

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIAS E TECNOLOGIA (FAET)  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EVANDRO FERNANDES LEDEMA

AVALIAÇÃO 2 DA UNIDADE 1  
Fluxo de Potência

CUIABÁ

2021

## **RESUMO**

O trabalho a seguir serve como avaliação de conhecimento da primeira unidade do curso de Análise de Sistemas de Energia Elétrica 2, ministrado pelo Prof. Dr. Carlos Henrique Portugal Poma. Esta segunda avaliação abrange o estudo de fluxo de potência através de métodos numéricos, com o objetivo de solidificar os conhecimentos adquiridos. Utilizou-se de vídeo aulas gravadas e material disponibilizados pelo professor da disciplina. Como forma de contornar a falta do programa computacional ANAREDE utilizou-se o programa SIMULIGHT para comparação de resultados. Para o cálculo de fluxo de potência através de métodos numéricos foi utilizado o programa computacional MATLAB.

**Palavras-Chave:** Fluxo de potência, MATLAB, SIMULIGHT.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de Admitância $N \times N$ .....	1
Figura 2 - Diagrama unifilar do sistema teste de 3 barras .....	2
Figura 3 - Circuito equivalente $\pi$ para transformadores. ....	3
Figura 4 - Formulações para A, B e C do modelo $\pi$ . ....	4
Figura 5 – Fluxograma script fluxo de potência. ....	5
Figura 6 - Definição dos valores conhecidos e chutes iniciais .....	6
Figura 7 - Matriz de admitância .....	6
Figura 8 - Matriz de admitância após cálculo do programa. ....	6
Figura 9 - Injeção de potência $S_k$ , na Barra k. ....	7
Figura 10 – Cálculo da Potência injetada. ....	7
Figura 11 - Resíduos. ....	8
Figura 12 - Teste de convergência, exibição do resultado. ....	8
Figura 13 - Teste de convergência, Jacobiana reduzida. ....	9
Figura 14 - Jacobiana Reduzida para a 1 iteração. ....	9
Figura 15 - Exibição dos resultados. ....	10
Figura 16 - Resultados do fluxo de potência. ....	10
Figura 17 - Simulação Fluxo de Potência SIMULIGHT.....	10

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Dados Gerador.....	2
Tabela 2 - Dados Cargas Consumidas.....	2
Tabela 3 - Dados dos Transformadores.....	3
Tabela 4 - Dados da Linha de Transmissão.....	3
Tabela 5 - Matriz de Admitância.....	5
Tabela 6 - Matriz de admitância Atividade 1.....	5

## SUMÁRIO

1	ANÁLISE E ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA .....	1
1.1	MATRIZ DE ADMITÂNCIA .....	1
1.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA.....	2
1.2.1	ATIVIDADE 1 .....	2
2	CONCLUSÕES .....	10
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11

## 1 ANÁLISE E ESTUDO DE FLUXO DE POTÊNCIA

O regime permanente é o modo de funcionamento mais importante do sistema elétrico. O estudo de fluxo de potência é realizado nessa situação. Com isso analisa-se as características de funcionamento do sistema, observando-se os fluxos de potências ativas e reativas.

Todavia o estudo do fluxo de potência em geral é trabalhoso e por isso se torna necessário utilizar sistemas computacionais e métodos numéricos que facilitem os cálculos que de outra maneira seriam extensos ou mesmo inviáveis para sistemas grandes. Além de programas como ANAREDE, SIMULIGHT, POWERFACTOR, ETAP, SKM e PS CAD que fazem os cálculos em segundo plano e exibem os resultados também existem programas e linguagens de programação que após a criação de scripts conseguem resolver as equações de fluxo de potência. Os programas que necessitam de scripts mais utilizados para resolver fluxo de potência são MATLAB, SCILAB e as linguagens de programação C/C++, PYTHON e FORTRAN. Essa avaliação terá como enfoque a utilização da segunda categoria de programas para resolver as equações. O programa escolhido foi MATLAB.

### 1.1 MATRIZ DE ADMITÂNCIA

Para a avaliação 2 de Análise de Sistemas de Energia Elétrica 2 iremos precisar montar a matriz de admitância. Para isso precisamos utilizar a formulação nodal da forma matricial, pelo método de análise nodal de circuitos elétricos, baseado na Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC).

$$[I] = [Y_{barra}] \cdot [V] \quad (1)$$

Onde a matriz de admitância tem barra de dimensões NxN:

$$[Y_{barra}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix}$$

**Figura 1** - Matriz de Admitância NxN

Fonte: Compilação do Autor.

