediante justificativa do que se espera que seja realizado.

- a) Deduza a expressão das correntes de falta (do ponto de falta para terra) subtransitórias de sequência positiva, negativa e zero para uma falta bifásica-terra na barra 7. Considere que não existem

Nº



impedâncias de falta entre as fases e o ponto de falta, mas que existe uma impedância de falta Z_f entre o ponto de falta para a terra. **(0,7 ponto)**

- b) Considerando a mesma falta do item a), determine a constante de tempo (τ) associada ao decaimento da componente contínua (componente DC) da corrente de curto-circuito assimétrica, considerando que a frequência do sistema é 60 Hz. **(0,3 ponto)**
- c) Considere agora o sistema originalmente sem a falta na barra 7. Uma corrente I_{24} circula entre as barras 2 e 4. No instante t_1 , o condutor da fase A da linha entre as barras 2 e 4 abre nos pontos P2 e P4 indicados na Figura 1.2. Apresente as equações que descrevem as variações da tensão na barra 4 de sequência positiva, negativa e zero. **(1,0 ponto)**

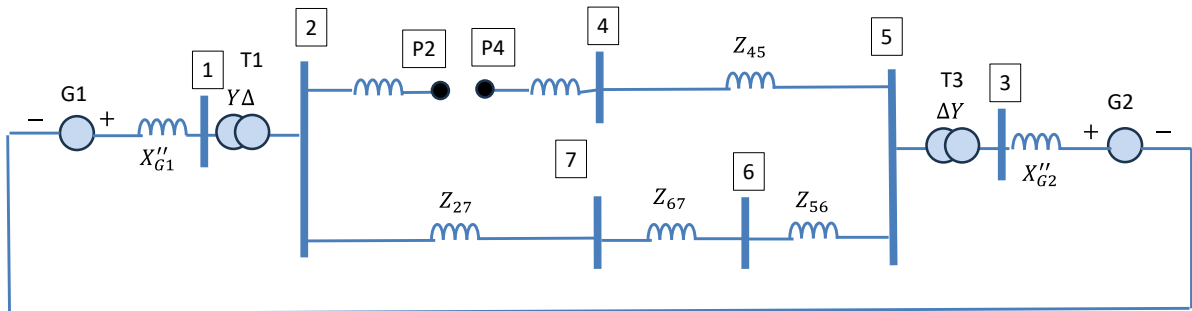


Figura 1.2 – Sistema de 5 barras com abertura da fase A do condutor

Questão 2

Um gerador síncrono, conectado à barra 1, está fornecendo $1+j3.543$ p.u. de potência para o sistema mostrado na Figura 2.1 e tanto a tensão na barra 1 quanto a da barra 3, que tem uma barra infinita conectada a ela, estão com módulo de tensão igual à 1.05 p.u. e o ângulo da tensão na barra 1 (tensão terminal) é de 17.15° .

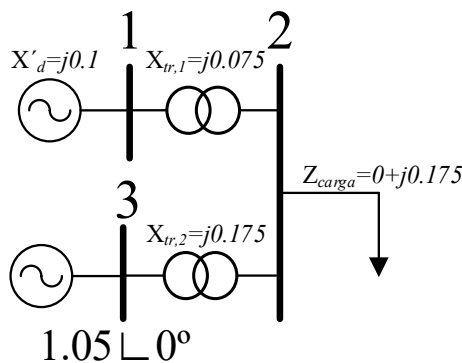


Figura 2.1

Determine:

- a) Equação swing da máquina conectada à barra 1, considerando que esta máquina tem $H=5\text{MJ/MVA}$. **(1,0 ponto)**
- b) Considerando um curto-circuito trifásico na barra 2, calcule o ângulo crítico e o tempo crítico de remoção da falta. **(1,0 ponto)**

Nº



Questão 3 (2,0 pontos)

Determine o estado operativo (magnitudes e ângulos das tensões nas barras) do sistema elétrico de duas barras da Figura 3.1 através do cálculo do Fluxo de Potência. Os dados de barra e de linha são fornecidos nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Utilize a formulação por injeções de potência em coordenadas polares e aplique o método iterativo de Newton-Raphson. Adote uma tolerância de convergência para os resíduos de potência (ΔP e ΔQ) menor ou igual a 0,003 p.u. .

Se necessário, utilize:

$$P_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + B_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}))$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_{km}))$$

$K \rightarrow$ conjunto de nós diretamente ligados a barra k , incluindo a própria barra k

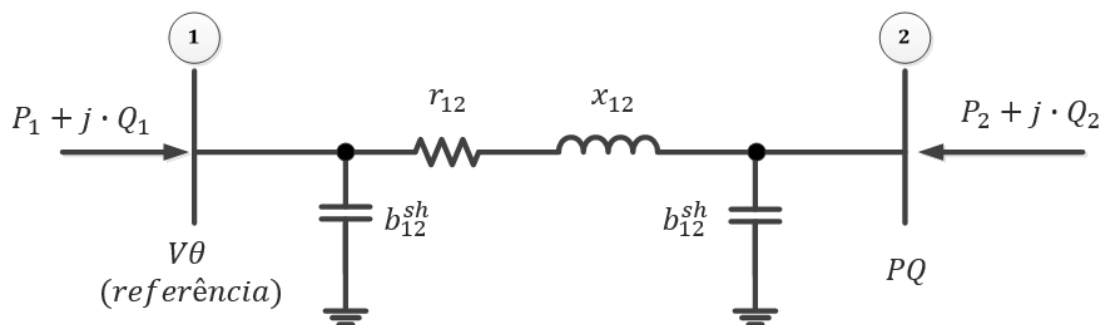


Figura 3.1

Tabela 3.1 – Dados de Barra

Barra	Tipo	P	Q	V	θ
1	$V\theta$	--	--	1,00 p. u.	0°
2	PQ	-0,50 p. u.	+0,15 p. u.	--	--

Tabela 3.2 – Dados de Linha

Barra "k"	Barra "m"	r_{km}	x_{km}	b_{km}^{sh}
1	2	0,1 p. u.	0,4 p. u.	0,03 p. u.



