

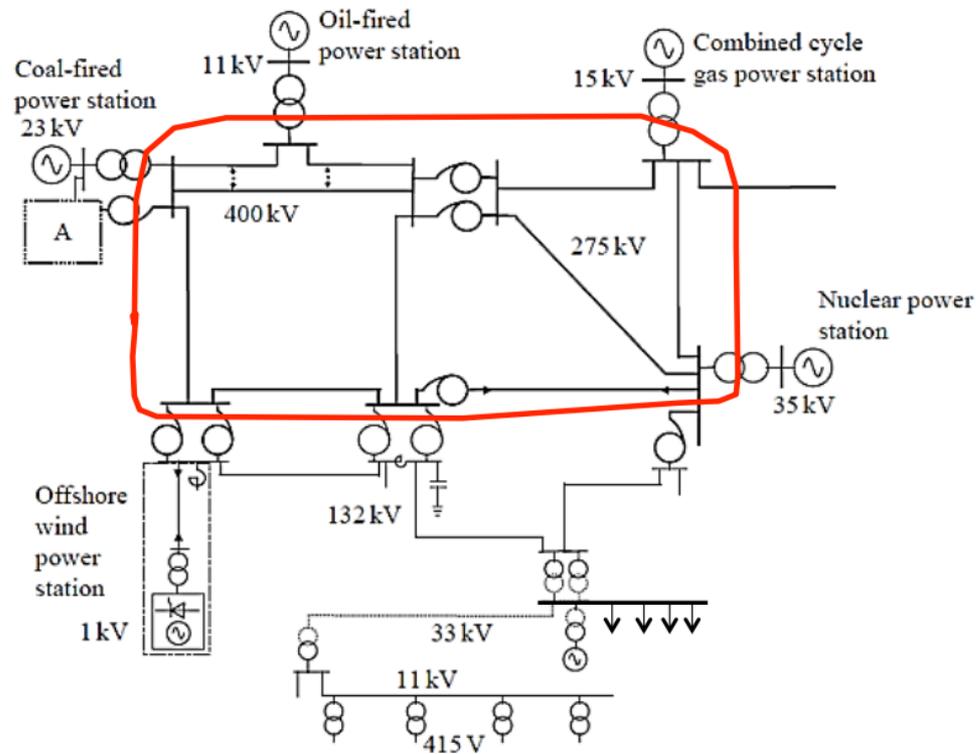
# ***TE-158: Operação de Sistemas Elétricos de Potência***

