

8

Referências Bibliográficas

- [1] Kundur P., et.al. "Definition and Classification of Power System Stability," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.19, pp.1387-1401, May 2004.
- [2] Prada, R.B.; Palomino, E.C.; Dos Santos, J. O R; Bianco, A.; Pilotto, L.A S, "Voltage stability assessment for real-time operation," **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, , vol.149, no.2, pp.175,181, Mar 2002.
- [3] França, R.F., dos Santos, J.O.R., Prada, R.B., Ferreira, L.C.A., Bianco, A., 2003, "Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão na Operação em Tempo Real", 5th **Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission**, São Pedro, São Paulo, Brasil.
- [4] Brown, Homer E. "**Solution of large networks by matrix methods**", John Wiley & Sons, Inc, 1975, cap 3.
- [5] Rao, G.G.; Murthy, K.V.S.R., "Model Validation Studies in Obtaining Q-V Characteristics of P-Q Loads in Respect of Reactive Power Management and Voltage Stability," **Power Electronics, Drives and Energy Systems**, 2006. PEDES '06. International Conference on , vol., no., pp.1,5, 12-15 Dec. 2006.
- [6] Chebbo, A.M.; Irving, M.R.; Sterling, M. J H, "Voltage collapse proximity indicator: behaviour and implications," **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, , vol.139, no.3, pp.241,252, May 1992.

- [7] Vu, K.; Begovic, M.M.; Novosel, D.; Saha, M.M., "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.14, no.3, pp.1029,1035, Aug 1999.
- [8] K. Vu, D. Julian, J. O. Gjerde, R.P. Schultz, N. Bhatt, ; B. Laios, , "Voltage Instability Predictor (VIP) and Its Applications", **Power Systems Computation Conference**, 13th, pp. 308-316, June 1999.
- [9] Corsi, S.; Taranto, G.N., "Voltage instability alarm by real-time predictive indicators," **2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting**, vol., no., pp.1,10, 22-26 July 2012.
- [10] Corsi, S.; Taranto, G.N, "A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements," **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 23, No. 3, pp. 1271-1278, 2008.
- [11] S. Corsi, G.N.Taranto,L.N.A.Guerra "New Real Time Voltage Stability Indicators Based on Phasor Measurement Unit Data", C4-109, CIGRE Conference, 2008.
- [12] Van Cutsem, T., Glavic, M.; "A short survey of methods for voltage instability detection"; Page: 1 – 8, **Power and Energy Society General Meeting**, 24-29 July 2011.
- [13] I. Smon, G. Verbic, and F. Gubina, "Local voltage-stability index using Tellegen's theorem," **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 21, no. 3, pp.1267–1275, Aug. 2006.

A

Procedimento de Obtenção dos Circuitos Equivalentes de Thévenin Sistema–Teste de 3 Barras

Neste apêndice são apresentados os procedimentos realizados para obtenção dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin visto desde a barra de carga 3, usando os métodos apresentados na Seção 6.1. São considerados os cenários de carga leve e pesada e usados os dados de barra, linha e o resultado do fluxo de potência apresentados na Seção 5.3.1.

A.1

Método 1

Baseado no Método 1 descrito na Seção 6.1.1, para encontrar a tensão de Thévenin foi executado um fluxo de potência considerando as potências ativa e reativa da barra 3 iguais a zero ($P_3=Q_3=0$) obtendo-se $V_{Thev} = V_3$ e a impedância do equivalente de Thévenin, o elemento $Z_{33}\angle\beta_3$ da matriz de impedância de barra Z_{BUS} . Isto foi realizado para os dois cenários: carga leve e pesada obtendo-se os resultados mostrados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin Usando o Método 1
Sistema–Teste de 3 Barras

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Carga Leve	0.986	-1.359	0.371	87.138
Carga Pesada	0.936	-6.599	0.371	87.138

A.2

Método 2

Da mesma maneira ao que é feito no Método 1, para encontrar a V_{Thev} é executado um fluxo de potência, considerando as potências ativa e reativa da barra 3 iguais a zero ($P_3=Q_3=0$), obtendo-se $V_{Thev} = V_3$.

