

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

*FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA*



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***

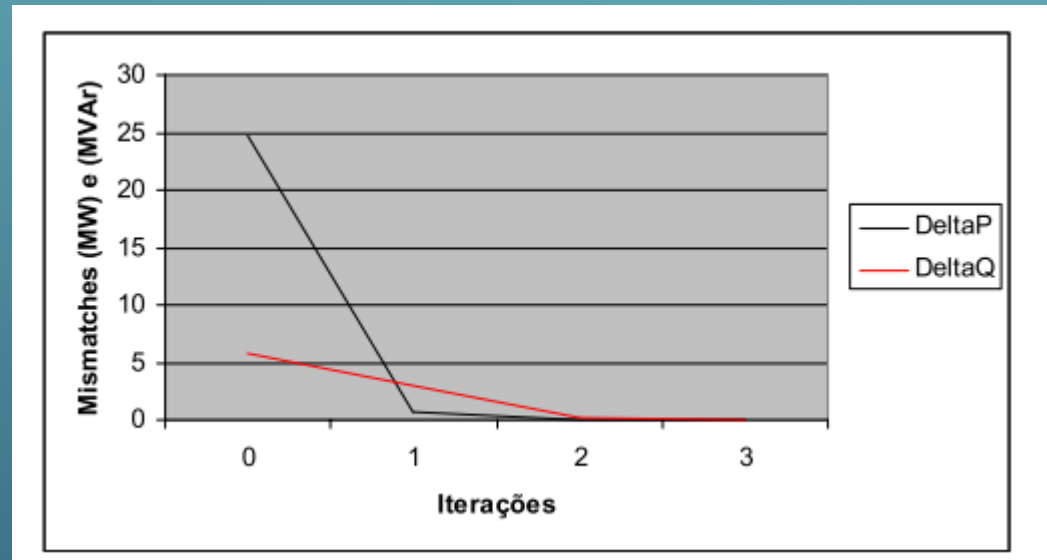
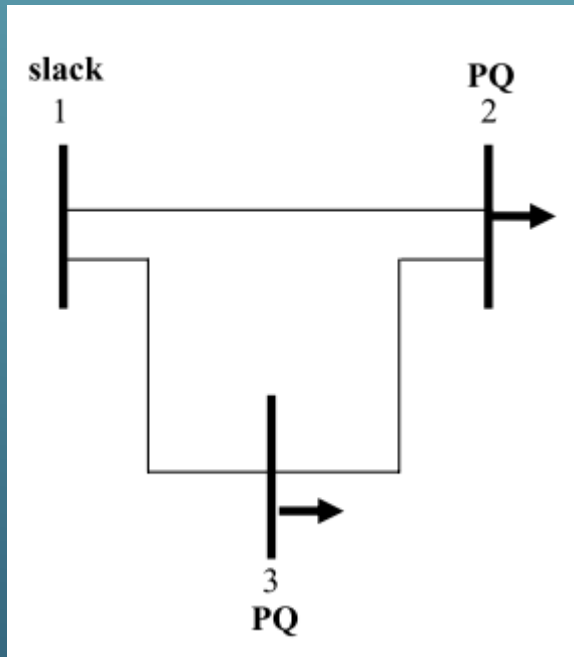
INTRODUÇÃO