## ***SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA***

---

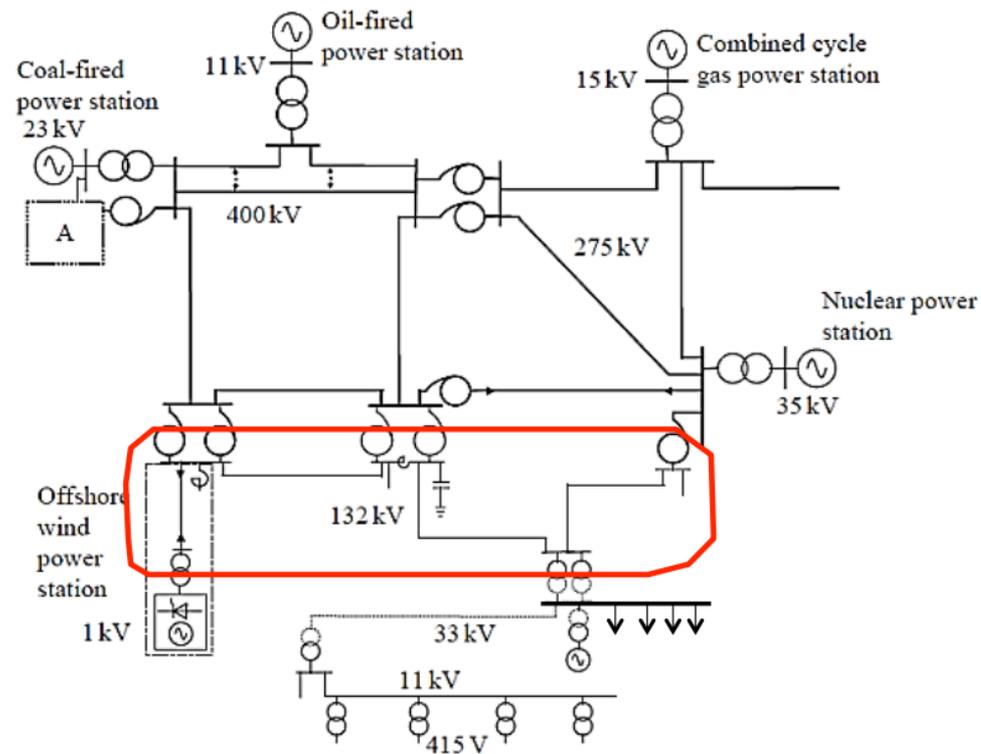
# INTRODUÇÃO

## Transmissão UHV (230 – 750 kV)



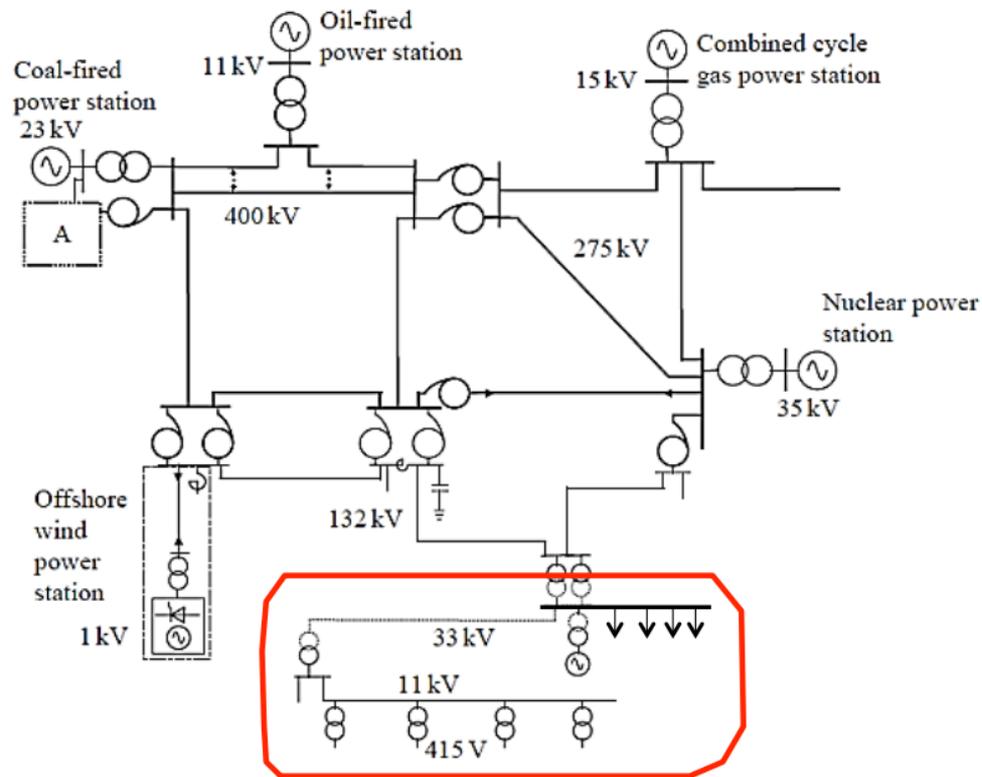
# INTRODUÇÃO

## SubTransmissão HV (69 – 230 kV)

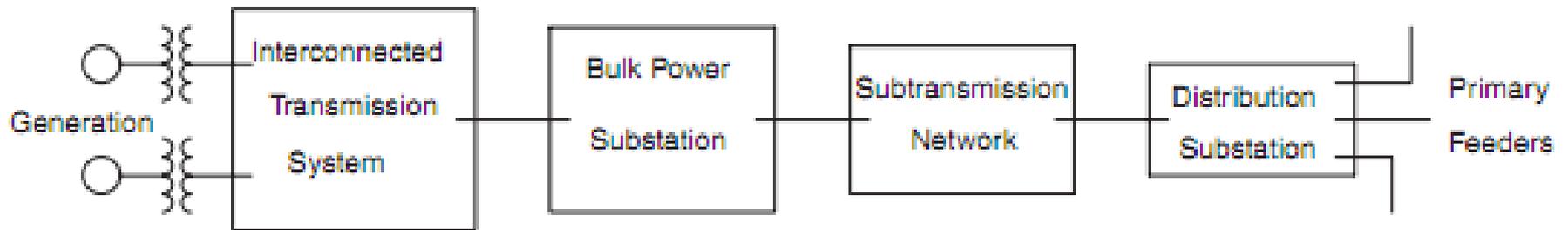


# INTRODUÇÃO

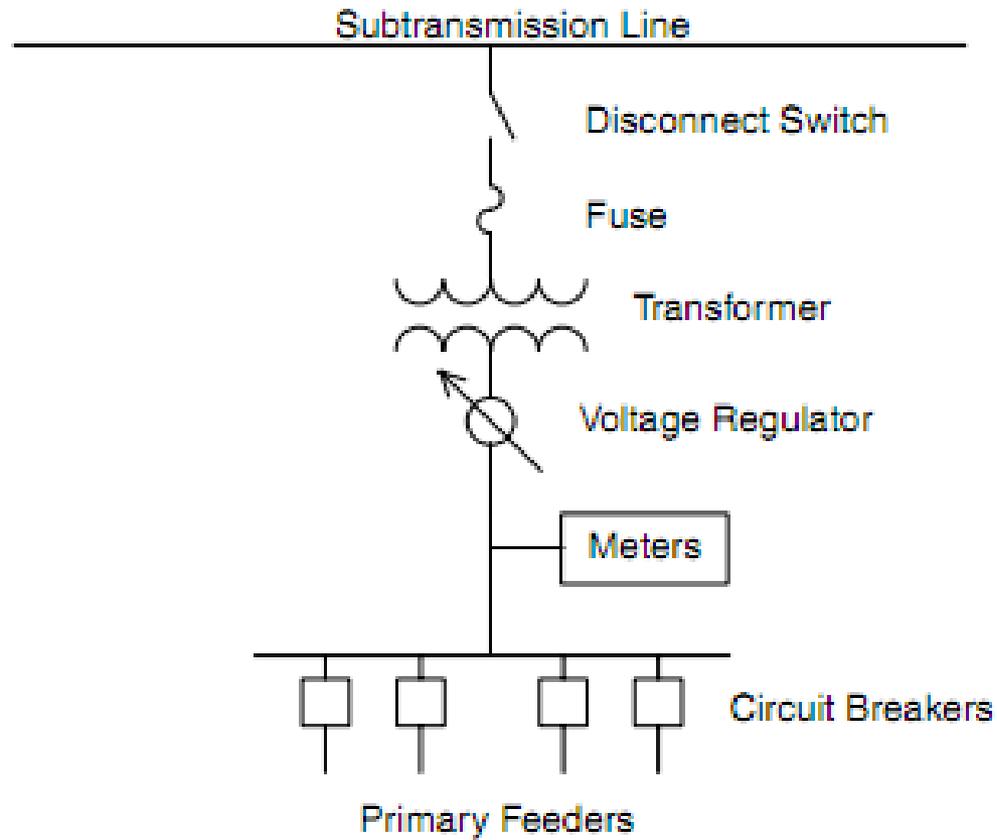
Distribuição MV (13,8 – 69 kV) - LV (127/220 – 220/380 V)



