
Cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica

Com otimização por redução de barras

David Maykon Krepsky Silva

11 de dezembro de 2015

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Objetivos
2. Metodologia
3. Sistema elétrico brasileiro
4. O fluxo de potência
5. Métodos para redes de distribuição
6. Resultados

Objetivos

Objetivos do trabalho

Objetivos primários:

- Implementação dos métodos *Soma de Correntes* e *Soma de potências* para o cálculo do fluxo de potência.
- Comparação de desempenho entre os métodos.
- Desenvolvimento e implementação do algoritmo de otimização do fluxo de potência por redução de barras.

Objetivo secundário:

- Desenvolvimento de programa gráfico para análise de sistemas de distribuição utilizando os algoritmos acima citados.

Metodologia

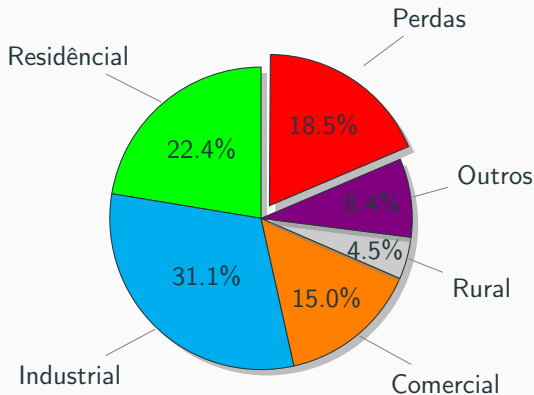
- Uso de linguagem de programação C++.
- Desenvolvimento com o *framework* Qt.
- Validação dos resultados através da comparação com resultados de outro programa.
- Teste de performance dos algoritmos implementados, com e sem a otimização.

Sistema elétrico brasileiro

Consumo de energia elétrica no Brasil

- Em julho de 2015, foram consumidos 45.149 GWh de energia elétrica no Brasil [3].
- As crises hídricas encarecem o custo da energia elétrica, pois estimulam o uso de combustíveis fósseis.
- De forma a compensar o custo extra das usinas termo-elétricas, foi instaurado em 2015 o Sistema de Bandeiras Tarifárias.

Figura 1: Perfil de consumo de energia elétrica no Brasil, julho de 2015



Fonte: Ministério de Minas e Energia [3].

- Em alguns estados, como no Piauí, as perdas chegam a 29% [5].
- As perdas técnicas (como as perdas nos cabos e nos transformadores) chegam a 13% [5], sendo maior que as perdas totais em países como os EUA, a qual fica em torno de 6% [4].
- O prejuízo é avaliado em bilhões de reais por ano.
- As maiores perdas técnicas se encontram no sistema de distribuição.

O fluxo de potência

O fluxo de potência (ou fluxo de carga) é um problema matemático, composto por um conjunto de equações algébricas não lineares, que permite determinar os valores de tensão e potência, bem como as perdas, para um sistema elétrico de potência em regime permanente.

Provê uma visão detalhada das condições de operação do sistema, permitindo:

- análise de segurança da rede;
- o planejamento de redes de transmissão/distribuição mais eficientes;
- otimização dos sistemas em operação.

Características dos sistemas de potência

- Composto por *barras*, geradores, cargas, transformadores, reatores *shunt*, capacitores *shunt* e linhas de transmissão/distribuição.
- Barras são do tipo PV, PQ e $V\theta$.
- Barras são interligadas por linhas, as quais possuem perdas.

Devido a natureza não linear do problema, são necessários métodos numéricos iterativos para a determinar uma aproximação das incógnitas nas equações do fluxo de potência.

Apesar dos métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson (e seus derivados) serem amplamente utilizados para o cálculo do fluxo de potência em sistemas de transmissão de energia elétrica, os mesmos apresentam problemas de convergência e desempenho quando aplicados em sistemas de distribuição [6, 1, 7, 10].

Métodos para redes de distribuição

Os métodos empregados na solução de redes de distribuição aproveitam a topologia radial [2], ou fracamente malhada [8, 9], para resolver o problema do fluxo de potência.

Figura 2: Sistema radial.

