

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO



Sumário

Unidade 1 | Introdução aos sistemas elétricos de potência (SEP)

Seção - 1.1 O sistema elétrico de potência (SEP)

Seção - 1.2 Equipamentos elétricos utilizados em SEP

Seção - 1.3 Subestações de energia

Unidade 2 | Análise do sistema elétrico de potência

Seção - 2.1 Sistema por unidade (PU)

Seção - 2.2 Geradores e cargas utilizados em SEP

Seção - 2.3 Introdução ao fluxo de potência



Sumário

Unidade 3 | Sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC)

Seção 3.1 - Introdução aos sistemas de transmissão em corrente contínua

Seção 3.2 - Sistemas HVDC com elo de corrente

Seção 3.3 - Sistemas HVDC com elo de tensão

Unidade 4 | Automação dos sistemas de distribuição de energia

Seção 4.1 - Motivações para a automação do sistema de distribuição de energia

Seção 4.2 - Monitoramento das redes de distribuição

Seção 4.3 - O sistema de gerenciamento da distribuição e suas funções

CONCEITOS

Geradores no SEP



Geradores

- Conectados ao SEP, **forneendo** potência;
- Garantir o balanço energético;
- Brasil: maior parte é gerador síncrono.
- Enrolamento trifásico no estator e um rotor com um enrolamento que é excitado com corrente continua de forma a criar um campo magnético estático.

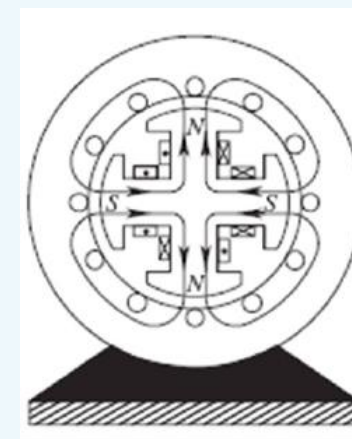
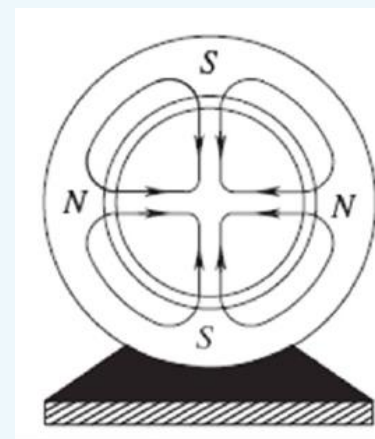


A máquina síncrona é uma máquina rotativa que possui um enrolamento trifásico em seu estator e um rotor com um enrolamento que é excitado com corrente contínua de forma a criar um campo magnético estático.

Os rotores da máquina síncrona podem ser de polos salientes ou polos lisos:

Os rotores de polos salientes se caracterizam por possuir um espaço variável nas faces polares nas quais os enrolamentos são construídos.

Os rotores de polos lisos se caracterizam pela distribuição uniforme do enrolamento por toda a superfície do rotor.

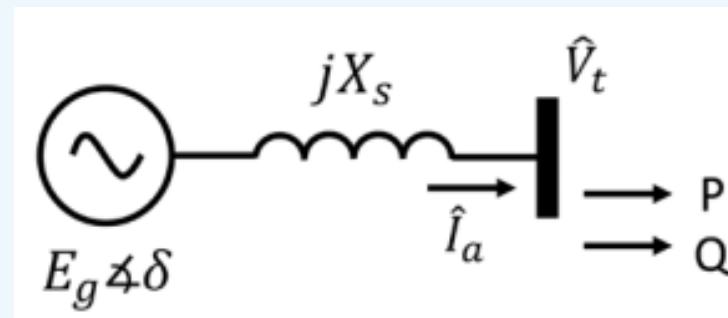
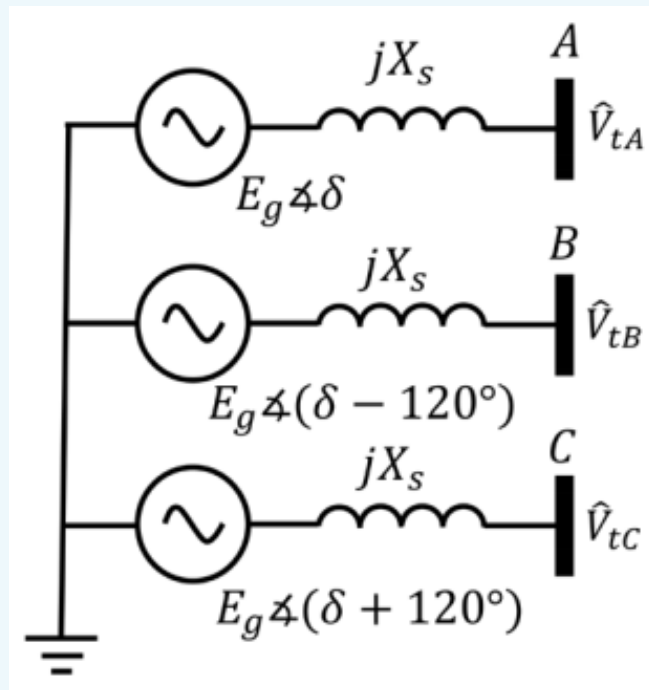


Fonte: Silva, 2019, p. 74.