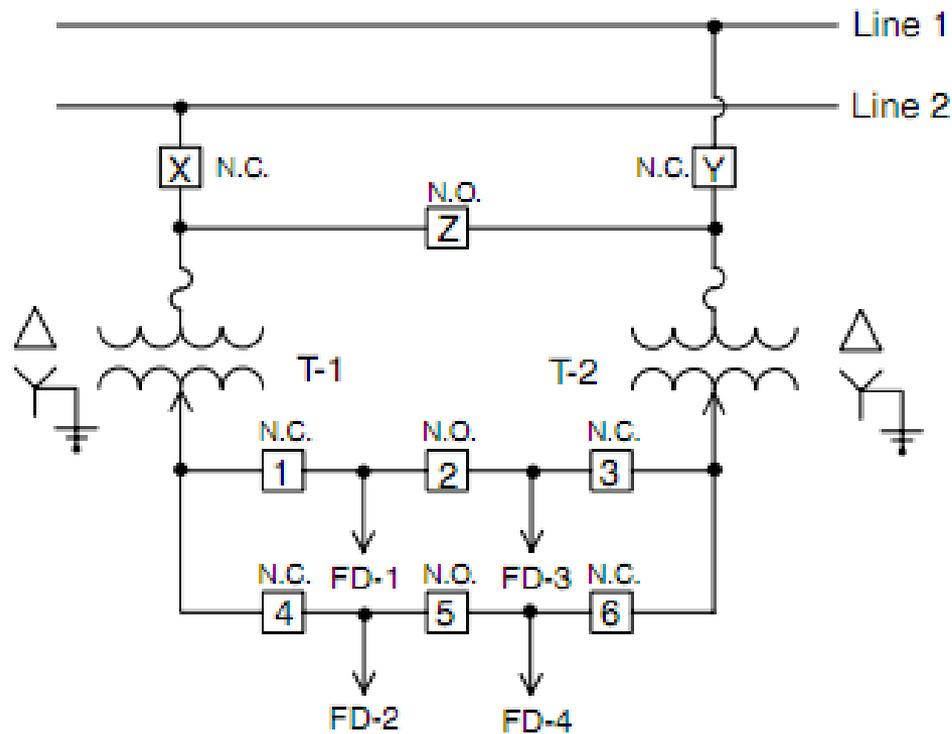
# INTRODUÇÃO



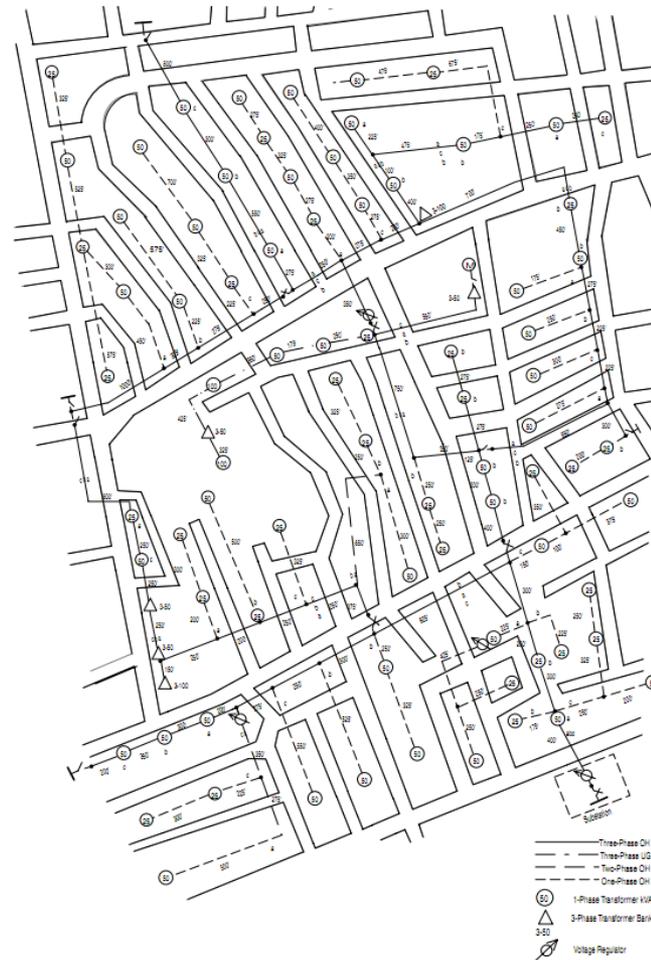
# INTRODUÇÃO



# INTRODUÇÃO



# INTRODUÇÃO



# INTRODUÇÃO

## Sistemas de Transmissão

Operação balanceada

Monofásica

Alta tensão

Alta relação X/R

Malhada

Grandes centros geração

Sentidos do fluxo de potência - operação

Newton e versões desacopladas

## Sistemas de Distribuição

Sistema desequilibrado

Trifásica

Baixa tensão

Baixa relação X/R

Radial e fracam. malhada

Ausência de geração

Único sentido do fluxo de potência – SE → Carga

- Adaptações de Newton  
- *Backward/Forward Sweep*

# INTRODUÇÃO

- **Relações X/R**

Cabos Utilizados nas Redes Primárias de Distribuição			Cabos Utilizados nas Redes de Transmissão		
Tipo	Bitola	X/R	Tipo	Bitola	X/R
Cobre	4 AWG a 250 MCM	0,52 a 2,56	Cobre	450 MCM a 900 MCM	3,40 a 5,88
ACSR	2 AWG a 266,8 MCM	0,50 a 1,67	ACSR	556,5 MCM a 1,75 Pol	2,47 a 4,68
ACC	2 AWG a 266,8 MCM	0,48 a 1,73	ACC	—	—