A impedância Z_{Thev} é igual ao elemento $Z_{33}\angle\beta_3$ obtido da matriz Z_{BUS} , a qual é formada considerando que todas as barras são fontes de tensão constantes. Isto foi realizado para os dois cenários: carga leve e pesada obtendo-se os resultados mostrados na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 2
Sistema–Teste de 3 Barras

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Carga Leve	0.986	-1.359	0.250	87.138
Carga Pesada	0.936	-6.599	0.250	87.138

A.3 Método 3

Conhecendo-se o resultado do fluxo de potência é linearizado o ponto de operação transformando-se as injeções e extrações de potência em elementos shunts com exceção das injeções da barra *slack*, como é mostrado na Figura A.1.

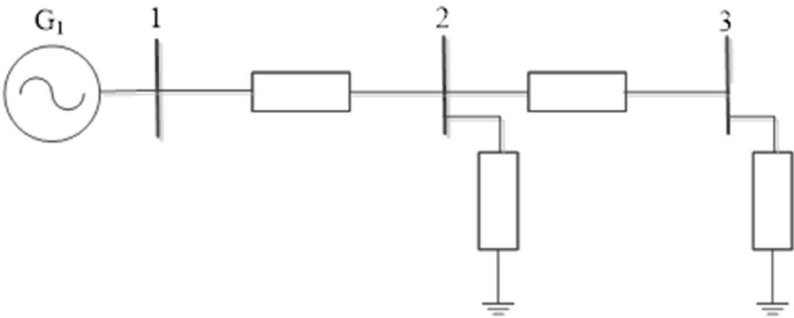


Figura A.1 Sistema–Teste de 3 Barras Ponto de Operação Linearizado

Para obter a tensão de Thévenin é executado um fluxo de potência sem considerar o elemento shunt da barra 3 e tomando a barra 2 do tipo PQ (com $P=0$ e $Q=0$). A impedância Z_{Thev} é obtida como o elemento $Z_{33}\angle\beta_3$ da matriz Z_{BUS} do sistema linearizado. Isto foi realizado para os dois cenários: carga leve e pesada obtendo-se os resultados mostrados na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 3
Sistema–Teste de 3 Barras

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Carga Leve	0.986	-1.378	0.369	86.695
Carga Pesada	0.915	-9.438	0.359	84.262

A.4 Método 4

Tomando-se o ponto de operação a ser avaliado, para simular 10 s de medições das PMU o qual equivale a tomar aproximadamente 100 fasores de tensão e corrente por segundo, foram realizadas pequenas variações sucessivas na potência da barra de 0.001% e com cada variação executado um novo fluxo de potência obtendo 1000 fasores de tensão e corrente.

Carga Leve

Considerando-se (6.6) e tomando uma janela de 1000 medições de fasores de tensão e corrente, obtém-se o seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1,r} & I_{k1,i} \\ 0 & 1 & -I_{k1,i} & -I_{k1,r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -I_{k1000,r} & I_{k1000,i} \\ 0 & 1 & -I_{k1000,i} & -I_{k1000,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k1,r} \\ V_{k1,i} \\ \vdots \\ V_{k1000,r} \\ V_{k1000,i} \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

Substituindo-se valores em (A.1):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.100 & -0.058 \\ 0 & 1 & 0.058 & -0.100 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -0.099 & -0.059 \\ 0 & 1 & 0.058 & -0.099 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.962 \\ -0.059 \\ \vdots \\ 0.962 \\ -0.059 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

A solução ao sistema matricial (A.2), da forma $Ax = B$ onde A usualmente não é quadrada, usando-se mínimos quadrados é dada por:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (A.3)$$

Considerando-se (A.2) e (A.3), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.986 \\ -0.023 \\ 0.021 \\ 0.372 \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

Substituindo-se a potência e a tensão (da Tabela 5.10) em (A.5) é encontrada a impedância da barra monitorada.

$$Z_3 = -\frac{|V_3|^2}{S_3^*} \quad (A.5)$$

$$Z_3 = -\frac{0.964^2}{0.112 \angle -26.565^\circ} = 8.314 \angle 26.565^\circ \quad (A.6)$$

Finalmente, os resultados consolidados são mostrados na Tabela A.4.