Modelo de gerador síncrono

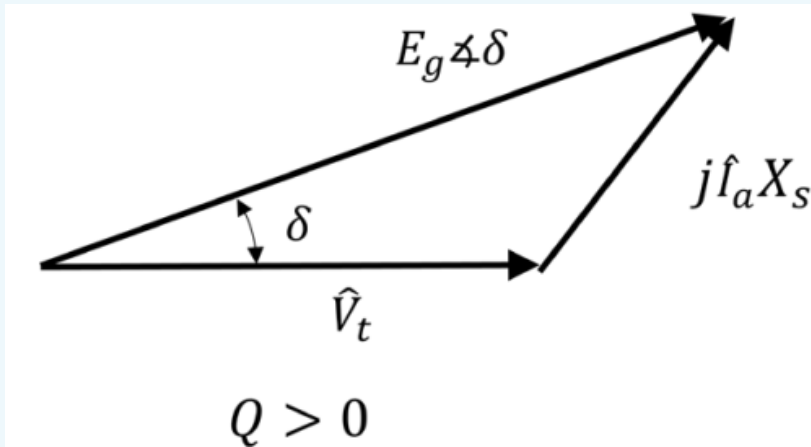
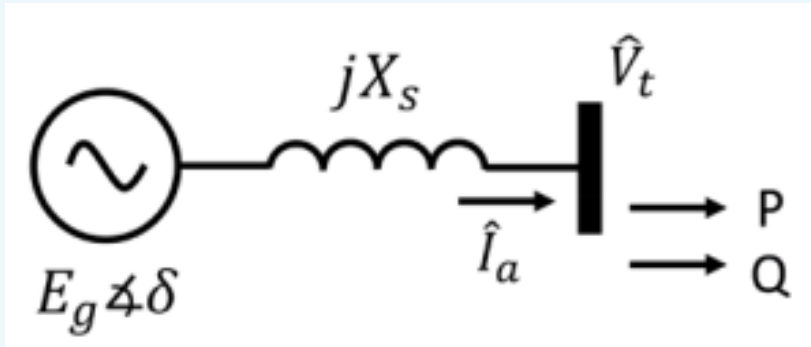
- Utiliza-se o modelo para máquinas de polos lisos



Sistemas equilibrados

Sistemas desequilibrados

Fonte: Silva, 2019, p. 76.

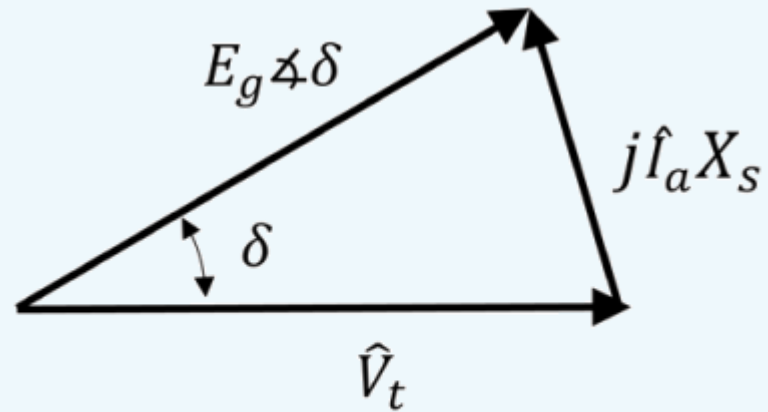


Fonte: Silva, 2019, p. 77.

Sobrexcitado

$$|\hat{V}_t| < E_g$$

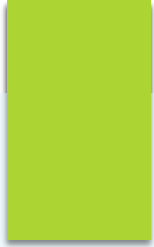
$$\hat{V}_t = E_g \angle \delta - jX_s \hat{I}_a$$



$$Q < 0$$

Subexcitado

$$|\hat{V}_t| > E_g$$





Considerando a tensão terminal como sendo fixa.

A potência por fase é: $S = P + jQ = \hat{V}_t \hat{I}_a^*$



$$\hat{I}_a^* = \left(\frac{\hat{E}_g - \hat{V}_t}{jX_s} \right)^* = \left(\frac{\hat{E}_g}{jX_s} \right)^* - \left(\frac{\hat{V}_t}{jX_s} \right)^* = \left(\frac{E_g \angle (-\delta + 90^\circ)}{X_s} \right) - \left(\frac{|\hat{V}_t| \angle -\theta + 90^\circ}{X_s} \right)$$

$$S = \hat{V}_t \hat{I}_a^* = \frac{E_g V_t}{X_s} \angle (-\delta + 90^\circ) - \frac{V_t^2}{X_s} \angle 90^\circ$$

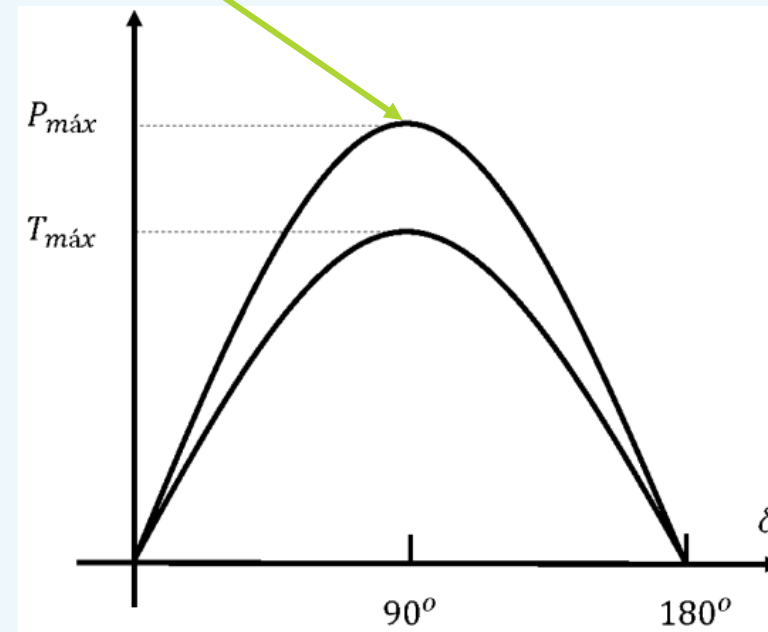
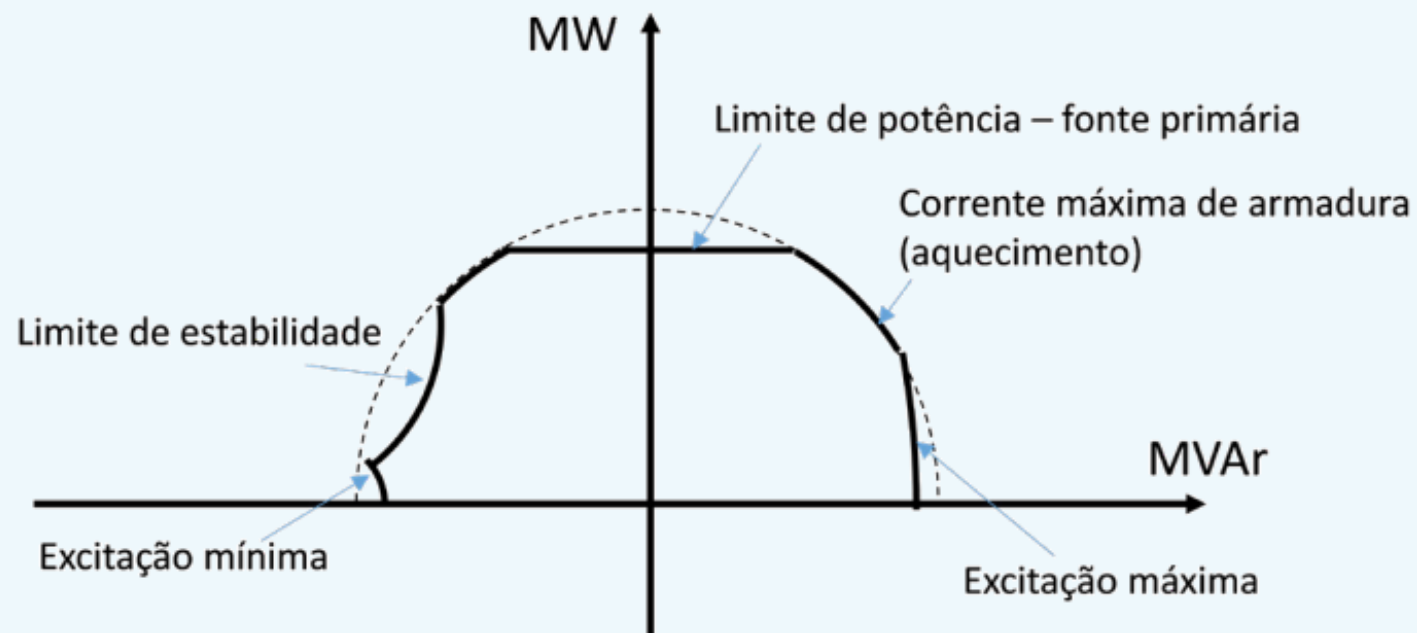
$$P = \frac{E_g V_t}{X_s} \sin(\delta)$$

