

# PRODUÇÃO, TRANSPORTE, DISTRIBUIÇÃO E UTILIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

## ▣ TENSÃO ALTERNADA TRIFÁSICA

EUROPA: 50 Hz

USA, Brasil: 60 Hz

## ▣ TENSÕES:

PRODUÇÃO: 6 a 25 kV

TRANSPORTE: 150, 220, 400 kV [MAT]

[outros países: 750, 1000, 1200 kV]

DISTRIBUIÇÃO: 110, 60 kV [AT]

30, 15 kV [MT]

[outros países: 20 kV]

400/230 V [BT]

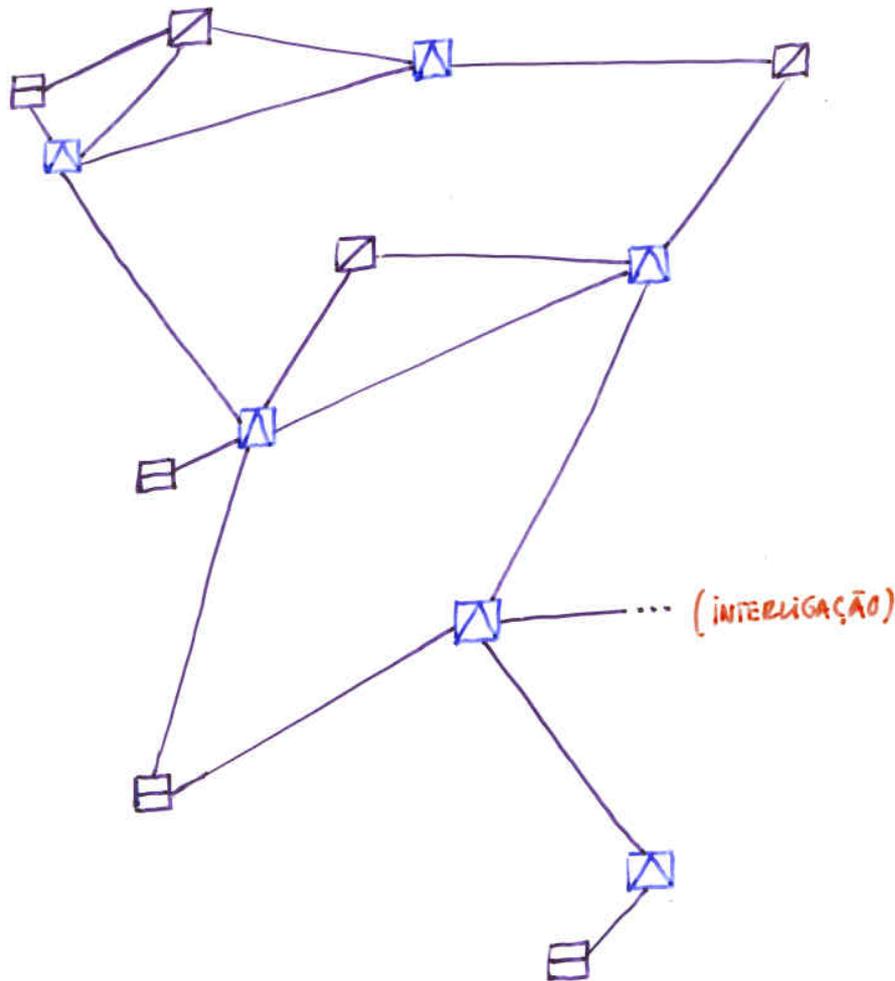
[outros países: 400/230 V, 190/110 V, 415/240 V]

UTILIZAÇÃO: 400/230 V

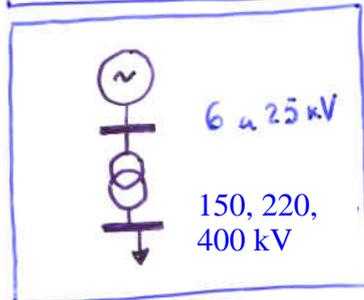
6 kV, 10 kV [indústria]

C.C. [três]