- 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	—	—

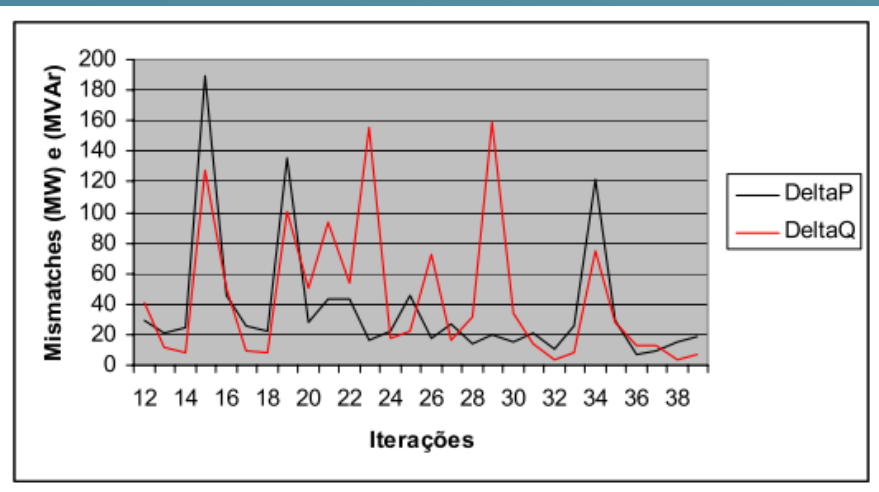
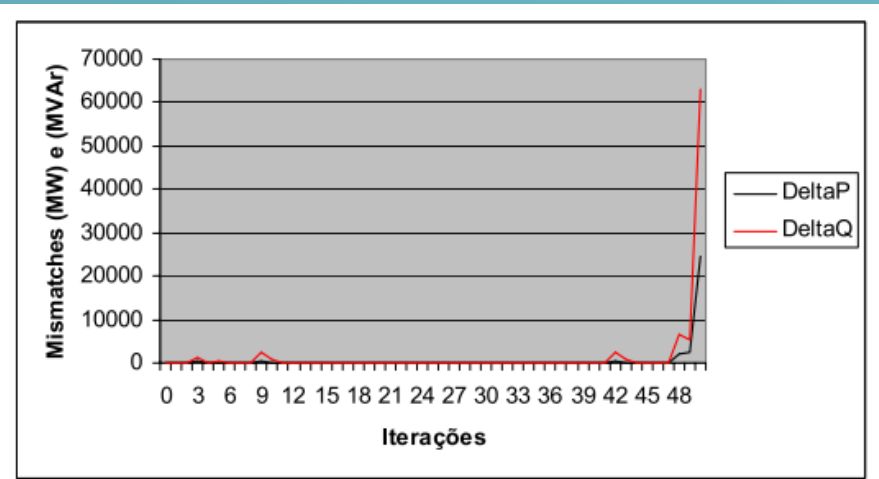
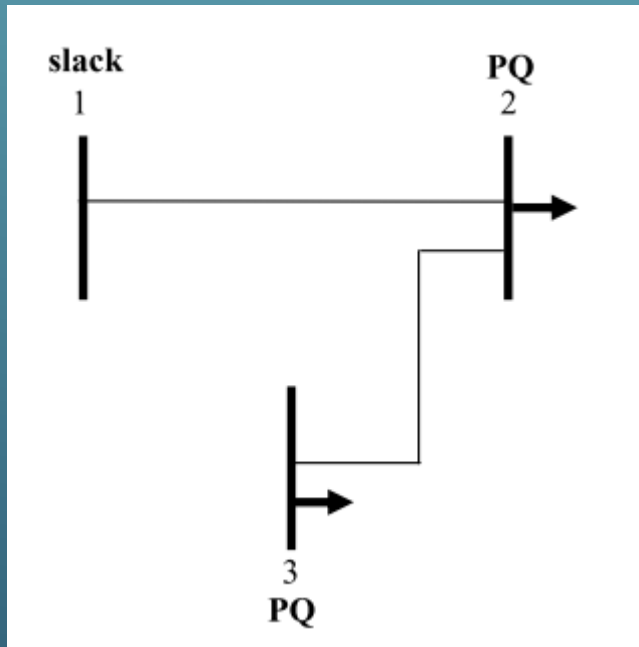
ALGORITMOS DE FP

- 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 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”

MÉTODO ESCALONADO

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método Escalonado

- 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 a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 2:
 - Calcular a corrente da carga na barra k (\dot{I}_k^v) da seguinte maneira: $\dot{S}_k^{esp} = \dot{V}_k^v \cdot \dot{I}_k^{v*}$.
 - 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: $\dot{I}_{k-1,k}^v = \dot{I}_k^v + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b}^v$.