Utilizando o modelo  $\pi$  para a linha de transmissão e o transformador. Onde para a linha de transmissão a admitância assume a forma de uma admitância série com duas

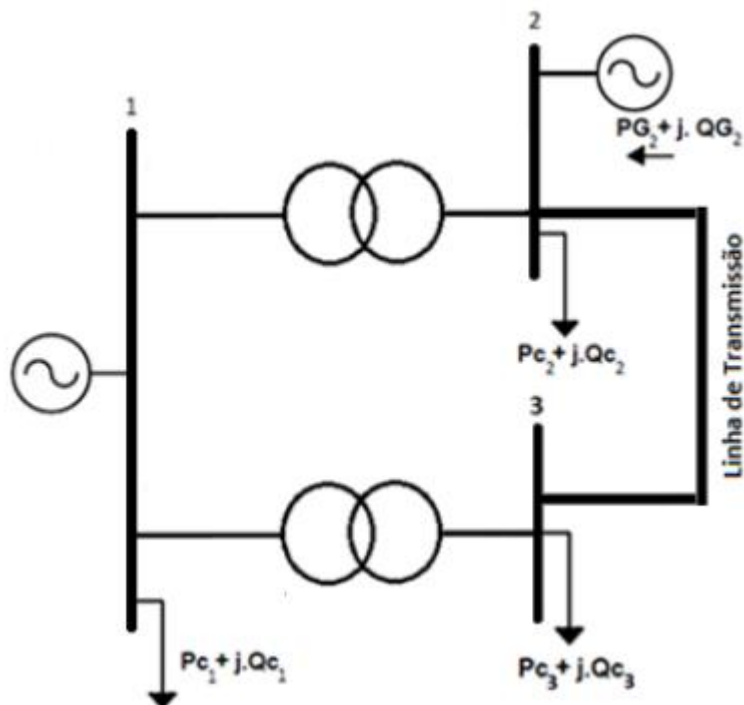
admitâncias shunt, o mesmo ocorre para o transformador, porém com formulação diferente para obter as admitâncias série e shunt como será demonstrado.

## 1.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

A avaliação será realizada de acordo com o **caso 6** da tabela disponibilizada pelo Professor Doutor Carlos Portugal.

### 1.2.1 ATIVIDADE 1

**Figura 2** - Diagrama unifilar do sistema teste de 3 barras



Fonte: Avaliação 2

**Tabela 1** - Dados Gerador.

Gerador da barra 2	
PG2 MW	V2 pu
15,09	0,92

Fonte: Avaliação 2.

**Tabela 2** - Dados Cargas Consumidas.

Cargas Consumidas nas barras 1, 2 e 3					
Pc1 MW	Pc2 MW	Pc3 MW	Qc1 MVar	Qc2 MVar	Qc3 MVar
14,02	23,07	20,04	7,01	22,05	15,07

Fonte: Avaliação 2.

**Tabela 3** - Dados dos Transformadores.

Transformadores	
Xt pu	Tap pu = a
0,6	0,98

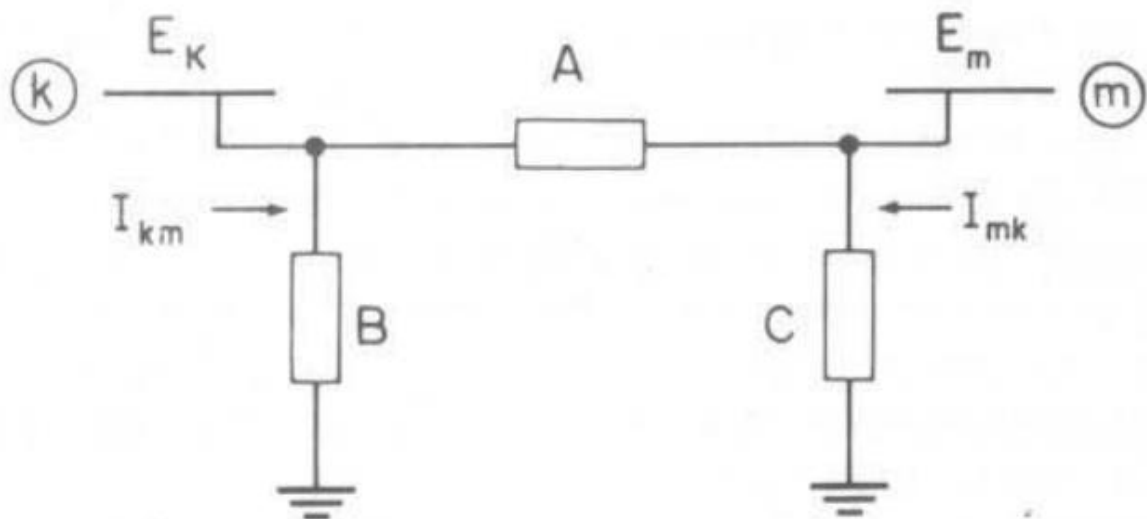
Fonte: Avaliação 2. Os dois transformadores da figura 3 são iguais.