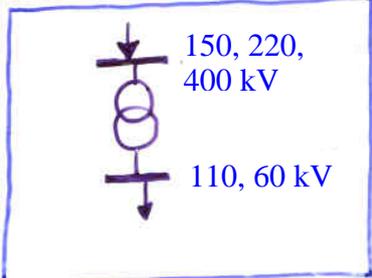
# PRODUÇÃO E TRANSPORTE



CENTRAIS  



SUBESTAÇÕES MAT/AT 

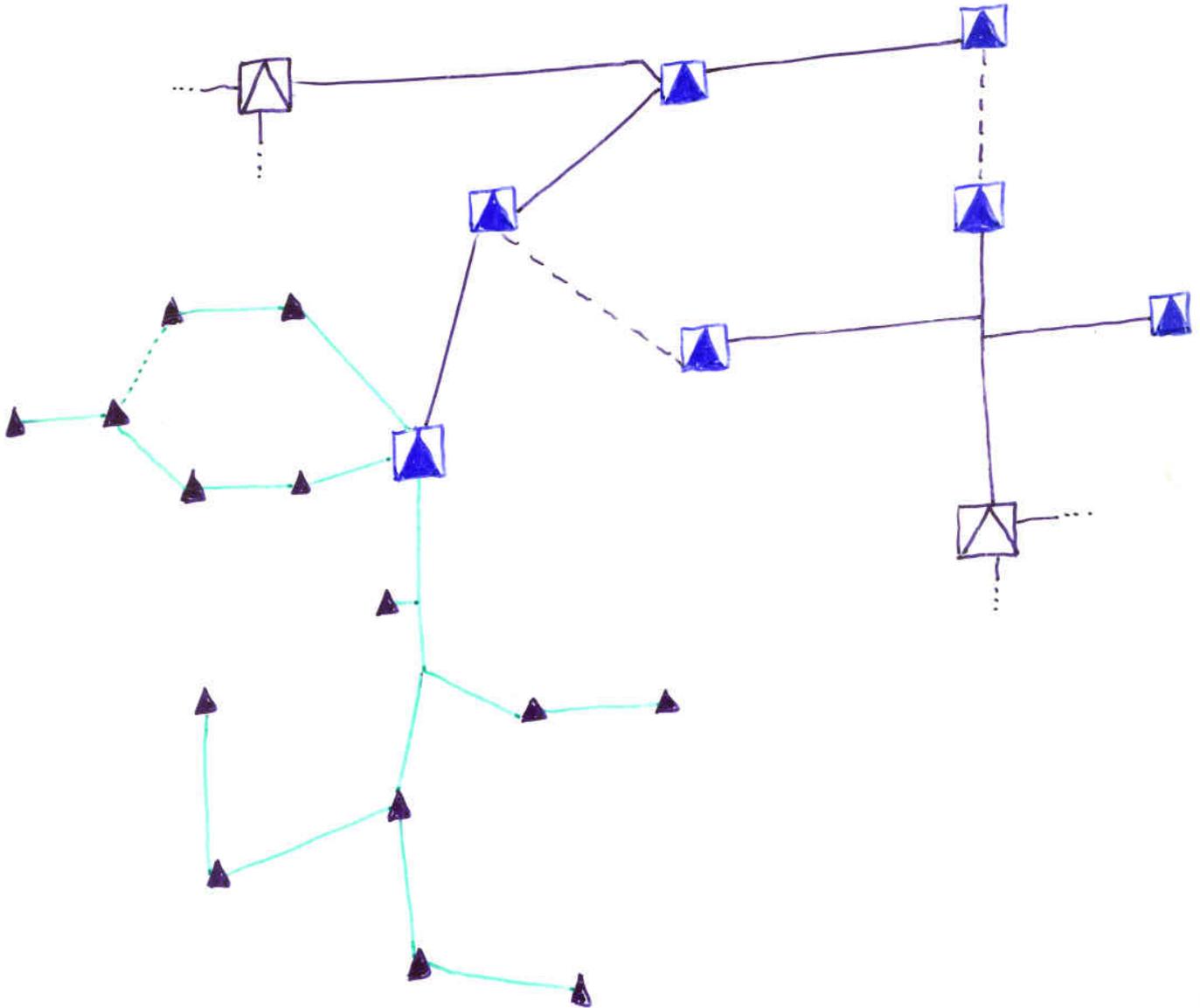


REDE MAT

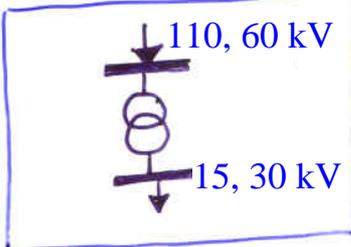
- Linhas aéreas
- Apoios metálicos
- Condutores Al-Aço
- Rede emalhada
- Cargas nodais

ESQUEMAS MUITO SIMPLIFICADOS: Os elementos indicados podem ser múltiplos, e existem aparelhos de corte e proteção, não representados

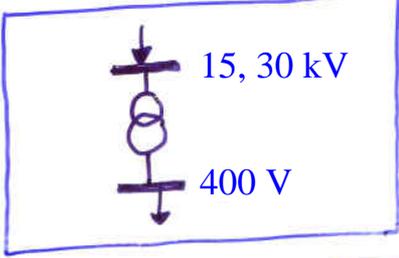
# DISTRIBUIÇÃO AT e MT



Subestações AT/MT



Postos de Transformação



Consumidores AT e MT: Grandes consumidores com cargas importantes. Indústria, Minas, Transportes com tração eléctrica

