

# Análise de Fluxo de Potência através de métodos numéricos

A.L.A. Oliveira, D.M. Silva and R.A.K. Nascimento

**Abstract**—A load study consists of determining the voltage, the current of the power and the power factor or reactive power at the various points of an electrical network under real conditions or under assumptions of normal operation. These studies are intended to plan the expansion of the system, since the satisfactory operation of this system depends on the knowledge of its interconnection with the other systems, of new loads, of new generating plants and of new transmission lines that may be installed. Before the development of computers, load flow studies were carried out on AC network analyzers, which were a small-scale replica of a real system by intermediate components of electronic circuits. However these processes are too long and tiring. With the rise of computers, flow studies can be retrieved and analyzed in increasingly complex systems, in addition, these computers can operate more than 1,000 bars with results being obtained in a simpler and faster way than computer methods in previous decades.

**Index Terms**—Load Flow, electrical network, generating plants, computer methods.

## I. INTRODUÇÃO

As informações obtidas por soluções numéricas para fluxo de carga constituem uma indicação de grande contribuição para os engenheiros de sistemas de potência. Nessas as informações coletadas servem de base para operação de sistemas, até então, inexistentes ou que estejam em planejamento, ou ainda para analisar efeitos de mudanças em sistemas existentes. Os resultados obtidos constituem em, casos recorrentes, tabelas com informações sobre o nome, o módulo da tensão, seu ângulo, a geração e a carga ao qual está submetida cada barra. Acompanhado a isso, existe o fluxo de potência em megawatts e megavars que constituem informações suficientes para a tomada de decisão que qualquer engenheiro eletricista que necessite realizar algum tipo de intervenção no sistema de transmissão de energia[2].

Na operação de um sistema de potência, qualquer variação na tensão de um trafo, causada por uma variação na carga, pode tornar necessária uma mudança da posição dos transformadores providos de comutação de derivação, de modo a manter a estabilidade do sistema como um todo. Se a tensão não estiver dentro de um padrão estipulado previamente, um programa realiza um conjunto de interações para estimar uma nova variação no comutador de derivação[3]. Esse processo se repete quantas vezes for necessário até ser definida uma solução que atenda os requisitos regulamentados por uma agência governamental.

A.L.A. Oliveira, Universidade Estadual do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mail: andre.oliveira11@unioeste.br).

D.M. Silva, Universidade Estadual do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mail: daniel.silva11@unioeste.br).

R.A.K. Nascimento, Universidade Estadual do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (e-mail: rafael.nascimento2@unioeste.br).

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### A. Método de Gauss-Seidel

Como um dos métodos iterativos mais comumente utilizados, Gauss-Seidel consiste em isolar os termos da diagonal principal, usando a equação resultante para encontrar um valor aproximado para o termo isolado da diagonal. Diferentemente de Gauss-Jacobi, Seidel utiliza o valor da interação anterior para definir a aproximação da próxima componente da diagonal. Ou seja, definimos um valor para  $x_1$ , calculamos um novo  $x_1$  e usamos esse novo para  $x_2$  e assim sucessivamente[5].

$$x_1 = \frac{b_1 - a_{12}x_2 - a_{13}x_3}{a_{11}} \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{b_2 - a_{21}x_1 - a_{23}x_3}{a_{22}} \quad (2)$$

Esse equacionamento descrito acima são necessários para a solução linear  $[A]X = B$

### B. Método LU decomposição

A solução linear por LU, diferentemente de Gauss-Seidel é um método de solução linear direta, não passando por várias interações. Esse segue os mesmos princípios que a Eliminação por Gauss, onde é feita a eliminação progressiva dos termos inferiores a diagonal principal e a solução progressiva da matriz. Em LU temos a separação da matriz A em duas novas, uma denominada U que é igual a matriz resultante da eliminação e uma matriz L, que possui os valores que resultam na triangularização inferior de U. Após é buscada uma matriz D, resultante de L e B (que é a matriz com os valores a direita da igualdade do sistema) e por fim usamos U e D para encontrar a matriz resposta ao sistema proposto inicialmente. Uma representação desse processo é apresentada na Fig. 1.

### C. Fluxo de Potência

O cálculo do fluxo de carga, também denominado por alguns autores como fluxo de potência, consiste em definir estáticamente os estados que se encontram as barras, as distribuições de energia e outras grandezas importantes para a análise do sistema estudado[4]. Como o estudo é fundamentado em meios estáticos, pode-se desconsiderar os efeitos transitórios uma vez que esses ocorrem de modo suficientemente lento, não afetando drasticamente os resultados finais[1].

