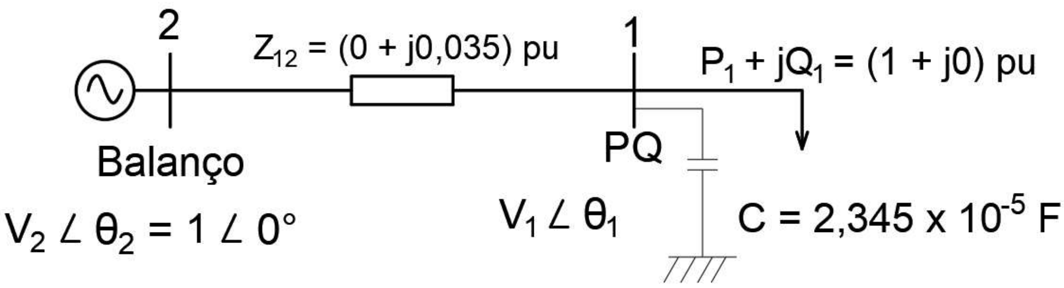
Solução do problema de fluxo de potência.

Figura 1 - Diagrama unifilar do circuito a ser analisado



Fonte: Elaborada pelo autor

```
%   Apenas garantindo que a tela de comando inicie sem conteúdo prévio e que
% não haja nenhum dado guardado de programas anteriores.
clear
clc
```

Número de barramentos (entrada do usuário):

Formato padrão da entrada:

numBarra deverá ser igualado ao número de barramentos do sistema.

Exemplo: Um sistema com três barramentos.

numBarra = 3;

```
numBarra = 2;
```

São criada as matrizes e variáveis que serão utilizadas ao longo do programa.

```
SLACK = 1;
PV = 2;
PQ = 3;
matriz_P = sym("P" , [numBarra , 1]);
matriz_Q = sym("Q" , [numBarra , 1]);
assume(matriz_Q, 'real');
matriz_theta = sym("theta" , [1 , numBarra]);
matriz_V = sym("V" , [1 , numBarra]);
matriz_YG = zeros(numBarra , 1);
```

Especificações de impedância do sistema (entrada do usuário):

Impedância da linha de transmissão:

Se faz indispensável definir o valor das impedâncias das LTs para que o programa funcione corretamente. Seus valores deverão ser especificados em p.u. (por unidade). Para defini-los, deve-se atribuir o valor dos elementos matriz_Z(p, q) da matriz_Z, onde **p** é o barramento extremo de entrada da LT, e **q** é o barramento do extremo de saida. Caso não haja LT entre os barramentos p,q, deve-se definir seu valor de impedância como zero (matriz_Z(p , q) = 0).

Como estamos resolvendo o problema 5.4 especificado, iremos preencher com os dados do mesmo:

Tabela 1 - Dados das linhas de transmissão.

Linha	Impedância série Z / Ω (pu)
1 – 2	$Z_{12} = (0 + j0{,}035)$

Fonte: Elaborada pelo autor

Formato padrão da entrada:

Caso houver necessidade de adicionar ao sistema um n-ésimo barramento:

matriz_Z(n , A) = valor especificado;

matriz_Z(A , n) = valor especificado;

ou

matriz_Z(n , B) = 0;

matriz_Z(N , n) = 0;

Onde A representa todos os barramentos em que existe LT entre n e A

e B representa todos os barramentos em que não existe LT entre n e B

Exemplo: Deseja-se adicionar ao problema em análise um 3º barramento. Este tem conexão (LT) conectando-o **apenas** ao barramento 1. Esta LT tem como valor de impedância Z = (0.005 + j0.004) p.u

Deverá ser adicionado ao código:

matriz_Z(1 , 3) = 0.005 + j*0.004;

matriz_Z(3 , 1) = 0.005 + j*0.004;

matriz_Z(1 , 2) = 0;

matriz_Z(2 , 1) = 0;

```
% Input do usuário: especificações das Linhas de Transmissão (LTs):
matriz_Z = zeros(numBarra,numBarra);

% Impedância da LT entre os barramentos 1-2 ou 2-1 (em pu):
matriz_Z(1,2) = 0 + j*0.0350;
matriz_Z(2,1) = 0 + j*0.0350;
```

Admitância entre o barramento e a terra:

É possível que não seja especificado ou utilizado este valor no problema. Caso seja o caso deixe de preenche-lo. Abaixo apenas são atribuidos como zero para enfatizar a sua existência no problema.