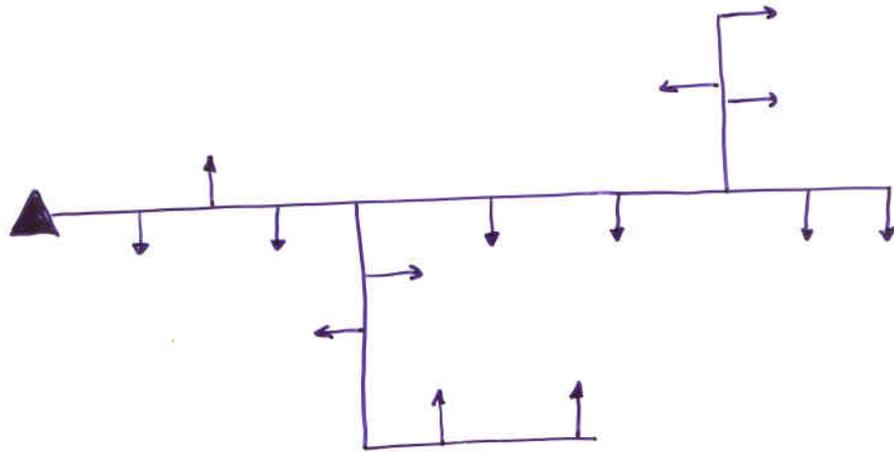
REDE AT —

Linhas aéreas  
Apoios metálicos/bastão.  
Emalhada / Anel Aberto  
Cargas nodais

REDE MT —

Aérea [rural] / Subter. [urb.]  
Anel Aberto / Radial  
Cargas nos ramos

# DISTRIBUIÇÃO BT



Consumidores BT

Habitagens  
Escritórios  
Comércio  
Pequena Indústria  
...

REDE BT

Linhas aéreas { Condutores nus } RURAL  
                  { Cabo isolado } URBANO  
Rede subterrânea  
Rede radial  
Cargas nos ramos

Os grandes consumidores (MAT, AT, MT) têm redes próprias de distribuição, semelhantes às redes públicas

No caso do TRANSPORTES A TRACÇÃO ELÉCTRICA, as redes incluem subestações, em particular subestações rectificadoras

As redes de distribuição nos edifícios têm um nome próprio: instalações colectivas

Na evolução dos sistemas de energia tem vindo a surgir, com importância crescente, a produção distribuída ligada às redes de distribuição MT e AT, seja a Cogeração Industrial, seja como aproveitamento de energias renováveis (mini-hídrica e eólica). Mais recentemente, esta tendência tem-se dirigido à BT, onde se espera um grande crescimento da micro-geração (micro-turbinas, células de combustível, pequenas eólicas).

## ESTADOS DE FUNCIONAMENTO DO S.E.E.

No funcionamento do S.E.E. há que ter em conta:

- garantir níveis de qualidade de serviço:

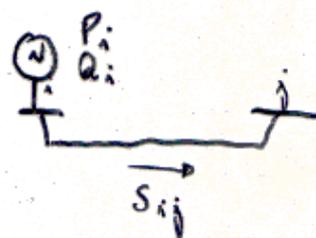
$$f = 50 \text{ Hz}$$
$$U \approx U_{\text{nominal}}$$

- limitações físicas de operacionalidade dos componentes:

$$S_{ij} < S_{ij}^{\text{max}}$$

$$P_i < P_i^{\text{max}}$$
$$Q_i < Q_i^{\text{max}}$$

$$U_{i \dots j} < U_{i \dots j}^{\text{max}}$$
$$U_{i \dots j} > U_{i \dots j}^{\text{min}}$$



Em termos  
formais

CONJUNTO DE  
RESTRICÇÕES:

$$h(X, U) = 0 \quad (I)$$

restrições de  
igualdade

$$g(X, U) \leq 0 \quad (D)$$

restrições de  
desigualdade

onde:

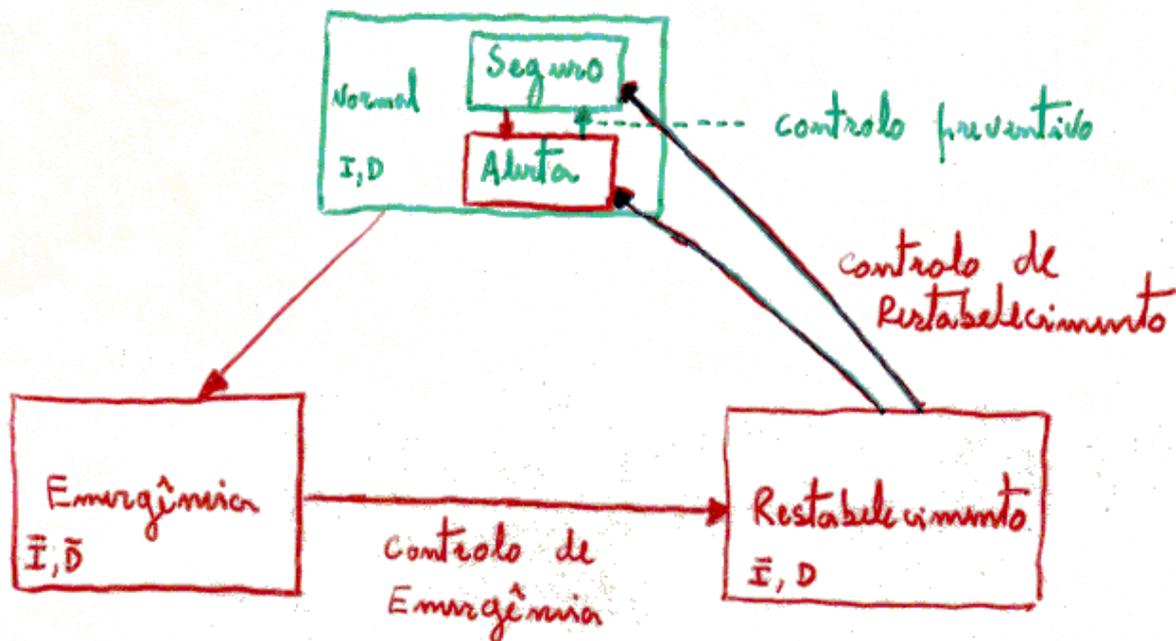
X - vector de estado

U - vector de variáveis independentes

- Restrições de igualdade  $\Leftrightarrow$  Produção Total = Consumo + perdas
- Restrições de desigualdade  $\Leftrightarrow$  Trânsitos de potência nos links e níveis de tensão nos nós estão dentro de limites aceitáveis



### Diagrama de Estados



- Finke e Carlsson, DyLiaco
- F. Wu

Esta conceptualização do funcionamento do S.E.E. envolve uma função: **Análise de Segurança de Exploração**

**Segurança:** Robustez do sistema para enfrentar perturbações  
 → Margens de Segurança

**Estado Seguro:** verifica certas margens de segurança  
**Estado Alerta:** não garante os graus de segurança desejados

## FUNCIONAMENTO DO S.E.E. : Principais Problemas

O planeamento e exploração do S.E.E. envolvem a resolução de alguns problemas:

### • Fluxo de Cargas

Objectivo:

- Conhecer os valores das tensões em cada nó;
- Determinar os trânsitos de potências em cada ramo - linhas, transformadouros
- .....
- .....

### • Curto - Circuitos

Objectivo:

- Conhecer as correntes e potências de c.c. → dimensionar eq. protecção;
- Conhecer as tensões nos nós durante o período de defeito;
- Determinar as correntes de c.c. nos ramos.

### • Previsão de Cargas

Objectivo:

- Estimar os consumos modais para estabelecer estratégias de exploração.

- Estimação de Estado

Objectivo:

- Descrever de forma completa e coerente o sistema, a partir de informações eventualmente afectadas de erros;
- Detectar falsas medidas;
- Controlar o sistema;

- Despacho Óptimo Económico

Objectivo:

- Definir a melhor estratégia de produção de energia, por forma a minimizar os custos económicos de produção.

- Análise de Segurança

- Estabilidade

Objectivo:

- Avaliar o comportamento dinâmico (evoluções temporais) do sistema quando sujeito a perturbações;
- Refinar estratégias de controlo.



SIMULAÇÃO DIGITAL + GRANDES MEIOS DE CÁLCULO

# POTÊNCIA ACTIVA E REACTIVA



$$v = v_{\max} \sin \omega t$$

Volts

$$i = i_{\max} \sin (\omega t - \varphi)$$

Ampères

A potência instantânea ...

$$p = v i = v_{\max} i_{\max} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi)$$

Watts

Recordando a  nometria

$$\begin{aligned} \rightarrow \sin \alpha \sin \beta &= \frac{1}{2} [\cos (\alpha - \beta) - \cos (\alpha + \beta)] \\ \rightarrow \cos (\alpha - \beta) &= \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \end{aligned}$$

$$p = \frac{v_{\max} i_{\max}}{2} [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]$$

$$|V| = \frac{v_{\max}}{\sqrt{2}} \quad |I| = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}}$$

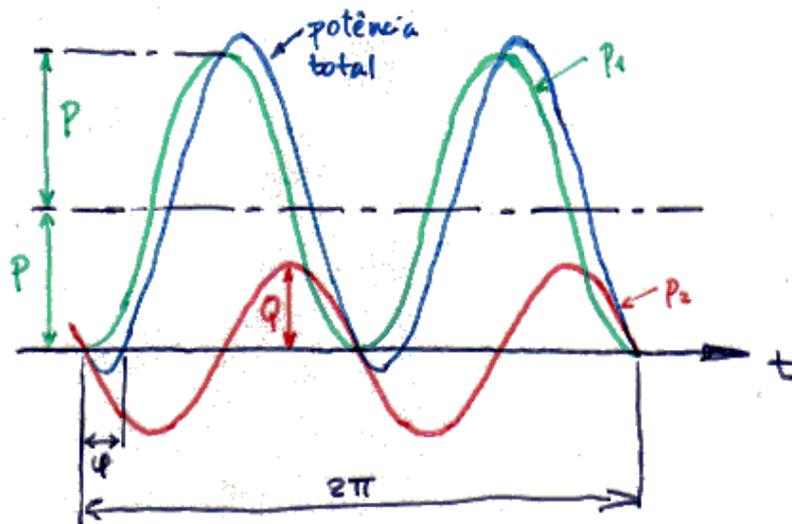
$$p = \underbrace{|V||I| \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)}_{\text{nunca fica negativo}} - \underbrace{|V||I| \sin \varphi \sin 2\omega t}_{\text{tem valor médio nulo}}$$