Carga Pesada

Considerando-se (A.1) e substituindo valores:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.603 & -1.221 \\ 0 & 1 & 1.221 & -0.603 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -0.606 & -1.106 \\ 0 & 1 & 1.106 & -0.606 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.445 \\ -0.321 \\ \vdots \\ 0.489 \\ -0.322 \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

Considerando-se (A.7) e (A.3), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.922 \\ -0.086 \\ 0.001 \\ 0.391 \end{bmatrix} \quad (A.8)$$

Substituindo-se a potência e a tensão (da Tabela 5.15) em (A.5) é encontrada a impedância da barra monitorada.

$$Z_3 = -\frac{0.542^2}{0.747\angle -27.937^\circ} = 0.393\angle 27.937^\circ \quad (\text{A.9})$$

Finalmente, os resultados consolidados são mostrados na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 4
Sistema–Teste de 3 Barras

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Carga Leve	0.986	-1.358	0.373	86.722
Carga Pesada	0.926	-5.334	0.390	89.930

A.5 Método 5

O algoritmo de identificação recursiva para estimação dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin apresentado na Seção 6.1.2 foi implementado na ferramenta computacional Matlab.

O valor do parâmetro k, usado pelo algoritmo, foi ajustado para 0.001.

Na Tabela A.5 são apresentados os resultados da primeira iteração e a final.

Tabela A.5 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5
Sistema–Teste de 3 Barras

Método 5						
	Iteração Inicial			Iteração Final		
	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)
Carga Leve	1.289	17.916	4.568	0.987	-1.331	0.367
Carga Pesada	0.736	-14.746	0.221	0.927	-5.267	0.392

Para uma melhor ilustração do procedimento usado no método, a seguir são mostradas a iteração 0 e 1 em carga pesada.

Tabela A.6 – Dados dos Fasores 0 e 1 – Sistema–Teste de 3 Barras – Carga Pesada

Fasor N°	V _k (pu)	Θ _{Ek} (°)	I _k (pu)	angI _k (°)	Z _k (pu)	angZ _k (°)
0	0.5424	27.9374	1.3772	0.0000	0.3939	27.9374
1	0.5428	27.9374	1.3762	0.0000	0.3945	27.9374

Usando-se os valores da Tabela A.6, (6.15) e (6.16) são encontrados os valores para E_{Thev}^{min} e E_{Thev}^{max} .

$$E_{Thev}^{min} = V_k^0 = 0.5424 \quad (A.10)$$

$$E_{Thev}^{max} = V_k^0 \sqrt{2(1 + \sin \theta_{Ek}^0)} = 0.9295 \quad (A.11)$$

Substituindo-se (A.10) e (A.11) em (6.17):

$$E_{Thev}^0 = \frac{0.5424 + 0.9295}{2} = 0.7360 \quad (A.12)$$

Com (A.12) e (6.13), obtém-se:

$$\theta_{Thev}^0 = \cos^{-1} \left(\frac{V_k^0 \cos \theta_{Ek}^0}{E_{Thev}^0} \right) = 49.3660^\circ \quad (A.13)$$

Com (A.12), (A.13), (6.18) e os valores da Tabela A.6, calcula-se o valor de X_{Thev}^0 .

$$X_{Thev}^0 = \frac{E_{Thev}^0 \sin \theta_{Thev}^0 - V_k^0 \sin \theta_{Ek}^0}{I_k^0} = 0.2211 \quad (A.14)$$

Uma vez obtidos os valores iniciais dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin começa o processo iterativo.

Tomando-se $i=1$ e seguindo o procedimento descrito na Seção 6.1.2, para calcular E_{Thev}^1 , inicialmente calcula-se:

$$(Z_k^1 - Z_k^0) = 5.9043e^{-4} \quad (A.15)$$

Sabendo que (A.15) é maior do que zero, procede-se a calcular a diferença entre X_{Thev}^{1*} e X_{Thev}^0 , para o qual inicialmente são calculados os valores de θ_{Thev}^{1*} e X_{Thev}^{1*} respectivamente.

$$\theta_{Thev}^{1*} = \cos^{-1} \left(\frac{V_k^1 \cos \theta_{Ek}^1}{E_{Thev}^0} \right) = 49.3431^\circ \quad (A.16)$$

$$X_{Thev}^{1*} = \frac{E_{Thev}^0 \sin \theta_{Thev}^{1*} - V_k^1 \sin \theta_{Ek}^1}{I_k^1} = 0.2209 \quad (A.17)$$

$$(X_{Thev}^{1*} - X_{Thev}^0) = -0.0002 \quad (A.18)$$

Baseado no procedimento da Seção 6.1.2 com (A.18) menor do que zero, tem-se:

$$E_{Thev}^1 = E_{Thev}^0 + \varepsilon_E^1 = 0.7367 \quad (A.19)$$

Onde, $\varepsilon_E^1 = \min(\varepsilon_{inf}^1, \varepsilon_{sup}^1, \varepsilon_{lim}^1)$

$$\varepsilon_{inf}^1 = |E_{Thev}^0 - V_k^1| = 0.1932 \quad (A.20)$$

$$\varepsilon_{sup}^1 = |E_{Thev}^0 - E_{Thev}^{max}| = 0.1935 \quad (A.21)$$

$$\varepsilon_{lim}^1 = |E_{Thev}^0 \times k| = 0.0007 \quad (A.22)$$

Com E_{Thev}^1 é calculado θ_{Thev}^1 com (6.13) e posteriormente, X_{Thev}^1 com (6.18).

$$\theta_{Thev}^1 = \cos^{-1} \left(\frac{V_k^1 \cos \theta_{Ek}^0}{E_{Thev}^1} \right) = 49.3947^\circ \quad (A.23)$$

$$X_{Thev}^1 = \frac{E_{Thev}^1 \sin \theta_{Thev}^1 - V_k^1 \sin \theta_{Ek}^0}{I_k^1} = 0.2216 \quad (A.24)$$

*os valores apresentados anteriormente que não tem unidade, correspondem a valores em pu.

Com a finalidade de ilustrar melhor o comportamento do método na estimação dos parâmetros do equivalente de Thévenin em cada iteração, nas Figuras A.2, A.3 e A.4 são apresentados os resultados obtidos para carga pesada.

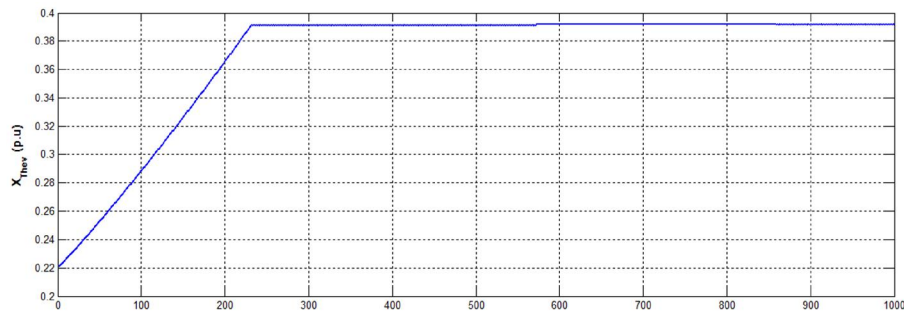


Figura A.2 Impedância de Thévenin Estimada Carga Pesada – Barra de Carga 3

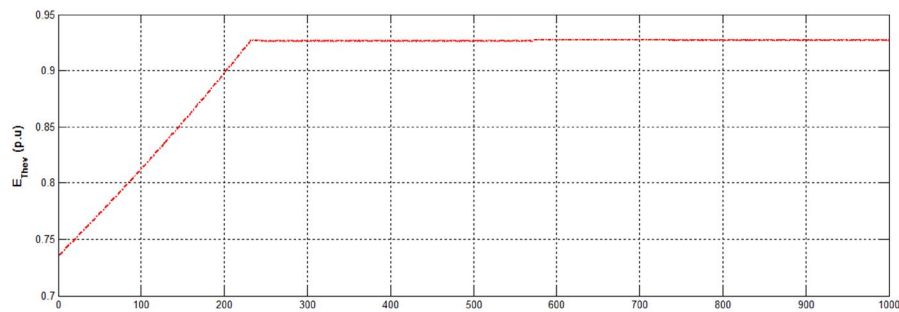


Figura A.3 Tensão de Thévenin Estimada Carga Pesada – Barra de Carga 3

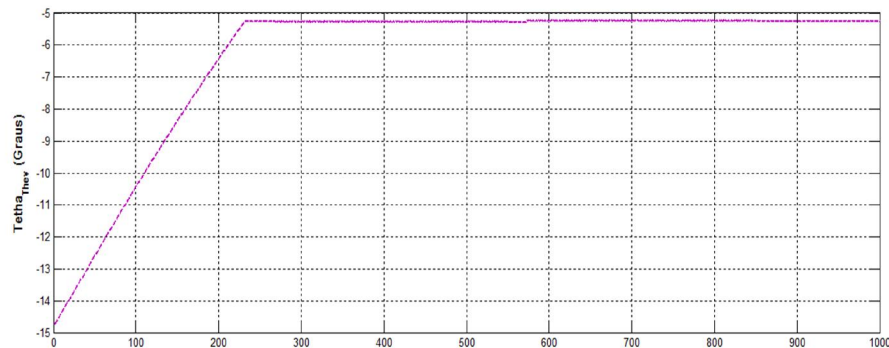


Figura A.4 Ângulo da Tensão Thévenin Estimado Carga Pesada – Barra de Carga

B

Procedimento de Obtenção dos Circuitos Equivalentes de Thévenin Sistema – Barra de Geração