$$Q = \frac{E_g V_t}{X_s} \cos(\delta) - \frac{V_t^2}{X_s}$$



Limite de estabilidade estático

Curva de capacidade



SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: Identificação
de operação de
gerador

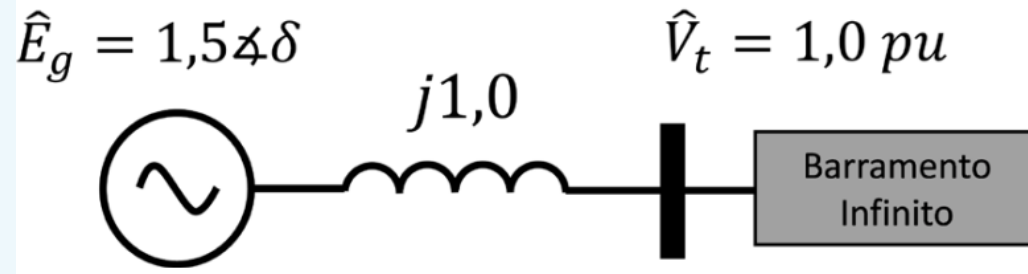


SP: operação de gerador

- ▶ Turbo gerador de polos lisos conectado a um **barramento infinito**.
 - ▶ Inicialmente o gerador opera sobreexcitado, tensão 50% acima.
 - ▶ O *infinite bus* demanda uma pot. ativa de 25% da potência de base do sist.
 - ▶ Reatância síncrona do gerador é 1pu.
- ▶ Máquina opera perto de seu limite estático?
 - ▶ Qual o menor valor de excitação para operação segura?



SP: resolução



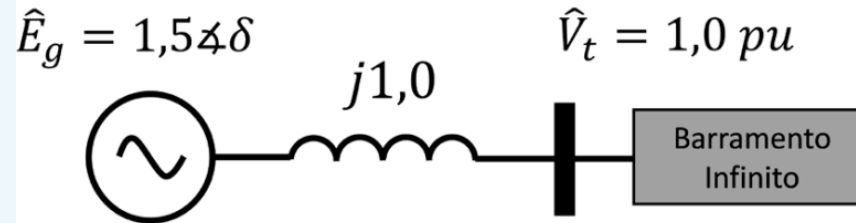
Fonte: Silva, 2019, p. 84.

- ▶ Diagrama do sistema:
- ▶ Relação de potência ativa da máquina com ângulo da carga: $P_g = \frac{E_g V_t}{X_s} \text{sen}(\delta)$
 - Tensão no barramento inf é $V_t = 1,0 \text{ pu}$
 - Excitação da máq. é $E_g = 1,5 \text{ pu}$

$$0,25 = \frac{1,5 \times 1}{1} \text{sen}(\delta) \rightarrow \text{sen}(\delta) = \frac{0,25}{1,5} = 0,1666... \simeq 0,17 \quad P_g = 0,25 \text{ pu}$$



SP: resolução



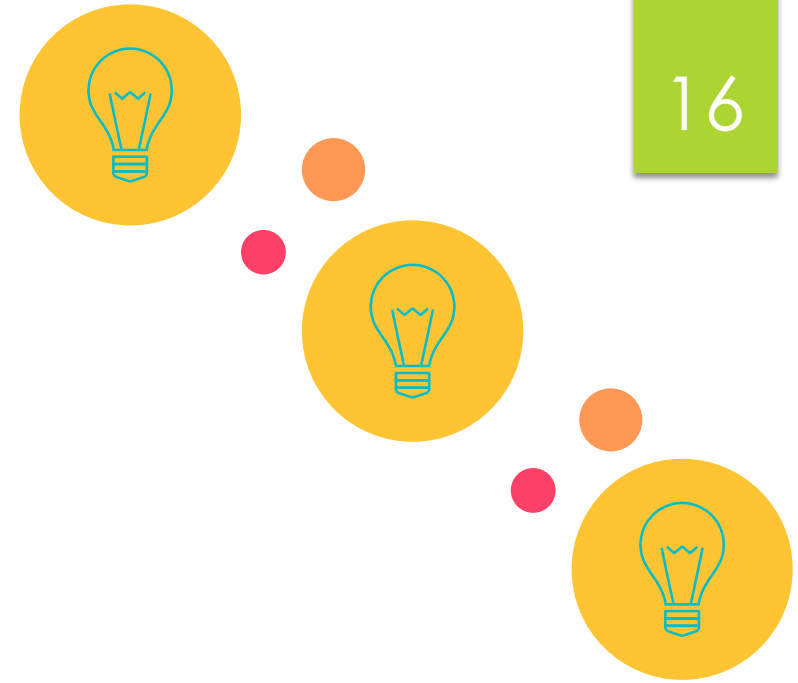
Fonte: Silva, 2019, p. 84.