**Tabela 4** - Dados da Linha de Transmissão.

Linha de transmissão		
R pu	X pu	b pu
0,02	0,3	0,2

Fonte: Avaliação 2.

Na figura 2 considera-se que a barra de referência, slack, é a barra 1, onde temos  $V_1/\theta_1 = 1/0^\circ$  pu. A partir desse diagrama se calculará as admitâncias A, B e C do modelo  $\pi$  dos transformadores.

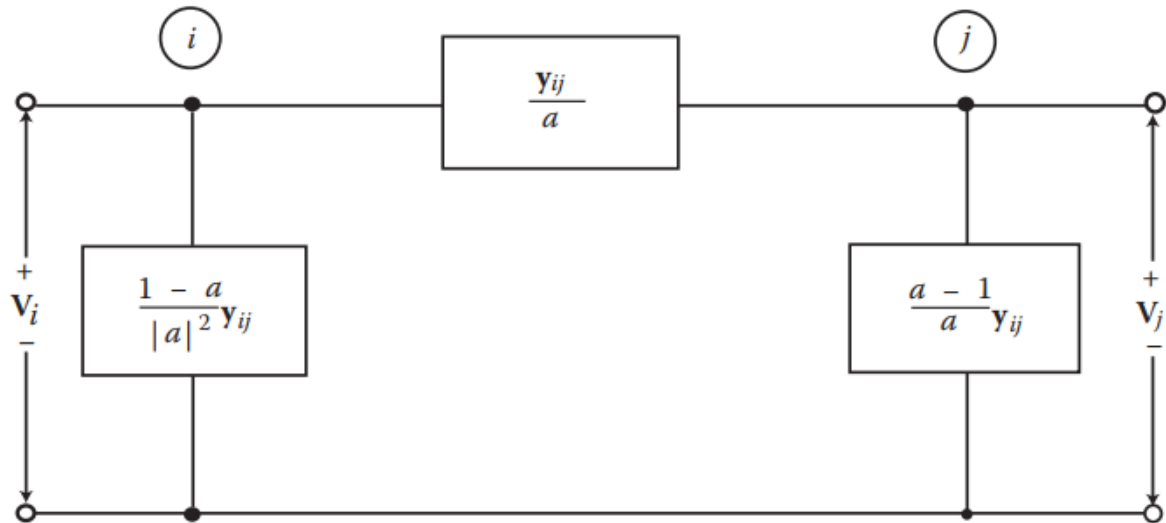
**Figura 3** - Circuito equivalente  $\pi$  para transformadores.

Fonte: Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica 1946, p. 7.

As formulações para os termos A, B e C do circuito equivalente  $\pi$  do transformador está na figura abaixo:



**Figura 4** - Formulações para A, B e C do modelo  $\pi$ .



Fonte: GÖNEN, Modern Power System Analysis, 2013, P. 483.

Respectivamente da esquerda para direita B, A e C. Considerando  $Y_{km} = Y_{ij}$  e  $a$  como o tap do transformador.

Simplificando os termos A, B e C do modelo  $\pi$  para transformadores temos:

$$A = \frac{Y_{km}}{a} \quad (2)$$

$$B = \frac{Y_{km}}{a} \left( \frac{1}{a} - 1 \right) \quad (3)$$

$$C = Y_{km} \left( 1 - \frac{1}{a} \right) \quad (4)$$

Para encontrar as impedâncias da LT usamos a seguinte formulação:

$$Y_{LT} = Z^{-1} = \frac{1}{R+jX} = \left( \frac{R}{R^2+X^2} \right) + j \left( \frac{-X}{R^2+X^2} \right) \quad (5)$$

$$Y_{sh} = \frac{b}{2} \quad (6)$$

Realizados os cálculos utilizando o Excel, chegou-se aos seguintes resultados:

Linha de Transmissão:  $Y_{LT} = 0,2212 - j3,3186$ ,  $Y_{sh} = 0,1000$

Modelo  $\pi$ :

$$A = -j1,7007$$

$$B = -j0,0347$$

$$C = j0,0340$$

Com esses resultados monta-se a matriz de admitância:

**Tabela 5** - Matriz de Admitância.

$Y_{KM}$	1	2	3
1	$(A+B) + (A+B)$	$-A$	$-A$
2	$-A$	$C + A + Y_{LT} + Y_{SH}/2$	$-Y_{LT}$
3	$-A$	$-Y_{LT}$	$C + A + Y_{LT} + Y_{SH}/2$

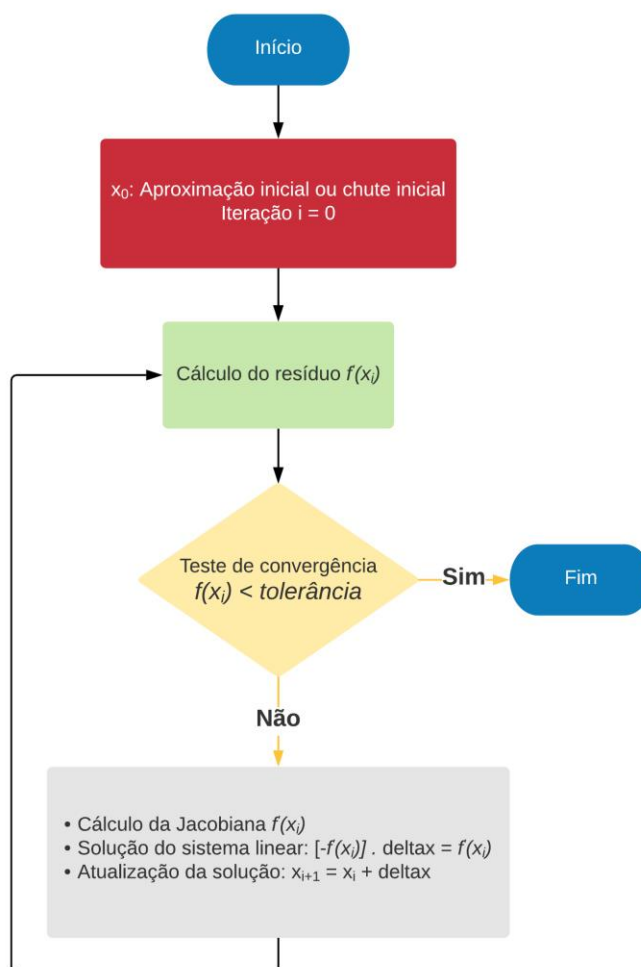
Fonte: Autor.

**Tabela 6** - Matriz de admitância Atividade 1.

$Y_{KM}$	1	2	3
1	$-j3,4708$	$j1,7007$	$j1,7007$
2	$j1,7007$	$0,2212 - j4,8853$	$-0,2212 + j3,3186$
3	$j1,7007$	$-0,2212 + j3,3186$	$0,2212 - j4,8853$

Fonte: Autor.

Foi utilizado o fluxograma disponibilizado pelo professor como base para a implementação do script no MATLAB:

**Figura 5** – Fluxograma script fluxo de potência.

Fonte: Autor.

Seguindo o fluxograma acima, inicia-se o script definindo no programa as informações conhecidas: para barra slack -  $V_1$ ,  $\Theta_1$  e para barra PV -  $V_2$ . Também, foi definido os chutes iniciais para os valores desconhecidos de  $\Theta_2$ ,  $V_3$ ,  $\Theta_3$ :

**Figura 6** - Definição dos valores conhecidos e chutes iniciais

```
%Tensão de referência V1
V(1)=1;
%Ângulo de referência O1
Theta(1)=0;

%Tensão Barra 2
V(2)=0.92;
%Incógnita Barra 2 - Chute inicial O2
Theta(2)=0;

%Incógnita Barra 3 - Chute inicial V3 e O3
V(3)=1;
Theta(3)=0;
```

Fonte: Autor.

Como estamos trabalhando com grandezas elétricas em pu o chute para tensão será de 1 pu e para ângulo de 0 rad.