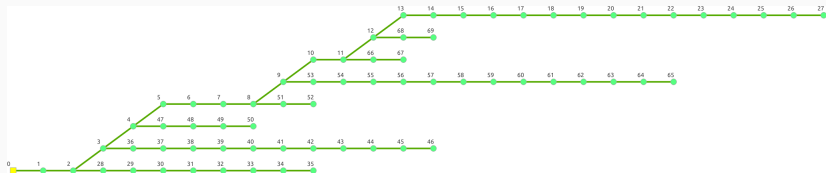
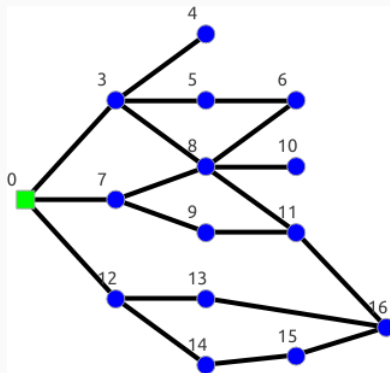


Figura 3: Sistema malhado.



Método Soma de Potências

Este método, proposto em [2], consiste em duas operações, uma a montante e outra a jusante.

- Operação a montante: partindo dos nós finais até o nó inicial, são calculadas as potências equivalentes em cada nó (i.e., somando todas as potências que são alimentadas por cada nó e as suas perdas).
- Operação a jusante: dado que a tensão da barra de referência é conhecida, é aplicada a equação 1 para o cálculo da tensão nas barras subsequentes.
- O critério de parada é determinado pela variação das perdas totais do sistema (equação 2).

Método Soma de Potências

Equação para o cálculo das tensões:

$$V_r^4 + [2 \cdot (PR + QX) - V_s^2] \cdot V_r^2 + (P^2 + Q^2) \cdot (R^2 + X^2) = 0. \quad (1)$$

Perdas nas linhas:

$$L_p = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (2)$$

$$L_q = X \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3)$$

Onde:

- s é o nó fonte e r é o nó à jusante;
- V_s é o módulo da tensão em s ;
- V_r é o módulo da tensão em r ;
- P e Q são as potências ativa e reativa equivalentes da carga;
- R é a resistência e X a reatância da linha de transmissão;
- L_p e L_q são as perdas ativas e reativas, respectivamente.

Desvantagens:

- Não calcula o ângulo das tensões.
- Aplicável somente a sistemas radiais.

Método Soma de Correntes

Proposto em [8, 9], também consiste em duas operações, chamadas de varredura para trás (*backward sweep*) e varredura para frente (*forward sweep*).

- Varredura para trás: assumindo um perfil de tensão inicial para as barras, o algoritmo começa calculando as correntes nos nós das camadas finais com a equação 4. Em seguida, é calculado a corrente da camada anterior, sendo que, a corrente nas barras dessa camada é a soma das correntes que vão e direção a camada seguinte (equação 5).
- Varredura para frente: Ao chegar na barra de referência (a qual possui tensão e fase conhecidas), o algoritmo calcula a tensão nas barras subsequentes, considerando as correntes previamente calculadas e a queda de tensão nas linhas de distribuição, com a equação 6.
- O critério de parada é determinado pela variação da potência no sistema.

Equações do método Soma de Correntes

Corrente nas barras:

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(S_{ia} / V_{ia}^{(k-1)} \right)^* \\ \left(S_{ib} / V_{ib}^{(k-1)} \right)^* \\ \left(S_{ic} / V_{ic}^{(k-1)} \right)^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (4)$$

Corrente nas linhas:

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^{(k)} = - \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(k)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^k \quad (5)$$

Tensão nas barras:

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(k)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ba,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ca,l} & Z_{cb,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (6)$$

Onde:

- I_{ia}, I_{ib}, I_{ic} são as injeções de corrente na barra i .
- S_{ia}, S_{ib}, S_{ic} são as injeções de potência programadas na barra i .
- V_{ia}, V_{ib}, V_{ic} são as tensões na barra i .
- Y_{ia}, Y_{ib}, Y_{ic} são as admitâncias dos elementos *shunt* na barra i .
- J_{la}, J_{lb}, J_{lc} são as correntes na linha l .
- k é a iteração.