► $\delta = \text{sen}^{-1}(0,17) = 9,6^\circ \rightarrow$ **Operação segura!**

► Limite de operação \rightarrow ângulo de 90°

$$0,25 = \frac{E_g \times 1}{1} \text{sen}(90^\circ) \rightarrow 0,25 = \frac{E_g \times 1}{1} \rightarrow E_g = 0,25 \text{ pu}$$

EXERCÍCIOS





Um dos principais geradores utilizados em sistemas elétricos de potência são os geradores síncronos. Esses geradores são capazes de produzir uma tensão com uma frequência fixa, sendo necessário para isso ajustar a excitação da máquina e a velocidade de rotação adequadamente.

Assinale a alternativa que contém o nome do elemento que controla a excitação e a localização dele na máquina.

- a) Regulador de sobretensão, rotor.
- b) Regulação de sobretensão, estator.
- c) Excitatriz, rotor.
- d) Excitatriz, estator.
- e) Regulador de velocidade, rotor.



Uma das questões cruciais na operação de geradores síncronos conectados à rede elétrica é com relação à sua estabilidade. Dessa forma, sabe-se que um gerador síncrono é capaz de fornecer potência elétrica até um valor máximo. Considere um gerador que tem reatância síncrona de 0,8 pu e está conectado a um barramento infinito.

Se a excitação da máquina está ajustada em 20% acima do valor nominal, qual deve ser o valor da potência ativa máxima entregue pela máquina, em pu?

- a) 1,2 pu.
- b) 1,3 pu.
- c) 1,4 pu.
- d) 1,5 pu.
- e) 1,6 pu.



Um modelo que apresenta um significado físico, correspondendo a um agregado de cargas que combina os tipos de impedância constante, corrente constante e potência constante é o modelo ZIP, largamente empregado em estudos de fluxo de potência e de estabilidade de tensão. Considere que a tensão em uma determinada barra está 0.1 pu abaixo do valor nominal em uma barra que contém 30% de cargas de impedância constante, 40% de cargas de corrente constante e 30% de cargas de potência constante.

Se, a potência ativa para a tensão nominal é de 0,8 pu, na situação descrita qual será o valor da potência ativa em pu?

a) 0,6544.

b) 0,7224.

c) 0,8345.

d) 0,9334.

e) 0,2334.

CONCEITOS

Cargas no SEP



Modelagem de cargas

- **Impedância constante:** capacitores, aquecedores resistivos, lâmpadas incandescentes...
- Potência na carga varia **proporcionalmente ao quadrado da tensão:**

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R_0} \therefore R_0 = \frac{V_0^2}{P_0} \rightarrow P = \frac{V_k^2(t)}{R_0} = \frac{V_k^2(t)}{V_0^2/P_0} = P_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)^2$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)^2$$



Modelagem de cargas

- **Corrente constante:** fornos a arco, lâmpadas fluorescentes...
- Potência na carga varia **proporcionalmente à tensão:**

$$P_0 = V_0 I_0 \therefore I_0 = \frac{P_0}{V_0} \rightarrow P = V_k(t) I_0 = P_0 \frac{V_k(t)}{V_0}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)$$



Modelagem de cargas

- **Potência constante:** modelo mais utilizado em fluxo de pot.
- Potência na carga **é constante:**

$$P = P_o$$

$$Q = Q_o$$

CONCEITOS

Introdução ao fluxo de potência



Fluxo de potência (fluxo de carga)

- ▶ **Objetivo:** obter as condições de operação da rede;

Análise estática da rede -> regime permanente.

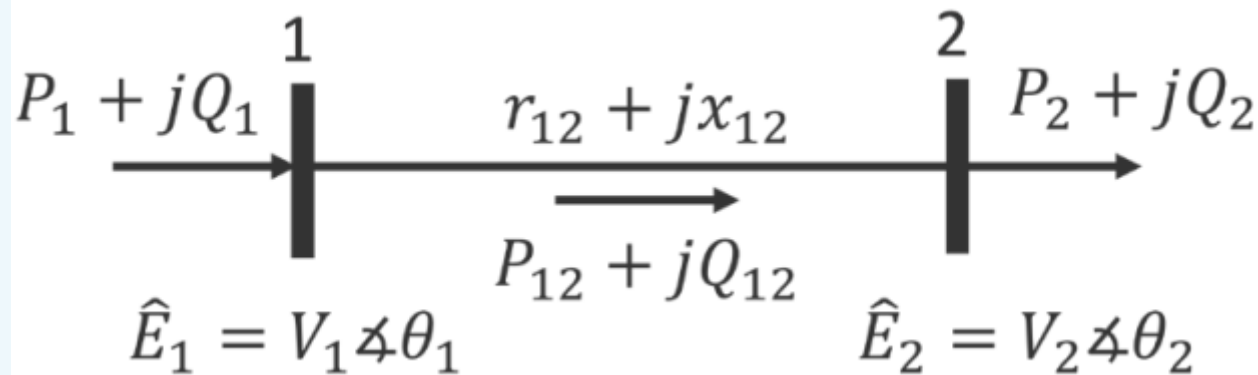
Passos:

- ▶ **1.** Modelamento dos componentes da rede.
- ▶ **2.** Obtenção do sistema de equações (ou inequações) algébricas.
- ▶ **3.** Escolha do método de solução.
- ▶ **4.** Obtenção do estado de operação em regime permanente.



Exemplificando

- Considere o sistema abaixo. Qual a potência necessária na barra 1?