As equações básicas para esse tipo de modelagem seguem os princípios da conservação de potência ativa e reativa em um nó da rede (Lei de Kirchhoff das Correntes). A Lei de Ohm nos fornece os estados ao qual os componentes ligados as barras se encontram. Conforme descrito anteriormente, o

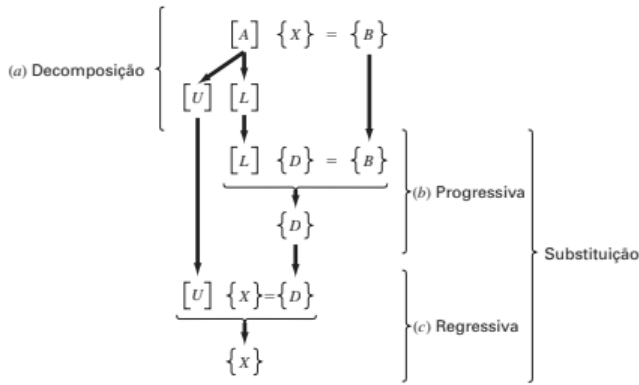


Fig. 1. Passos da decomposição LU

fluxo de carga pode ser formulado de modo simplificado como a associação de quatro variáveis características para a maioria dos problemas, onde duas são condições fornecidas e as outras duas incógnitas do estudo:

$V_k$  - magnitude da tensão nodal da barra

$\theta_k$  - ângulo de tensão nodal

$P_k$  - Potência ativa

$Q_k$  - Potência reativa

O fluxo pode ser fornecido segundo as equações:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (3)$$

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (4)$$

Onde o subíndice  $km$  representa a identificação dos pontos das barras  $K$  e  $m$ . Os índices  $g_{km}$  e  $b_{km}$  são respectivamente a condutância e a susceptância do elemento em série que liga as barras.  $V_k$  é a tensão sobre a referência.

#### D. Aplicações do Fluxo de Carga

A análise do fluxo de potência tem como principais objetivos:

- **Segurança:** a simulação do fluxo de potência no SEE é eficaz no sentido de se estimar eventuais violações nos limites de operação do mesmo, sendo possível assim detectar problemas futuros que possam causar a perda de transmissão de energia como a perda de estabilidade de partes do sistema elétrico e que possam causar o colapso do sistema.
- **Planejamento e Operação:** a análise do fluxo de potência atua como uma poderosa ferramenta no processo de avaliação de novas configurações do sistema elétrico para atender o aumento da demanda dentro dos limites da segurança do sistema elétrico. Assim, também procuram-se configurações dos sistemas elétricos com as menores perdas de operação.
- **Simulação de Sistemas Elétricos operando sob condições anormais decorrentes da saída de operação de equipamentos** como linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras. A saída de operação desses equipamentos pode se dar pela necessidade de manutenção

$$\begin{bmatrix} 17,333333 & -0,666666 & 0 \\ -0,666666 & 9,04902 & -5,882353 \\ 0 & -5,882353 & 10,882353 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,8 \\ -0,15 \\ -0,25 \end{bmatrix}$$

Fig. 2. Sistema para 4 barras

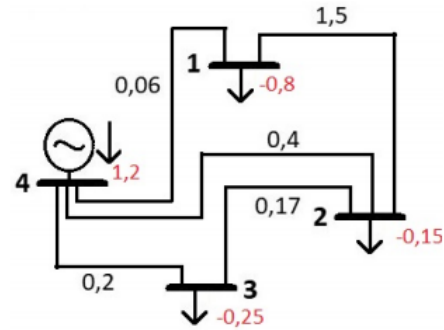


Fig. 3. Diagrama Unifilar

preventiva ou corretiva, ou ainda, em se tratando de linhas de transmissão, pelo desligamento automático após descargas atmosféricas.

### III. METODOLOGIA EMPREGADA

O ponto de partida para obter os dados necessários para o cálculo do fluxo é o circuito estrutural de análise, sendo assim, são necessários os valores das impedâncias em série e das impedâncias de derivação da linha de modo que seja possível determinar a matriz admitância. Outra consideração que deve ser feita é qual variável das citadas anteriormente, será mantida constante. Como uma das barras o fluxo não é especificado, denominamos essa de barra de oscilação, é nessa que concentramos o foco de estudo utilizando o método mais atrativo para cálculo uma vez que ela se encontra vinculada ao sistema gerador. A Figura 2 ilustra o sistema de estudo desse, com as condições de saída do nosso sistema (a esquerda), junto da matriz admitância. Como utilizamos a barra 4, Figura 3, como referencial ou barra de oscilação, podemos omiti-lá do sistema e ficamos com o sistema apresentado na Figura 2. Os valores para os termos  $a_{12}, b_{21}, b_{23}$ , etc., são as admitâncias entre as respectivas barras e os termos das diagonais principais a soma das admitâncias ligadas a aquela barra.