MÉTODO ESCALONADO

- Calcular a tensão da barra precedente à barra k (\dot{V}_{k-1}^v) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff: $\dot{V}_{k-1}^v = \dot{V}_k^v + \dot{Z}_{k-1,k} \cdot \dot{I}_{k-1,k}^v$.
- iii. Testar a convergência: se $\left\| \dot{V}_1^v - \dot{V}_1^{esp} \right\| \leq \varepsilon$, o processo iterativo convergiu para a solução (\dot{V}^v). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $v = v + 1$ e seguir em frente.
- iv. Atribuir o valor especificado à tensão da subestação: $\dot{V}_1^{v+1} = \dot{V}_1^{esp}$.
- v. Iniciar a varredura a jusante (*forward sweep*). Para k variando de 1 até $N_b - 1$:
 - Encontrar a nova tensão da barra que sucede a barra k (\dot{V}_{k+1}^{v+1}) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff $\dot{V}_{k+1}^{v+1} = \dot{V}_k^{v+1} - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1}^v$, usando as correntes encontradas na varredura a montante. Voltar ao passo (ii).

ALGORITMOS DE FP

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

MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método da Soma das Correntes

- 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 a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 2:

- Calcular a corrente de carga em todas as barras (\dot{I}_k^v) conforme a equação:

$$\dot{S}_k^{esp} = \dot{V}_k^v \cdot \dot{I}_k^{v*} .$$

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

MÉTODO DA SOMA DAS CORRENTES

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

- Calcular a tensão da barra que sucede a barra k (\dot{V}_{k+1}^v) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff $\dot{V}_{k+1}^v = \dot{V}_k^v - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1}^v$, usando as correntes encontradas na varredura a montante.

iv. Calcular as injeções de potência (\dot{S}_k) da seguinte maneira: $\dot{S}_k = \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^*$, e os desvios ΔP_k e ΔQ_k : $\Delta P_k = \text{Re}[\dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp}]$ e $\Delta Q_k = \text{Im}[\dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp}]$.

v. Testar a convergência: se $\max\{|\Delta P_k^v|\} \leq \varepsilon$ e $\max\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \varepsilon$, o processo iterativo convergiu para a solução (\dot{V}^v). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $v = v + 1$ e voltar ao passo (ii).

ALGORITMOS DE FP

- Década de 90:
 - Cespedes (1990)
 - Backward/Forward Sweep (Método de varredura);
 - Soma das Potências.

MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método da Soma das Potências

- 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 a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 1:
 - Calcular a carga equivalente de cada barra:

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

sendo as perdas obtidas pelas equações:

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

MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS

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

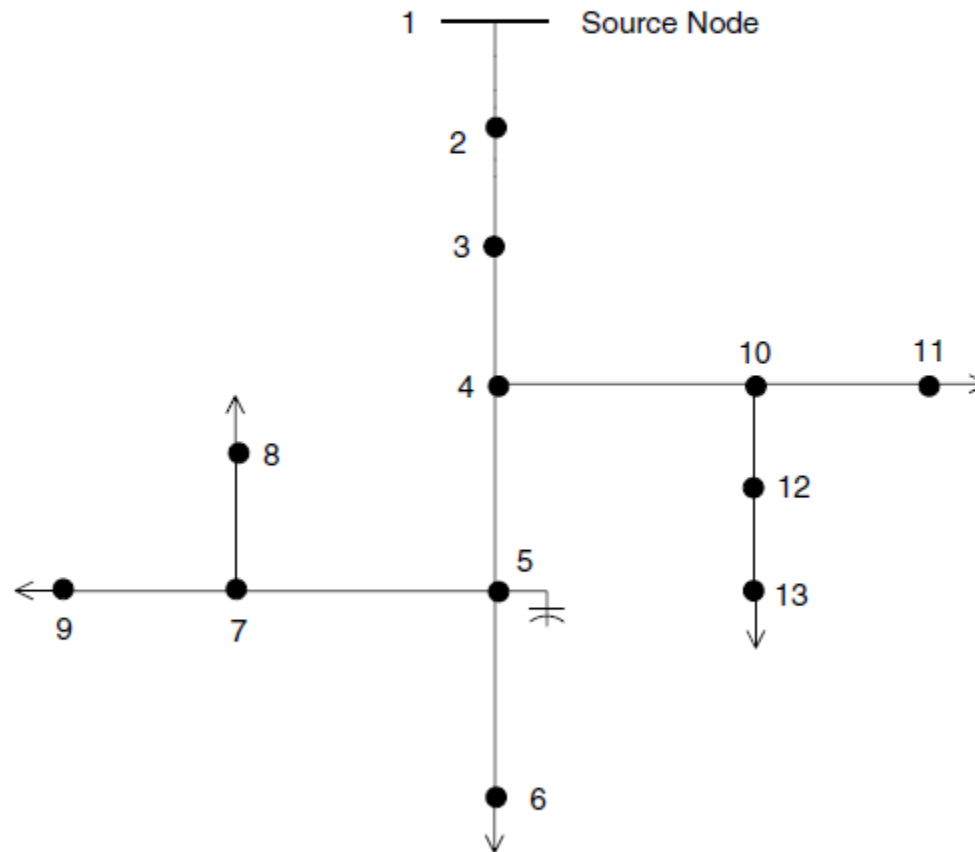
- Calcular a magnitude de tensão da barra que sucede a barra k (V_{k+1}^v) pela equação