Fonte: Silva, 2019, p. 89.

$$P_2 = 1,0 \text{ pu} \quad Q_2 = 0 \text{ pu} \quad V_1 = 1,0112 \text{ pu} \quad r_{12} = 0,01 \text{ pu} \quad x_{12} = 0,05 \text{ pu}$$



LKT:

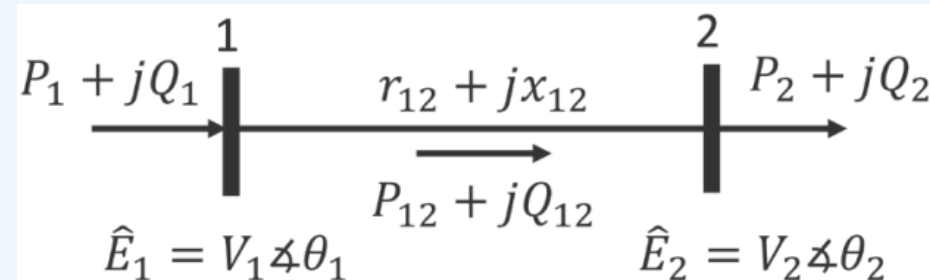
$$\hat{E}_1 = \hat{E}_2 + (r_{12} + jx_{12})\hat{I}_{12} = \hat{E}_2 + (r_{12} + jx_{12})\hat{I}_2 = \hat{E}_2 + (r_{12} + jx_{12})\left(\frac{S_2}{\hat{E}_2}\right)^*$$

Multiplicando por $(\hat{E}_2)^*$:

$$\hat{E}_2^* \hat{E}_1 = (\hat{E}_2)^2 + (r_{12} + jx_{12})S_2^* \rightarrow \hat{E}_2^* \hat{E}_1 = (V_2)^2 + (r_{12} + jx_{12})(P_2 - jQ_2)$$

Considerando $V_1 \angle 0^\circ$ como a referência:

$$V_1 V_2 \angle -\theta_2 = (V_2)^2 + (r_{12} + jx_{12})(P_2 - jQ_2)$$

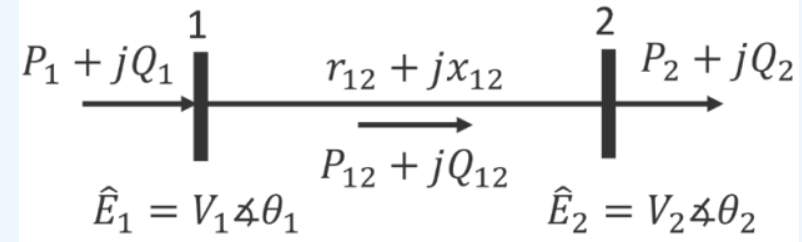


Fonte: Silva, 2019, p. 89.



$$V_1 V_2 \cos \theta_2 = (V_2)^2 + r_{12} P_2 + Q_2 x_{12}$$

$$V_1 V_2 \sin \theta_2 = r_{12} Q_2 - x_{12} P_2$$



Fonte: Silva, 2019, p. 89.

Igualando partes reais e imaginárias:

$$(V_1 V_2 \cos \theta_2)^2 + (V_1 V_2 \sin \theta_2)^2 = \left((V_2)^2 + r_{12} P_2 + Q_2 x_{12} \right)^2 + (r_{12} Q_2 - x_{12} P_2)^2$$

$$V_2^4 + V_2^2 \left[2(r_{12} P_2 + x_{12} Q_2) - V_1^2 \right] +$$

Elevando ambas equações ao quadrado e somando:

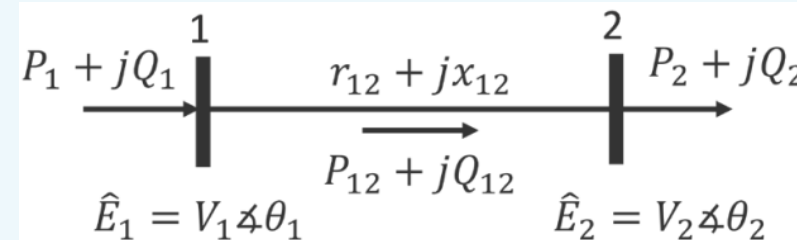
$$+ \left[(r_{12} Q_2 - x_{12} P_2)^2 + (r_{12} P_2 + x_{12} Q_2)^2 \right] = 0$$



$$V_2^4 + V_2^2 [2(0,01 \times 1) - 1,0112^2] + [(-0,05)^2 + (0,01)^2] = 0$$

$$V_2^4 - 1,0025V_2^2 + 0,0026 = 0$$

Substituindo os valores:



Fonte: Silva, 2019, p. 89.

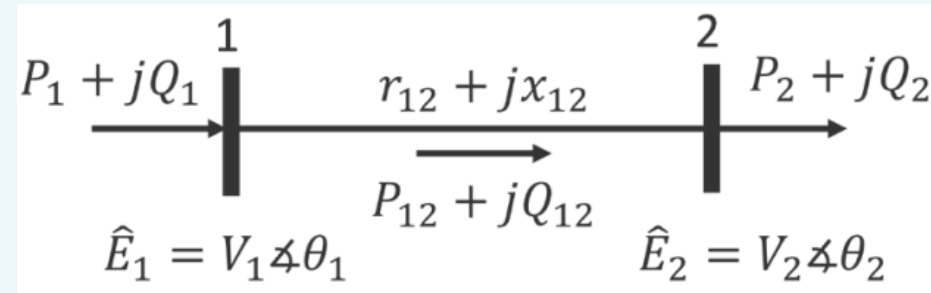
$$V_2 = \{-1; -0,05; 0,05; 1\}$$

← Mais próximo de V_1

$$V_1 V_2 \sin \theta_2 = r_{12} Q_2 - x_{12} P_2 \rightarrow \sin \theta_2 = \frac{r_{12} Q_2 - x_{12} P_2}{V_1 V_2}$$

Substituindo o valor encontrado de V_2 :

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{r_{12} Q_2 - x_{12} P_2}{V_1 V_2} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{-0,05}{1,0112} \right) = -2,8^\circ$$



Fonte: Silva, 2019, p. 89.