Em andamento...

Resultados

Tabela 1: Tesões no sistema de 69 barras¹. Valores em volts.

Barra	Soma de potências	Soma de correntes	Diferença
0	12.661,3	12.661,3	0.00
1	12.660,9	12.660,9	0.00
2	12.660,4	12.660,4	0.00
3	12.660,4	12.660,4	0.00
4	12.659,2	12.659,2	0.00
5	12.648,8	12.648,8	0.00
6	12.535,7	12.535,7	0.00
7	12.418,1	12.418,1	0.00
8	12.390,0	12.390,0	0.00
9	12.375,7	12.375,7	0.00

¹Margem de erro 1%

Validação dos algoritmos - Perdas

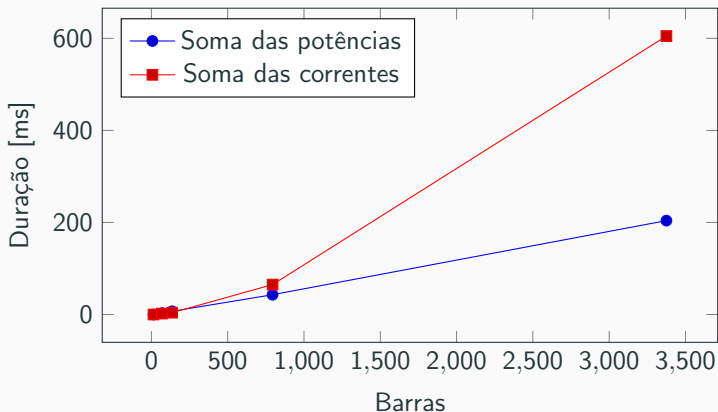
Tabela 2: Perdas no sistema de 69 barras². Valores em VA.

Nó inicial	Nó final	Soma de potências	Soma de correntes
0	1	$0.07498 + 0.17995j$	$0.07498 + 0.17995j$
1	2	$0.07498 + 0.17995j$	$0.07498 + 0.17995j$
2	3	$0.01431 + 0.01431j$	$0.01431 + 0.01431j$
3	4	$0.19493 + 0.46785j$	$0.19493 + 0.46785j$
4	5	$1.93656 + 2.26832j$	$1.93656 + 2.26832j$
5	6	$28.2383 + 14.3815j$	$28.2383 + 14.3815j$
6	7	$29.3461 + 14.9464j$	$29.3461 + 14.9464j$
7	8	$6.89402 + 3.51431j$	$6.89402 + 3.51431j$
8	9	$3.37479 + 1.71820j$	$3.37479 + 1.71820j$
9	10	$4.77740 + 1.57905j$	$4.77740 + 1.57905j$

²Margem de erro 1%

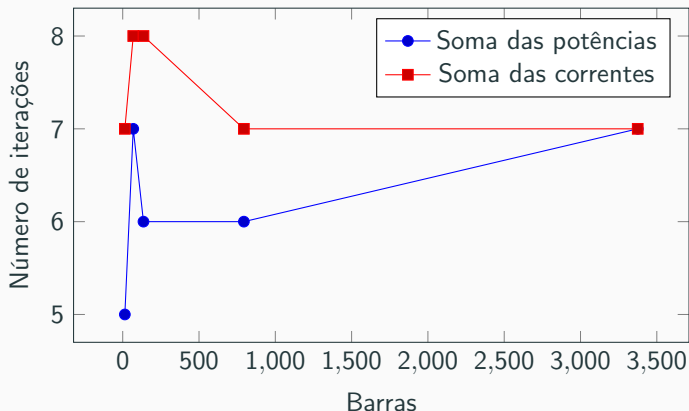
Comparação de desempenho sem otimização - Tempo

Figura 4: Tempo de convergência para os sistemas de teste.