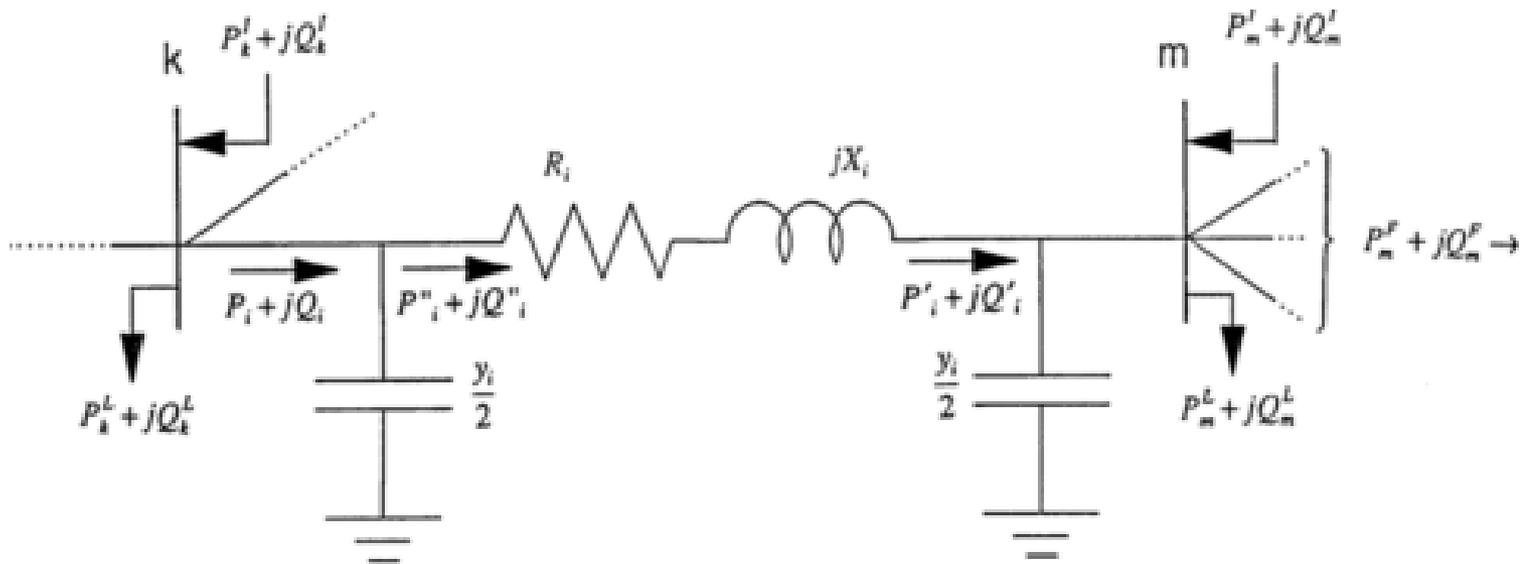
# ***MODELAGEM***

- **Linhas de Distribuição**



# MODELAGEM

- Linhas de Distribuição



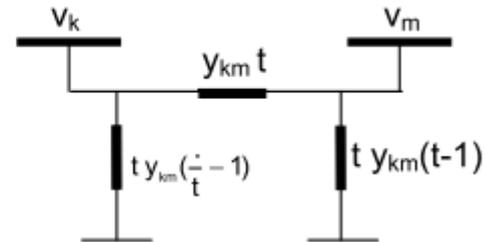
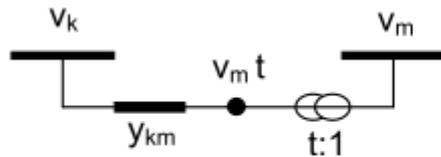
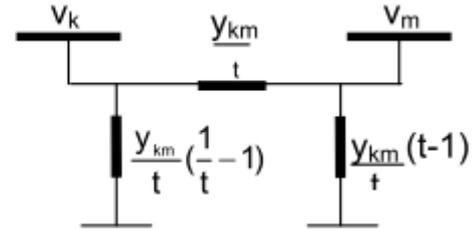
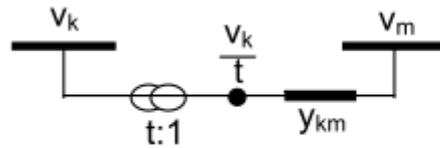
# MODELAGEM

- Transformadores



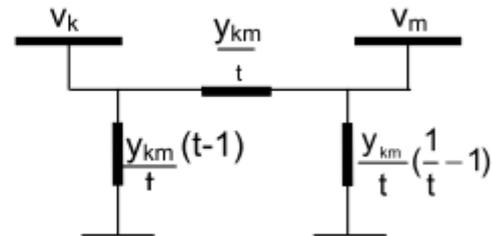
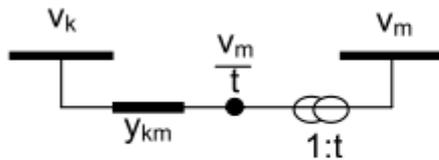
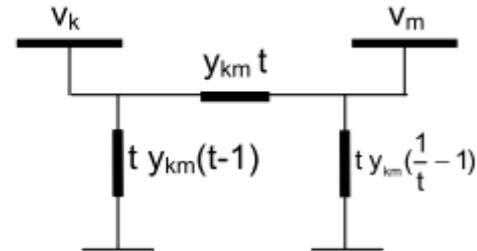
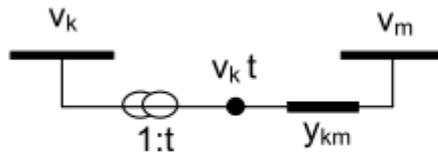
# MODELAGEM