Prosseguindo com o fluxograma, monta-se então a matriz de admitância com os dados já definidos na tabela 6:

**Figura 7** - Matriz de admitância

```
%Montagem da matriz de admitância Segundo Modelo
Y(1,1) = 0.0000-3.4708i;
Y(1,2) = 0.0000+1.7007i;
Y(1,3) = 0.0000+1.7007i;
Y(2,1) = 0.0000+1.7007i;
Y(2,2) = 0.2212-4.8853i;
Y(2,3) = -0.2212+3.3186i;
Y(3,1) = 0.0000+1.7007i;
Y(3,2) = -0.2212+3.3186i;
Y(3,3) = 0.2212-4.8853i;

%Matriz de Admitância - Modelo Y = G +jB
G = real(Y);
B = imag(Y);
```

Fonte: Autor.

**Figura 8** - Matriz de admitância após cálculo do programa.

```
disp(Y)
0.0000 - 4.2084i    0.0000 + 2.2936i    0.0000 + 2.2936i
0.0000 + 2.2936i    0.1216 - 3.8932i   -0.1216 + 1.4182i
0.0000 + 2.2936i   -0.1216 + 1.4182i    0.1216 - 3.8932i
```

Fonte: Autor.

O próximo passo é realizar o cálculo da potência injetada nas barras. Todavia, somente calcularemos as barras onde se tem elementos desconhecidos, isto ocorre nas barras 2 e 3. Portanto, calcula-se a potência através de recursos de loop e fórmulas já estabelecidas para potência injetada:

**Figura 9** - Injeção de potência  $S_k$ , na Barra  $k$ .

$$P_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}]$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}]$$

Para  $k = 1, \dots, n$

Fonte: Slide I.5 Método de Solução de Fluxo de Potência, AVA, 2021.

Segue a implementação feita no MATLAB das equações de potência injetada:

**Figura 10** – Cálculo da Potência injetada.

```
%loop - while
while(1)
    %Variáveis recebendo zero
    P(2) = 0;
    P(3) = 0;
    Q(2) = 0;
    Q(3) = 0;

    %Equações Matriz Jacobiana: dimensão 2NPQ + NPV = 2.(1)+1 = 3.
    %A dimensão da matriz será 3x3, 3 variáveis de estado.
    %O index m irá de 1 até a quantia de barras, notação KM.
    for m = 1:3,
        Theta2x = Theta(2)-Theta(m);
        Theta3x = Theta(3)-Theta(m);
        P(2) = P(2) + V(m) * (G(2,m)*cos(Theta2x)+B(2,m)*sin(Theta2x));
        P(3) = P(3) + V(m) * (G(3,m)*cos(Theta3x)+B(3,m)*sin(Theta3x));
        Q(2) = Q(2) + V(m) * (G(2,m)*sin(Theta2x)-B(2,m)*cos(Theta2x));
        Q(3) = Q(3) + V(m) * (G(3,m)*sin(Theta3x)-B(3,m)*cos(Theta3x));
        % é necessário colocar P(2) e Q(2) novamente pois não possui comando de
        % acréscimo como c++: ++, --, +=, -=, *=, etc.

    end

    %Agora é preciso juntar o somatório a Parte que estava fora na fórmula:
    P(2) = V(2)*P(2);
    P(3) = V(3)*P(3);
    Q(2) = V(2)*Q(2);
    Q(3) = V(3)*Q(3);
```

Fonte: Autor.

O próximo passo no foi calcular os resíduos  $g$ , onde  $P_e$ , potência especificada;  $P_g$  potência gerada;  $P_c$ , potência consumida; o mesmo para  $Q$ :

$$\Delta P_2 = P_e - P_2 = P_g - P_{c2} - P_2 \quad (7)$$

$$\Delta P_3 = P_e - P_3 = P_g - P_{c3} - P_3 \quad (8)$$

$$\Delta Q_2 = Q_e - Q_2 = Q_g - Q_{c2} - Q_2 \quad (9)$$

Implementando os resíduos no MAATLAB:

**Figura 11 - Resíduos.**

```
%Resíduos: g = [3x1]:
g(1,1) = -0.0798-P(2);
g(2,1) = -0.2004-P(3);
g(3,1) = -0.1507-Q(3);
```

Fonte: Autor.