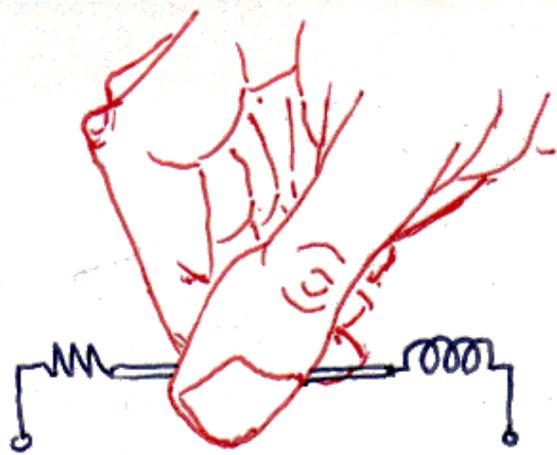
$$P = |V||I| \cos \varphi \quad \leftarrow \text{POTÊNCIA ACTIVA}$$

$$Q = |V||I| \sin \varphi \quad \leftarrow \text{POTÊNCIA REACTIVA}$$

$$p = \underbrace{P (1 - \cos 2\omega t)}_{P_1} - \underbrace{Q \sin 2\omega t}_{P_2}$$

Watts





Pegemos num circuito RL

Se a tensão for

$$v = \sqrt{2} |V| \sin \omega t$$

e a corrente

$$i = \sqrt{2} |I| \sin(\omega t - \varphi)$$

e' também

$$|I| = \frac{|V|}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\text{e } \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

Portanto

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

As potências activa e reactiva podem exprimir-se como

$$P = \frac{|V|^2 R}{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$Q = \frac{|V|^2 \omega L}{R^2 + (\omega L)^2}$$

A energia magnética armazenada na indutância é'

$$W_m = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} L \left[ \sqrt{2} \frac{|V|}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \right]^2$$

A variação desta energia é'

$$\frac{dW_m}{dt} = 2 \omega L \frac{|V|^2}{R^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t - \varphi) \cos(\omega t - \varphi)$$

$$= \omega L \frac{|V|^2}{R^2 + (\omega L)^2} \sin 2(\omega t - \varphi)$$

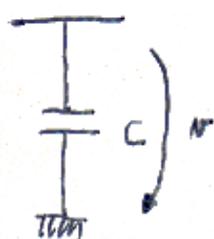
$$\boxed{\frac{dW_m}{dt} = Q \sin 2(\omega t - \varphi)}$$

$$\text{se } \varphi = \pi/2$$

$$\rightarrow -Q \sin 2\omega t$$

Que concluir?

No caso das capacidades a situação é semelhante



$$v = \sqrt{2} |v| \sin \omega t$$

A energia associada ao campo elétrico existente entre as placas da capacidade  $C$  é dada por:

$$\begin{aligned} W_e &= \frac{1}{2} C v^2 \\ &= \frac{1}{2} C 2 |v|^2 \sin^2 \omega t \end{aligned}$$

A variação temporal desta energia - potência - é:

$$\begin{aligned} \frac{dW_e}{dt} &= 2 C |v|^2 \omega \sin \omega t \cos \omega t \\ &= \omega C |v|^2 \sin 2\omega t \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{dW_e}{dt} = Q \sin 2\omega t}$$