A corrente na barra 1 é:

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \left(\frac{P_2 + jQ_2}{\hat{E}_2} \right)^* = \left(\frac{1,0}{1,0 \angle -2,8^\circ} \right)^* = 1,0 \angle -2,8^\circ$$

A potência injetada na barra 1 é:

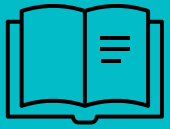
$$S_1 = \hat{E}_1 \hat{I}_1^* = (1 \angle 0)(1 \angle 2,8) = 1 \angle 2,8 = 0,9988 + j0,0488 \text{ pu}$$

Portanto,

$$P_1 = 0,9988 \text{ pu e } Q_1 = 0,0488 \text{ pu}$$

CONCEITOS

Modelagem para
fluxo de potência

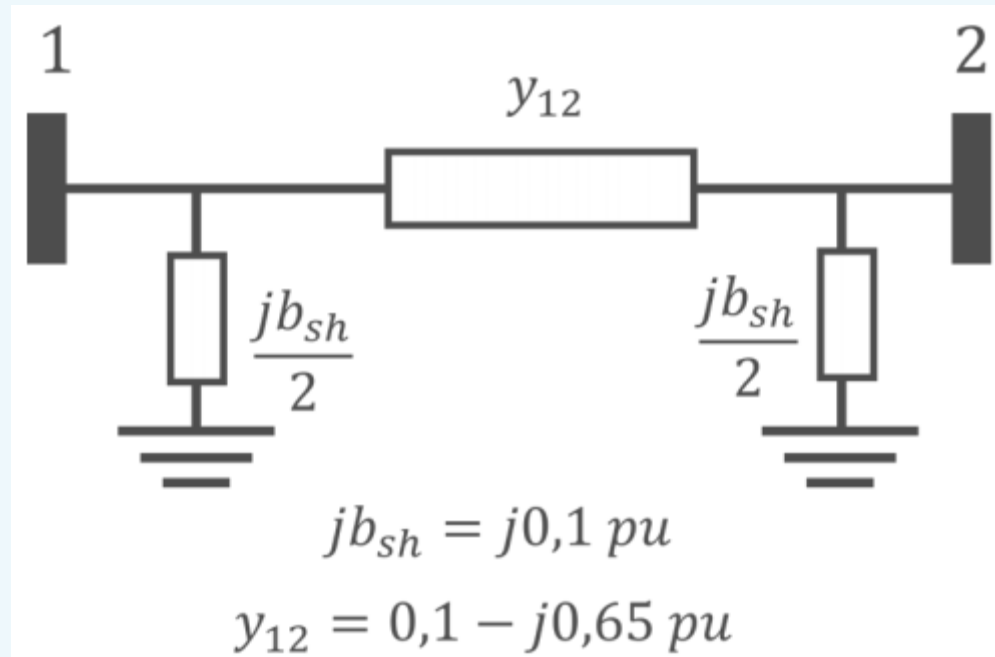


Modelo de sistema

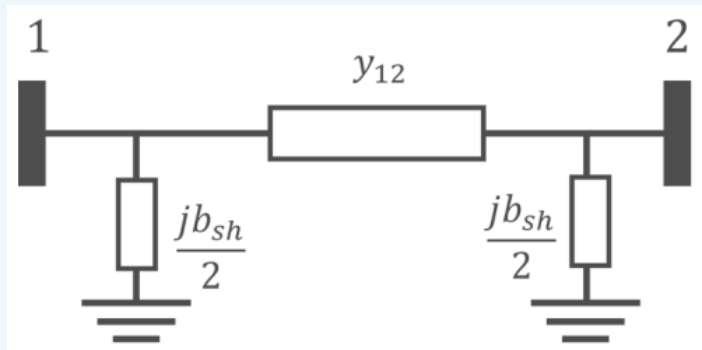
- **Motivação:** sistemas complexos exigem análise numérica e computacional.
- Determinar a matriz de admitância nodal Y_{bus}
 1. A admitância entre um nó k e a ref. (impedância shunt) é considerada no elemento principal da matriz (k, k) ;
 2. As admitâncias conectadas entre os nós k e m -> elemento principal (m, m) e (k, k)
 3. Negativo dessas admitâncias -> (m, k) e (k, m) .



Exemplo: linha de transmissão π



Fonte: Silva, 2019, p. 93.



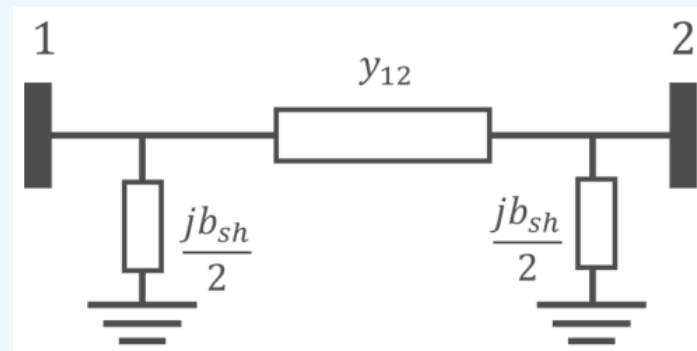
Fonte: Silva, 2019, p. 93.

$$\begin{aligned} Y_{bus} &= \begin{bmatrix} y_{12} + \frac{jb_{sh}}{2} & -y_{12} \\ -y_{12} & y_{12} + \frac{jb_{sh}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1 - j0,65 + j0,05 & -0,1 + j0,65 \\ -0,1 + j0,65 & 0,1 - j0,65 + j0,05 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,1 - j0,65 + j0,05 & -0,1 + j0,65 \\ -0,1 + j0,65 & 0,1 - j0,65 + j0,05 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,1 - j0,60 & -0,1 + j0,65 \\ -0,1 + j0,65 & 0,1 - j0,60 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \vdots \\ \hat{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \\ \vdots \\ \hat{V}_n \end{bmatrix} \Rightarrow [\hat{I}] = [Y_{bus}][\hat{V}] \Rightarrow [\hat{I}] = [G + jB][\hat{V}]$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 0,1 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} -0,60 & 0,65 \\ 0,65 & -0,60 \end{bmatrix} = G + jB$$



Fonte: Silva, 2019, p. 93.



$$\hat{I}_k = Y_{k1}\hat{E}_1 + Y_{k2}\hat{E}_2 + \dots + Y_{kN}\hat{E}_N = Y_{kk}\hat{E}_k + \sum_{m \in K} Y_{km}\hat{E}_m$$

- Em fluxo de **potência**, são especificados **P e Q injetados ou consumidos**.

A corrente na barra k depende do conjunto de barras conectadas:

$$S_k = P_k + jQ_k = \hat{E}_k \hat{I}_k^* = \hat{E}_k \left(Y_{kk}\hat{E}_k + \sum_{m \in K} Y_{km}\hat{E}_m \right)$$

A potência nessa barra é:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$



Tipo de barra	Valores conhecidos	Cálculo necessário
$V\theta$ ou slack	Magnitude de tensão e ângulo	Potência ativa e reativa
PV	Magnitude de tensão e potência ativa	Potência reativa e ângulo
PQ	Potência ativa e reativa	Tensão e ângulo

Fonte: Silva, 2019, p. 95.