Questão 4

O planejamento e a operação de sistemas elétricos lidam cotidianamente com a transição de uma matriz baseada em usinas concentradas tradicionais (hidrelétricas, termelétricas e nucleares) para uma matriz com forte penetração de fontes renováveis centralizadas (eólica e solar de grande porte) e de Geração Distribuída (GD). Sabendo que as novas fontes renováveis são majoritariamente Fontes Baseadas a Inversor (IBRs), disserte de forma objetiva sobre:

- A diferença fundamental de operação entre as usinas tradicionais e as IBRs. **(1,0 ponto)**
- Explique como a inserção massiva da GD afeta o perfil da demanda líquida do sistema ao longo do dia e qual o grande desafio operativo gerado para os operadores do sistema, principalmente no período do entardecer. **(0,5 ponto)**
- O impacto sistêmico na resposta dinâmica da rede decorrente da substituição de geradores síncronos por IBRs na estabilidade de frequência do sistema após um distúrbio severo. **(0,5 ponto)**

Questão 5

A Figura 5.1 mostra a configuração de uma linha de transmissão trifásica de 345 kV, com as distâncias entre os cabos e solo. Essa linha possui dois cabos para-raios.

O raio do condutor de cada fase é r_{Fase} , o raio do condutor do para-raios é r_{PR} , a resistividade do solo é ρ .

Considerando o método de Carson, pede-se:

- Obtenha as impedâncias serie da linha. A influência do solo deve ser considerada. **(1,0 ponto)**
 - Estruture a matriz primitiva, considerando as impedâncias próprias e mútuas.
 - O método de componentes simétricos deve ser utilizado para obter a matriz de impedâncias de sequencias.
- Obtenha as admitâncias *shunt* da linha. O método de imagens de *maxwell* deve ser considerado. **(1,0 ponto)**
 - As distâncias das imagens devem ser calculadas
 - A matriz de coeficiente de potencial deve ser apresentada
 - Os termos próprios e mútuos devem ser apresentados.
 - O método de componentes simétricos deve ser utilizado para obter a matriz de impedâncias de sequencias.

Observação:

- Os itens devem ser resolvidos apresentando um passo a passo, com descrição e justificativa de cada etapa.
- Caso necessite de algum parâmetro que não esteja indicado na questão, atribua uma variável, descreva o parâmetro e apresente a devida justificativa.

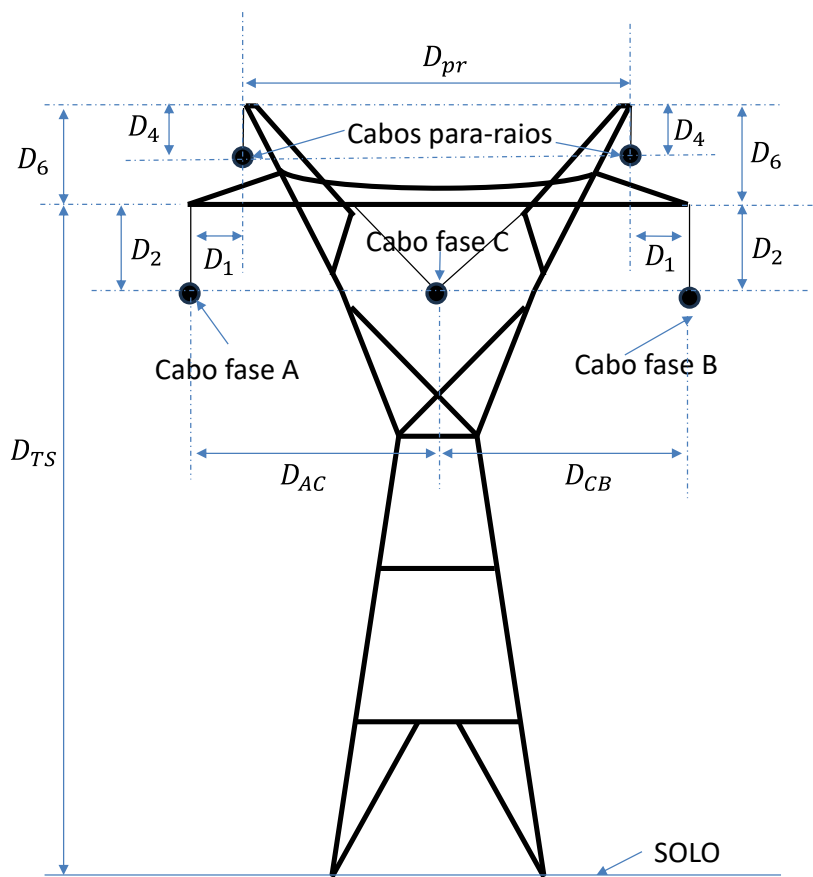


Figura 5.1 – Configuração da Linha de Transmissão