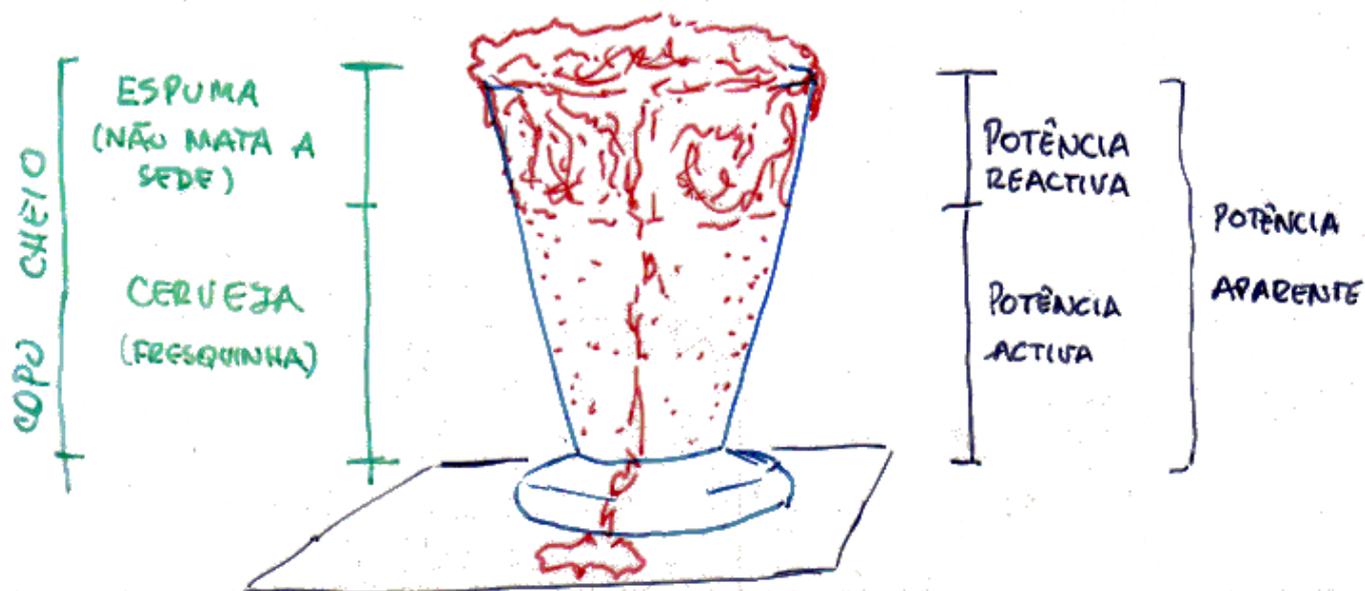
pois

$$\omega C |v|^2 = Q$$

# CONCLUSÕES IMPORTANTES

1. A potência activa corresponde ao valor médio de  $p_i$  e à potência útil transmitida. A sua grandeza depende fortemente do factor de potência  $\cos\phi$ .
2. A potência reactiva é o valor de pico da componente que oscila "para a frente e para trás" com valor médio nulo e, portanto, resultando inútil para a produção de trabalho.
3. A energia armazenada no campo magnético das indutâncias ou no campo eléctrico das capacitâncias varia a um ritmo que se caracteriza por uma frequência  $2\omega$ , um valor médio nulo e um valor máximo igual a Q - potência reactiva.

PARA OS DE COMPREENSÃO LENTA ...



# ENERGIA ACTIVA E REACTIVA

REGRA TARIFÁRIA - Consumo de energia reactiva não pode exceder uma certa percentagem do consumo de energia activa.

ACTUALMENTE: Limite de 40%  $\rightarrow \text{tg } \varphi \leq 0,4$

SANÇÃO - A energia reactiva em excesso é debitada a um certo preço.

EXAGEROS - O fornecimento de energia reactiva à rede nas horas de vazio **pode** ser facturado.

## CORRECÇÃO DO FACTOR DE POTÊNCIA

CASO - Consumo de 2400 kWh e 1800 kvarh em 24h.

$$P = \frac{2400}{24} = 100 \text{ kW}$$

$$Q = \frac{1800}{24} = 75 \text{ kvar}$$

$$\frac{Q}{P} = 0,75 > 0,4$$

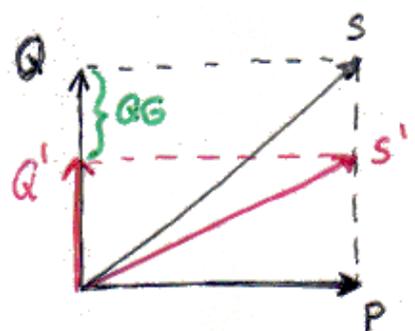
Que fazer?

$$Q' = 0,4 \cdot P = 40 \text{ kvar}$$

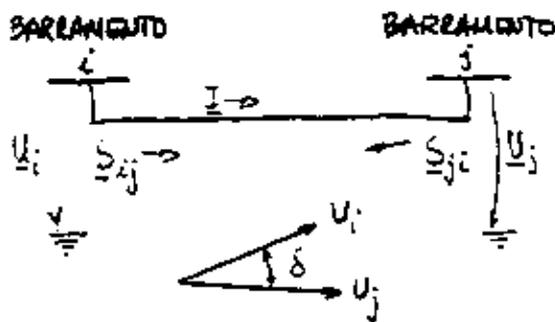
$$Q_G = Q - Q' = 75 - 40 = \underline{\underline{35 \text{ kvar}}}$$

É necessário produzir localmente

35 kvar



## 2.9.2. LIMITE DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE UMA LINHA



### PRESSUPOSTOS

1. As tensões  $\underline{U}_i$  e  $\underline{U}_j$  são conhecidas (valores por fase)
2. A linha tem uma impedância  $\underline{Z} = R + jX$
3. A corrente  $\underline{I}$  é constante

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_i - \underline{U}_j}{\underline{Z}}$$

$$\underline{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \underline{U}_i \underline{I}^*$$

$$\underline{S}_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = -\underline{U}_j \underline{I}^*$$

$$\underline{S}_{ij} = \underline{U}_i \frac{\underline{U}_i - \underline{U}_j}{\underline{Z}^*} = \frac{|\underline{U}_i|^2 - |\underline{U}_i||\underline{U}_j| e^{j(\underline{U}_i - \underline{U}_j)}}{R - jX}$$

$$\underline{S}_{ji} = \underline{U}_j \frac{\underline{U}_i - \underline{U}_j}{\underline{Z}^*} = \frac{|\underline{U}_j|^2 - |\underline{U}_i||\underline{U}_j| e^{j(\underline{U}_j - \underline{U}_i)}}{R - jX}$$

$$\delta = \underline{U}_i - \underline{U}_j$$

( $\delta$  = "power angle")