Como no caso em análise esta **não é especificada**, deixaremos como zero os valores respectivos.

Formato padrão da entrada:

Caso deseja-se adicionar no sistema um n-ésimo barramento:

matriz_YG(n) = valor especificado;

ou

matriz_YG(n) = 0;

Exemplo: Deseja-se adicionar ao problema em análise um 3º barramento. Este tem valor de sua admitância barramento-terra $Y_G = (0.0 + \mathrm{j}0.055\ )\ \mathrm{pu}$

matriz_YG(1) = 0;

matriz_YG(2) = 0;

matriz_YG(3) = j*0.055;

```
% Admitância barramento-terra na barra 1, em pu:
matriz_YG(1) = j*4.21 ;

% Admitância barramento-terra na barra 2, em pu:
matriz_YG(2) = 0 ;
```

Matriz admitância:

Após especificados todos parâmetros relacionando impedâncias no sistema, chama-se a função **matriz_admitancia()** , a qual faz o cálculo da matriz admitância do sistema em questão, em pu.

```
% Formando a matriz admitância:
matriz_Y = matriz_admitancia(matriz_Z, matriz_YG);
```

Análise da matriz admitância (Y):

Analisando a saida da função **matriz_admitância()** já é possível que seus dados estão de acordo com os constados no livro:

Tabela 2 - Matriz admitância calculada pelo programa em pu.

```
matriz_Y =

   0.0000 -24.3614i   0.0000 +28.5714i
   0.0000 +28.5714i   0.0000 -28.5714i
```

Fonte: Elaborada pelo autor

Especificações dos dados dos barramentos (entrada do usuário):

Nesta seção deverão ser especificados os dados dos n barramentos (no caso numBarra = 2 barramentos). Cada barramento pode ser um dos três tipos: barramento de **Referência** ou **Folga** (ou Slack em inglês), **PV** ou **PQ.** Cada tipo de barramento deve ser especificados valores diferentes:

- **SLACK:** Deverá ser especificado um valor para tensão (**matriz_V(p)**) , onde p é o número do barramento em questão) e o valor do ângulo de fase deve ser zero (**matriz_theta(p)** = 0).
- **PV:** Deverá ser especificado um valor para potência ativa P (**matriz_P(p)**) e para tensão (**matriz_V(p)**).
- **PQ**: Deverá ser especificado um valor para potência ativa P (**matriz_P(p)**) e para potência reativa Q (**matriz_Q(p)**).

Para tal, deve-se associar cada barramento ao seu tipo (Tipo_barra(p) = {"SLACK" , "PV" ou "PQ"}). O valor especificado deverá constar exatamente igual ao conteúdo entre aspas, sendo o correto **Tipo_barra(p) = "SLACK"**, e por exemplo, um uso incorreto Tipo_barra(p) = slack ou Tipo_barra(p) = Slack.

Formato padrão da entrada:

Caso houver necessidade de adicionar ao sistema um n-ésimo barramento:

*Se o barramento for do tipo balanço (ou **SLACK** em inglês):*

Tipo_barra(n) = SLACK;

matriz_V(n) = valor especificado em pu. ;

matriz_theta (n) = 0;

*Se o barramento for do tipo **PV**:*

Tipo_barra(n) = PV;

matriz_P(n) = valor especificado em pu ;

matriz_V(n) = valor especificado em pu ;

*Se o barramento for do tipo **PQ**:*

Tipo_barra(n) = PQ;

matriz_P(n) = valor especificado em pu ;

matriz_Q(n) = valor especificado em pu ;

Exemplo: Deseja-se adicionar ao problema em análise um 3º barramento tipo PV, onde a potência injetada é P = 1 *pu* e a tensão

V = 1.06 *pu*

Deverá ser adicionado ao código:

Tipo_barra(3) = PV;

matriz_P(3) = 1.00;

matriz_V(3) = 1.06;

```
% Input do usuário: especificações dos barramentos:
% Se for barra tipo SLACK, deve-se definir o valor da tensão (1 pu) e ângulo (0 rad)
% Se for barra tipo PV, deve-se definir Potência ativa injetada em pu e magnitude da tensão em pu.
% Se for barra tipo PQ, deve-se definir Potência ativa injetada em pu e Potência reativa injetada em pu.


% Barramento 1: PQ
Tipo_barra(1) = PQ;
matriz_P(1) = -1.0;
matriz_Q(1) = -0;



% Barramento 2: SLACK
Tipo_barra(2) = SLACK;
matriz_V(2) = 1.00;
matriz_theta(2) = 0;
```

Potência especificada:

Forma um vetor coluna contendo os valores previamente especificados de potência ativa e reativa, assim como os valores não especificados, em forma de variáveis livres:

Figura 2 - Valor da potência total.

$$P_k + jQ_k$$

Fonte: ELECTRIC POWER SYSTEM: A FIRST COURSE, 2012, página 82

```
P_esp = vpa(matriz_P + j * matriz_Q);
```

No exemplo em questão, P_esp teria contido em suas linhas:

Figura 3 - Valor contido no vetor P_esp, em pu.

$$\text{P\_esp} = \begin{pmatrix} -1.0 \\ P_2 + 1.0\, Q_2\, \mathrm{i} \end{pmatrix}$$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Obtendo vetor coluna conténdo variáveis e chutes para o método Newthon-Raphson:

Conforme necessário no método Newthon-Raphson, um vetor com valores iniciais para as variáveis livres das funções se faz necessário. Além disso, é necessário conhecer quais são as variáveis livres em si para o cálculo das derivadas parciais (Jacobiano). Então é chamada a função **obter_dadosNR()** que realiza ambas as tarefas descritas acima.

```
% Construindo o vetor chute X0 e as variáveis para o método NR:
[X0 , variaveis_NR] = obter_dadosNR(Tipo_barra);
```

A saida da função **obter_dadosNR()** é um vetor coluna chute X0 e um vetor linha contendo todas variáveis livres do sistema.

Figura 3 - Valores contidos nos vetores X0 e variaveis_NR.

```
X0 = 2×1
     0
     1
```

$$\text{variaveis\_NR} = \begin{pmatrix} \theta_1 & V_1 \end{pmatrix}$$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale salientar que os elementos de **X0** ,apesar de ser um vetor coluna, são respectivamente equivalentes ao chute inicial das variáveis contidas no vetor linha **variaveis_NR** , onde os valores inicias são: theta2 = 0 , theta3 = 0 e V3 = 0.

```
% Contando número de barramentos PV e PQ:
[nPV , nPQ] = contBarramentos(Tipo_barra);
```

Equações básicas de fluxo de potência:

Conforme deduzido no livro, será utilizada as fórmulas para equações básicas de fluxo de potência:

Figura 4 - Equações de potência fornecidas por cada barramento.

$$P_k = G_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{n} V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \,\mathrm{sen}\, \theta_{km})$$

$$Q_k = -B_{kk} V_k^2 + V_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{n} V_m (G_{km} \,\mathrm{sen}\, \theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km})$$

Fonte: ELECTRIC POWER SYSTEM: A FIRST COURSE, 2012, página 82.

Obtém-se da função **func_potencia()** dois vetores colunas: **equacao_potencia_NR,** que contém as funções em forma de texto (string) das potências deconhecidas (descrita acima) e **f_potencia_geral** que contém as potências conhecidas (especificadas anteriormente) e as desconhecidas (descritas acima).

```
% Obtendo as equações de potência:
[equacao_potencia_NR , f_potencia_geral] = func_potencia(nPV , nPQ , P_esp, Tipo_barra ,matriz_V , matriz_theta, matriz_Y);
```

Função de potência geral:

Constroi-se a função numérica **P_numeric_geral** propriamente dita a partir do vetor **f_potencia_geral** contendo as funções em forma de texto.

```
sym_P_geral = symfun(f_potencia_geral , variaveis_NR);
P_numeric_geral = matlabFunction(sym_P_geral);
```

Método Newton-Raphson:

Em posse das previamente calculadas equações básicas de potência em forma de texto (**equacao_potencia_NR**) , variáveis livres do sistema (**variaveis_NR**) e chute das variáveis livres (**X0**) poderá ser calculada as raízes das equações de potência. Além disso, deverá ser especificado uma tolerância para as raízes obtidas e um número limite de iterações.

```
maximo_de_iteracoes = 1000;
tolerancia = 1.0e-10;
[final_X , final_JAC , iteracoes] = NewtonRaphson(equacao_potencia_NR , variaveis_NR , X0, maximo_de_iteracoes, tolerancia);
```

```
Jacobiano da iteração 1:
  -28.5714         0
         0  -20.1514



Jacobiano da iteração 2:
  -34.5194    0.9998
    1.2087  -30.3480



Jacobiano da iteração 3:
  -33.5102    0.8566
    1.0051  -28.6120



Jacobiano da iteração 4:
  -33.4791    0.8530
    1.0000  -28.5587
```

Saída do método Newton-Raphson:

Depois de ser realizado o método Newthon-Raphson por meio da função de mesmo nome: **NewtonRaphson()** é retornado dela três parâmetros:

- **final_X**: vetor coluna contendo as raizes aproximadas das equações de potência.
- **final_JAC**: o valor numérico do jacobiano da última iteração
- **iteracoes**: número de iterações necessárias para alcançar os valores descritos acima.

Impressão dos dados de potência, ângulo da fase e tensão por barramento:

Chamando funções personalizadas **printP_barras()** , **printX()** são impressos os dados ,previamente calculados, na tela de comandos do usuário.

```
fprintf("Número de iterações = %d ", iteracoes);
```

```
Número de iterações = 5
```

```
cell_X = num2cell(final_X);
P_das_barras = P_numeric_geral(cell_X{:});
printP_barras(P_das_barras);
```

```
Potência fornecida por cada barramento.
 n |      P + Q*i [pu]
------------------------------
 1 |   -1.00000+0.000000i
 2 |    1.00000-4.907678i
```

```
fprintf("Jacobiano da última iteração:\n");
```

```
Jacobiano da última iteração:
```

```
disp(final_JAC);
```

```
   33.4791   -0.8530
   -1.0000   28.5587
```

```
fprintf("\n");
```

```
printX(variaveis_NR , final_X, matriz_V, matriz_theta);
```

```
Tensão e ângulo nos barramentos.
 n |     V  [pu]  |  θ [rad]
------------------------------
 1 |    1.17229   |   -0.02986
 2 |    1.00000   |    0.00000
```

Cálculo do fluxo de potência nas LTs:

Em posse dos dados das raízes das equações de potência, calcula-se os valores de fluxo de potência das LTs usando a seguinte fórmula como base:

$$S_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq}$$

$$P_{pq} + jQ_{pq} = \bar{V}_p \bar{I}^* , \left(I = \frac{V_q - V_j}{Z_{\mathrm{pq}}} \right)$$

Portando utilizaremos para o cálculo de fluxo de potência nas LTs:

$$P_{\mathrm{pq}} + j\mathrm{Q}_{\mathrm{pq}} = V_p \left(\frac{V_q{}^* - V_j{}^*}{Z_{\mathrm{pq}}{}^*} \right)$$

```
[P_nas_LTs] = flxuo_potencia_LT(variaveis_NR , final_X , matriz_V, matriz_theta, matriz_Z);
printP_LTs(P_nas_LTs);
```

```
Fluxo de potência ativa e reativa entre os barramentos p e q.
  p -> q |    P + Q * i [p.u.]
---------------------------------
  1 -  2 |   -0.85316+5.796208i
  2 -  1 |    0.85316-4.922610i
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] POWER flow in power system networks. *In*: MOHAN, Ned. **Electric Power System**: A first course. 1. ed. Denver: John Wiley & Sons, Inc., 2012. v. 1, cap. 5, p. 78-93. ISBN 978-1-118-07479-4.

[2] LOAD flow studies. *In*: STAGG, Glenn W.; EL-ABIAD, Ahmed H. **Computer methods in power system analysis**. International Student edition. ed. [*S. l.*]: McGraw-Hill Inc., 1968. v. 1, cap. 8, p. 257-333. ISBN 978-0070857643.