- ▶ As barras de um sistema são classificadas de acordo com sua característica;
- ▶ **Necessário** uma barra de referência (*slack bus*);
- ▶ **Slack**: responsável pelo balanço de potência no sistema

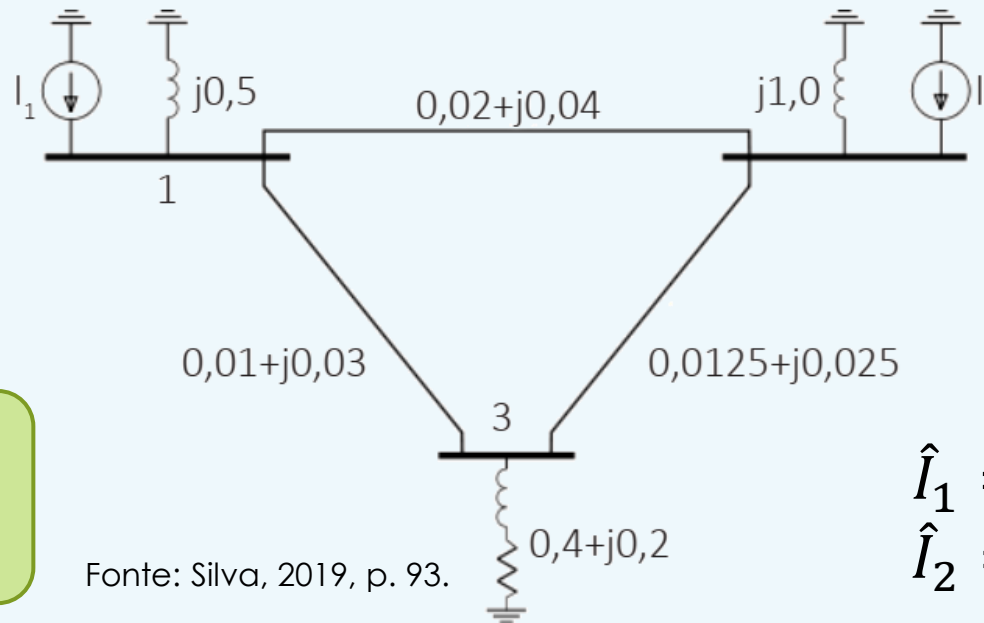
SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: Análise de rede



SP: análise de rede

- **Desafio:** engenheiro responsável por analisar as condições de operação da rede.



Qual a corrente e potência na barra 3?

Fonte: Silva, 2019, p. 93.

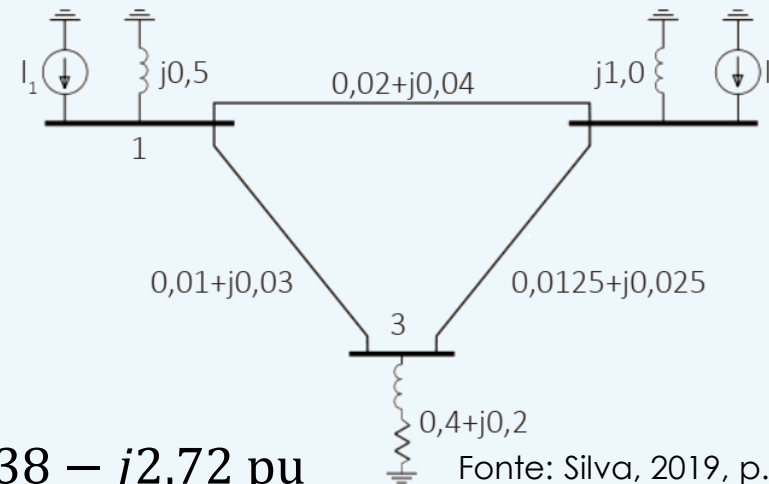
$$\hat{I}_1 = 1,38 - j2,72 \text{ pu}$$
$$\hat{I}_2 = 0,69 - j1,36 \text{ pu}$$



SP: resolução

- Admitância da LT: $Y_{12} = 10 - j20$ pu; $Y_{13} = 10 - j30$ pu; $Y_{23} = 16 - j32$ pu; $Y_1 = -j2$ pu; $Y_2 = -j1$ pu; $Y_3 = 2 - j1$ pu
- Matriz de admitância:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j52 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j53 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 28 - j63 \end{bmatrix}$$



$$\hat{I}_1 = 1,38 - j2,72 \text{ pu}$$

$$\hat{I}_2 = 0,69 - j1,36 \text{ pu}$$

Fonte: Silva, 2019, p. 93.

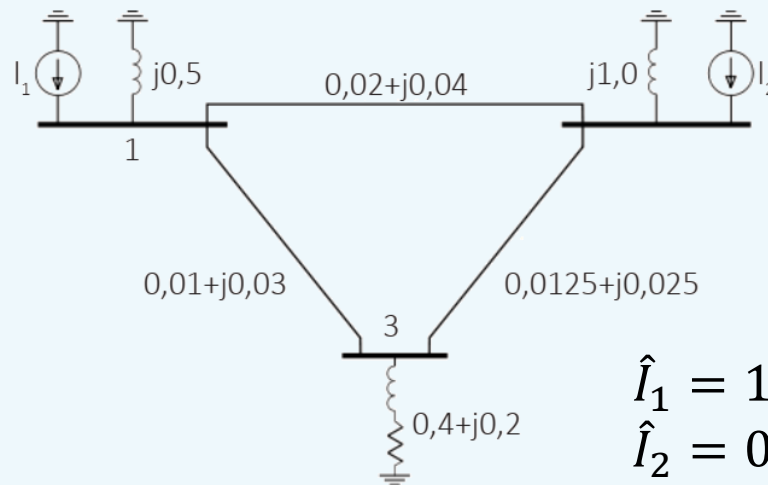


SP: resolução

► Cálculo das tensões:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1,38 - j2,72 \\ 0,69 - j1,36 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 - j52 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j53 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 28 - j63 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$