Considerando a definição de  $\delta$  e separando as partes real e imaginária

$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R |\underline{U}_i|^2 - R |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \cos \delta + X |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \sin \delta)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X |\underline{U}_i|^2 - X |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \cos \delta - R |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \sin \delta)$$

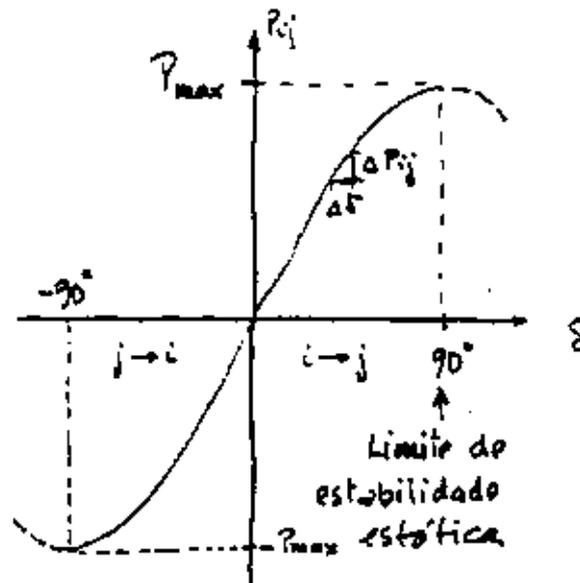
$$P_{ji} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R |\underline{U}_j|^2 - R |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \cos \delta - X |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \sin \delta)$$

$$Q_{ji} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X |\underline{U}_j|^2 - X |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \cos \delta + R |\underline{U}_i||\underline{U}_j| \sin \delta)$$

QUANDO  $R \ll X \dots \rightarrow R=0$

$$P_{ij} = -P_{ji} = \frac{|U_i||U_j|}{X} \sin \delta$$

$P_{max}$  → "STATIC TRANSMISSION CAPACITY"

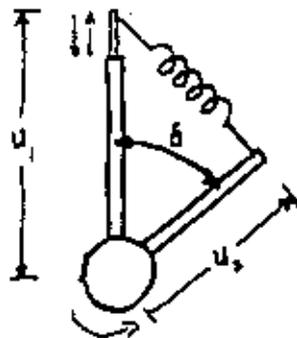
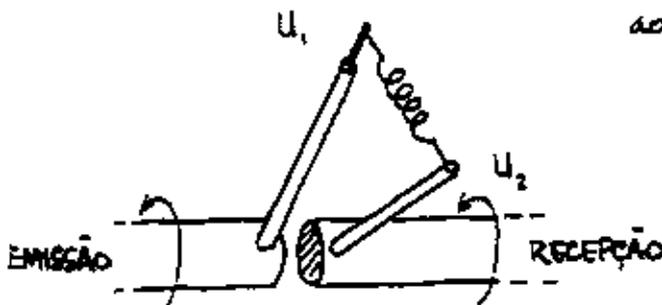


coef. de sincronismo  
( MW/and )

$$T_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta \delta} \approx \frac{dP_{ij}}{d\delta} = P_{max} \cos \delta$$

MODELO ANALÓGICO...

força da mola → proporcional  
ao comprimento da mola



$$P_{mec} = k U_1 U_2 \sin \delta$$

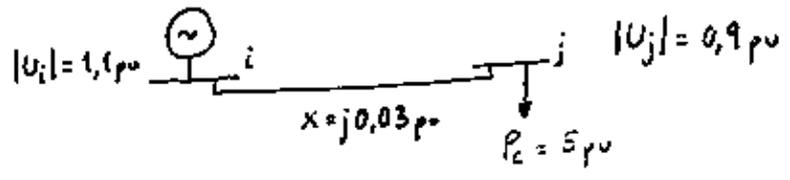
QUANDO  $\delta > 90^\circ$ , OS VEIOS PERDEM SINCRONISMO  
O VEIO E ULTRAPASSA SUCESSIVAMENTE O VEIO R

Se  $R \ll X$ ,  $R=0$  e:

$$P_{ij} = \frac{|U_i| |U_j|}{X} \sin \delta = -P_{ji}$$

$$Q_{ij} = \frac{|U_i|^2 - |U_i| |U_j| \cos \delta}{X} \quad Q_{ji} = \frac{|U_j|^2 - |U_i| |U_j| \cos \delta}{X}$$

Um exemplo instrutivo (c/ valores exagerados...):



$$\delta = \arcsin \frac{5}{\frac{1.1 \times 0.9}{0.03}} = 8.7^\circ \quad (P_{ij} = 5 \text{ pu}, P_{ji} = -5 \text{ pu})!$$

$$Q_{ij} = \frac{1.1^2 - 1.1 \times 0.9 \cos 8.7^\circ}{0.03} = 7.7 \text{ pu} \quad Q_{ji} = -5.6 \text{ pu}$$