- Transformadores



# MODELAGEM

- Transformadores



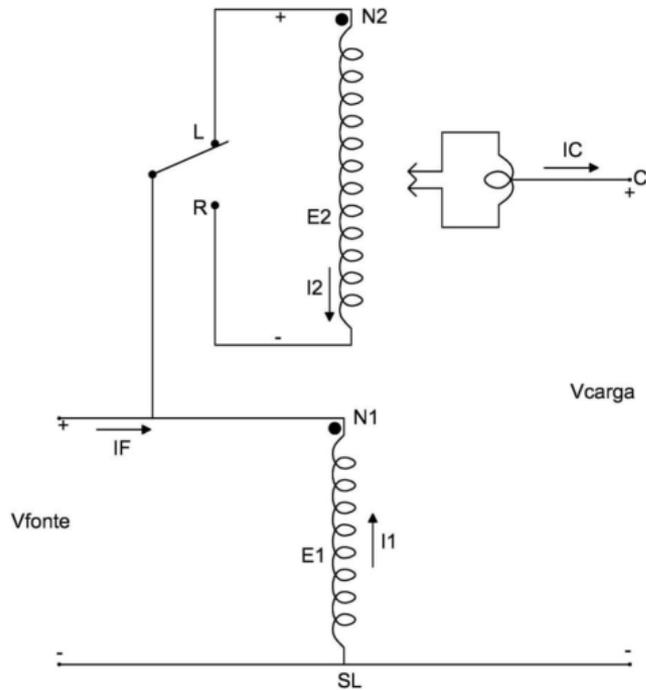
# ***MODELAGEM***

- **Reguladores de Tensão**

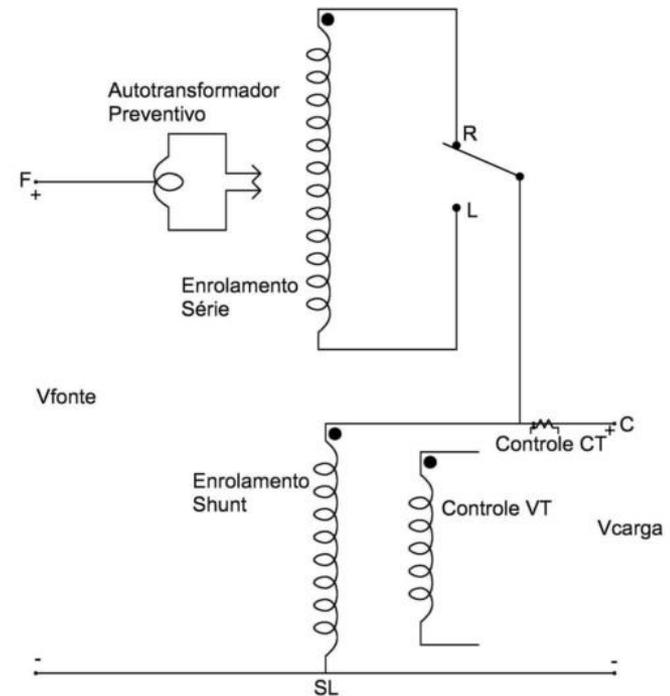


# MODELAGEM

- Reguladores de Tensão



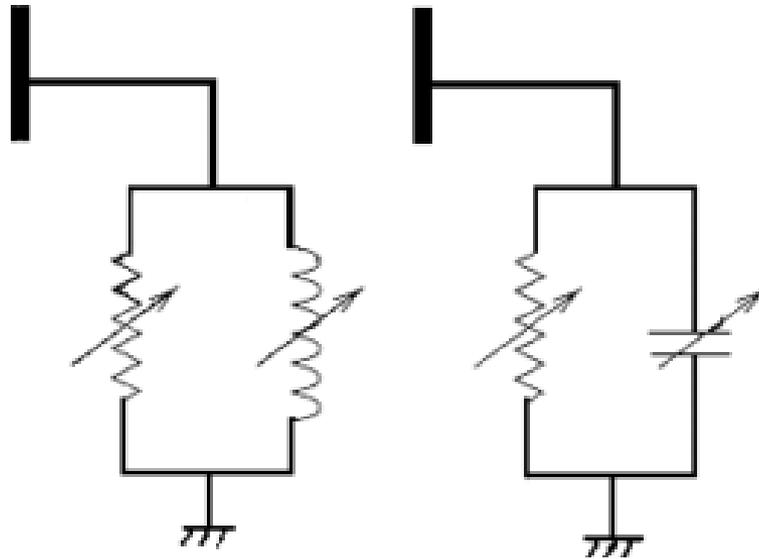
Tipo A



Tipo B

# MODELAGEM

- Cargas
  - Modelo P e Q constantes

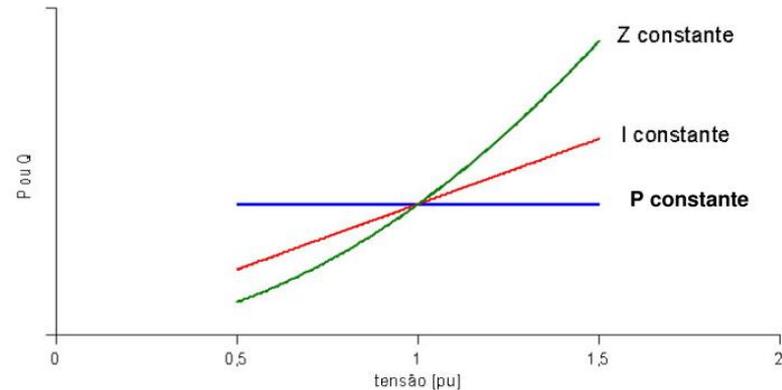


# MODELAGEM

- Cargas
  - Modelo Exponencial

$$P(V) = P_o \left(\frac{V}{V_o}\right)^{\alpha p}$$

$$Q(V) = Q_o \left(\frac{V}{V_o}\right)^{\alpha q}$$



$\alpha p = \alpha q = 2$ : carga com impedância constante

$\alpha p = \alpha q = 1$ : carga com corrente constante

$\alpha p = \alpha q = 0$ : carga com potência constante

# MODELAGEM

- Cargas
  - Modelo Exponencial

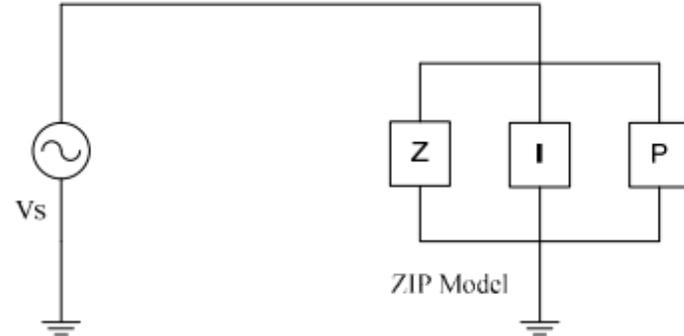
Componente de carga	$\alpha_p$ (Potência ativa)	$\alpha_Q$ (Potência reativa)
Resistência para aquecimento ambiente	2,00	0,00
Bomba do sistema de aquecimento	0,20	2,50
Bomba de ar condicionado	0,20	2,50
Ar condicionado central	0,20	2,20
Ar condicionado para quartos	0,20	2,50
Aquecedor de água	2,00	0,00
Refrigerador e freezer	0,80	2,50
Lava-louças	1,80	3,50