Na sequência do fluxograma é feito o teste de convergência de acordo com a tolerância escolhida: Tolerância < 1E-3. Uma condicional irá determinar se o resultado será exibido ou se deverá ser calculado a Jacobiana:

**Figura 12 - Teste de convergência, exibição do resultado.**

```
%Teste de Convergência
if (erroMax<Tol),
    fprintf('> Fluxo de potência bem sucedido. \n\n')
    %Exibir resultado:
    fprintf('> Theta(2): \n');
    disp(180*Theta(2)/pi);
    fprintf('> Theta(3): \n');
    disp(180*Theta(3)/pi);
    fprintf('> V(3): \n');
    disp(V(3));
    break
```

Fonte: Autor.

**Figura 13** - Teste de convergência, Jacobiana reduzida.

```

else
    %Jacobiana Reduzida
    Theta23 = Theta(2)-Theta(3);
    H22 = -B(2,2)*V(2)*V(2)-Q(2);
    H23 = V(2)*V(3)*(G(2,3)*sin(Theta23)-B(2,3)*cos(Theta23));
    H32 = -V(2)*V(3)*(G(2,3)*sin(Theta23)+B(2,3)*cos(Theta23));
    H33 = -B(3,3)*V(3)*V(3)-Q(3);
    N23 = V(2)*(G(2,3)*cos(Theta23)+B(2,3)*sin(Theta23));
    N33 = (P(3)+G(3,3)*V(3)*V(3))/V(3);
    M32 = -V(2)*V(3)*(G(2,3)*cos(Theta23)-B(2,3)*sin(Theta23));
    M33 = -G(3,3)*V(3)*V(3)+P(3);
    L33 = (Q(3)-B(3,3)*V(3)*V(3))/V(3);
    %Montagem da Jacobiana Reduzida
    J = [H22 H23 N23; H32 H33 N33; M32 M33 L33];

    %Solução do Sistema Linear
    %Incógnitas do sistema da forma g = J . X
    X = J\g;

    %Atualizar as incógnitas, variáveis de estado
    Theta(2) = Theta(2)+X(1);
    Theta(3) = Theta(3)+X(2);
    V(3) = V(3)+X(3);

    %counter
    i = i+1;

```

Fonte: Autor.

A jacobiana reduzida para a primeira iteração:

**Figura 14** - Jacobiana Reduzida para a 1 iteração.

```

J: 3x3 double =
    4.6178    -3.0531    -0.2035
   -3.0531     4.7538     0.2389
    0.2035    -0.2035     5.0168

```

Fonte: Autor.

Para o resultado final utiliza-se o código `disp()` para exibir o estado final das variáveis desejadas, para os ângulos serem exibidos em graus é necessário fazer a conversão como está abaixo:

**Figura 15** - Exibição dos resultados.

```
%Exibir resultado:
fprintf('> Theta(2): \n');
disp(180*Theta(2)/pi);
fprintf('> Theta(3): \n');
disp(180*Theta(3)/pi);
fprintf('> V(3): \n');
disp(V(3));
```

Fonte: Autor.

O resultado para o fluxo de potência utilizando o método NEWTON-RAPHSON no MATLAB é o seguinte:

**Figura 16** - Resultados do fluxo de potência.

```
> Fluxo de potência bem sucedido.
```

```
> Theta(2):
-4.5938
```

```
> Theta(3):
-5.5759
```

```
> V(3):
0.9378
```

Fonte: Autor.

Fazendo a simulação no programa computacional SIMULIGHT, obtém-se os seguintes resultados de fluxo de potência com o objetivo de comparar com os resultados obtidos do script no MATLAB:

**Figura 17** - Simulação Fluxo de Potência SIMULIGHT.

ID				Tensão		Geração		Carga	
Barra	Nome	Subestação	Cmp	[ pu]	[ °]	[ MW]	[ Mvar]	[ MW]	[ Mvar]
1	Barra 1	Barra 1	+	1.0000	0.00	42.053	39.404	14.020	7.010
2	Barra 2	Barra 1	+	0.9200	-4.59	15.090	-7.008	23.070	22.050
3	Barra 3	Barra 1	+	0.9377	-5.58	0.000	0.000	20.040	15.070

Fonte: Autor.

## 2 CONCLUSÕES

Vemos que o método de NEWTON-RAPHSON é muito adequado para se encontrar o resultado de fluxo de potência. Os resultados encontrados no MATLAB são próximos dos encontrados no SIMULIGHT. As diferenças se dão devido as aproximações das casas decimais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MONTICELLI, Alcir José. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo, SP, BR: Edgar Blücher, 1983.

GÖNEN, Turan. *Modern Power System Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.

POMA, Carlos Henrique Portugal, *Material Disponibilizado AVA*. Cuiabá, MT, BR: AVA, 2021.