A seguir é mostrado o procedimento de cálculo dos parâmetros dos equivalentes de Thévenin obtidos com os Métodos 4 e 5 para a barra de geração em um ponto de operação dado. Os dados de barra, dados de linha e resultado do fluxo de potência são mostrados nas Tabelas B.1, 6.8 e B.2.

Tabela B.1 - Dados de Barra do Sistema–Teste de 4 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga	
No.	Tipo	V (pu)	Θ (°)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	PV	1.000	0.000	141.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	82.250	11.750
4	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	82.250	11.750

Tabela B.2 – Resultado do Fluxo de Potência - Sistema–Teste de 4 Barras

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	V (pu)	Θ (°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.000	0.000	23.500	19.620	0.000	0.000
2	1.000	14.335	141.000	72.500	0.000	0.000
3	0.910	-7.426	0.000	0.000	82.250	11.750
4	0.874	-10.554	0.000	0.000	82.250	11.750

B.1

Modelagem Considerando a Barra de Geração como Barra PQ

No problema de fluxo de carga, a barra de geração sempre mantém a tensão constante. No entanto, no problema de estabilidade de tensão a tensão controlada não é considerada constante, mas variável.

Para simular estas variações de tensão, são tomados os resultados do fluxo de potência obtidos considerando-se a barra como do tipo PV, posteriormente, como este dados a barra é mudada do tipo PV para PQ e realizadas pequenas perturbações na potência de todas as barras e com cada perturbação executado um fluxo de potência para obter os fasores de tensão e corrente.

- **Método 4**

Considerando-se (A.1) e substituindo os fasores:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.517 & 0.364 \\ 0 & 1 & -0.364 & 1.517 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1.503 & 0.369 \\ 0 & 1 & -0.369 & 1.503 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.987 \\ 0.241 \\ \vdots \\ 0.996 \\ 0.238 \end{bmatrix} \quad (B.1)$$

Considerando-se (B.1) e (A.3), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.655 \\ -0.337 \\ 0.625 \\ -0.705 \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

- **Método 5**

Aplicando o procedimento do algoritmo de identificação recursiva, são estimados os parâmetros do circuito equivalente de Thévenin, os quais são apresentados na Tabela B.3 onde, são mostrados os resultados da primeira iteração e a final.

Tabela B.3 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5 – Barra de Geração como PQ -Sistema-Teste de 4 Barras

Método 5					
Iteração Inicial			Iteração Final		
Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)
1.038	42.919	0.625	1.049	43.544	0.639

B.2

Modelagem Considerando a Barra de Geração como Barra PV

São feitas variações na potência das barras e, para cada variação, executado um fluxo de potência. Os fasores de tensão e corrente são obtidos do resultado de cada fluxo de potência tomando a barra de geração como PV, isto é, não há mudanças na tensão.

- **Método 4**

Considerando-se (A.1) e substituindo os fasores:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.546 & 0.353 \\ 0 & 1 & -0.353 & 1.546 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 1.545 & 0.353 \\ 0 & 1 & -0.353 & 1.545 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.969 \\ 0.248 \\ \vdots \\ 0.969 \\ 0.247 \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

Considerando-se (B.3) e (A.3), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.064 \\ -0.003 \\ 0.169 \\ -0.985 \end{bmatrix} \quad (B.4)$$

- **Método 5**

Usando o algoritmo de identificação recursiva são obtidos os parâmetros do circuito equivalente de Thévenin os quais são apresentados na Tabela B.4, onde são mostrados os dados da primeira e última iteração.

Tabela B.4 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5 –
Barra de Geração PV - Sistema-Teste de 4 Barras

Método 5					
Iteração Inicial			Iteração Final		
Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)
1.020	-42.398	0.605	0.952	-33.815	0.503