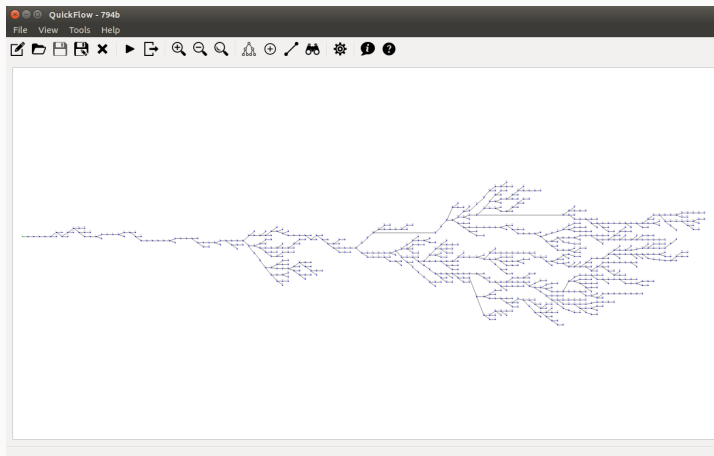
Comparação de desempenho sem otimização - Iterações

Figura 5: Número de iterações necessárias para convergência dos sistemas de teste.



Necessário implementar o algoritmo de otimização.

Figura 6: Programa *QuickFlow* para projeto e análise de sistemas de distribuição de energia elétrica.



- Permite a criação, importação e modificação de sistemas de distribuição energia elétrica trifásicos.
- Possibilita o trabalho com várias unidades (metro, kilometro, pés, milhas e etc.).
- Permite trabalhar com múltiplos alimentadores.
- Realiza o cálculo do fluxo de potência utilizando os dois métodos citados anteriormente.
- Aplica a otimização por redução de barras para agilizar os cálculos (em desenvolvimento).
- Possui código fonte aberto. Está disponível em [GitHub/QuickFlow](#).

Até o presente momento, foi observado que os métodos de resolução do fluxo de potência, empregados no trabalho, se mostram bastante robustos em relação à convergência. O desempenho dos mesmos é satisfatório, sendo necessário poucos milissegundos, em um computador de uso pessoal, para o cálculo dos parâmetros em sistemas compostos por milhares de barras. Em relação a comparação entre os métodos, foi possível observar um melhor desempenho do método da soma das potências, porém, o mesmo não provê a informação sobre a fase das tensões na rede. Quanto a *interface* gráfica, a mesma se mostrou bastante útil na análise de sistemas de distribuição de energia elétrica, agilizando a avaliação dos resultados e o teste com sistemas diferentes.

O trabalho desenvolvido é um passo inicial no desenvolvimento de uma ferramenta para análise do fluxo de potência. Assim, há a possibilidade de explorar uma grande quantidade de outros algoritmos, tanto de cálculo, como de formas de otimização para o fluxo de potência. Uma outra possibilidade é a integração de métodos para o cálculo do fluxo de potência ótimo, o qual encontra o melhor estado de operação da rede, de modo a minimizar o custo do kilowatt hora entregue ao consumidor final.

Referências

- [1] A. Alsaadi and et al. An effective approach for distribution system power flow solution. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 3(1), 2009.
- [2] Renato G. Cespedes. New method for the analysis of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(1), Janeiro 1990.
- [3] Ministério de Minas e Energia. Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro. Technical report, Ministério de Minas e Energia, Agosto 2015. Disponível em:
www.mme.gov.br/documents/10584/2027273/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Agosto-2015.pdf.

- [4] Leonardo Mendonça Oliveira de Queiroz. *Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica*. PhD thesis, Unicamp, 2010.
- [5] Jornal O Dia. Ligações clandestinas correspondem a 16% das perdas de energia elétrica, Agosto 2015. Disponível em:
<http://portalcostanorte.meionorte.com/ligacoes-clandestinas-correspondem-a-16-das-perdas-de-energia-eletrica/>.
- [6] Ulas Eminoglu and et al. A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models. *Electric Power Systems Research*, (76):106–114, 2005.
- [7] Puthireddy Umapathi Reddy and et al. Power flow analysis of three phase unbalanced radial distribution system. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, março 2012.

- [8] Dariush Shirmohammadi and et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2), Maio 1988.
- [9] Dariush Shirmohammadi and et al. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2), Maio 1995.
- [10] Yubin Yao and et al. Convergence analysis on the power flow methods for distribution networks with small impedance branches. In *The 3th international conference on deregulation and restructuring and power technologies (DRPT 2008)*, Abril 2008.

Perguntas?