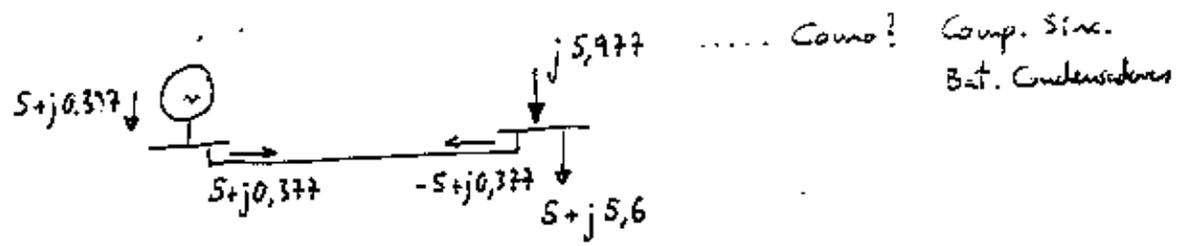
ou seja,  $Q_c = 5.6 \text{ pu}$ .

Se quisermos transmitir a mesma potência  $P_c$  com  $|U_i| = |U_j| = 1 \text{ pu}$  teremos:

$$\delta = \arcsin \frac{5}{\frac{1 \times 1}{0.03}} = 8.63^\circ \quad (\text{pequena variação!})$$

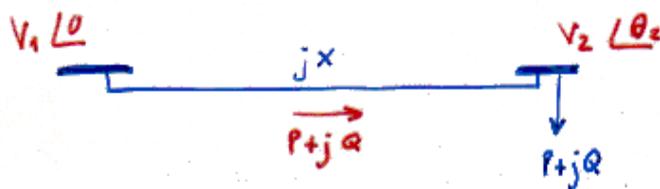
$$Q_{ij} = \frac{1^2 - 1^2 \cos \delta}{0.03} = 0.377 = Q_{ji}$$

seria necessário fornecer potência reativa no barramento j:



PENSAR: seria possível fazer  $|U_i| = 0.95$  e  $|U_j| = 1.1$ ? ■ E as perdas?

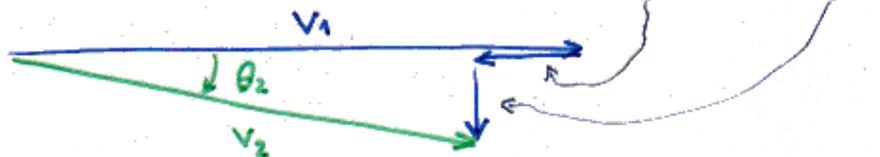
# CONTROLO DA TENSÃO



admitindo perdas desprezíveis...  $I \approx \frac{P - jQ}{V_1}$

A relação das tensões será  $U_2 = U_1 - ZI$

$$U_2 = V_1 - \frac{X}{V_1} Q - j \frac{X}{V_1} P$$



Conclusão:

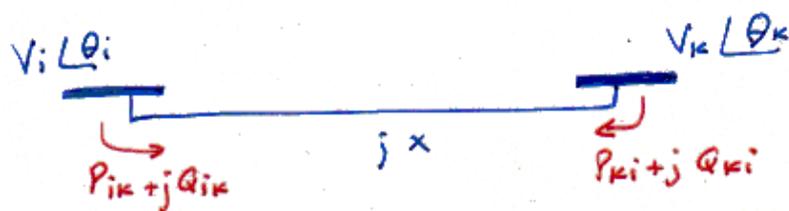
■ Quando  $R \ll X$

A variação de  $V$  depende essencialmente de  $Q$   
A variação de  $\theta$  depende essencialmente de  $P$

(PRINCÍPIO DO DESACOPLAMENTO)

■ O CONTROLO DA TENSÃO É FEITO À CUSTA DA INJEÇÃO DE POTÊNCIA REACTIVA.

# ≡≡≡ FUNCIONAMENTO do SISTEMA ≡≡≡



□  $P_{ik} = -P_{ki} = \frac{V_i V_k}{x} \sin \theta_{ik}$

$\max P_{ik} = \frac{V_i V_k}{x} \quad (\theta_{ik} = \pi/2)$

caso geral:  
 $\theta_{ik} = \arctg \frac{x}{R}$

limite de capacidade estática da linha

□  $Q_{ik} = \frac{V_i^2 - V_i V_k \cos \theta_{ik}}{x}$

$Q_{ki} = \frac{V_k^2 - V_i V_k \cos \theta_{ik}}{x}$

algumas situações:

$V_i = V_k = V \quad Q_{ik} = Q_{ki} = \frac{V^2}{x} (1 - \cos \theta_{ik})$

Para ter um perfil nivelado de tensões é preciso injetar potência reactiva em ambas as extremidades

$V_i < V_k \quad Q_{ik} < Q_{ki}$

É possível transmitir potência activa com tensão mais elevada na recepção do que na emissão

□ Como variam as perdas com o perfil de tensões?