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

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). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $v = v + 1$ e voltar ao passo (ii).

The General Feeder

A typical distribution feeder will consist of the primary main, with laterals tapped off the primary main and sublaterals tapped off the laterals, etc. Figure 10.4 shows a typical feeder. The ladder iterative technique for the feeder of Figure 10.4 would proceed as follows:



Typical distribution feeder.

1. Assume three-phase voltages at the end nodes (6,8,9,11, and 13). The usual assumption is to use the nominal voltages.
2. Starting at Node 13, compute the node current (load current plus capacitor current if present).
3. With this current, apply Kirchhoff's voltage law (KVL) to calculate the node voltages at 12 and 10.
4. Node 10 is referred to as a "junction" node since laterals branch in two directions from the node. For this feeder, go to Node 11 and compute the node current. Use that current to compute the voltage at Node 10. This will be referred to as "the most recent voltage at Node 10."
5. Using the most recent value of the voltage at Node 10, the node current at Node 10 (if any) is computed.
6. Apply Kirchhoff's current law (KCL) to determine the current flowing from Node 4 toward Node 10.
7. Compute the voltage at Node 4.
8. Node 4 is a junction node. An end node downstream from Node 4 is selected to start the forward sweep toward Node 4.
9. Select Node 6, compute the node current, and then compute the voltage at Junction Node 5.
10. Go to downstream end Node 8. Compute the node current and then the voltage at Junction Node 7.

11. Go to downstream end Node 9. Compute the node current and then the voltage at Junction Node 7.
12. Compute the node current at Node 7 using the most recent value of the Node 7 voltage.
13. Apply KCL at Node 7 to compute the current flowing on the line segment from Node 5 to Node 7.
14. Compute the voltage at Node 5.
15. Compute the node current at Node 5.
16. Apply KCL at Node 5 to determine the current flowing from Node 4 toward Node 5.
17. Compute the voltage at Node 4.
18. Compute the node current at Node 4.
19. Apply KCL at Node 4 to compute the current flowing from Node 3 to Node 4.
20. Calculate the voltage at Node 3.
21. Compute the node current at Node 3.
22. Apply KCL at Node 3 to compute the current flowing from Node 2 to Node 3.

23. Calculate the voltage at Node 2.
24. Compute the node current at Node 2.
25. Apply KCL at Node 2.
26. Calculate the voltage at Node 1.
27. Compare the calculated voltage at Node 1 to the specified source voltage.
28. If not within tolerance, use the specified source voltage and the forward sweep current flowing from Node 1 to Node 2, and compute the new voltage at Node 2.
29. The backward sweep continues, using the new upstream voltage and line segment current from the forward sweep to compute the new downstream voltage.
30. The backward sweep is completed when new voltages at all end nodes have been completed.
31. This completes the first iteration.
32. Repeat the forward sweep, only now using the new end voltages rather than the assumed voltages as was done in the first iteration.
33. Continue the forward and backward sweeps until the calculated voltage at the source is within a specified tolerance of the source voltage.
34. At this point the voltages are known at all nodes, and the currents flowing in all line segments are known. An output report can be produced giving all desired results.