Máquina de lavar roupas	0,08	1,60
Máquina de secar roupas	2,00	3,30
Lâmpada incandescente	1,54	0,00
Lâmpada fluorescente convencional	2,07	3,21
Lâmpada fluorescente compacta	0,95-1,03	0,31-0,46
Pequenos motores industriais	0,10	0,60
Grandes motores industriais	0,06	0,50
Bomba d'água para irrigação	1,40	1,40

# MODELAGEM

- Cargas
  - Modelo ZIP

$$P(V) = P_o \left[ a_p + b_p \frac{V}{V_o} + c_p \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 \right]$$

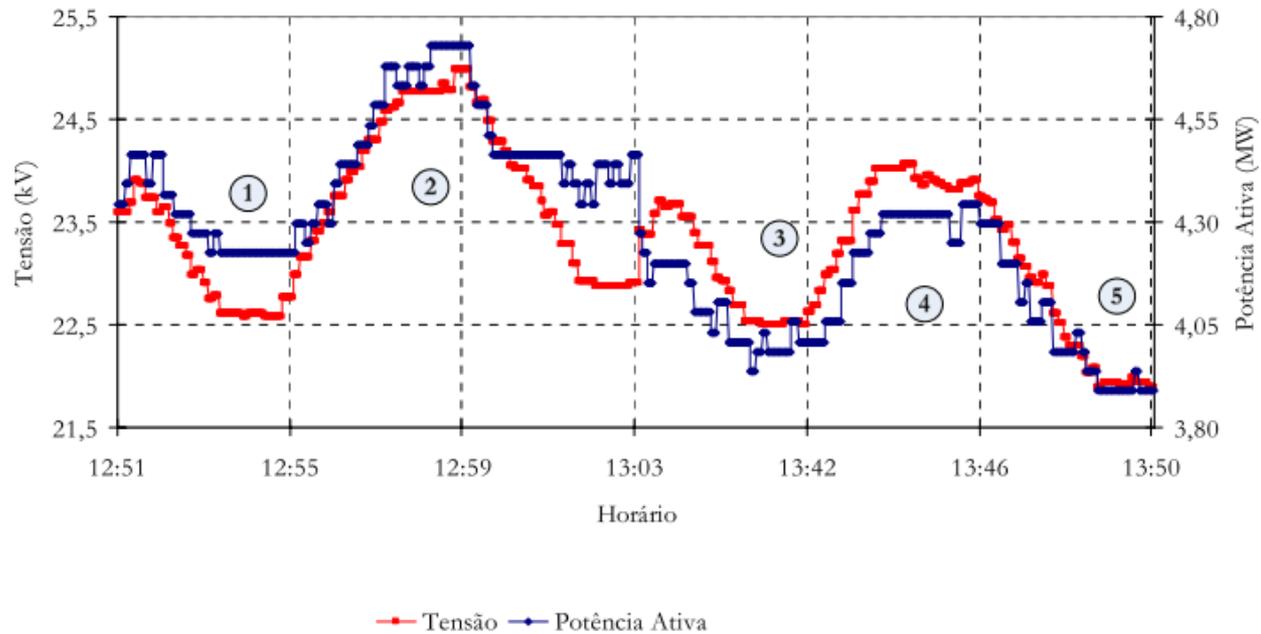
$$Q(V) = Q_o \left[ a_q + b_q \frac{V}{V_o} + c_q \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 \right]$$



$a_p$  e  $a_q$ : parcela da carga ativa/reativa como potência constante  
 $b_p$  e  $b_q$ : parcela da carga ativa/reativa como corrente constante  
 $c_p$  e  $c_q$ : parcela da carga ativa/reativa como impedância constante

# MODELAGEM

- Cargas



# ***ALGORITMOS DE FP***

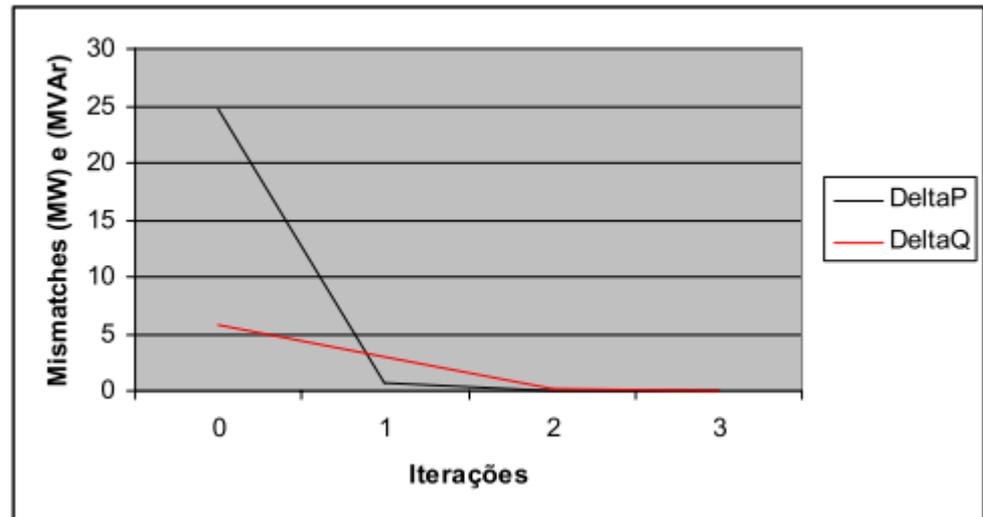
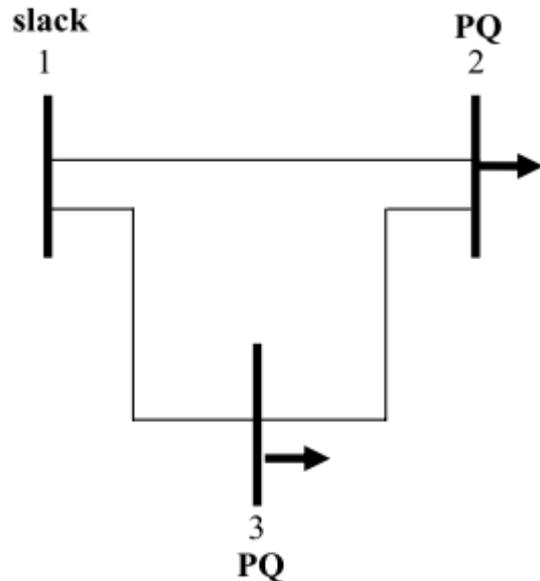
- **Década de 50 – Gauss-Siedel**
  - **Eficiente**
  - **Lento**
  - **Elevado número de iterações**
  - **Baixa capacidade de processamento do computadores**
  - **Pouco utilizado**

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 60 – Newton-Raphson:**
  - **W. F. Tinney**
  - **Sistemas de malhados - Transmissão**
  - **Amplamente utilizado**
  - **Rápida convergência**
  - **Eficiente**

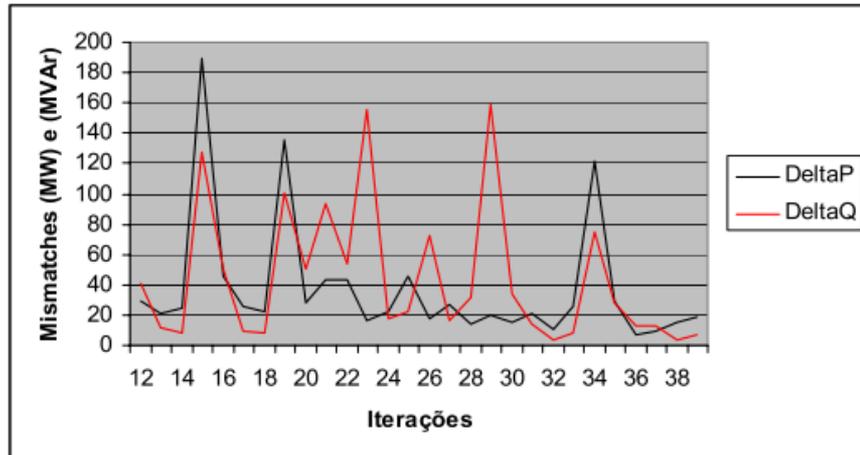
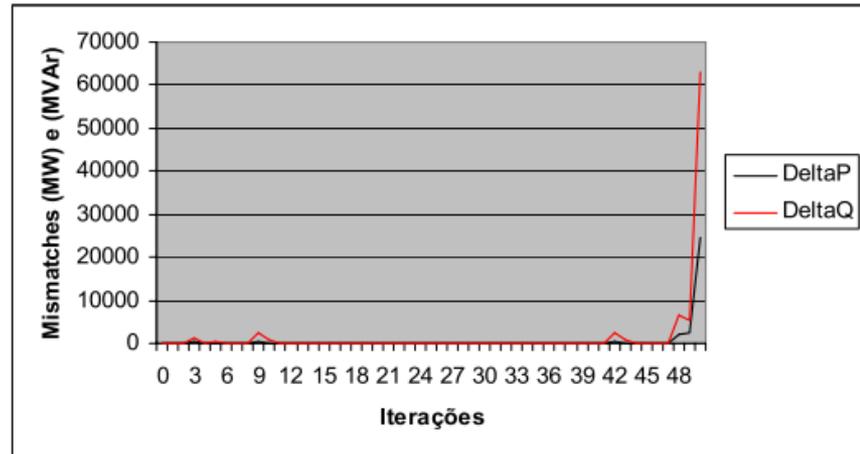
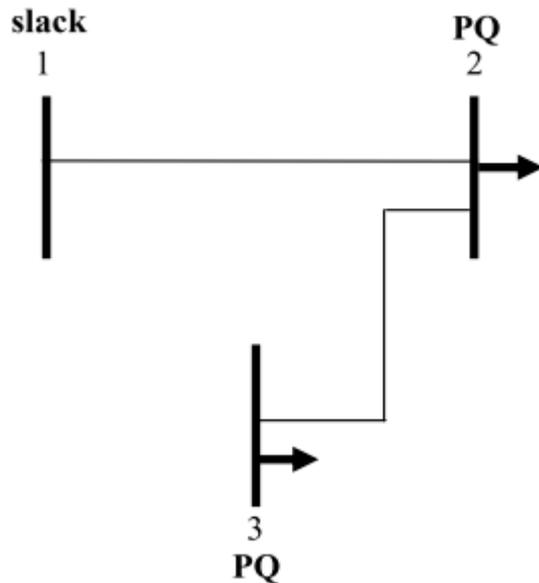
# ALGORITMOS DE FP

- Newton Raphson
  - Sistemas Malhados



# ALGORITMOS DE FP

- Newton Raphson
  - Sistemas Radiais



# ALGORITMOS DE FP

- Newton Raphson
  - Comparação

Matriz Jacobiana Sistema Malhado 1° Iteração	Matriz Jacobiana Sistema Radial 1° Iteração
$\begin{bmatrix} -1,960 & 0,970 & -0,200 & 0,099 \\ 0,970 & -1,455 & 0,097 & -0,143 \\ 0,96 & -0,097 & -1,960 & 0,970 \\ -0,097 & 0,146 & 0,90 & -1,367 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1,960 & 0,970 & -0,200 & 0,099 \\ 0,970 & -0,970 & 0,097 & -0,095 \\ 0,196 & -0,097 & -1,960 & 0,970 \\ -0,097 & 0,097 & 0,990 & -0,931 \end{bmatrix}$
Permaneceu a Característica Diagonalmente Dominante	Não Permaneceu a Característica Diagonalmente Dominante

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 60:**
  - **Primeiro trabalho exclusivo para sistemas de distribuição**
  - **R. Berg *et al.* (1967) “Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits”**
  - **Precursor dos demais algoritmos**

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 70:**
  - **W. H. Kersting e D. L. Mendive (1976)**
  - **Técnica *ladder* para o fluxo de potência em sistemas de distribuição**
  - **“An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-Phase Radial Load-Flow Problems”**

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 80:**
  - **D. Rajicic e A. Bose (1988)**
  - **Método Desacoplado Rápido para SD**
  - **Com modificação para compensar a baixa relação X/R**
  - **Coeficiente 0,4 e 0,3 (determinados experimentalmente) nas equações das matrizes B' e B''**

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 80:**
  - **D. Shimohammadi *et al.* (1988)**
  - **Backward/Forward Sweep**
  - **Baseado na técnica *ladder* (Kersting)**
  - **Soma das correntes**

# MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

## Subsistema 1

***i.*** Iniciar o contador de iteração  $v = 0$ . Escolher o valor inicial da tensão da subestação alimentadora ( $\dot{V}_1^v$ ). Arbitrar o mesmo valor para todas as barras do sistema.

***ii.*** Iniciar a varredura à montante (*backward sweep*). Para  $k$  variando de  $N_b$  até 2:

- Calcular a corrente de carga em todas as barras ( $\dot{I}_k^v$ ) da seguinte maneira:

$$\dot{I}_k = \left( \frac{\dot{S}_k^{esp}}{\dot{V}_k} \right)^*$$

# MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

## Subsistema 1

- Calcular a corrente da linha entre a barra precedente e a própria barra  $k$  ( $\dot{I}_{k-1,k}^v$ ) aplicando a lei de corrente de Kirchhoff:

$$\dot{I}_{k-1,k}^v = \dot{I}_k^v + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b}^v$$

*iii.* Iniciar varredura à jusante (*forward sweep*). Para  $k$  variando de 1 até  $N_b - 1$ :

- Calcular a tensão da barra sucedente à barra  $k$  ( $\dot{V}_{k+1}^v$ ) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff: .

$$\dot{V}_{k+1}^v = \dot{V}_k^v - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1}^v$$

# MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

## Subsistema 1

**iii.** Testar a convergência: se  $||V_1^v| - |V_1^{v-1}|| \leq \varepsilon$  o processo iterativo convergiu para a solução ( $\hat{V}^v$ ), ir para o passo (**vi**). Caso contrário, incrementar o contador de iterações  $v = v + 1$  e seguir em frente.

## Subsistema 2

**vi.** Calcular  $P_k$  para a barra  $V\theta$  e  $Q_k$  para as barras  $V\theta$  e  $PV$ . Outras grandezas também podem ser calculadas, como fluxos de potência nas linhas, perdas, etc.

# ***ALGORITMOS DE FP***

- **Década de 80:**
  - **Broadwater (1988);**
  - **Backward/Forward Sweep;**
  - **Soma das Potências.**

# MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS

## Subsistema 1

*i.* Iniciar o contador de iteração  $v = 0$ . Escolher o valor inicial da tensão da subestação alimentadora ( $\dot{V}_1^v$ ). Arbitrar o mesmo valor para todas as barras do sistema.

*ii.* Iniciar a varredura à montante (*backward sweep*). Para  $k$  variando de  $N_b$  até 1:

- Calcular a carga equivalente de cada barra :

$$P_k^{eq} = P_k + \sum_{b \in B_k} P_b + \sum_{l \in D_k} P_l^{perdas} \quad e \quad Q_k^{eq} = Q_k + \sum_{b \in B_k} Q_b + \sum_{l \in D_k} Q_l^{perdas}$$

sendo as perdas obtidas pelas equações:

$$P_{km}^{perdas} = r_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad e \quad Q_{km}^{perdas} = x_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2}$$

# MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS

## Subsistema 1

**iii.** Iniciar varredura à jusante (*forward sweep*). Para  $k$  e  $m$  variando de 1 até  $N_b$ :

- Calcular a tensão da barra sucedente à barra  $k$  ( $V_{k+1}^v$ ) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff:

$$V_m^4 + [2(r_{km} P_k^{eq} + x_{km} Q_k^{eq}) - V_k^2] V_m^2 + (P_k^{eq^2} + Q_k^{eq^2})(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0$$

**iv.** Recalcular as perdas e testar a convergência: se variação total das perdas entre duas iterações  $\leq \varepsilon$ , o processo iterativo convergiu para a solução ( $V^v$ ), ir para o passo (v). Caso contrário, incrementar o contador de iterações  $v = v + 1$  e voltar ao passo (ii).

# **MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS**

## **Subsistema 2**

**v. Calcular  $P_k$  para a barra  $V\theta$  e  $Q_k$  para as barras  $V\theta$  e  $PV$ . Outras grandezas também podem ser calculadas, como fluxos de potência nas linhas, perdas, etc.**

# ***REFERÊNCIAS***

**Baran, A. Fluxo de Potência Ótimo Trifásico. Dissertação UFPR, 2013.**

**Carvalho, M. Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial. Dissertação USP, 2006.**

**Durce, C. Normalização Complexa e Cálculo de Fluxo de Potência para Sistemas Elétricos Emergentes. Dissertação UFPR, 2012.**

**Expósito. Short Course on Recent Progress and Trends in State Estimation for Large-Scale Intelligent Systems (Part I). 20º CBA, Belo Horizonte, 2014.**

**Neves, M. Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica : Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo. Dissertação UFJF, 2008.**

**Souza, M. Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica : Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo. Dissertação UNIFEI, 2010**