Para solução do sistema da Figura 2, foram utilizados dois métodos e comparados os resultados que seriam adquiridos para os ângulos necessários para o sistema linear. O primeiro método foi o Gauss-Seidel, conforme a Figura 4, e após esse foi verificada a solução pelo método direto LU, com resultado na Figura 5. Ambos foram elaborados em Python, como forma de expandir os conhecimentos na linguagem de programação.

É possível observar que no quesito tempo de cálculo, os métodos não levam muito tempo para achar uma solução. Mas quando se trata de uma aproximação suficientemente igual

```

C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\Shared\Python151\bin\python.exe
Digite o numero de equacoes do sistema:3
digite os valores da (1a) linha de [A]: 17.333333,-0.666666,0
digite os valores da (2a) linha de [A]: -0.666666,9.04902,-5.882353
digite os valores da (3a) linha de [A]: 0,-5.882353,10.882353
digite o valor da (1a) linha de [B]: -.8
digite o valor da (2a) linha de [B]: -.15
digite o valor da (3a) linha de [B]: -.25
digite o valor inicial de X1: 2
digite o valor inicial de X2: 3
digite o valor inicial de X3: 4
digite o erro relativo:0.005

RESULTADOS:
X1 = -0.04823288503328836
X2 = -0.0540573991638368
X3 = -0.05219318874728589

NÚMERO DE ITERAÇÕES: 15

TEMPO DE EXECUÇÃO: 0.005365300000008233
Press any key to continue . . .

```

Fig. 4. Solução por Gauss-Seidel

```

Solucao com Pivoteamento:
[[-0.04823303]
 [-0.05405869]
 [-0.05219389]]

Tempo (Solucao com Pivoteamento): 0.0002386000001024513

```

Fig. 5. Solução por LU

entre eles, Gauss-Seidel tende a se distanciar em algumas casas decimais do valor adquirido por LU. Os critérios para julgamento sobre se, essa aproximação vai interferir ou não em um sistema de potência caberá a uma análise mais detalhada da situação. Como o intuito foi o de verificar se a convergência de ambos é razoável, LU e Seidel podem ser julgados ótimas ferramentas numérica para solução de problemas de fluxo de potência.

#### IV. CONCLUSÃO

Como pode ficar evidente, os métodos numéricos fornecem um grande suporte ao engenheiro eletricitista na determinação de componentes ausentes ao sistema e ainda com esses resultados aumentam a capacidade de análise e tomada de decisão quanto ao rumo que deve ser seguido em futuras instalações ou em novos métodos de distribuição do sistema elétrico. Com esses resultados é possível calcular o fluxo de potência ativa entre quaisquer duas barras no sistema de modo preciso e exato, ainda foi de grande valia a aplicação e implementação desses métodos, por mais que possam ser solucionados de modo algébrico mas que demandam bastante tempo e carga intelectual.

#### V. AUTO AVALIAÇÃO RAFAEL

André Luiz Alves de Oliveira: 88

Daniel Marques: 92

Rafael Antonio Klesner Nascimento:85

Trabalho:90

Daniel apresentou o tema utilizado como base para o trabalho, além de ter colaborado com materiais de pesquisa e ter redigido o artigo. André foi responsável por encontrar a maior parte do material de pesquisa utilizado no artigo e por montar a apresentação sobre o assunto abordado. Rafael

foi responsável por desenvolver os algoritmos dos métodos numéricos utilizados nas simulações do trabalho.

#### REFERENCES

- [1] Carmen Lucia Tancredo Borges. Análise de sistemas de potência. *Rio de Janeiro, UFRJ*, 2005.
- [2] Alcir José Monticelli. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher, 1983.
- [3] Bruno Nascimento, Caison Ramos, and Aline Loreto. Power flow analysis using numerical methods. *Ciência e Natura*, 40(0):69–76, 2019.
- [4] Débora Rosana Ribeiro Penido, Leandro Ramos de Araujo, Sandoval Carneiro Jr, and José Luiz Rezende Pereira. Metodologia para análise de sistemas elétricos a n condutores pelo método de injeção de correntes. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 21(3):308–321, 2010.
- [5] William D Stevenson. *Elementos de análise de sistemas de potência*. McGraw-Hill do Brasil, 1974.