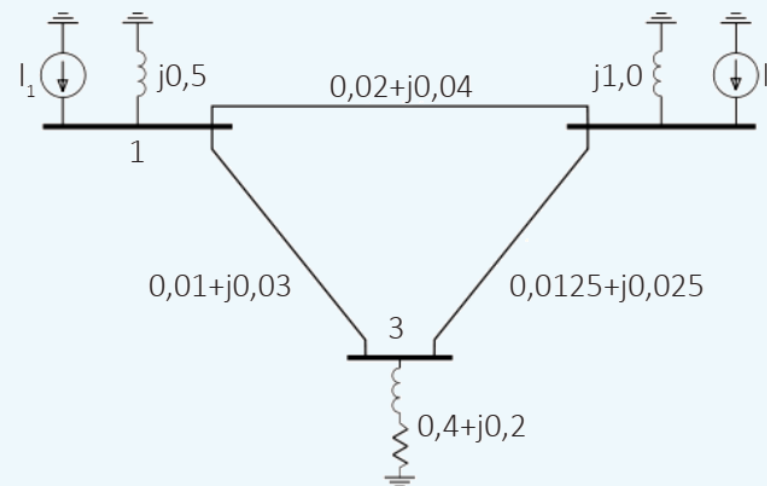
Fonte: Silva, 2019, p. 93.

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= 1,38 - j2,72 \text{ pu} \\ \hat{I}_2 &= 0,69 - j1,36 \text{ pu} \end{aligned}$$



►
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,03 \angle 1,46^\circ \\ 1,02 \angle 0,99^\circ \\ 1,00 \angle -0,02^\circ \end{bmatrix} \text{ pu}$$

Elemento		Valor da Corrente
Cargas	I_{L1}	$0,0524 - j2,0578$
	I_{L2}	$0,0177 - j1,0216$
	I_{L3}	$2,0000 - j1,0006$
Linhas	$I_{12} = -I_{21}$	$0,2448 - j0,0618$
	$I_{13} = -I_{31}$	$1,0828 - j0,6004$
	$I_{23} = -I_{32}$	$0,9171 - j0,4003$



Fonte: Silva, 2019, p. 93.

$$\hat{I}_1 = 1,38 - j2,72 \text{ pu}$$
$$\hat{I}_2 = 0,69 - j1,36 \text{ pu}$$

EXERCÍCIOS





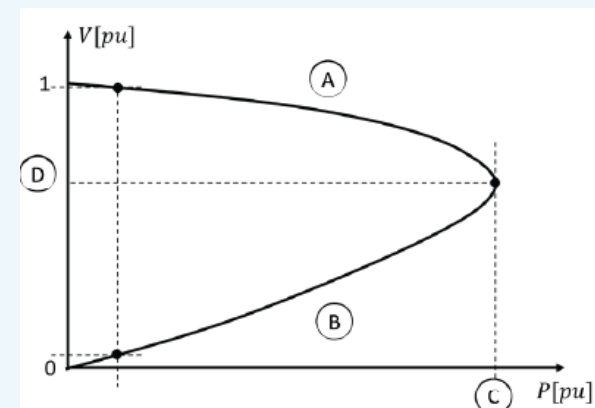
- Os sistemas elétricos de potência são sistemas dinâmicos. Isso significa que as variações em parâmetros da rede podem provocar variações ou alterações de outras grandezas, levando a períodos transitórios que precedem uma nova condição de operação.

Com relação à análise de sistemas de potência, assinale a alternativa correta.

- a) É sempre possível analisar o sistema elétrico de potência fazendo cálculos diretos.
- b) No fluxo de potência fazemos a modelagem estática dos componentes e a análise estática da rede.
- c) A matriz de admitâncias nodal considera a o valor das admitâncias conectadas entre as barras do sistema somente.
- d) A análise do fluxo de potência estático é importante para determinar as características transitórias da rede frente à perturbação.
- e) Os mesmos métodos de fluxo de carga utilizados para simular sistemas de transmissão podem ser usados para rodar fluxos de cargas em redes de distribuição.



► Na análise de sistemas elétricos de potência são encontrados pontos estáveis e instáveis de operação, essas regiões podem ser determinadas fazendo a construção e análise das curvas PV (ou $V \times P$), conforme mostra a figura a seguir:



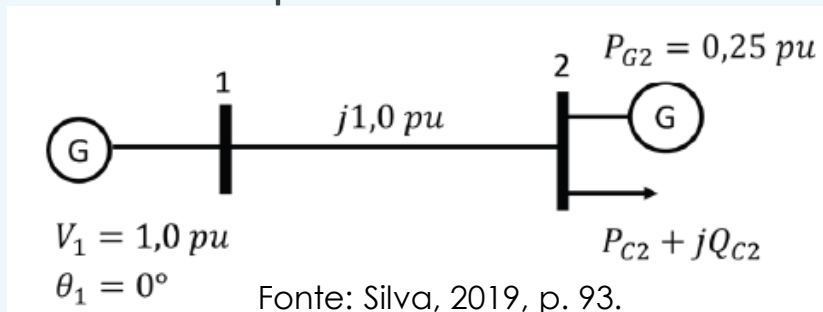
Fonte: Silva, 2019, p. 93.

Assinale a alternativa que denota corretamente os itens indicados por A, B, C e D.

- a) A - Região estável, B - Região instável, C – Tensão crítica, D – Potência crítica.
- b) A - Região instável, B - Região estável, C – Tensão crítica, D – Potência crítica.
- c) A - Região instável, B - Região estável, C – Potência crítica, D – Tensão crítica.
- d) A - Região estável, B - Região instável, C – Potência crítica, D – Tensão crítica.
- e) A - Região instável, B - Região estável. C – Potência de operação, D – Tensão de operação.



- Considere o sistema elétrico de potência dado na figura a seguir. Esse sistema é formado por dois geradores que injetam potência em uma linha de transmissão. A barra 2 atende uma carga e possui um gerador injetando 0,25 pu de potência ativa. A barra 1 é tomada como referência, e a barra 2 opera com uma tensão de 1 pu e um ângulo de -30 graus.



Com base nessas informações, a potência ativa e reativa na carga em pu são, respectivamente:

- a) -0,5 e -1,87.
- b) -1,87 e -0,5.
- c) -1,87 e -0,75.
- d) -0,75 e -1,87.
- e) -0,5 e -0,75.

INTERVALO

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO